

Thèse

Étude et modélisation des couloirs de bus dynamiques

Présentée devant

L'École Nationale des Travaux Publics de l'État

Pour obtenir

Le grade de docteur

École doctorale : Mécanique, Énergétique, Génie Civil et Acoustique (MEGA)

Spécialité : Génie Civil

Par

Xiaoyan Xie

Soutenue le 29 octobre 2013 devant la Commission d'examen

Jury :

Cécile APPERT-ROLLAND	Directrice de Recherche (CNRS)	Rapporteur
Jorge LAVAL	Professeur (Georgia Tech)	Rapporteur
Samuel SELLAM	Directeur de Recherche (IFSTTAR)	Examineur
Aurélien DURET	Docteur Ingénieur (CETE de Lyon)	Examineur
Ludovic LECLERCQ	Directeur de Recherche (IFSTTAR)	Directeur de Thèse
Nicolas CHIABAUT	ITPE-Chercheur (ENTPE)	Directeur de Thèse

Thèse

Étude et modélisation des couloirs de bus dynamiques

Présentée devant

L'École Nationale des Travaux Publics de l'État

Pour obtenir

Le grade de docteur

École doctorale : Mécanique, Énergétique, Génie Civil et Acoustique (MEGA)

Spécialité : Génie Civil

Par

Xiaoyan Xie

Soutenue le 29 octobre 2013 devant la Commission d'examen

Jury :

Cécile APPERT-ROLLAND	Directrice de Recherche (CNRS)	Rapporteur
Jorge LAVAL	Professeur (Georgia Tech)	Rapporteur
Samuel SELLAM	Directeur de Recherche (IFSTTAR)	Examineur
Aurélien DURET	Docteur Ingénieur (CETE de Lyon)	Examineur
Ludovic LECLERCQ	Directeur de Recherche (IFSTTAR)	Directeur de Thèse
Nicolas CHIABAUT	ITPE-Chercheur (ENTPE)	Directeur de Thèse

Remerciements

Je tiens en premier lieu à remercier le Professeur Nour-Eddin EL FAOUZI, directeur du Laboratoire d'Ingénierie Circulation Transports (LICIT), unité mixte de l'IFSTTAR et de l'ENTPE, qui m'a accueilli dans son laboratoire de recherche afin de réaliser ma thèse.

J'exprime toute ma gratitude au chercheur Nicolas CHIABAUT et au professeur Ludovic LECLERCQ, qui ont encadré mes travaux durant ces trois années. Je leur suis reconnaissant pour la confiance qu'ils ont su m'accorder, pour le partage des connaissances dont ils m'ont toujours fait profiter, pour leurs disponibilités et leurs gentillesse. Ses qualités scientifiques et humaines ont été un soutien important pour mes travaux.

Je remercie sincèrement Monsieur Jorge A. LAVAL, professeur à Georgia Institute of Technology USA, d'avoir accepté de juger ce travail au titre de rapporteur avec beaucoup d'intérêts.

Je remercie également chaleureusement Madame Cécile APPERT-ROLLAD, directrice de recherche de CNRS (Centre National de Recherche Scientifique) à l'Université Paris-Sud (Paris 11), qui a mis ses compétences et sa disponibilité au service de l'évaluation de ce mémoire de thèse au titre de rapporteur.

Je suis également très honoré de la présence dans ce jury de Monsieur Samuel SELLAM, et de Monsieur Aurélien DURET qui m'ont fait le plaisir d'accepter d'être les examinateurs de ce travail.

J'adresse mes plus vifs remerciements à mes collègues du laboratoire avec lesquels j'ai passé ces années pour les échanges scientifiques et humains. En tout premier lieu, je remercie Thomas COURBON pour les discussions scientifiques qu'on a effectuées ensemble et Cécile BECARIE pour ta disponibilité au cours de mes études en simulation. J'adresse des remerciements particuliers à Sonia CENILLE pour son soutien logistique et administratif durant la thèse. Je remercie également Anne-Christine DEMANNY, Florian MARZAK et Etienne HANS qui m'ont beaucoup aidé à relire mes manuscrits de mémoire et de rapport. Je ne saurais oublier tous ceux qui partagent le bureau T020 avec moi : Tamara VIEIRA DA

ROCHA, bien sûr, pour ta sympathie et ta compagnie depuis trois années ; et puis récemment Daniel VILLEGAS qui m'a aidé dans mon travail. Christine BUISSON, merci pour ta gentillesse durant ces trois ans. Je tiens également à saluer tous mes autres collègues du laboratoire avec lequel j'ai vécu ces années de thèse dans les meilleures conditions possibles.

Enfin, je ne saurais terminer ces remerciements sans parler de ma famille qui m'ont accompagné durant ces années de thèse.

Résumé

En milieu urbain, le trafic routier a un impact considérable sur la qualité des systèmes de transports, et en particulier, sur les transports collectifs de surface. Ainsi, les bus sont directement ralentis par les files d'attente et les congestions. Ils sont donc considérés comme moins ponctuels que les autres modes de transports. La conséquence directe est de renforcer la compétitivité du véhicule particulier par rapport aux transports en commun (TC). Même si les couloirs de bus ou les sites propres permettent de limiter les effets de la circulation, il en résulte potentiellement une utilisation inefficace de l'espace urbain pour les autres véhicules. Il est donc nécessaire d'avoir recours à des techniques innovantes de gestion du trafic pour améliorer la qualité du réseau TC.

Dans cette perspective, la thèse étudie le concept de couloirs de bus dynamiques. Cette stratégie de gestion dynamique de la voirie consiste à réserver une voie au bus, lorsqu'un bus est effectivement présent. Un couloir de bus temporaire est alors créé et la compétitivité des bus vis-à-vis des autres véhicules se voit renforcée. Après un état de l'art des solutions de gestion dynamique de la voirie, ce nouveau dispositif est étudié et modélisé.

Tout d'abord, la phase de déclenchement du système de couloirs de bus dynamiques est abordée. Il s'agit de déterminer analytiquement les effets sur la performance d'un boulevard urbain théorique. Il s'avère que même si la phase de déclenchement est contreproductive dans un premier temps en baissant de la capacité et augmentation des temps de parcours des véhicules. Ce coût est rapidement comblé par les bénéfices obtenus en aval de la zone de déclenchement lorsque le bus peut éviter les files d'attentes aux prochains feux de circulation. Cette étude analytique est ensuite renforcée par l'utilisation de la micro-simulation du trafic, qui donne accès à une représentation plus détaillée des phénomènes physiques du trafic urbain.

Dans un second temps, un modèle agrégé et simple du fonctionnement d'un boulevard urbain multimodal est proposé. En s'appuyant sur les travaux existants concernant le diagramme fondamental macroscopique, ce modèle permet de comparer différents aménagements (un couloir de bus dynamique et un couloir de bus permanent) avec la situation où rien n'est fait pour les bus. Les résultats obtenus permettent de déterminer les différents domaines d'application de ces aménagements en fonction des conditions de trafic.

Table des matières

Remerciements	i
Introduction	1
1 État de l'art des expérimentations de gestion dynamique des voies	5
1.1 État de l'art des solutions de gestion dynamique des voies.....	5
1.1.1 État de l'art des expérimentations de GDV	6
1.2 Couloirs de bus dynamiques.....	13
1.2.1 Priorité dynamique des bus aux intersections.....	13
1.2.2 Gestion dynamique de la voirie en faveur des bus	14
1.3 Conclusion.....	19
2 Étude du déclenchement des couloirs de bus dynamiques	21
2.1 Introduction.....	21
2.2 Étude analytique	24
2.2.1 Diagramme espace-temps	25
2.2.2 Modélisation de la chute de capacité	30
2.2.3 Évaluation de l'impact du déclenchement.....	30
2.3 Étude en simulation	33
2.3.1 Outil de simulation.....	33
2.3.2 Cas d'étude	34
2.3.3 Validation du modèle macroscopique.....	36
2.3.4 Analyse de sensibilité locale.....	37
2.4 Analyse de sensibilité globale	43
2.4.1 Méthodologie de GSA par un méta-modèle	45
2.4.2 GSA du déclenchement du couloir de bus dynamique.....	53
2.5 Conclusion	63
3 Évaluation macroscopique d'un boulevard multimodal urbain.....	65
3.1 Introduction.....	65
3.2 Modèle agrégé et simple d'un corridor urbain	66
3.3 Outils méthodologiques	68

3.3.1	Théorie du MB	68
3.3.2	Liens entre MB et BLIP	71
3.3.3	MFD	72
3.4	Deux nouvelles méthodes	74
3.4.1	Méthode M1	74
3.4.2	Méthode M2	78
3.4.3	Synthèse	81
3.5	Principaux résultats	82
3.5.1	Comparaison des méthodes	82
3.5.2	Comparaison des aménagements	87
3.6	Conclusion	95
	Synthèse et perspectives	97
	Résultats obtenus	97
	Perspectives	99
	Bibliographie	101
	Annexes	109
	Annexe 1	111
	Annexe 2	135
	Annexe 3	151
	Annexe 4	163

Table des figures

Figure 1. 1 : Dispositifs de signalisation et de détection du trafic	9
Figure 1. 2 : Processus du fonctionnement de l'IBL entre carrefours à feux.....	15
Figure 1. 3 : Processus du fonctionnement de la stratégie de BLIP « classique ».....	17
Figure 1. 4 : Processus du fonctionnement de la stratégie de BLIP « libérale ».....	18
Figure 2. 1 : Site théorique de l'étude du déclenchement à l'aide d'un capteur et des feux de circulation.....	22
Figure 2. 2 : Diagramme fondamental du site et principaux états d'équilibre.....	24
Figure 2. 3 : Diagramme espace-temps analytique pour un cycle de feu.....	25
Figure 2. 4 : Diagrammes espace-temps pour les cas (i), (ii) et (iii).....	27
Figure 2. 5 : Diagrammes espace-temps pour les cas (iv) et (v).....	28
Figure 2. 6 : Diagrammes espace-temps pour les cas (vi) et (vii).....	29
Figure 2. 7 : (a) évolution des temps de parcours (b) analyse du débit observé et (c) bénéfice par rapport à une solution permanente.	31
Figure 2. 8 : Gain sur le temps de parcours du bus	32
Figure 2. 9 : Deux scénarios étudiés : cas i, le cas de deux voies, (a1) schéma et (a2) SymuVia affichage ; et cas ii, le cas de trois voies, (b1) schéma et (b2) SymuVia affichage.	35
Figure 2. 10 : Comparaison entre l'étude analytique et la simulation.....	36
Figure 2. 11 : Influence de l'accélération.	40
Figure 2. 12 : Influence du coefficient de relaxation.	41
Figure 2. 13: Influence de la longueur de la voie d'insertion du déclenchement de BLIP.	42
Figure 2. 14 : Processus de GSA par Méta-modèle.	50

Figure 2. 15 : 2^9 échantillons de paramètres de la séquence quasi-aléatoire de Sobol.	55
Figure 2. 16 : Validation de la prédiction du méta-modèle du déclenchement du couloir de bus dynamique.	57
Figure 2. 17 : Prédiction du méta-modèle pour l'étude de sensibilité globale.	58
Figure 2. 18 : Évolutions des indices de sensibilités en fonctions du nombre de Monte-Carlo.	59
Figure 2. 19 : Indices de sensibilités et Intervalles de confiances.	60
Figure 3. 1 : (a) Représentation du MB sur un DF triangulaire (b) solution pour un cas simple dans le diagramme espace-temps.	69
Figure 3. 2 : (a) Approximation des trajectoires (b) calcul de la solution.	70
Figure 3. 3 : (a) Solutions en courbes de véhicules cumulés, (b) évolution du retard en fonction du nombre de sections réservées au couloir de bus dynamique et (c) occupation du bus pour compenser le retard en fonction du nombre de section réservées au couloir de bus dynamique.	71
Figure 3. 4 : Exemple des situations reproduites par le MFD.	73
Figure 3. 5 : Méthode direct d'estimation des MFD par la théorie variationnelle : (a) sans bus et (b) avec bus.	76
Figure 3. 6 : Application de la théorie du MB sur le MFD.	78
Figure 3. 7 : (a) Diagramme espace temps et (b) Point de fonctionnement.	79
Figure 3. 8 : Diagrammes espace-temps pour une succession de bus : (a) faible fréquence (cas 2i) et (b) forte fréquence (cas2ii).	80
Figure 3. 9 : Courbes vitesses débits pour les méthodes (a) M1, (b) M2 et (c) M3.	84
Figure 3. 10 : Comparaison des différentes méthodes pour plusieurs fréquence : (a) 3 mn, (b) 6 mn, (c) 12 mn, (d) 30 mn et (e) Différence.	85
Figure 3. 11 : Comparaison avec les abaques du HCM 2010 (a) courbe débit-vitesse et (b) niveaux de service.	86
Figure 3. 12 : p-MFD pour (a) MFD triangulaire et (b) MFD quelqconque.	89

Figure 3. 13 : p-MFD pour différentes valeurs de fréquence de bus pour la solution S1	90
Figure 3. 14 : p-MFD pour différentes valeurs de fréquence de bus pour la solution S2 et S3.	91
Figure 3. 15 : Comparaisons des trois solutions pour différentes fréquences de bus : (a) $h = 3$ mn, (b) $h = 6$ mn, (c) $h = 9$ mn, et (d) $h = 12$ mn.	92
Figure 3. 16 : Comparaison des trois solutions pour un cas plus réaliste.	93

Liste des tableaux

Tableau 1. 1 : Synthèse des différentes expérimentations de GDV.	10
Tableau 2. 1 : Paramètres de la route et du trafic.	35
Tableau 2. 2 : Valeurs de références des paramètres de l'étude de sensibilité locale.	39
Tableau 2. 3 : Synthèse de l'influence des différents paramètres.	43
Tableau 2. 4 : Plages des paramètres à testés dans l'étude de sensibilité globale.	54
Tableau 3. 1 : Synthèse de travaux réalisés.	81

Liste des publications

Publications dans des revues à comité de lecture :

Chiabaut, N., Xie, X. et Leclercq, L. [2013]. Performance analysis for different designs of a multimodal urban arterial. *Transportmetrica B*, soumis. *Annexe 1*.

Xie, X., Chiabaut, N. et Leclercq, L. [2013]. Macroscopic Fundamental Diagram for Urban Streets and Mixed Traffic: Cross-comparison of Estimation Methods. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, à paraître. *Annexe 2*.

Chiabaut, N., Xie, X., Leclercq, L. [2012]. Road capacity and travel times with Bus Lanes and Intermittent Priority Activation: Analytical Investigations. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2315, 1, 182-190. *Annexe 3*.

Publications dans des actes de congrès à comité de sélection et/ou lecture :

Xie, X., Chiabaut, N. et Leclercq, L. [2013]. Macroscopic Fundamental Diagram for Urban Streets and Mixed Traffic: Cross-comparison of Estimation Methods. *92nd meeting of the Transportation Research Board*, 13-17 January, Washington, D.C. Paper number 12-0560.

Xie, X., Chiabaut, N. et Leclercq, L. [2012]. Multimodal Level of Service for Urban Streets: Cross-comparison of Estimation Methods. *LATSIS 1st European Symposium on Quantitative Methods in Transportation Systems*, 4-7 September, Lausanne, Switzerland.

Xie, X., Chiabaut, N., Leclercq, L. [2012]. Improving Bus Transit in Cities with Appropriate Dynamic Lane Allocating Strategies. *Transportation Research Arena*, Athens, 23-26 April 2012. / *Procedia - Social and Behavioral Sciences, Transportation Research Arena 2012*. 48, 1472-1481. *Annexe 4*.

Chiabaut, N., Xie, X., Leclercq, L. [2012]. Road capacity and travel times with Bus Lanes and Intermittent Priority Activation: Analytical Investigations. *91st meeting of the Transportation Research Board*, 22-26 January, Washington, D.C. Paper number 12-0560.

Introduction

Contexte de la recherche

Le rapport du Grenelle Environnement a placé la problématique des transports au cœur de la politique de développement durable. En particulier, le groupe C030 « recherche » du Grenelle Environnement recommande : « la question de l'optimisation de l'usage des infrastructures de transports est centrale : la congestion conduit au gaspillage de l'énergie dans tous les modes, et ne permet pas d'utiliser les véhicules dans leurs meilleures conditions de performance énergétique ». L'optimisation de l'usage des infrastructures de transport constitue donc un enjeu important en termes énergétiques mais aussi en termes de nuisances et de coûts environnementaux. La complexité de l'optimisation est accrue par le fait qu'elle se traite sur le plan collectif (gestion du trafic) mais aussi à l'échelle individuelle (bus, véhicules propres, véhicules prioritaires, etc.).

Ces deux visions ne sont pas nécessairement cohérentes puisque la concurrence entre modes de transports pour l'utilisation de la voirie peut conduire à une sous-utilisation des réseaux de transports en commun (TC) de surface, et en particulier des bus, au profit de la voiture particulière. Lorsque les voies de circulation sont congestionnées, le temps de parcours des usagers des bus augmente et devient très incertain. La qualité du service décroît rapidement et l'utilisation de la voiture particulière devient la situation privilégiée. Ce report modal est coûteux à la collectivité en termes de nuisances environnementales mais aussi de temps total perdu en congestion. Les pouvoirs publics ont donc un intérêt accru à limiter les retards subis par les bus.

Ces retards sont en grande majorité générés par la congestion qui réduit l'écoulement du trafic routier. La congestion se situe à différents endroits de l'infrastructure : sur les tronçons ou au niveau des intersections. La première source de congestion correspond à une demande en véhicules supérieure à la capacité offerte par la voirie. La seconde source de congestion est directement liée au fonctionnement des feux de circulation (alternance de phase de vert et de rouge).

Afin de réduire les retards générés par la congestion, des stratégies ont déjà été mises en place. Une première solution, largement répandue, est la création de couloirs de bus et de sites propres. Il s'agit donc de dédier une partie de l'infrastructure à l'usage exclusif des bus. De ce fait, ils ne subissent plus la congestion routière. Cependant, la topologie des sites, en

particulier en milieu urbain, ne rend pas toujours possible la réalisation d'un couloir de bus ou d'un site propre (géométrie du site, fréquence des passages de bus, etc.). Une seconde solution est la gestion dynamique des priorités aux feux de signalisation. Il s'agit d'écourter les phases de rouge ou d'allonger les phases de vert afin que les bus n'aient pas à s'arrêter. Cette solution simple peut s'avérer très contre-productive sur les mouvements antagonistes.

Le défaut des stratégies existantes repose donc dans une préemption d'une partie de la capacité de voirie (perte d'une voie de circulation ou allongement de la phase de rouge). Une nouvelle solution pourrait donc consister à gérer dynamiquement les dispositifs de régulation et en particulier les couloirs de bus. Dans cette perspective, il est envisageable d'allouer temporairement les voies de circulation à l'usage des bus lorsqu'ils sont réellement présents sur le site. La création de ces couloirs de bus temporaires permet de ne réduire la capacité disponible aux véhicules particuliers que pour les périodes réellement intéressantes.

Concernant les expérimentations, peu de réalisations existent en matière d'allocation dynamique des voies de bus. Il est cependant possible de citer l'expérience réalisée à Lisbonne [Viegas et al., 2007]. Les résultats obtenus montrent l'efficacité de ce type de système en milieu urbain pour des conditions de trafic particulières, cette expérimentation étant un prototype sur une zone dédiée. La vitesse des bus augmente de 25% en moyenne (jusqu'à 50% en heure de pointe) sans pour autant impacter le fonctionnement du reste de l'infrastructure.

Concernant la modélisation, les initiatives sont rares. Les travaux réalisés jusqu'à présent concernent uniquement la modélisation macroscopique de voies dédiées temporairement à un trafic particulier [Eichler et Daganzo, 2006]. Cette modélisation ne prend donc pas en compte les spécificités du milieu urbain (feux de circulations, intersections, tourne-à-gauche, etc.) ou la complexité du trafic routier à l'échelle microscopique (changements de voies, comportements de conduites hétérogènes, etc.). Par ailleurs, la phase de déclenchement, pourtant cruciale dans l'efficacité du système, n'est jamais étudiée.

De manière plus générale, l'allocation dynamique des voies de circulation et des intersections en faveur d'une classe de véhicules particulière est un outil novateur et potentiellement performant pour gérer l'écoulement du trafic. Il y a donc un enjeu considérable à pouvoir évaluer et tester ces scénarios en amont de la mise en œuvre opérationnelle. Pour l'instant, l'évaluation est réalisée au coup par coup. L'efficacité du scénario n'est, quant à elle, jugée qu'après la mise en œuvre opérationnelle. Par conséquent, les projets recensés de par le monde ne présentent aucune garantie d'être transposables d'un site à l'autre.

L'objectif du sujet de thèse est d'étudier en modélisation la mise en place, en milieu urbain, de dispositifs dynamiques de gestion du trafic en faveur d'une classe de véhicules

jugés prioritaires (bus, véhicules d'urgence, de livraison, etc.). Il s'agit de proposer un ou des modèles agrégés d'écoulement du trafic permettant de comparer les différents aménagements possibles d'une infrastructure parcourue par un trafic multimodal. Pour ce faire, nous allons nous appuyer sur les éléments existants de la théorie du trafic. Ils vont permettre de reproduire à la fois l'influence des bus en mouvement sur le flux de véhicules mais aussi et surtout l'impact des couloirs de bus dynamiques. Ainsi, les couloirs de bus dynamiques pourront être confrontés à des solutions plus classiques comme la création d'un couloir de bus permanent ou laisser le bus dans le trafic. De la sorte, les résultats de la thèse permettront d'établir un premier diagnostic sur l'aménagement d'un boulevard urbain.

Plan du mémoire

Les travaux de thèse s'articulent autour de trois chapitres.

Le chapitre 1 dresse un état de l'art des connaissances concernant l'allocation dynamique des voies de circulation. Il s'agit donc de recenser les différentes expérimentations réalisées de par le monde et de faire le point sur les enjeux particuliers liés à ce type de stratégies d'exploitation. L'objectif final est de pouvoir identifier les caractéristiques des sites susceptibles de recevoir l'implémentation d'un couloir de bus dynamique.

Le chapitre 2 s'intéresse à la phase de déclenchement du système de couloirs de bus dynamiques. Dans un premier temps, il s'agit d'aborder analytiquement ce problème à l'aide des éléments existants de la théorie du trafic. Ainsi, plusieurs modélisations, de la plus grossière à la plus détaillée, peuvent être envisagées. Les résultats obtenus permettent de rendre un premier diagnostic sur la longueur minimale du site à équiper. Dans un second temps, le problème du déclenchement est abordé par la simulation. Cette approche permet de représenter l'écoulement du trafic de manière très précise. Il faut noter que les résultats analytiques fournissent la tendance à suivre par le simulateur. Enfin, cela permet de réaliser une étude de sensibilité, locale puis globale, des couloirs de bus dynamiques aux différents paramètres de la simulation de trafic mais aussi et surtout aux paramètres de déclenchement.

Le chapitre 3 est consacré à l'écoulement du trafic sur un boulevard multimodal, i.e. boulevard parcouru par des bus et des véhicules particuliers, soumis à un couloir de bus dynamique. Dans un premier temps, il s'agit de déterminer un modèle agrégé permettant de reproduire facilement l'influence du couloir de bus dynamique mais aussi la situation où le bus est laissé dans le trafic. Pour ce faire, le diagramme fondamental de zone est utilisé et la thèse propose donc une nouvelle méthode d'estimation dans le cas multimodal. Dans un

second temps, cette méthode est utilisée pour comparer les différentes solutions. La notion de diagramme fondamental de zone est étendue pour prendre en compte le nombre de passagers présents dans les différents modes. Enfin, des premières préconisations sur l'aménagement d'un site théorique peuvent être proposées.

Chapitre 1

État de l'art des expérimentations de gestion dynamique des voies

L'objectif de ce premier chapitre de la thèse est de réaliser un état de l'art des expérimentations de gestion dynamique de la voirie. Ce recensement des initiatives de par le monde dans la première partie permet de dresser un premier constat sur les sites potentiellement candidats à recevoir un dispositif de couloir de bus dynamique. La seconde partie de ce chapitre est donc naturellement centrée sur les solutions en faveur des bus. Après une synthèse des applications opérationnelles, la fin de ce premier chapitre est consacrée à la présentation des quelques travaux analytiques traitant du sujet des couloirs de bus dynamiques.

1.1 État de l'art des solutions de gestion dynamique des voies

En ville, les bus sont souvent considérés comme moins fiables que les autres modes de TC car ils peuvent subir les effets de la congestion. Comme expliqué précédemment, ces effets conduisent à une augmentation des temps de parcours des bus mais aussi une incertitude sur les instants de passage aux arrêts. Ces deux conséquences sont particulièrement néfastes pour l'efficacité du système de transport en commun. L'objectif général du travail de thèse est de proposer une solution pour limiter ce problème en créant dynamiquement des couloirs de bus temporaires. Ce procédé innovant et très peu expérimenté de par le monde repose cependant sur une technique plus connue qui est l'allocation dynamique des voies de circulation.

L'allocation dynamique de voirie (également appelée Gestion Dynamique de Voirie ou

GDV par certains auteurs) a été mise en œuvre depuis plusieurs décennies dans de nombreux pays, principalement lors de chantiers, pour augmenter la capacité des réseaux routiers ou maîtriser la congestion. Le caractère « dynamique » de ces dispositifs est cependant limité. En effet, dans ces cas, l'allocation de voirie est déclenchée sur un périmètre fixe, à un instant déterminé à l'avance, pour une durée définie à l'avance, de plusieurs heures voire jours ou pour tous les véhicules.

Plus récemment, des dispositifs d'utilisation variable des voies ont été étudiés, testés et parfois maintenus en service, avec une dynamique accrue. On parle généralement de GDV en français, et d'ATM (Advanced Traffic Management ou Active Traffic Management : ATM) en anglais. Il s'agit alors d'affectation variable de la chaussée dans le temps, à différents usages ou catégories d'utilisateurs. Le besoin n'est plus lié à des travaux d'aménagement mais au fait que les congestions deviennent de plus en plus fréquentes et importantes, dans un espace public circulaire qui n'est plus extensible.

L'essor de ces dispositifs est intimement lié aux progrès technologiques de ces dernières décennies. En effet, le système de GDV doit être en mesure de diffuser des informations variables et dynamiques aux usagers de la route pour que les consignes soient comprises et respectées. La technologie utilisée est à la fois dépendante de la solution mise en œuvre, de la typologie du site contrôlé mais aussi de la classe de véhicules favorisés. Il se trouve que les systèmes technologiques sont différents lorsque la GDV s'applique pour une flotte bien identifiée comme les transports en commun.

1.1.1 État de l'art des expérimentations de GDV

L'affectation dynamique des voies consiste à allouer une partie de la voirie lors de certaines périodes pour tous les usagers ou pour une certaine catégorie seulement. La GDV a pour objectif de diminuer la congestion sur les infrastructures routières existantes et/ou d'améliorer le transport de certaines catégories d'utilisateur [Nouvier, 2004], en particulier les usagers des transports en commun et ceux pratiquant le covoiturage. Les moyens utilisés pour atteindre ces objectifs ne font pas recours à la construction de nouvelles infrastructures mais visent l'optimisation de l'utilisation des infrastructures routières existantes par des mesures d'exploitation dynamique.

1.1.1.a Historique

La gestion dynamique des voies, n'est pas un concept nouveau. En France, dès le début des années 60, on trouve des panneaux de signalisation pliants, sur lesquels l'indication portée (par exemple, sens unique/double sens) est modifiable manuellement (en pliant et dépliant le

panneau). Même si on peut parler de gestion dynamique, le procédé reste assez rudimentaire, nécessite une action manuelle, et surtout le caractère dynamique (variable dans le temps) reste très limité. À la fin des années 60 apparaissent les premières croix rouges et flèches vertes (Tunnel de Saint-Cloud à Paris, accès aux sites des JO de Grenoble).

1.1.1.b Différentes caractéristiques de l'affectation dynamique

En ne considérant que l'affectation dynamique des voies, on peut distinguer les voies réversibles des voies de circulation supplémentaires. Bien sûr, on peut aussi dire qu'une voie réversible ajoute à un sens puis à l'autre une voie de circulation supplémentaire.

Les usagers concernés par ces types d'affectation dynamique diffèrent eux aussi selon l'objectif visé par le système. Si l'objectif est de réduire la congestion en général, alors que le type d'affectation concernera l'ensemble des usagers. En revanche, s'il s'agit de rendre certains modes de déplacement plus attractifs, alors le type d'affectation s'appliquera uniquement à la catégorie d'usage seulement (transports en commun, covoiturage...).

L'aspect dynamique varie beaucoup selon les différents systèmes. L'affectation variable peut être prédéfinie sur certaines plages de temps (voie réservée à certains véhicules à Londres en semaine de 16h à 19h, voie de bus réversible à Lyon dans un sens jusqu'à 13h, dans l'autre à partir de 14h, etc.), ou faire l'objet d'une activation en quasi temps réel en fonction de certains paramètres (vitesse sur la section pour la voie spécialisée partagée (VSP) près de Grenoble par exemple).

1.1.1.c Technologies à disposition

Avec la gestion dynamique des voies, le statut des voies change au cours du temps, des dispositifs technologiques de signalisation, éventuellement de séparation physique et de détection doivent être mis en place. Ces dispositifs doivent permettre la lisibilité pour les usagers concernés et assurer leur sécurité.

Signalisation

Une signalisation statique peut être suffisante dans certains cas : par exemple, pour les voies de bus temporaires à Londres, comme la période d'activation est fixe et prédéfinie, un affichage statique peut suffire ; d'autant plus que le dispositif n'entrave pas à la sécurité. Mais, dans la plupart des cas, la signalisation dynamique est nécessaire. Un affichage dynamique vertical est très souvent utilisé : la signalisation directionnelle variable sur les

panneaux des portiques à l'aide de prismes (la voie rapide urbaine (VRU) Chambéry vers A41 et A43), panneaux à message variable (PMV) lumineux (croix rouges/flèches vertes, vitesse autorisée...).

Plus récemment des marquages au sol dynamiques ont fait leur apparition : les plots lumineux utilisant des diodes lumineuses ou les barrettes de fibre optique peuvent être intégrés dans la chaussée afin de faire varier la signalisation horizontale [Certu, 2009]. Aux Pays-Bas ce type de marquage est étudié afin d'augmenter le nombre de voies disponibles en diminuant la largeur des voies et sans toucher à la bande d'arrêt d'urgence (BAU). Toujours aux Pays-Bas, l'inscription « BUS » peut être affichée dans une voie afin de changer son statut en voie de bus.

Séparation physique

Des dispositifs techniques permettent parfois d'ouvrir/fermer ou de séparer la voie spéciale. Sur la voie de bus réversible à Lyon (montée des soldats), la voie est surélevée (dispositif statique permettant de la distinguer). En plus de cela, à l'entrée et à la sortie de la voie sont disposées des barrières automatiques.

Différents types de séparateurs physiques peuvent être mis en place selon le besoin. Certains sont rudimentaires: les plots ou les délinéateurs placés manuellement (Golden Gate Bridge, San Francisco), d'autres sont contrôlés automatiquement (séparateurs translatables, glissière mobile...).

Recueil de données

En gestion dynamique du trafic les dispositifs de détection sont souvent indispensables au déclenchement. Ces dispositifs détectent principalement l'état du trafic (vitesse, taux d'occupation), le plus souvent grâce à des boucles de détection dans la chaussée, ou grâce à des caméras (cas de l'A48 près de Grenoble).

En plus des équipements permettant de connaître l'état du trafic, pour certains systèmes de GDV, il est nécessaire de géo-localiser les véhicules spécifiques devant en bénéficier. Par exemple, à Lisbonne, l'activation de la voie de bus intermittente est en fonction non seulement de l'état du trafic, mais aussi de la localisation du bus (Figure 1. 1).

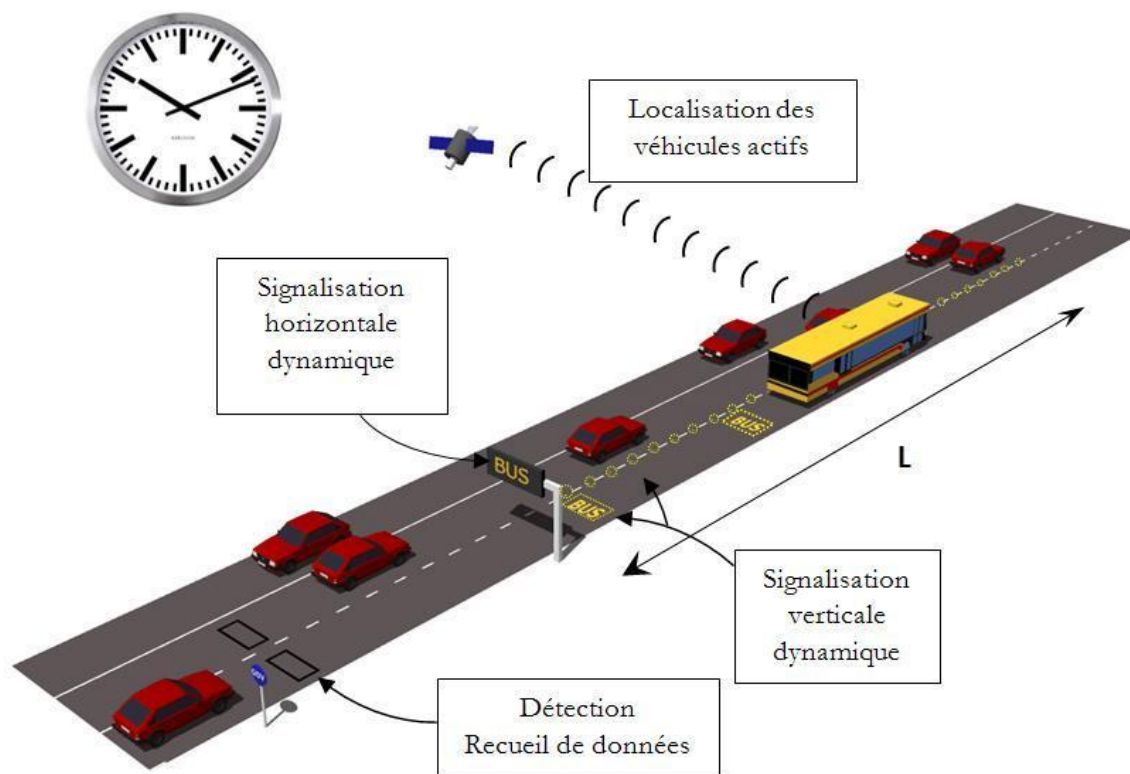


Figure 1. 1 : Dispositifs de signalisation et de détection du trafic.

Le Tableau 1. 1 présente les différentes stratégies d'affectation dynamique des voies par quelques exemples illustratifs. On a précisé les différentes caractéristiques soulevées plus haut : type d'affectation, véhicules concernés, technologies utilisées, etc. [SIRI, 2010].

1.1.1.d Objectif et enjeux

Comme il a été souligné plus haut, l'objectif de la GDV est d'optimiser l'utilisation des infrastructures routières en vue de diminuer la congestion et/ou d'améliorer la qualité de service des transports en commun ou du covoiturage. Le moyen retenu est de créer un espace modulable selon les besoins avec les infrastructures existantes en termes d'espace, de périodes, de vitesses, et même parfois de tarifs. En effet, si l'on regarde la congestion, on se rend bien compte qu'elle est généralement localisée dans l'espace et dans le temps. Par exemple en milieu urbain, elle concerne souvent seulement quelques heures par jour ouvrable, et quelques jours par an en interurbain [Nouvier, 2004].

Tableau 1. 1 : Synthèse des différentes expérimentations de GDV.

	Type d'application		Véhicules concernés	Péage	Dimensions du dispositif	Période d'activation		Dispositifs techniques
	Voie(s) réversible(s)	Variation nombre voies				Périodes prédéfinies	En temps réel	
Exploitation sous chantier	X	X	Tous/Engins de chantier	Non	Longueur des travaux	Sur la durée des travaux		Marquage temporaire, plots
Voies réversibles (ex : tunnel de St-Cloud à Paris, autopont de Vienne...)	X		Tous	Non		En fonction des charges de trafic, HPM (heure de point du matin) et HPS (heure de point du soir)		Signaux d'affectation des voies, ou séparateur transposable (Gennevilliers)
Voies réversibles Etats Unis (Washington, San Francisco...)	X		Tous	Non	1 à quelques dizaines de miles	HPM et HPS		Glissière mobile, délinéateurs placés manuellement (Golden Gate Bridge)
Voie auxiliaire RD 6202 Alpes Maritimes en mode d'exploitation « retour de week-end »		X	Tous	Non	Dizaine de km			
Ouverture d'une voie auxiliaire (A4 et A86)		X (+1)	Tous	Non	2200m sur la BAU	Pendant l'HPM dans le sens Paris, et l'HPS dans le sens province, si TO (Taux d'Occupation) > 20%		Signalisation verticale dynamique, traitement chaussée particulier (couleur enrobé, marquage au sol), Glissières mobiles de sécurité
Ouverture d'une voie auxiliaire pour les sorties (Göttingen et Holdorf, Allemagne)		X (voie de sortie)	Tous	Non	1km sur la BAU		En congestion (utilisation de la BAU en amont de la sortie)	

HOV/HOT Lane (High Occupancy Vehicles/Tolling)	Parfois (15)	X (voies spécialisées)	Véhicules à haut taux d'occupation/ payant un péage	Oui pour les HOT		Possible (pendant les heures de pointe)		Parfois séparateurs physiques, signalisation horizontale (losanges blancs) tous les 200-300m
Voie de bus réversible (de la montée des soldats à Lyon)	X		Bus	Non	800m	Le matin (jusqu'à 13h) à la descente, l'après-midi (à partir de 14h) à la montée		Voie physiquement surélevée. Barrière automatique et feux déclenchés par des boucles
Ouverture d'une voie spéciale partagée (A48)		X (+1)	Autocars RER (réseau express régional), véhicules d'urgence, d'intervention et de secours	Non	1100m (puis +4200m) sur la BAU/BDD	Activation quand $V_{A48} < 50\text{km/h}$		Panneaux à prismes, PVM, caméra de comptage de trafic et DAI, feux rouges, système de contrôle d'accès de la bretelle
Voie de bus non permanente La Haye, Pays-Bas		(pour le trafic général)	Bus/trafic général	Non		Certaines heures de la journée quand il y a congestion		Inscription du mot BUS grâce à des diodes lumineuses dans la chaussée sur la voie
Voie de bus non permanente Londres		X	Bus, cycles, motos, taxi/trafic général	Non		Certaines heures de la journée (par ex : Mon-Fri 4-7pm)		Signalisation verticale statique
Voie de tram réservée par intermittence "Dynamic Fairway"		X	Tram/trafic général	Non	2km	Aux heures de pointe dans le sens de circulation le plus congestionné à la détection de l'arrivée d'un tram		PMV et plots lumineux incrustés dans la chaussée
Voie de bus intermittente Lisbonne, Portugal		X (pour le trafic général)	Bus/trafic général	Non	600m		Localisation des bus et état du trafic	PMV, diodes clignotantes au sol

Cependant la recherche du caractère modulable pose la question de la sécurité. Jusqu'où peut-on aller en voulant améliorer l'efficacité sans compromettre la sécurité ? La question se pose tout particulièrement pour les voies réversibles, l'utilisation de la BAU, et la réduction de la largeur des voies. La stratégie d'exploitation (par exemple, l'interdiction de la circulation sur la voie de bus réversible à Lyon pendant une heure pour le battement), et la signalisation (PMV adaptés, marquage au sol dynamique, etc.) jouent un rôle important pour la sécurité. Cette sécurité passe beaucoup par la lisibilité du dispositif pour les utilisateurs, et c'est un aspect qui conditionne grandement la réussite d'un système de gestion dynamique. Cette bonne compréhension ne passe pas uniquement par des moyens techniques, mais aussi par une bonne communication vers les personnes concernées, voire même une formation quand cela est possible (formation des conducteurs d'autocar pour la VSP vers Grenoble) [Certu, 2009].

Les expérimentations restant encore ponctuelles, le processus d'évaluation des dispositifs est nécessaire. Celui-ci doit dans l'idéal, être réalisé en amont, mais également pendant l'expérimentation afin d'avoir un retour d'expérience. Il peut permettre d'évaluer un certain nombre de points [Certu, 2009] : le bon fonctionnement du matériel, le comportement des usagers, la congestion, l'efficacité globale du système de transport (nombre de personnes transportées), la sécurité, l'environnement, le fonctionnement du dispositif (trafic écoulé, vitesses...), les aspects socio-économiques...

Une des principales difficultés pour l'évaluation est la définition d'un périmètre géographique d'étude. Ce n'est pas parce que la capacité d'un tronçon est augmentée en un endroit, que le problème est réglé. S'il existe un point dur en aval de ce périmètre, alors le problème n'est probablement que déplacé. Par ailleurs, il faudrait connaître l'impact du système sur les voiries annexes : une évaluation positive sur un tronçon peut être nulle, voire négative, si l'on se place à une échelle d'évaluation plus large.

1.1.1.e Expérimentation de GDV de bus

L'état de l'art réalisé précédemment montre bien que la gestion dynamique des voies de bus est encore assez marginale. En particulier, le concept d'allocation temporaire d'une voie de trafic général à bus lors de son passage n'a été expérimenté qu'à Lisbonne avec la voie des bus intermittente (Intermittent Bus Lane : IBL). Cette expérience sera présentée plus précisément dans la sous-section suivante.

1.2 Couloirs de bus dynamiques

Cette seconde partie de ce premier chapitre est consacrée aux dispositifs de régulation du trafic en faveur des bus. Plus particulièrement, les solutions dynamiques s'articulent autour de deux catégories : la priorité dynamique des bus aux intersections à feux (Transit Signal Priority : TSP) et le couloir de bus dynamique (Intermittente Bus Lane : IBL, Bus Lane with Intermittent Priority : BLIP).

1.2.1 Priorité dynamique des bus aux intersections à feux

La priorité dynamique des bus aux intersections à feux pour les bus est un terme général pour un ensemble d'améliorations opérationnelles. Elles utilisent la technologie pour réduire les temps d'arrêt des bus aux feux en prolongeant la phase verte du feu (appelé le prolongement vert) ou en réduisant la phase rouge du feu (appelé la troncature rouge). Ce système peut être mis en œuvre au niveau des intersections seules, des corridors urbains ou d'un réseau des rues. Les systèmes de TSP se composent de quatre éléments : un système de détection au bord des bus ; un générateur de demande de priorité qui peut être soit au bord du véhicule soit à l'emplacement de la gestion centralisée ; une stratégie pour les demandes de priorité et un système global de la gestion de TSP [Harriet et al., 2005].

Les systèmes de TSP se distinguent au sein de deux grandes catégories, (i) le TSP centralisé et (ii) le TSP distribué [Li et al., 2008].

(i) TSP centralisé

Dans le système de TSP centralisé, un système central organise et gère les demandes de priorité. Ce type de système est mieux adapté pour les gestionnaires qui contrôlent à la fois le système de feux et le système de bus, car ces deux systèmes peuvent communiquer entre eux.

(ii) TSP distribué

Dans le système de TSP distribué, la différence principale par rapport au TSP centralisé réside dans le fait que toutes les décisions prioritaires sont prises au niveau de l'intersection. Les bus remettent les demandes de priorité chaque fois qu'ils s'approchent d'une intersection. Cette méthode nécessite moins de communication entre le centre de la gestion du feu et le centre de la gestion du bus.

Par conséquent, le système de TSP distribué demande moins de gestion, mais la décision de la priorité peut être moins variée. En effet, la possibilité d'accorder la priorité aux bus est

liée à l'heure de détection du bus à l'intersection.

Les détecteurs fixes pour déclencher la priorité du bus sont à la base de nombreuses implémentations de TSP. Cela fonctionne bien pour les bus approchant un feu vert qui est en train de changer. Cependant, si la file d'attente empêche le bus d'atteindre les détecteurs fixes, ceux-ci causent des problèmes pour la demande de la priorité par la troncature rouge [Balk et al., 2000]. Pour pallier ce problème, certaines implémentations de TSP utilisent des technologies de communication sans fil qui ne reposent pas sur des détecteurs fixes. Ces systèmes de TSP sans fil compatibles fournissent souvent des algorithmes « de priorités intelligents » qui peuvent prédire les heures d'arrivée des bus aux intersections sans détection à proximité de l'intersection [Balk, 1999; Balk et al., 2000].

En résumé, le système de TSP permet de réduire le temps de parcours de bus, d'améliorer l'efficacité des bus, d'améliorer le respect des horaires et donc finalement d'augmenter l'efficacité du réseau routier [Harriet et al., 2005]. Malheureusement, les TSP perdent en efficacité lorsque le débit est élevé, parce que les signaux doivent tenir compte non seulement du bus, mais aussi du trafic.

1.2.2 Gestion dynamique de la voirie en faveur des bus

Les couloirs de bus dynamiques existants sont distingués en deux catégories, l'IBL (Intermittent Bus Lane) [Viegas, 1997] et le BLIP (Bus Lane with Inttemittent Priority) [Eichler et Daganzo, 2006]. L'IBL ouvre la voie réservée aux bus temporairement aux véhicules légers lorsque cette voie réservée n'est pas utilisée par un bus. Il empêche les véhicules légers de changer de voie vers la voie réservée au bus en aval de celui-ci, mais ne demande pas aux véhicules légers déjà sur la voie réservée en aval du bus de quitter la voie. Une interdiction de rabattement est mise en place. Au contraire, le BLIP force les véhicules légers sur la voie réservée au bus en aval du bus à changer de voie grâce à un affichage des consignes sur des panneaux à messages variables (PMV).

1.2.2.a IBL

Le concept de l'IBL est introduit initialement par [Viegas, 1997] et analysé ultérieurement par [Viegas et Lu, 1999; Viegas et Lu, 2001; Viegas et Lu, 2004; Viegas et al., 2007]. Le processus du fonctionnement de l'IBL peut être résumé par la Figure 1. 2 :

① : Activation de l'IBL, les diodes lumineuses s'allument ;

② : IBL activé, la file de véhicule se déplace créant de l'espace pour l'arrivée du bus ;

③ : IBL activé, le bus roule sur une voie dégagée ;

④ : Désactivation de l'IBL, les véhicules peuvent se rabattre sur la voie.

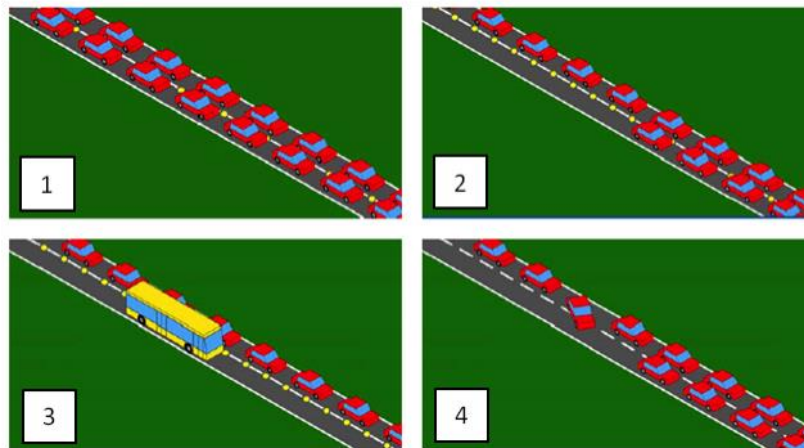


Figure 1. 2 : Processus du fonctionnement de l'IBL entre carrefours à feux.

Avant de mettre en place physiquement l'IBL, les études analytiques et les simulations de l'IBL sont mises en avant pour en construire la structure fondamentale et en identifier les paramètres de contrôle [Viegas et Lu, 1999; Viegas et Lu, 2001; Viegas et Lu, 2004]. Les trajets d'un ou plusieurs bus successifs sont modélisés, et les formules de prédiction des paramètres de contrôle des feux sur les itinéraires des bus sont établies. Les temps de parcours totaux des bus sur un itinéraire de 14 carrefours à feux (les tronçons entre carrefours chacun mesurent entre 120 et 150 m de la longueur) sont calculés par quatre stratégies différentes du déclenchement de l'IBL. Le temps de parcours de bus sur le trajet varie entre 420 et 500 s selon la stratégie appliquée au contrôle des feux (TSP).

La première expérimentation de l'IBL s'est déroulée à Lisbonne au Portugal de janvier 2005 à juin 2006 [Viegas et al., 2007]. L'IBL a été mise en place sur une rue urbaine avec des carrefours à feux. La rue mesurait 800m de longueur. Le dispositif permettait d'affecter temporairement une section de voie aux bus en fonction de la demande par le système d'aide à la gestion de trafic. Ce système régule les phases des feux successifs à la manière du TSP. Le changement du statut de la voie réservée au bus est indiqué par la signalisation horizontale (des diodes lumineuses au sol), qui interdit son accès aux véhicules légers. Cette expérience révèle une augmentation de la vitesse moyenne du bus de 15% à 25% et perturbe peu le trafic général (le débit, la vitesse et les files d'attente).

Selon les documents, les bus peuvent bénéficier des avantages de la voie réservée au bus pour une fréquence de bus relativement faible. L'efficacité du système de l'IBL est faible dans des secteurs saturés et/ou pour des fréquences de bus élevées. Ensuite, ce système proposé est étroitement lié au système de TSP. Les ajustements de signaux sont utilisés pour décharger les files d'attente aux feux et vider la voie pour les bus. Cependant, les ajustements des signaux peuvent augmenter la quantité des temps des feux verts alloués lorsque la demande est faible. Cela réduit la capacité des rues latérales et augmente le retard. En plus, la libération de la voie en aval de la voie réservée au bus est une contrainte pour les véhicules, surtout les temps de l'anticipation sont assez longs pour des niveaux de débits élevés. Enfin, la longueur de la rue expérimentale de l'IBL est trop courte pour affirmer que les résultats sont indépendants de sa longueur.

1.2.2.b BLIP

En s'inspirant de la théorie de l'IBL, [Todd et al., 2006; Eichler et Daganzo, 2006] ont proposé et analysé le concept du BLIP. Par rapport à l'IBL, le BLIP ne nécessite pas de modification des paramétrages des feux. Par conséquent, il doit être efficace et facile à évaluer.

Le BLIP peut être présenté par deux stratégies différentes pour la mise en place du dispositif [Todd et al., 2006] : la stratégie de BLIP « classique » et la stratégie de BLIP « libérale ».

Stratégie de BLIP « classique »

La stratégie de BLIP « classique » consiste à déclencher la voie de bus réservée pendant la durée d'un cycle de feux entier lorsqu'un bus passe (Figure 1. 3), c'est-à-dire, l'interdiction d'une des voies même après le passage du bus, voir les étapes [3] et [4] sur la Figure 1. 3. Les rectangles blancs représentent les véhicules autres que les bus (appelés les véhicules légers), et les rectangles jaunes sont les bus. Les pointillés jaunes matérialisent sur la figure l'interdiction pour les véhicules légers de changer de voie à droite et de circuler sur la voie de droite.

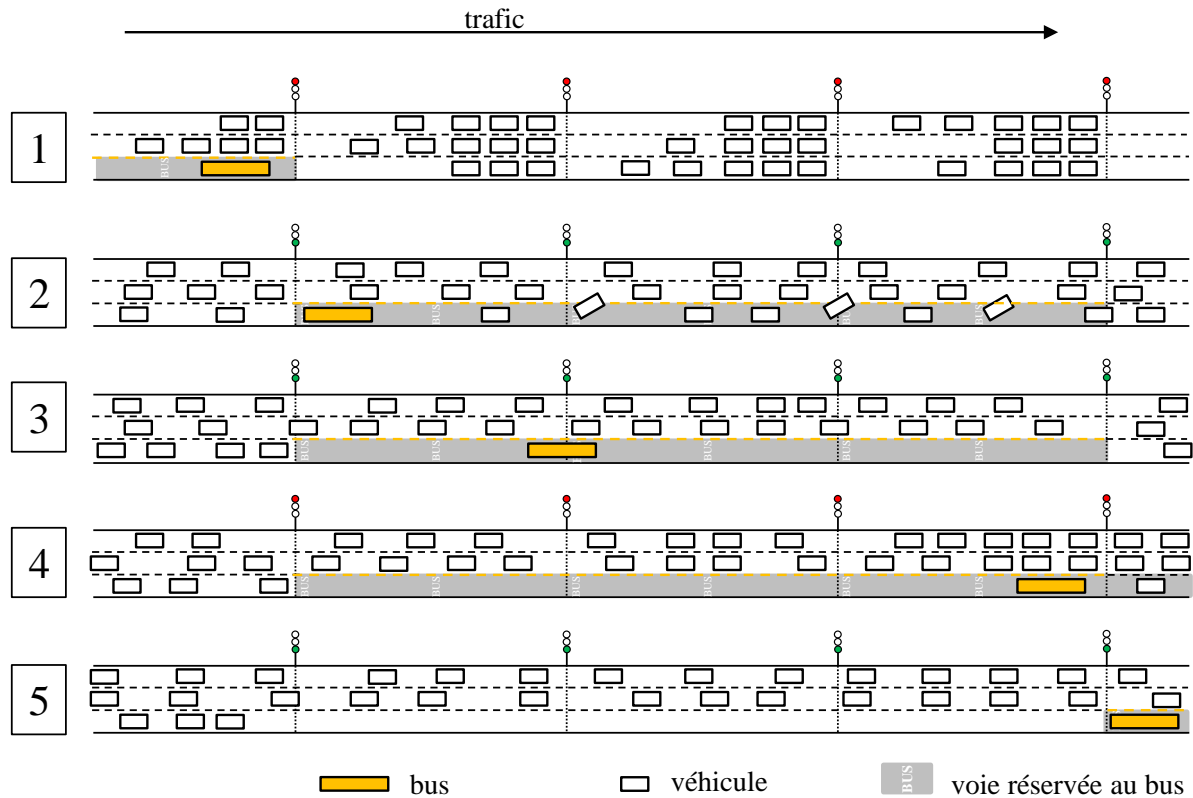


Figure 1. 3 : Processus du fonctionnement de la stratégie de BLIP « classique ».

Stratégie de BLIP « libérale »

Contrairement à la stratégie de BLIP « classique », la stratégie de BLIP « libérale » permet aux véhicules situés derrière le bus d'utiliser à nouveau l'ensemble des voies lorsque le bus est passé. Le dispositif est en effet arrêté une fois que le bus a traversé l'intersection, voir les étapes [3] et [4] sur la Figure 1. 4. Les pointillés jaunes matérialisent sur la figure l'interdiction pour les véhicules légers de changer de voie à droite et circuler sur la voie de droite.

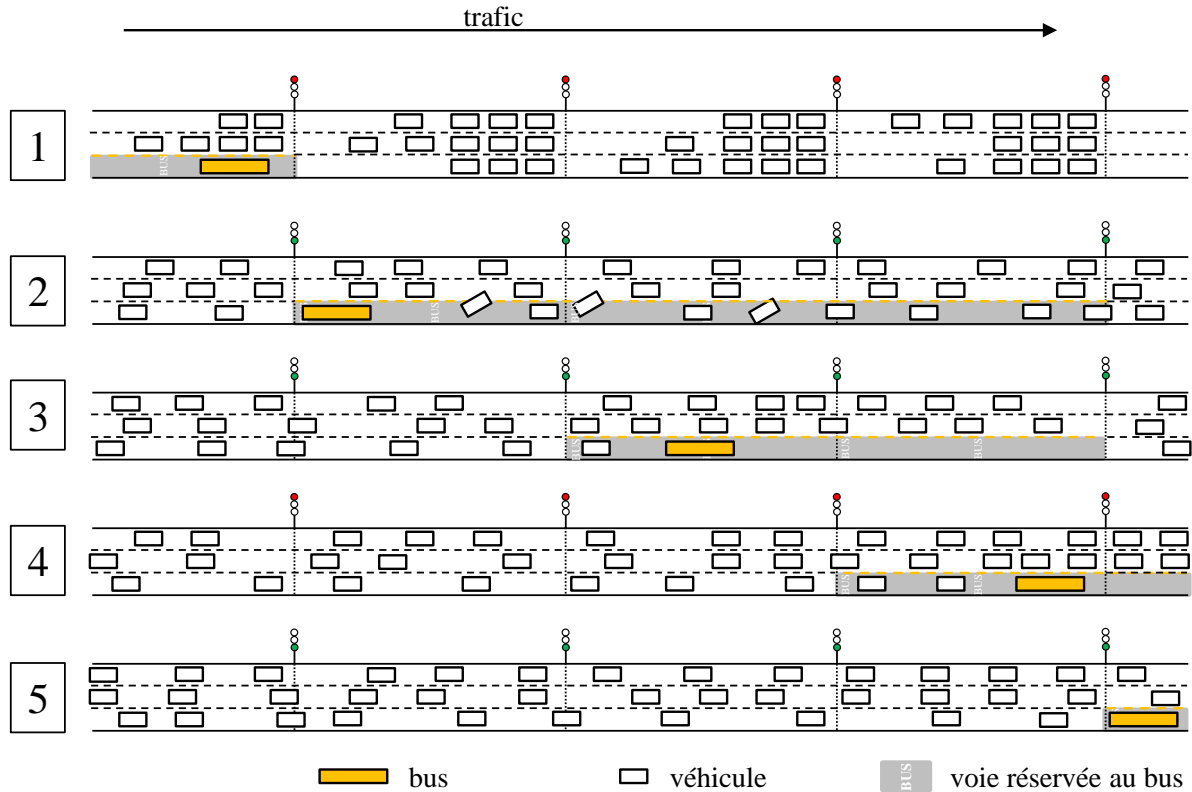


Figure 1. 4 : Processus du fonctionnement de la stratégie de BLIP « libérale ».

Par conséquent, on peut constater qu'il n'y a aucune différence pour les bus entre les deux stratégies de BLIP. En revanche, le débit sur la route augmente pendant le cycle dans le cas libéral. La stratégie de BLIP « libérale » est plus optimale et efficace d'un point de vue du débit observé à l'intersection. La stratégie de BLIP « libérale » peut être mieux acceptée par les automobilistes, car les véhicules situés derrière le bus peuvent bénéficier des trois voies de circulation et n'ont pas besoin de changer de voie. Cependant, elle est moins lisible pour les usagers et plus compliquée à évaluer.

Au contraire, le message à l'intersection reste le même et le nombre de voies disponibles est toujours constant pendant toute la durée du cycle dans la stratégie de BLIP « classique ». Pour cette raison, [Eichler et Daganzo, 2006] ont évalué les avantages et les coûts de la stratégie de BLIP « classique » sur un corridor urbain avec des carrefours à feux successifs de manière analytique en utilisant les théories des ondes cinématiques [Lighthill et Whitham, 1955; Richards, 1956] et des bouchons mobiles [Newell, 1998]. Cette approche est générale et théorique. Les bus sont modélisés comme des bouchons mobiles qui contraignent

localement et temporairement le débit de la route. L'ensemble du couloir de bus dynamique est modélisé comme un cocon de l'arrière du bus jusqu'à la fin de l'extension du couloir de bus dynamique. Le fonctionnement du dispositif est étudié en présence d'un ou plusieurs bus successifs. Les formules paramétrées sont données pour évaluer les influences sur les bus et les véhicules légers. Les coûts, les avantages, du retard moyen subi par les véhicules légers et les gains du temps de parcours des bus sont évalués. L'étude précise également plusieurs paramètres autres que la demande: la fréquence des bus et les taux d'occupation (des véhicules et des bus). Ces paramètres influencent l'efficacité du système de BLIP.

Dans cette étude, le système de TSP et le système de BLIP sont bien séparés. Cela donne la possibilité de les étudier de manière indépendante ou en combinaison. Les auteurs nous montre que le système de BLIP est pertinent (accompagné ou non d'un système de TSP) lorsque la demande est entre la capacité du bouchon mobile (la capacité de la route moins une voie) et la capacité restreinte (l'état de trafic en aval d'un bouchon mobile actif [Newell, 1998]) de la route dans la situation fluide. Enfin, les domaines de préconisation des stratégies du bus sont estimés de manière quantitative pour améliorer la circulation des bus en comparant avec le TSP et le couloir de bus permanent (Dedicated Bus Lane : DBL) :

- DBLs et DBL/TSP : une demande inférieure à 80% ou 90% de la capacité du bouchon mobile ;
- BLIP ou BLIP/TSP : une demande proche de la capacité du bouchon mobile;
- Pure TSP : une demande supérieure à 120% de la capacité du bouchon mobile.

Les auteurs nous montrent que le couloir de bus dynamique réduit faiblement la capacité des véhicules lorsque la demande est dans un intervalle hors saturation dans la fluidité entre la capacité du bouchon mobile et la capacité restreinte. Malheureusement, l'analyse ne peut pas être réalisée quand la demande est plus grande que la capacité restreinte. La stratégie de BLIP « classique » présente globalement les mêmes limites d'utilisation que l'IBL : le trafic et le réseau non dense, et la fréquence de bus basse.

1.3 Conclusion

Ce premier chapitre de la thèse a permis de recenser brièvement les expérimentations de GDV de par le monde. Il apparaît que ce dispositif peut s'avérer très efficace lorsqu'il est appliqué au bon site et avec la technologie adaptée. Néanmoins, la dynamique des solutions existantes reste bien plus lente que l'objectif visé dans ce travail de thèse.

Concernant l'application de ces systèmes aux bus, les travaux sont peu nombreux. Il s'agit essentiellement d'un retour d'expérience dont les conclusions nous poussent à

considérer le couloir de bus dynamique comme une solution de régulation efficace pour le système de transport dans son ensemble (bus et véhicules particuliers). On retiendra de la littérature que la solution de couloir de bus dynamique dite libérale est celle à privilégier. En effet, elle s'avère être la moins pénalisante en terme de réduction de capacité pour les véhicules particuliers.

D'un point de vue analytique, il a été possible d'identifier deux manques qui constituent les deux verrous scientifiques qui seront abordés dans le travail de thèse. D'une part, le déclenchement du système de couloirs de bus dynamiques n'a jamais été étudié. Pour autant, cette phase cruciale conditionne l'efficacité du système. D'autre part, l'évaluation du fonctionnement des couloirs de bus dynamique se concentre, pour l'instant, uniquement sur la situation fluide. La thèse a pour objectif d'étendre cette évaluation aux situations congestionnées mais aussi de proposer un cadre méthodologique simple permettant de caractériser de manière agrégée le fonctionnement du système. Cette démarche permet ensuite de comparer facilement les différents aménagements envisageables en faveur des bus.

Chapitre 2

Étude du déclenchement des couloirs de bus dynamiques

2.1 Introduction

Cette première partie se consacre au déclenchement du système de couloirs de bus dynamiques. En effet, cette manœuvre n'est pas neutre puisqu'elle est le lieu de la principale réduction de capacité. Cette réduction peut, en fonction de la demande, générer la création d'une file d'attente. Elle est donc potentiellement créatrice de retard à la fois pour les véhicules et les bus. De plus, la réduction du nombre de voies entraîne en amont des phénomènes d'insertion des véhicules situés sur la voie qui se ferme vers le reste de l'infrastructure. Ces phénomènes peuvent être la source d'une baisse de la capacité théorique de l'infrastructure. Ainsi, le déclenchement conditionne la dynamique de propagation du trafic le long du boulevard urbain. L'enjeu de cette première partie est donc d'évaluer analytiquement et en simulation les impacts du déclenchement du système de couloirs de bus dynamiques sur le bus et le reste de l'écoulement.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la situation suivante. Il s'agit du déclenchement du système à l'aide de feux de circulation situés à l'entrée d'un boulevard urbain et le PMV. Le principe est résumé par la Figure 2. 1. Lorsqu'un bus est détecté par un capteur situé à une distance l_d de l'entrée du boulevard, la décision de déclencher le couloir de bus dynamique est prise. Cela se traduit par la fermeture de la voie la plus à droite en amont du feu dès la détection de bus jusqu'à ce qu'il franchisse la ligne de feux. D'un point de vue technologique, la détection du bus peut se faire par un capteur électromagnétique, une localisation GPS, une caméra, etc. Un récapitulatif des technologies disponibles est présent dans [Todd et al., 2006]. Par ailleurs, il faut noter que les véhicules déjà présents sur la voie de droite sont obligés de quitter la voie. Enfin, lorsque le bus a franchi le feu, situé à $x = 0$, la voie de droite est rendue au reste du trafic. Cette solution correspond à la stratégie dite libérale.

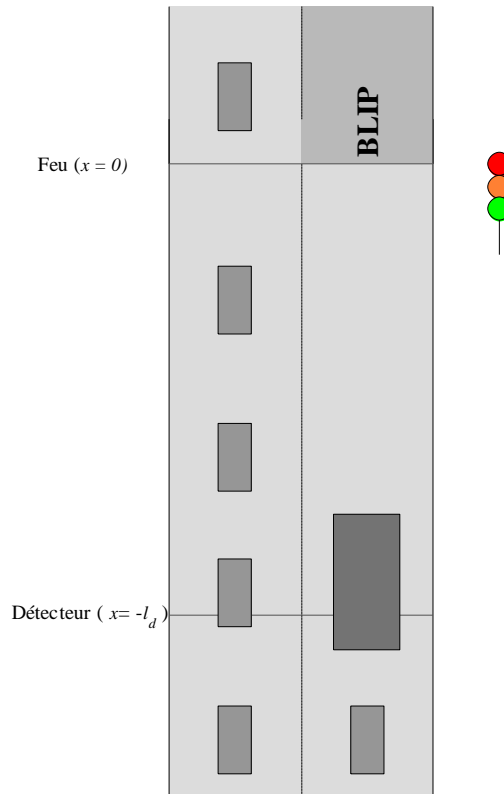


Figure 2. 1 : Site théorique de l'étude du déclenchement à l'aide d'un capteur et des feux de circulation.

Par ailleurs, nous supposons qu'il n'existe pas de l'arrêt de bus entre la zone de détection et l'entrée du boulevard, i.e. entre $x = -l_d$ et $x = 0$. De plus, puisqu'il s'agit d'un environnement urbain, nous supposons aussi que les bus roulent à la même vitesse que le trafic. Cette hypothèse simplifie la modélisation analytique, car les bus n'agissent pas comme des bouchons mobiles. Même si cette hypothèse pourrait être facilement relâchée, nous préférons nous concentrer sur l'impact du déclenchement plus que sur l'impact des bus. En particulier, l'étude s'intéresse à comparer la solution dynamique par rapport à la solution permanente lors du déclenchement.

La question du déclenchement du système de couloirs de bus dynamiques mais aussi des couloirs de bus permanents a toujours été laissée de côté. En effet, la littérature existante propose des études portant sur la modélisation analytique de l'écoulement sur l'infrastructure [Eichler et Daganzo, 2006], sur la simulation à l'échelle microscopique d'un trafic impacté par un couloir de bus dynamique [Zyryanov et Mironchuk, 2012] ou sur le contrôle optimal

des feux de circulation [Viegas et Lu, 2004]. Néanmoins, comme précédemment expliqué, le déclenchement du système peut mener à deux catégories de perturbations.

D'une part, la réduction de l'offre en aval génère une congestion pour des demandes élevées. Cette congestion conduit à des retards à la fois pour les véhicules mais aussi pour les bus. La mesure semble donc être, dans un premier temps, contre-productive pour les transports en commun. Cependant, les bus vont rattraper leur retard en aval en évitant les files d'attente aux feux de circulation. Il y a donc un enjeu majeur à pouvoir quantifier le retard initial dû au déclenchement pour déterminer les conditions à l'efficacité du couloir de bus dynamique.

D'autre part, la réduction du nombre de voies impose aux véhicules présents sur la voie la plus à droite de s'insérer sur les voies restantes. Les insertions s'effectuent le plus souvent à une vitesse plus faible que celle du flot déjà présent. Durant la phase d'accélération du véhicule s'insérant, le flot est donc contraint en amont ce qui conduit à une baisse de la capacité effective. Le caractère borné de l'accélération des véhicules a donc un impact majeur sur la dynamique du trafic. C'est une notion à prendre en compte afin d'évaluer correctement l'impact du déclenchement du système de couloirs de bus dynamiques.

La première partie de ce chapitre vise donc à évaluer analytiquement l'impact du déclenchement du système de couloirs de bus dynamiques. Plusieurs modélisations sont testées afin de déterminer la pertinence à recourir à un modèle de trafic détaillé. Ainsi, l'étude s'appuie tout d'abord sur les travaux existants [Eichler et Daganzo, 2006] en utilisant le modèle LWR comme support. Ce modèle est ensuite raffiné pour prendre en compte à la fois l'accélération bornée des véhicules et la baisse de capacité générée par la réduction du nombre de voies. Ces principes de modélisation sont donc présentés dans un premier temps. Dans un second temps, les principaux résultats associés sont analysés et discutés. Ils conduisent à la conclusion : plus le modèle de trafic utilisé intègre une représentation détaillée des phénomènes physiques, plus l'impact du déclenchement sur l'écoulement est fort. Ce résultat pousse donc à envisager une étude plus précise. C'est l'objet de la deuxième partie de ce chapitre : la simulation microscopique du déclenchement du système de couloirs de bus dynamiques. Une étude de sensibilité locale des différents paramètres de simulation sur les indicateurs de performance retenus est réalisée. Enfin, dans une troisième section, une étude de sensibilité globale du modèle de déclenchement du système de couloirs de bus dynamiques est proposée.

Ce premier chapitre de thèse est présenté sous la forme d'un résumé étendu des travaux

qui ont donné lieu à une publication en revue dans l'édition 2012 de *Transportation Research Record* et deux communications en congrès à comité de sélection (le TRB 2012 et la conférence TRA 2012). Ces articles sont proposés en annexe.

2.2 Étude analytique

Nous allons donc essayer d'évaluer analytiquement les perturbations générées par le déclenchement du système de couloirs de bus dynamiques à l'aide du modèle LWR. Même si ce modèle présente certaines limitations, les capacités et les temps de parcours sont bien reproduits. Dans ce cadre, il est supposé que le trafic peut être modélisé au travers d'un diagramme fondamental (DF) de forme triangulaire [Chiabaut et Leclercq, 2011]. Le DF dépend donc de seulement trois paramètres qui peuvent être facilement estimés à partir de mesures classiques de trafic : la vitesse libre (ou maximale) des véhicules u (km/h), la vitesse des ondes en congestion (la vitesse des ondes de redémarrage) w (km/h) et la concentration maximale lorsque les véhicules sont à l'arrêt k_x (veh/km). Cette relation est représentée sur la Figure 2. 2. La capacité maximale est donc donnée par q_x (veh/h) et la concentration critique par k_c (veh/km). Ces deux grandeurs sont facilement calculés à partir des trois paramètres précédentes : $q_x = uwk_x/(u + w)$ et $k_c = q_x/u$.

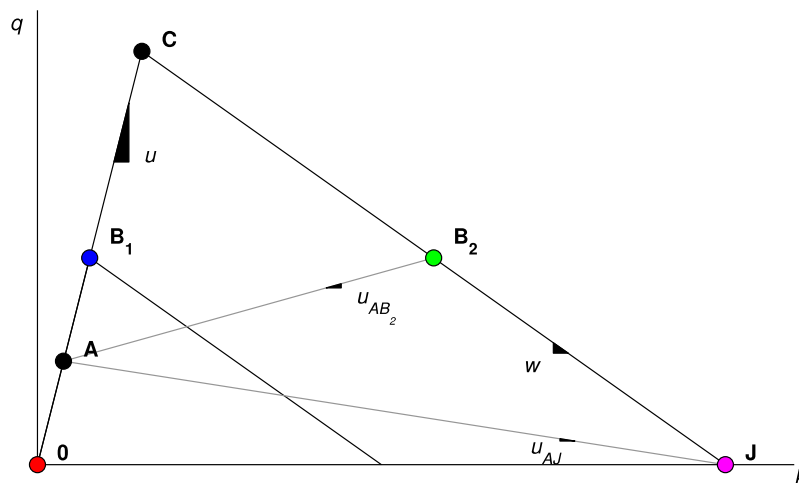


Figure 2. 2 : Diagramme fondamental du site et principaux états d'équilibre.

Il est maintenant intéressant de définir les états d'équilibre nécessaires à l'étude analytique. Il s'agit des points importants du DF. Pour n'importe quel état d'équilibre A du

trafic, le débit et la concentration sont respectivement notés q_A et k_A . La Figure 2. 2 synthétise l'ensemble des états d'équilibre nécessaires à l'étude analytique. Ainsi, l'état B_1 correspond à la situation lors de l'application d'un couloir de bus dynamique (une voie de circulation en moins) ; l'état B_2 correspond à la situation en amont du feu lors de l'application d'un couloir de bus dynamique (état congestionné, débit limité à celui moins une voie); l'état A est la demande en trafic bien en amont du feu ; l'état C est la capacité maximale du boulevard et l'état J est la situation complètement congestionnée pour laquelle les véhicules sont à l'arrêt.

À partir de ces points particuliers du DF, nous sommes en mesure de déterminer analytiquement le diagramme espace-temps des conditions de trafic pour un cycle de feu. Le principe de résolution repose sur le calcul des variations. La théorie et les détails peuvent être trouvés dans [Leclercq, 2007]. Nous allons nous intéresser ici uniquement à la dynamique.

Par ailleurs, le modèle LWR peut être étendu pour tenir compte de l'accélération bornée des véhicules. Nous supposons désormais que les véhicules accélèrent à un taux constant a . Ce taux est identique pour tous les véhicules. En conséquence, le premier véhicule arrêté dans la file d'attente du feu va contraindre le reste du trafic, i.e. le débit, jusqu'au moment où il atteint sa vitesse désirée, i.e. la vitesse maximale u .

2.2.1 Diagramme espace-temps

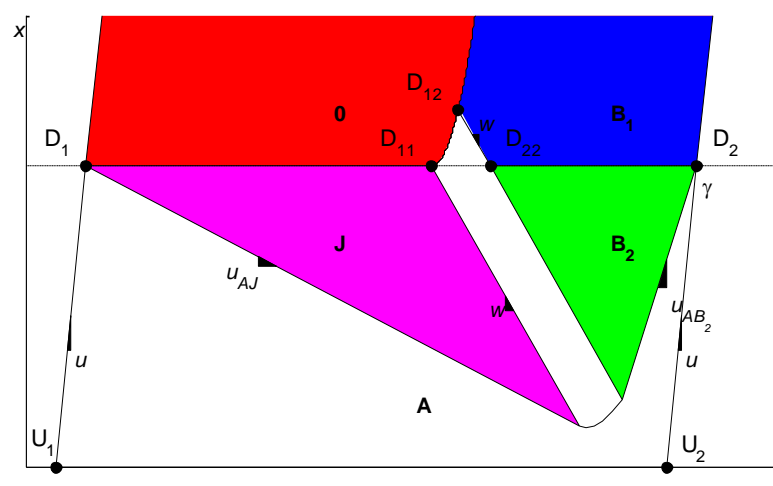


Figure 2. 3 : Diagramme espace-temps analytique pour un cycle de feu.

La Figure 2. 3 présente le diagramme espace-temps dans le cas d'un feu avec des véhicules dont l'accélération (a) est bornée. La longueur de la voie d'insertion du déclenchement de BLIP est l_d . La longueur du tronçon i est l_i et ses paramétrages de feu sont : la phase verte du feu g , la phase rouge r , le cycle c et le décalage δ par rapport à une référence commune. Supposons que le décalage est égale à 0. Nous voyons donc que le passage au rouge du feu génère une file d'attente où les véhicules sont arrêtés. Il s'agit de l'état J. Cette file d'attente remonte le trafic à une vitesse u_{AJ} , entièrement déterminée à l'aide du DF et de la formule de Rankine-Hugoniot : $u_{AJ} = (q_J - q_A)/(k_J - qk_A)$ et $k_J = k_x$. Lorsque le feu passe au vert, le premier véhicule démarre jusqu'à atteindre sa vitesse maximale. Nous observons alors un état transitoire qui se propage à une vitesse constante vers l'amont de l'infrastructure. En effet, l'onde de redémarrage a pour vitesse w , i.e. la pente du DF en congestion. Une fois que le premier véhicule a atteint sa vitesse maximale, nous observons l'état B₁ en aval du feu, i.e. deux voies de circulation, et l'état B₂ en amont du feu, i.e. trois voies de circulation. Enfin, nous retrouvons l'état de demande A lorsque l'état B₂ s'est résorbé. La vitesse de l'onde de résorption u_{AB_2} est donnée par le DF et la formule de Rankine-Hugoniot.

Les coordonnées de ces différentes zones et en particulier les instants d'apparition des états peuvent être déterminés à l'aide de calcul de variations du nombre de véhicules observés. En effet, notons N le nombre cumulé de véhicules qui entrent dans le site d'étude. Il est connu que sur un chemin fermé, les variations de N sont nulles. Ainsi, sur le chemin U₁-U₂, situé à une distance l_d du feu, la variation de N doit être égale à la variation de N sur le chemin D₁-D₂ situé à $x = 0$.

Sur le chemin U₁-U₂, la variation de N , ΔN est égal à $q_A \gamma$, où γ est la durée de disparition de la file d'attente (en supposant D1 est à $t = 0$).

Sur le chemin D₁-D₂, la variation de N est un peu plus compliquée à calculer. Elle est la même que sur le chemin, D₁-D₁₁-D₁₂-D₂₂-D₂. De D₁ à D₁₁, la variation est nulle car le débit sortant est nul (feu rouge). De D₁₁ à D₁₂, ΔN est aussi égal à 0 car aucun véhicule ne peut dépasser le premier. De D₁₂ à D₂₂, ΔN est égal à wk_x selon [Leclercq et al., 2011]. Enfin de D₂₂ à D₂, la variation de N est égal à $(\gamma - t_{22}) * q_B$ où t_{22} est égal à $t_{22} = (u/a) \cdot (u/2w + 1) + r$, où a est l'accélération bornée.

Finalement, il est donc facile d'obtenir γ la date de fin de la file d'attente générée par la réduction d'une voie de circulation.

$$\gamma = \frac{1}{q_B - q_A} (pwk(t_{22} - t_{12}) + q_A t_{22}) \quad [2. 1]$$

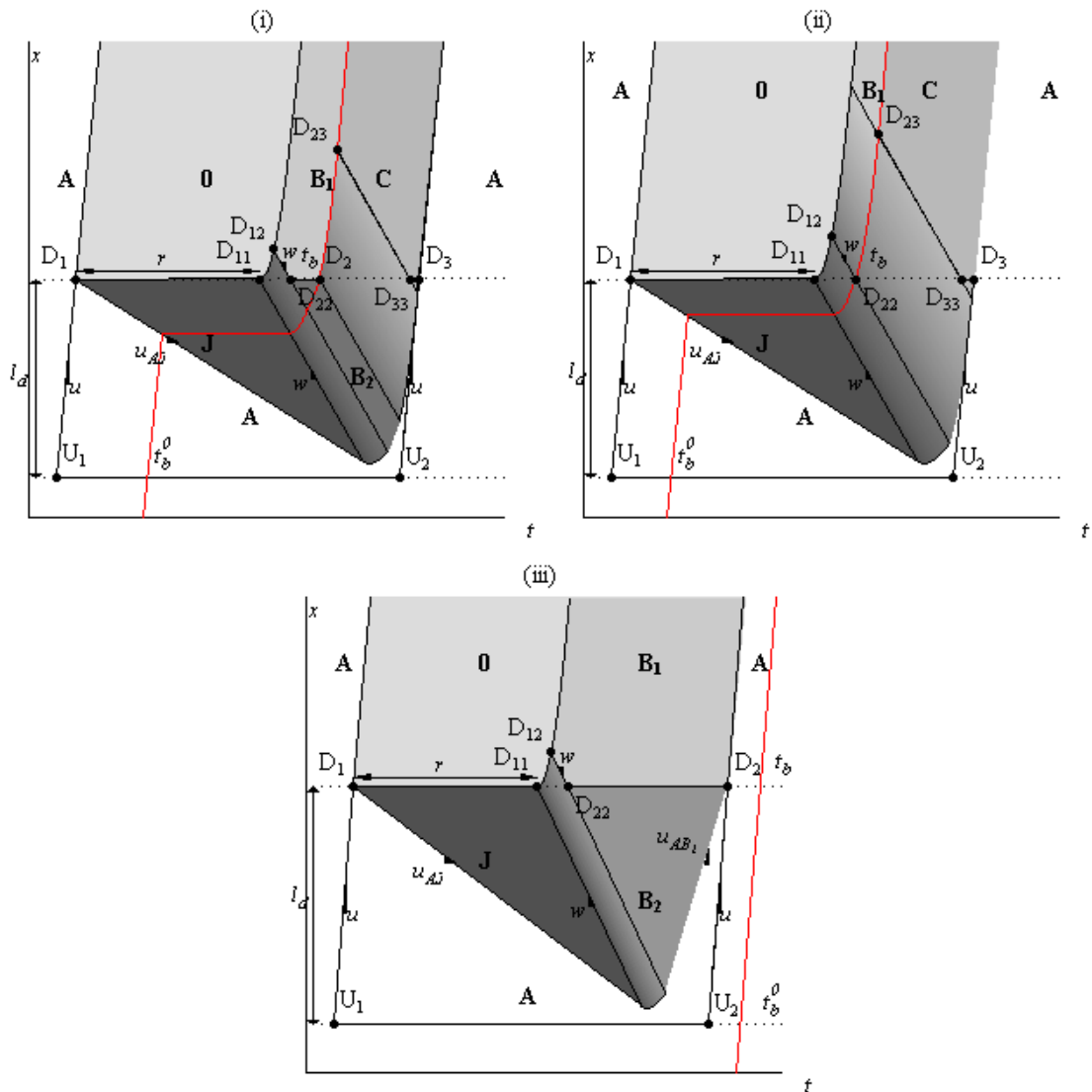


Figure 2.4 : Diagrammes espace-temps pour les cas (i), (ii) et (iii).

À partir de l'expression de γ et de la date de passage du bus au niveau du feu (t_b), nous pouvons déterminer sept cas d'étude différents. Les Figure 2.4, Figure 2.5 et Figure 2.6 proposent les diagrammes espace-temps associés aux différents cas. De la même manière, le débit observé peut donc être calculé en fonction de la demande et des arrivées des bus.

Les sept cas sont alors les suivants :

- Il faut moins d'un cycle pour dissiper la congestion due à la réduction du nombre de voies :

- Cas (i) : le bus arrive une fois que l'état B_2 est établi (le premier véhicule a atteint sa vitesse maximale u) et avant que la congestion se soit dissipée ;
- Cas (ii) : le bus arrive avant que l'état B_2 soit établi ;
- Cas (iii) : le bus arrive après que la congestion se soit dissipée.
- Il faut plus d'un cycle pour dissiper la congestion due à la réduction du nombre de voies :
 - Cas (iv) : le bus arrive pendant le premier cycle et une fois que l'état B_2 est établi ;
 - Cas (v) : le bus arrive pendant le premier cycle et avant que l'état B_2 soit établi ;
 - Cas (vi) : le bus arrive pendant le second cycle et une fois que l'état B_2 est établi ;
 - Cas (vii) : le bus arrive pendant le second cycle et avant que l'état B_2 soit établi.

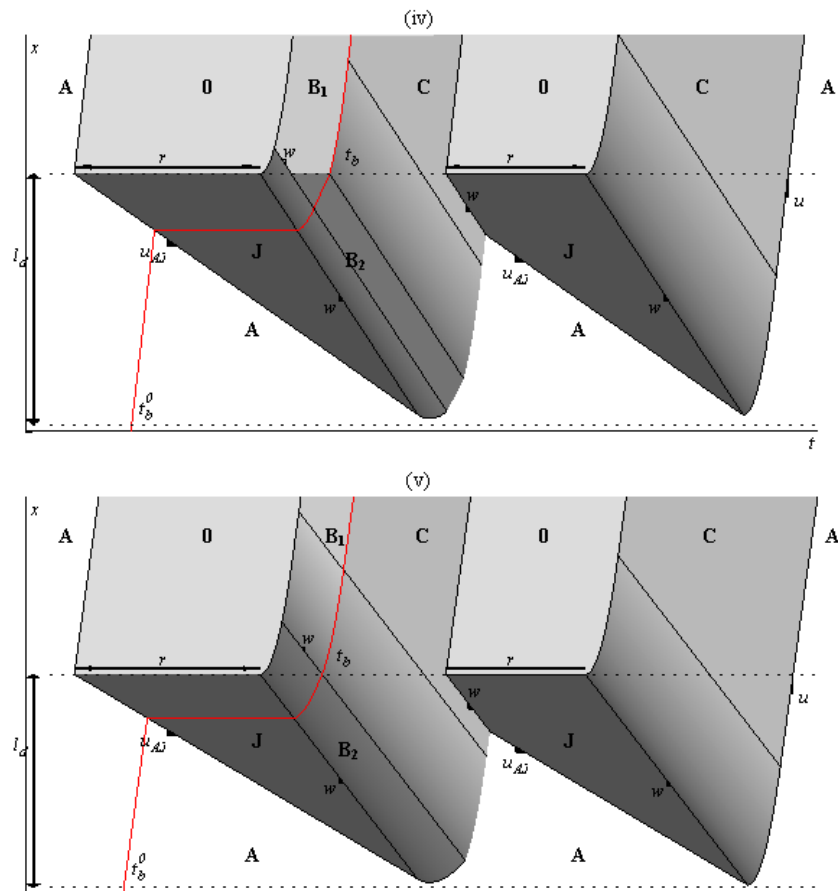


Figure 2.5 : Diagrammes espace-temps pour les cas (iv) et (v).

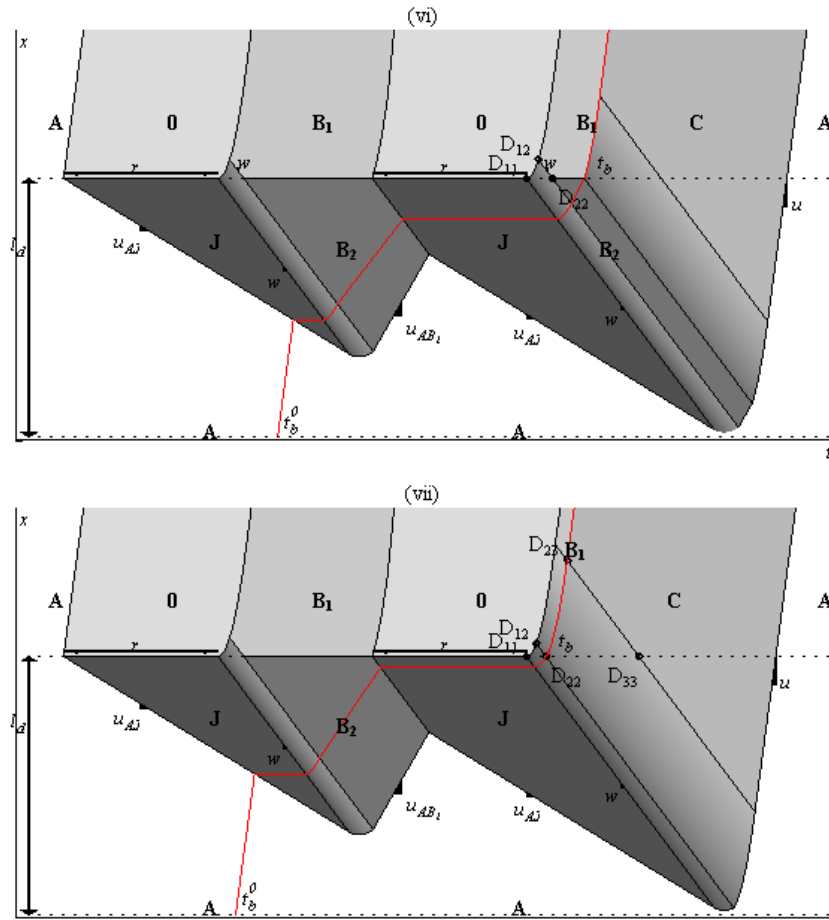


Figure 2. 6 : Diagrammes espace-temps pour les cas (vi) et (vii).

Donc, pour le cas (i), basée sur les calculs de variations de N , le temps de parcours de bus et le débit observé peuvent être calculé comme :

$$TT_{bus} = t_b - t_b^0 \quad [2. 2]$$

$$Q_m = \frac{1}{c} [pwk(t_{22} - t_{12}) + q_B(t_b - t_{22}) + wk(t_{D33} - t_{D23}) + q_x(c - t_{12})] \quad [2. 3]$$

avec $t_b = \frac{1}{q_B} [q_A (t_b^0 - \frac{l_d}{u}) - pwk(t_{22} - t_{12}) + t_{22}]$. Pour les autres cas, les détails des calculs du temps de parcours et du débit observé peuvent être trouvés dans l'article d'Annexe 3.

Ce qu'il faut retenir, c'est que cette modélisation permet de prendre en compte, en plus de l'accélération bornée, les états de transition. Les travaux précédents [Eichler et Daganzo,

2006; Todd et al., 2006] supposaient que le trafic était en situation fluide. Ce choix de modélisation introduit un biais non négligeable dans l'évaluation de l'impact des couloirs de bus dynamiques sur le reste de l'écoulement. Dans notre cadre d'étude, il est possible que la mise en œuvre du couloir de bus dynamique prenne plus d'un cycle de feu.

2.2.2 Modélisation de la chute de capacité

Dans un second temps, l'impact des insertions de véhicules devant changer de voie, afin de respecter la consigne, est ajouté au modèle. Il s'agit d'un phénomène bien connu qui conduit à une chute de capacité comprise entre 10% et 30%. En effet, les véhicules changeant de voie doivent accélérer une fois sur la voie cible pour atteindre la vitesse du flot. Même si l'accélération bornée a déjà été prise en compte, le phénomène d'insertion n'a pas été modélisé jusqu'à présent. Nous allons donc étendre le modèle pour reproduire cette chute de capacité. [Leclercq et al., 2011] propose une formulation analytique qui reproduit le phénomène d'insertion des véhicules et conduit à une chute de capacité.

La modélisation est assez simple puisqu'elle fournit un unique indicateur d qui quantifie la chute de capacité relative. En d'autres mots, d est le complément du ratio entre la capacité effective Q et la capacité théorique donnée par le DF : $d = 1 - Q/q_x$. Ce paramètre d dépend uniquement des paramètres du DF, de l'accélération des véhicules ainsi que de la longueur de la zone d'insertion. Il est aussi important de remarquer que les valeurs de d ne peuvent être comparées à celles observées expérimentalement. En effet, la littérature définit le plus souvent la chute de capacité en référence au débit maximal observé juste avant la chute de capacité qui est toujours plus faible que la capacité théorique. Finalement, concernant les phases de déclenchement du système de couloirs de bus dynamiques, le débit n'est plus contraint à q_B durant les phases d'activation des couloirs de bus dynamiques mais à $(1 - d)q_B$. Les formules obtenues précédemment peuvent donc être facilement modifiées pour prendre en compte la chute de capacité.

2.2.3 Évaluation de l'impact du déclenchement

Nous disposons maintenant de tous les outils pour évaluer analytiquement l'impact des couloirs de bus dynamiques sur le reste de l'écoulement. Nous allons nous intéresser à deux indicateurs : (i) le débit moyen observé (Q_m) à l'entrée du boulevard, et (ii) le temps de parcours moyen des bus (TT) entre le détecteur ($x = -l_d$) et le feu ($x = 0$). Il s'agit d'indicateurs moyens car une agrégation sur les instants initiaux de détection des bus est réalisée. L'évolution de ces indicateurs en fonction de la demande est ensuite déterminée.

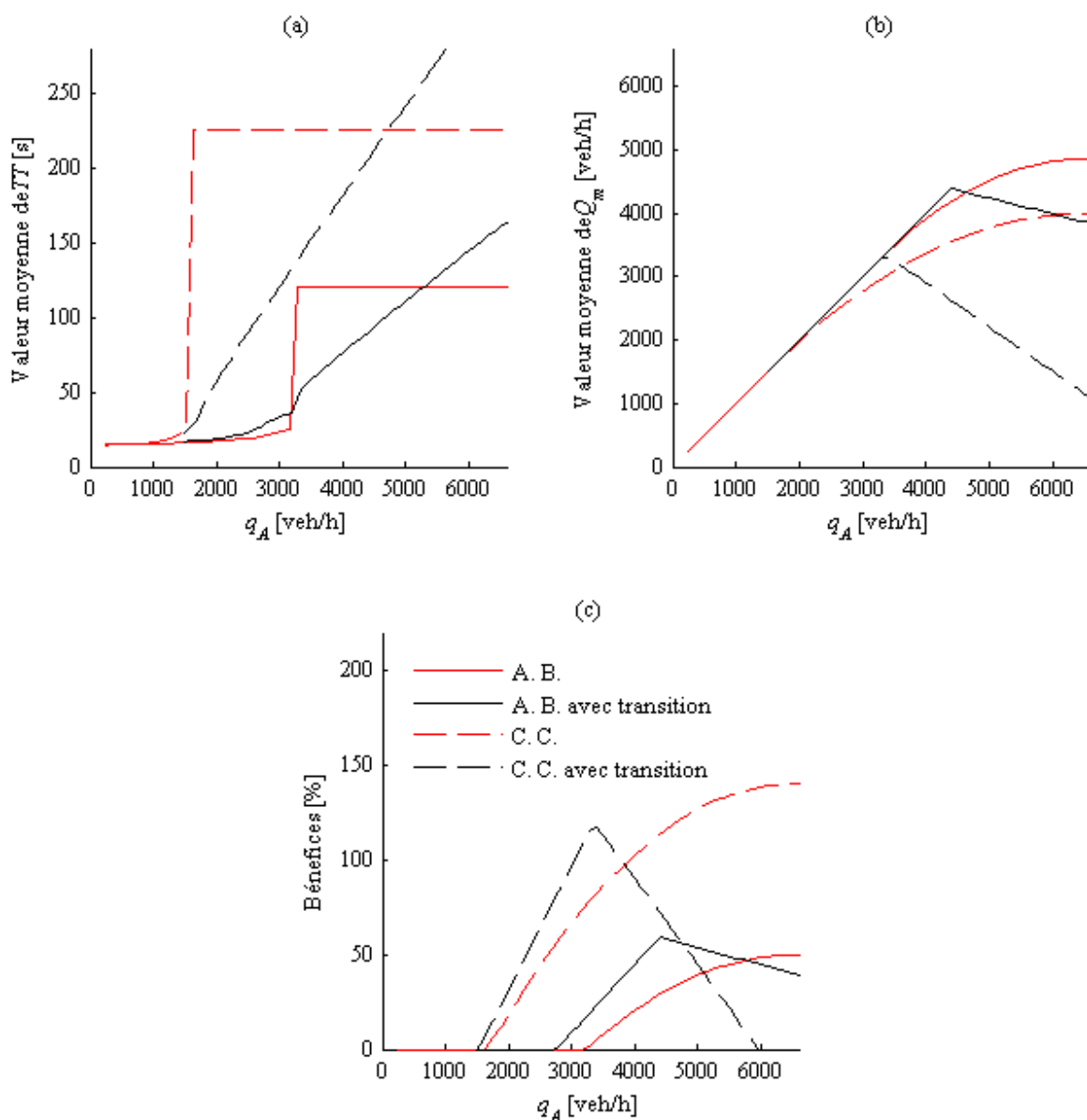


Figure 2. 7 : (a) évolution des temps de parcours (b) analyse du débit observé et (c) bénéfice par rapport à une solution permanente.

La Figure 2. 7a représente l'évolution de TT en fonction de la demande. Sans surprise, nous remarquons que TT augmente avec le niveau de demande (q_A). Les différents choix de modélisation sont aussi proposés. La courbe rouge en tirets représente le résultat du cas d'accélération bornée sans transition. La courbe noire en tirets représente le résultat du cas d'accélération bornée avec transition. La courbe rouge solide représente le résultat du cas de

chute de capacité sans transition. Et la courbe noire solide représente le résultat du cas de chute de capacité avec transition. Il est possible de remarquer que les temps de parcours du bus sont évidemment plus élevés lorsque la chute de capacité n'est pas prise en compte. De la même manière, il semble nécessaire de modéliser la dynamique de la congestion. Les courbes en noires proposent les mêmes modélisations (accélération bornée et accélération bornée avec chute de capacité) pour des cas ne prenant pas en compte les phases de transition. Il apparaît clairement que les temps de parcours sont sous-évalués pour des valeurs de demandes élevées.

L'évolution du débit observé en fonction de la demande est proposée sur la Figure 2. 7b. L'impact des choix de modélisation sur la capacité apparaît clairement. Plus le modèle est détaillé plus les débits observés sont bas. La tendance d'évolution dépend de la prise en compte de la dynamique de la congestion.

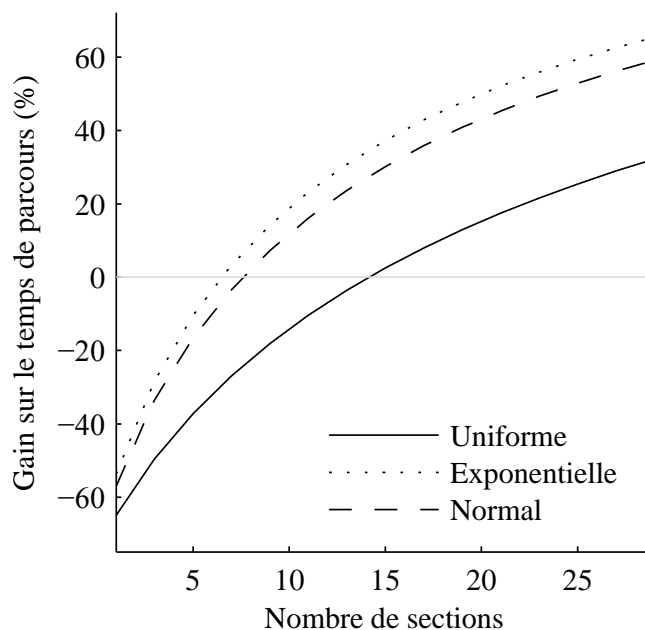


Figure 2. 8 : Gain sur le temps de parcours du bus.

L'impact du déclenchement des couloirs de bus dynamiques semble donc dans un premier temps contre-productif. Cependant, si l'analyse est étendue à une échelle spatiale plus importante comme le boulevard urbain, les couloirs de bus dynamiques améliorent la situation en réduisant les perturbations par rapport à un couloir de bus permanent. Puisqu'une fois la stratégie BLIP correctement déclenchée, le bus ne subit plus de retard aux différentes intersections. Il gagne donc du temps par rapport à une situation avec trafic où le retard

moyen est $r/2$. La Figure 2. 8 illustre ce constat. Elle est donc obtenue en comparant ce gain avec le retard généré par le déclenchement au premier feu. Le temps de parcours du bus est calculé en fonction du nombre de tronçons constituant le boulevard urbain. À partir de 15 tronçons pour une distribution uniforme des arrivées et moins de 10 tronçons pour des distributions normales et exponentielles, les couloirs de bus dynamiques améliorent le temps de parcours du bus tout en améliorant la capacité du boulevard urbain.

En conclusion, il apparaît donc comme indispensable (i) de compléter cette première étude par une analyse en simulation et (ii) d'analyser le fonctionnement global du boulevard urbain. En effet, (i) les premiers résultats montrent qu'un plus grand niveau de détails réduit la capacité et augmente le temps de parcours. La prise en compte du trafic urbain dans toute sa complexité (intersections, changement de voies, etc.) peut donc encore augmenter les impacts négatifs sur le reste de l'écoulement. De plus, (ii) l'efficacité des couloirs de bus dynamiques apparaît pour des sites relativement longs. Il est nécessaire d'approfondir ce point pour identifier clairement les sites potentiellement candidats.

2.3 Étude en simulation

Les résultats de l'étude analytique montrent que le niveau de détails, dans la modélisation de l'écoulement du trafic, a un impact sur l'évaluation du déclenchement du système de couloirs de bus dynamiques sur le reste du trafic. De plus, les modèles proposés jusqu'alors ne permettent pas de tester différentes hypothèses sur les comportements individuels de conduite, par exemple la relaxation après la simulation. Ces deux points motivent donc à l'utilisation de la simulation microscopique du trafic.

L'étude en simulation a donc deux objectifs. Le premier est d'abord de s'assurer de la cohérence entre la dynamique produite par le simulateur et les résultats du modèle analytique. Il est important de noter que puisqu'il s'agit de deux résolutions différentes du même modèle, les résultats doivent être cohérents entre les deux approches. Cela permet de s'assurer que le travail mené dans le dernier chapitre, portant sur l'étude d'un site en simulation, est pertinent. Le second objectif est de réaliser une analyse de sensibilité des indicateurs d'évaluation aux différents paramètres du modèle. Ce travail permet d'identifier les grandeurs ayant le plus d'influence et fournit une base de réflexion sur l'optimisation du contrôle des couloirs de bus dynamiques.

2.3.1 Outil de simulation

L'étude en simulation est réalisée à l'aide de SymuVia [SymuVia, 2013], la plateforme

développée par le LICIT depuis plusieurs années. Il s'agit d'une résolution Lagrangienne du modèle LWR qui permet de représenter les positions des véhicules sur le réseau à chaque instant de simulation tout en gardant une loi de comportement macroscopique garantissant la bonne représentation de la physique de l'écoulement et du trafic. Les détails de cette résolution peuvent être trouvés dans [Leclercq et Chevallier, 2007] et [Leclercq, 2007]. De plus, cette résolution permet d'étendre le modèle de trafic LWR. Les principes de modélisation des différentes extensions ne sont pas détaillés ici. Les informations sont disponibles dans les références scientifiques correspondantes.

Ainsi, les véhicules ont aussi des capacités d'accélération bornées. SymuVia permet aussi de modéliser de façon différenciée les voies de circulation et donc le changement de voie [Laval et Leclercq, 2008]. Concernant le changement de voie, le phénomène de relaxation, i.e. le fait d'accepter des espaces de changement de voie plus petit que les espacements d'équilibre dictés par le DF, est aussi pris en compte. Toutes ces extensions font que la chute de capacité générée par la réduction de voirie est correctement reproduite par SymuVia [Leclercq et al., 2011].

Enfin, les paramètres de SymuVia correspondent au même DF triangulaire que l'approche analytique. Cependant, SymuVia nécessite deux paramètres supplémentaires : le coefficient de relaxation ε qui traduit la différence de vitesses maintenue par un véhicule changeant de voie pour retrouver un espacement de sécurité et le temps d'exécution d'un changement de voie τ . L'analyse de sensibilité s'intéresse à l'influence de ces deux paramètres mais aussi à l'influence de l'accélération bornée ainsi qu'à la position du détecteur. Il faut noter que les deux premiers paramètres ne peuvent être pris en compte dans l'approche analytique.

2.3.2 Cas d'étude

Le déclenchement du couloir de bus dynamique est simulé pour deux réseaux différents : deux voies (cas i) et trois voies (cas ii). Les Figure 2. 9a1 et b1 représentent le schéma du réseau simulé, et les Figure 2. 9a2 et b2 sont les scénarios affichés simulés dans SymuVia. Ce scénarios étudiés sont similaire à celui considéré dans les modèles analytiques. C1 et C2, en rouge sur les Figure 2. 9a1 et b1, sont les capteurs ponctuels situés sur le corridor pour détecter les informations du trafic : le nombre de véhicules et/ou de bus cumulés, et le temps de passage des bus et/ou des véhicules. E est l'entrée du corridor, et S la sortie. l_d est la longueur de la voie d'insertion du déclenchement du couloir de bus dynamique en amont du premier feu. Les véhicules sont forcés de changer de voie à gauche dans cette section.

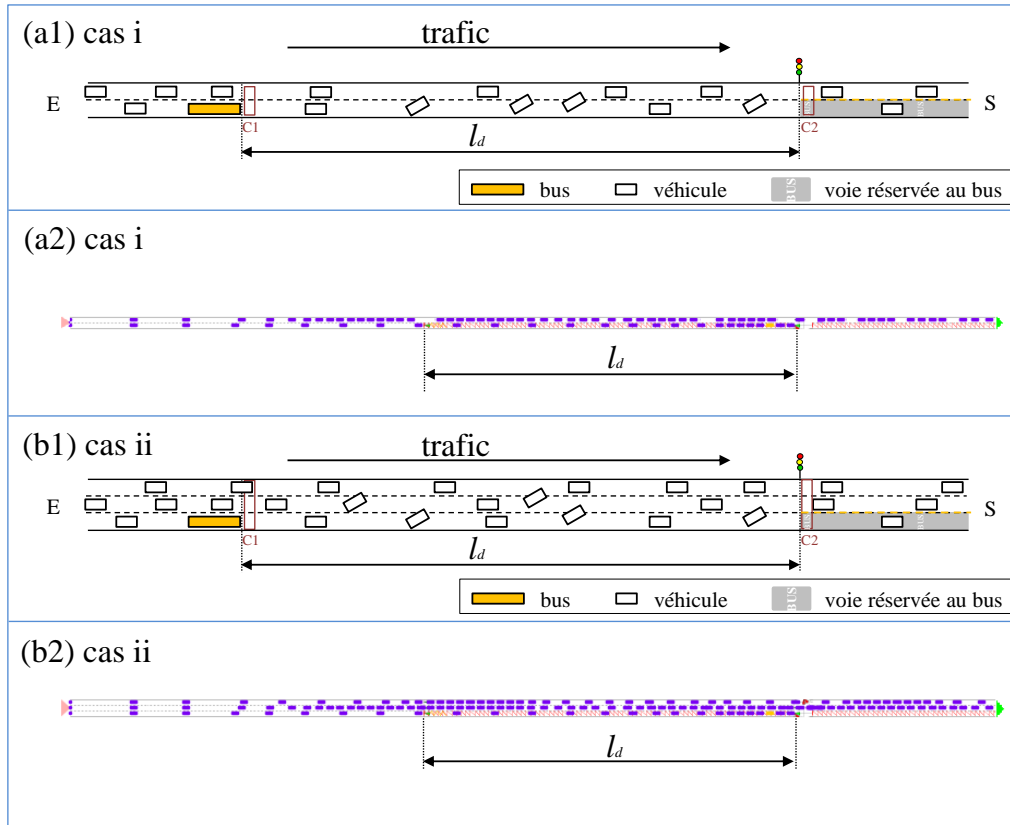


Figure 2. 9 : Deux scénarios étudiés : cas i, le cas de deux voies, (a1) schéma et (a2) SymuVia affichage ; et cas ii, le cas de trois voies, (b1) schéma et (b2) SymuVia affichage.

Les paramètres de la route et du trafic sont définis dans le Tableau 2. 1.

Tableau 2. 1 : Paramètres de la route et du trafic.

Paramètres de la Route	Valeur	Paramètres du trafic	Valeur (unité)
Longueur tronçon (l)	300 (m)	Vitesse libre (u)	15 (m/s)
Cycle du feu (c)	80 (s)	Vitesse congestionnée (w)	3 (m/s)
Phase rouge (r)	20 (s)	Capacité (q_C)	2000/3600 (veh/s)
Phase verte (g)	60 (s)	Densité max (k_x)	0.244 (veh/m)
Décalage (δ)	0 (s)	Demande (q_A)	(5000/3600)/3 (veh/s)
Nombre de voie (p)	2 ou 3 (voie)		
Fermeture de la voie BLIP	[80:140] (s)		

2.3.3 Validation du modèle macroscopique

Dans un premier temps, nous allons donc nous mettre dans les mêmes situations que l'approche analytique afin de valider qualitativement le fonctionnement du simulateur. Les résultats obtenus par la modélisation prenant en compte uniquement l'accélération bornée sont comparés aux résultats simulés. Afin de considérer des situations comparables, le paramètre ε de relaxation est fixé à 12 m/s. En effet, plus ce paramètre est grand, plus la relaxation est rapide et plus le modèle retrouve rapidement un fonctionnement à l'équilibre.

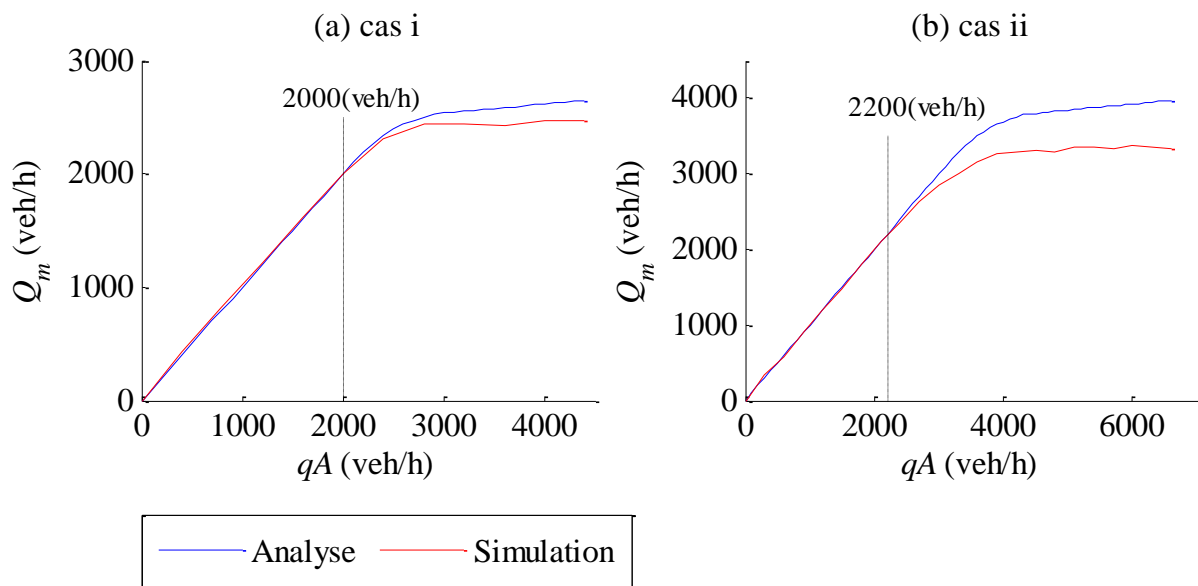


Figure 2. 10 : Comparaison entre l'étude analytique et la simulation.

Nous considérons donc l'évolution du débit moyen observé (Q_m) en fonction du niveau de demande (q_A). La Figure 2. 10 montre les résultats simulés des deux cas différents (cas i et cas ii). Ces résultats simulés (les courbes rouges) sont comparés avec les résultats analytiques (les courbes bleues). Il se trouve que lorsque la demande est bien plus faible que la capacité lors du déclenchement des couloirs de bus dynamiques ($q_A < 2000$ veh/h), les deux approches fournissent exactement les mêmes résultats. En revanche, lorsque la demande est plus forte, la simulation fournit toujours des débits observés plus faibles que les débits calculés analytiquement. Néanmoins, ce constat n'est pas surprenant puisque la simulation reproduit des phénomènes qui ne sont pas pris en compte dans l'approche analytique. Ces phénomènes

ont pour conséquence directe de réduire la capacité. Cependant, la dynamique des deux approches est similaire. Cela permet donc de conclure que les résultats des simulations sont cohérents et pertinents avec les résultats de l'approche analytique.

2.3.4 Analyse de sensibilité locale

L'analyse de sensibilité étudie comment des incertitudes sur les entrées du modèle engendrent des incertitudes sur la sortie (Saltelli et al., 2004 ; Saltelli et al., 2008)). L'objectif ne porte alors pas sur l'incertitude de la sortie (qui est étudiée par l'analyse d'incertitude), mais sur la part de celle-ci attribuable à chaque entrée. L'étude de sensibilité peut être utilisée pour : (i) découvrir des erreurs techniques dans le modèle ; (ii) identifier des régions critiques dans l'espace des entrées ; (iii) établir des priorités pour la recherche ; (iv) simplifier les modèles [Punzo et Ciuffo, 2011]. Les différentes entrées ainsi que les incertitudes associées peuvent affecter les sorties d'une manière différente. Lorsque le nombre de ces entrées s'élève à plusieurs, comme c'est le cas de nombreux modèles complexes actuels, la compréhension de ceux qui ont besoin de notre attention pour leur estimation devient cruciale. Dans ce cadre, l'étude de sensibilité joue un rôle fondamental, car il peut ordonner l'étude de sensibilité vers l'identification de l'importance relative de chaque entrée.

Il est possible de grouper les méthodes d'analyse de sensibilité en trois catégories : les méthodes de screening (Screening), l'étude de sensibilité locale (Local Sensitivity Analysis : LSA) et l'étude de sensibilité globale (Global Sensitivity Analysis : GSA) [Jacques, 2005]. Les méthodes de screening, présentées par [Saltelli et al., 2000], analysent qualitativement l'importance des variables d'entrée sur la variabilité de la réponse du modèle. Elles permettent d'établir une hiérarchie au sein des variables d'entrée en fonction de leur influence sur la variabilité de la réponse. L'étude de sensibilité locale et l'étude de sensibilité globale sont des méthodes d'analyse quantitative qui permettent non seulement d'établir une hiérarchie au sein des variables d'entrée, mais aussi de donner un ordre de grandeur des écarts au sein de cette hiérarchie. L'étude de sensibilité locale étudie comment des petites perturbations autour d'une valeur $x^0 = (x_1^0, \dots, x_p^0)$ des entrées se répercutent sur la valeur de la sortie. La méthode d'analyse locale la plus classique est l'approche OAT (One factor At Time). L'étude de sensibilité globale s'intéresse quant à elle à la variabilité de la sortie du modèle dans son domaine de variation. Elle étudie comment la variabilité des entrées se répercute sur celle de la sortie, en déterminant la part de variance de la sortie due à chaque entrée ou l'ensemble d'entrées. Ainsi, l'étude de sensibilité locale et l'étude de sensibilité globale se distinguent par le fait que : l'analyse locale s'intéresse à la valeur de la réponse, tandis que l'analyse globale s'intéresse à sa variabilité.

2.3.4.a Paramètres et Indicateurs

Cette sous-section s'intéresse désormais à l'étude de sensibilité locale des indicateurs d'évaluation aux différents paramètres de simulation, l'approche la plus couramment adoptée en simulation du trafic. L'objectif est donc d'identifier les grandeurs les plus influentes sur le système et évaluer l'évolution d'indicateur en fonction de chaque paramètre. Chaque paramètre est testé successivement et séparément. Les indicateurs d'évaluation sont ensuite calculés pour trois niveaux de demande.

Dans notre application, les paramètres étudiés (entrées non fixes) sont les paramètres suivants :

- Accélération (a) : un écart infiniment petit de vitesse pendant un temps infiniment petit mis pour modifier cette vitesse (cet attribut n'est pas utilisé dans le cas où la simulation a pour caractéristique "accélération non bornée"), l'unité en (m/s^2) ;
- Coefficient relaxation (ε) : le coefficient relaxation du réseau est la différence de vitesse que le changeur de voie est prêt à maintenir avec son leader afin d'atteindre un espacement à l'équilibre. Le coefficient de relaxation est pour les véhicules qui changent de voies, l'unité en (m/s) ;
- Tau (τ) : le temps caractéristique du changement de voie, l'unité en (s) ;
- Longueur de la voie d'insertion du déclenchement du BLIP (l_d) : la longueur de la voie d'insertion du déclenchement du couloir de bus dynamique en amont du premier feu, l'unité en (m) ;
- Pi rabattement (π_r) : la probabilité pour un véhicule de se rabattre vers la voie la plus à droite des véhicules, sans unité ;
- Pi mandatory_alpha (π_m) : la probabilité d'un changement de voie obligatoire liée à une réduction de voie uniquement, sans unité ;
- Fréquence de bus (h) : la fréquence entre le lancement de 2 bus (à définir uniquement si le type de paramétrage est global), c'est-à-dire le temps séparant le départ de deux bus consécutifs (le temps inter-bus), l'unité en (s).

Concernant les indicateurs, nous avons étudié quatre indicateurs les plus importants: le débit moyen des véhicules pendant un cycle de feu (Q_m), le débit maximum observé des véhicules entre deux passages de bus (C_m), les temps de parcours moyens des bus et des

véhicules légers entre deux capteurs C1 et C2 dans la Figure 2. 9 (TT_{bus} et TT_{vl}). Il faut noter que ces temps de parcours sont des moyennes sur les instants de détections possibles de bus (distribués uniformément).

Une série des valeurs de références des paramètres sont définis dans le Tableau 2. 2. Ces valeurs s'appuient sur des observations expérimentales, des arguments théoriques, des résultats des analyses ou des avis d'experts. Ils sont affichés comme les points noirs sur les figures suivantes.

Tableau 2. 2 : Valeurs de références des paramètres de l'étude de sensibilité locale.

Paramètre	a	ε	τ	l_d	π_r	π_m	h
Valeur	1.5 m/s ²	0.55 m/s	4 s	100 m	0	1	1 cycle

2.3.4.b Influences locales des paramètres du déclenchement du couloir de bus dynamique

Tout d'abord, l'étude de sensibilité est centrée sur l'influence de l'accélération des véhicules a (m/s²). Les premiers résultats montrent que plus la valeur d'accélération des véhicules est élevée, plus le débit observé est fort (Figure 2. 11a1 et a2). En effet, les véhicules s'insérant ont besoin de moins de temps pour atteindre la vitesse du flot de la voie cible lorsque la valeur d'accélération est grande. L'impact de la fréquence de bus, l'intervalle de temps entre le passage de deux bus successifs, est analysé (Figure 2. 11b1 et b2). Il apparaît que le débit observé converge rapidement vers une valeur commune. Au-delà d'une certaine fréquence, les couloirs de bus dynamiques n'ont que peu d'influence sur le reste de l'écoulement. On peut tout de même observer que cette convergence est moins rapide pour des demandes élevée. Concernant les temps de parcours des bus et des véhicules, ils sont évidemment réduits lorsque la valeur d'accélération augmente (Figure 2. 11c1 et c2). Par ailleurs, ils augmentent avec le niveau de demande puisque dans ce cas les files d'attente sont plus importantes. Il faut aussi noter que les demandes fortes ont tendance à uniformiser les temps de parcours des bus et des véhicules.

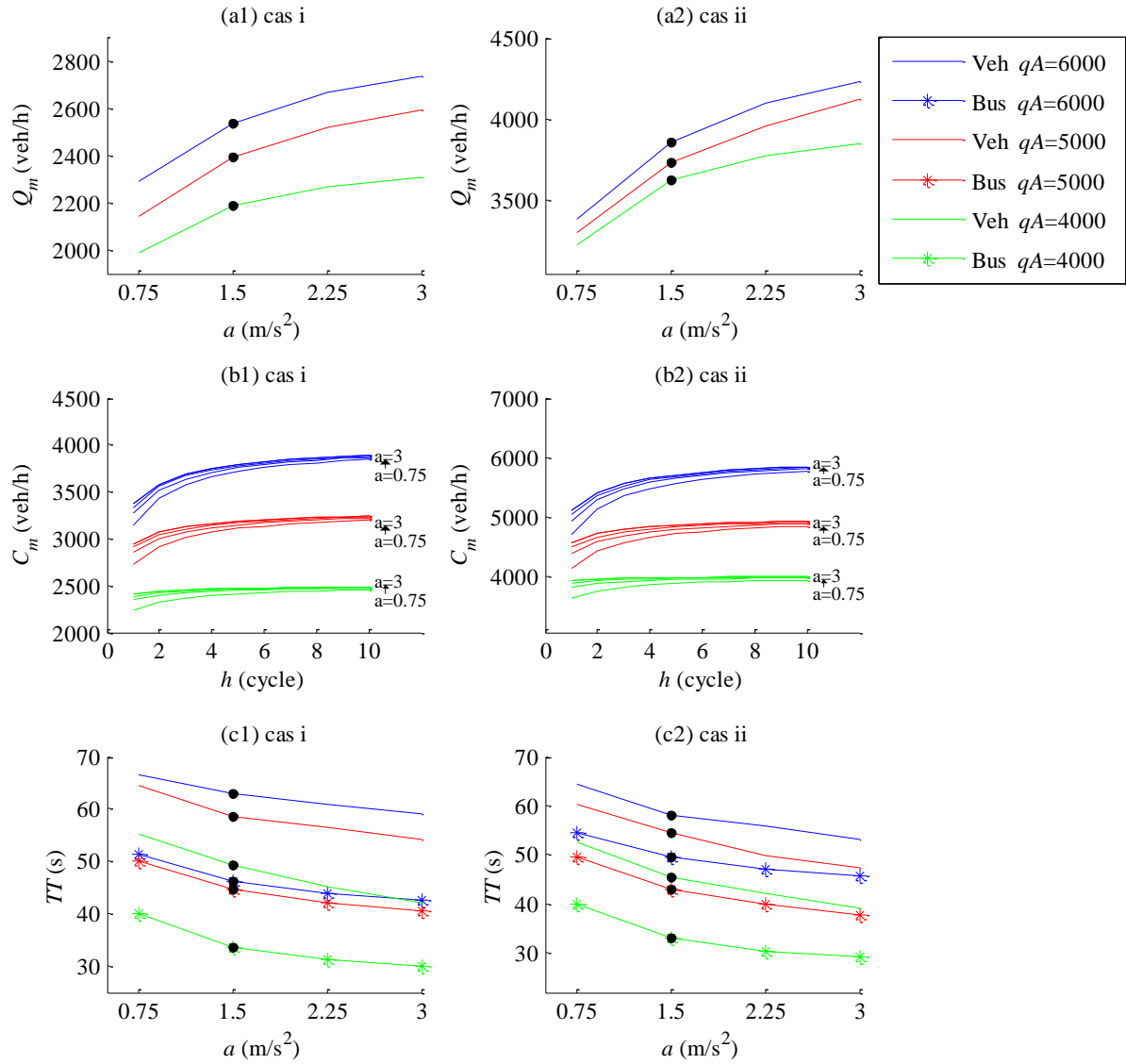


Figure 2. 11 : Influence de l'accélération.

Ensuite, nous nous concentrons maintenant sur le coefficient de relaxation ε (m/s). La Figure 2. 12 montre que le débit observé décroît lorsque ε augmente. Ce résultat est assez logique puisque lorsque ε est petit, les véhicules acceptent des espacements plus courts avec leur prédécesseur. Par conséquent, le débit observé augmente. De plus, Q_m décroît plus rapidement pour de faibles valeurs de ε .

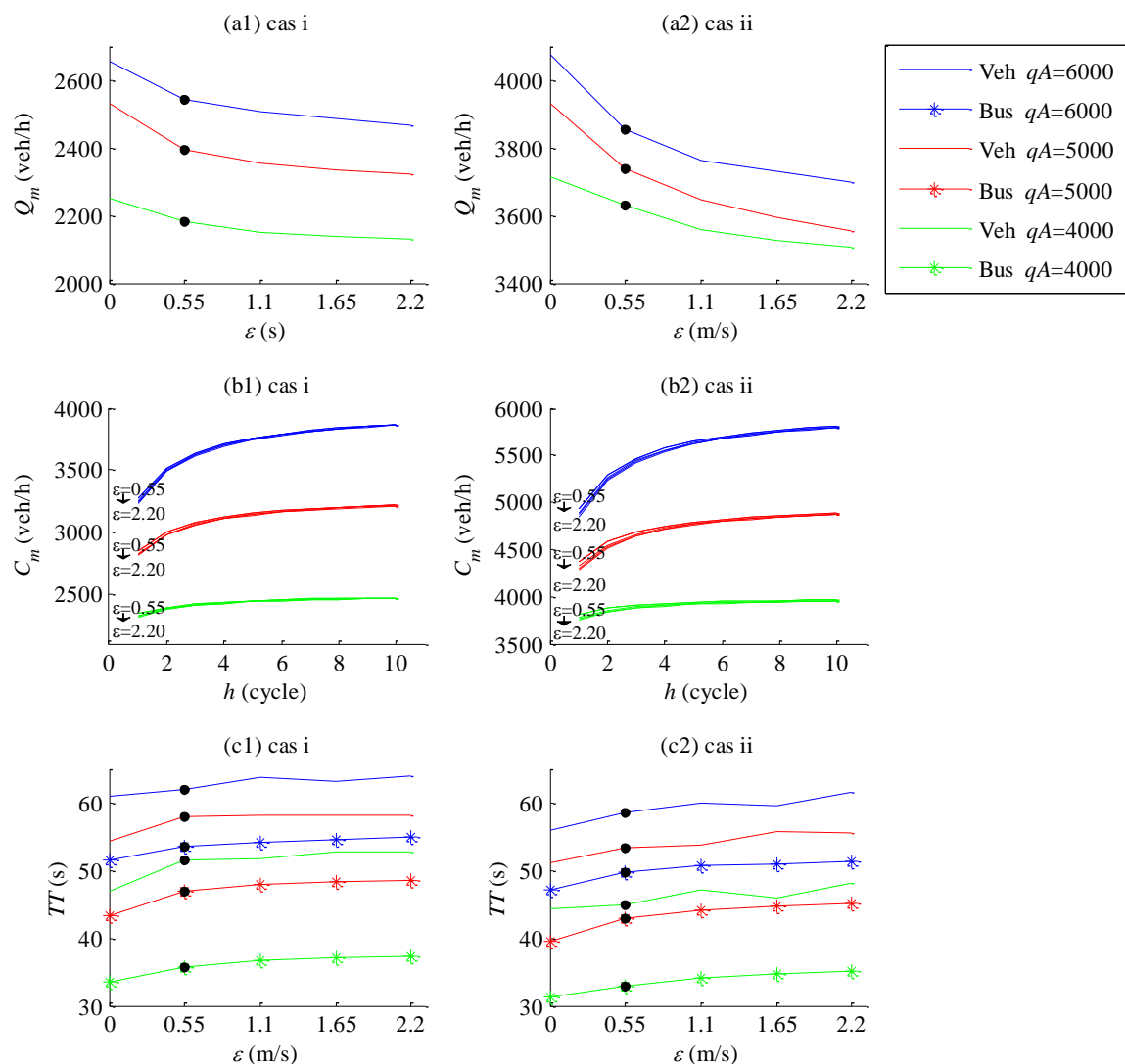


Figure 2.12 : Influence du coefficient de relaxation.

En puis, nous nous intéressons désormais à l'influence de la longueur de la voie d'insertion du déclenchement de couloirs de bus dynamique (l_d en m) sur l'efficacité du système. Ainsi, le débit observé décroît rapidement lorsque l_d passe de 20 à 180 m (Figure 2.13). Il faut noter que la chute la plus importante est observée lorsque l_d atteint les 100m. En revanche, l_d n'a pas de l'influence sur les temps de parcours que ce soit ceux du bus ou des véhicules.

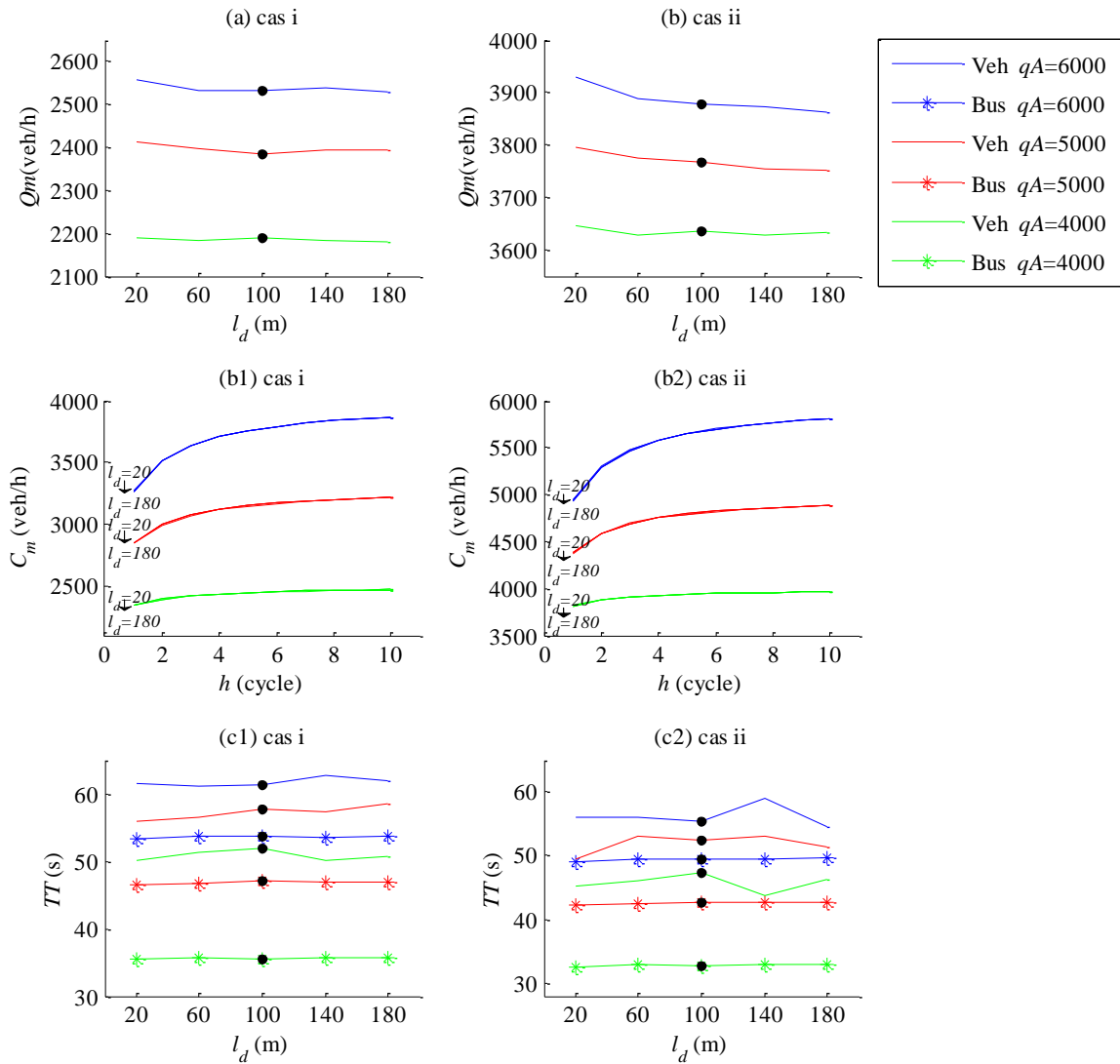


Figure 2.13: Influence de la longueur de la voie d'insertion du déclenchement de BLIP.

Finalement, le Tableau 2.3 résume l'influence des différents paramètres sur les débits observés et les temps de parcours. L'accélération et le coefficient de relaxation sont les deux paramètres les plus influents. La longueur de détection n'a presque aucun impact sur le système. Enfin, le reste des paramètres (τ , π_m , π_r) n'ont que peu de l'influence lors du déclenchement du système de couloirs de bus dynamiques.

Tableau 2.3 : Synthèse de l'influence des différents paramètres.

Paramètres		Pas	Q_m	C_m	TT_{vl}/TT_{bus}
Accélération (a)		0.75 m/s ²	+++++	+	+++++
Coefficient de relaxation (ε)	Borne minimum	0.55 m/s	+	++	+++
	Borne maximum	3 m/s	+	+++	+++
Longueur de la voie d'insertion (l_d)		40 m	+	0	0
Temps de changement de voie (τ)		1 s	0	faible	0
Pi rabattement (π_r)		1	0	0	0
Pi mandatory_alpha (π_m)		0.1	0	0	0
Fréquence des bus (h)		1 cycle		++++	

En effet, le principal inconvénient de cette approche est que les interactions entre les paramètres ne peuvent pas être détectées, car elle nécessite que les entrées puissent être modifiées simultanément. En outre, cette approche se rapporte à la famille des techniques d'analyse de « sensibilité locale » et est utilisée pour obtenir des informations locales sur le comportement du modèle autour d'un point plutôt que d'explorer l'espace d'entrée. Par conséquent, il ne peut pas être considéré comme une bonne pratique. Cependant, on l'a choisi pour sa simplicité et sa parcimonie dans un premier temps. Une analyse complète et systématique est détaillée dans la dernière section de ce chapitre.

2.4 Analyse de sensibilité globale

Cette section présente l'étude de sensibilité globale d'un modèle de déclenchement du couloir de bus dynamique. Deux indices de sensibilité sont estimés : l'indice de sensibilité de premier ordre et l'indice de sensibilité totale. Le principe de l'étude de sensibilité globale est d'étudier la contribution relative des entrées à la variance de l'indicateur de sortie considéré. Grâce à l'augmentation de la capacité des ordinateurs, le modèle complexe du déclenchement du couloir de bus dynamique peut être reproduit par la plateforme SymuVia. Il est important d'analyser ce modèle pour comprendre comment il fonctionne, et en particulier ce qui influe sur sa capacité à reproduire les phénomènes physiques.

Malheureusement, les techniques les plus sophistiquées et les plus récentes sont très peu utilisées [Saltelli et al., 2008]. En effet, même avec les stratégies d'échantillonnage les plus sophistiquées, l'exploration de l'espace d'entrée demandée par n'importe quelle méthode de l'étude de sensibilité globale nécessite de nombreuses exécutions de simulations. Lorsque le

modèle est coûteux en calcul, ce qui est assez commun dans les applications, l'étude de sensibilité devient rapidement irréalisable. Pour traiter cette question, certaines études de ces dernières années ont fait usage des méta-modèles, qui fournissent des émulateurs peu coûteux des modèles informatiques complexes et de grandes tailles [Volkova et al., 2008; Storlie et al., 2009; Saltelli et al., 2010]. Le coût de calcul informatique de l'estimation d'un émulateur dépend généralement du nombre d'entrées, mais cette dépendance est beaucoup plus faible que pour les modèles initiaux.

[Ciuffo et al., 2011] ont récemment adopté un méta-modèle pour vérifier l'efficacité des procédures d'étalonnage des modèles de trafic. Dans le domaine de la simulation de trafic, en raison du temps important nécessaire pour l'étude de sensibilité globale en utilisant le modèle de simulation, [Ciuffo et al., 2013] ont proposés un processus pour étudier la sensibilité globale du modèle de trafic à l'aide d'un méta-modèle. La méthodologie proposée a consisté à comparer les modèles de simulation et les méta-modèles associés par des techniques d'analyse de sensibilité basée sur la variance pour cinq modèles différents de la route. Les résultats confirment la puissance de la méthodologie proposée et élargissent ainsi le champ d'application des techniques d'analyse de sensibilité globale aux modèles complexes de simulation du trafic. Les questions importantes qui se posent lors de l'estimation d'un méta-modèle ont été étudiées et commentées dans l'application spécifique du modèle de simulation. Ainsi, se pose le choix d'une stratégie d'échantillonnage appropriée à une description optimale de l'espace d'entrée, ainsi que d'une classe de méta-modèles capables de reproduire la relation entre l'entrée et la sortie de manière robuste et fiable. Dans ce but, la séquence de Sobol utilisant des nombres quasi-aléatoires [Sobol, 1976] et le méta-modèle basé sur le processus Gaussien ont été utilisés pour calculer l'indice de sensibilité de premier ordre et l'indice de sensibilité total. Il a été prouvé que cette séquence est celle dont la divergence est la plus faible.

Par conséquent, dans cette section, nous allons tester la possibilité d'effectuer une analyse de sensibilité non pas directement réalisée par le modèle du déclenchement du couloir de bus dynamique constitué par SymuVia, mais à l'aide de son méta-modèle associé. La séquence de Sobol utilisant des nombres quasi-aléatoires [Sobol, 1976] et le méta-modèle basé sur les principes de [Kleijnen, 2008; Kleijnen, 2009] vont être utilisés pour l'évaluation des indices de sensibilités basés sur la variance. Le méta-modèle proposé sera validée par $R = 2^9$ simulations de SymuVia, et sa sensibilité sera évaluée par $N = 2^{15}$ combinaisons de l'entrée du méta-modèle. Quatre indicateurs de sortie seront étudiés. Les estimateurs statistiques de l'étude de sensibilité (l'indice de sensibilité de premier ordre et l'indice de sensibilité total) seront évalués. À part les paramètres du trafic, un paramètre spécial du déclenchement du couloir de bus dynamique, la longueur de la voie d'insertion du déclenchement du couloir de bus dynamique en amont du premier feu (l_d), sera testé.

2.4.1 Méthodologie de GSA par un méta-modèle

Le but de cette sous-section est de présenter la méthodologie pour réaliser une analyse de sensibilité d'un modèle de simulation du couloir de bus dynamique en utilisant des techniques basées sur la variance par un méta-modèle. Celui-ci est estimé à partir d'un échantillon des évaluations relativement petit. Nous présentons dans un premier temps la méthode de l'étude de sensibilité globale basée sur la variance et la méthode d'estimation des indices de sensibilité de type quasi Monte-Carlo. Ensuite, le processus d'évaluation de sensibilité globale par un méta-modèle et la méthode d'estimation d'un méta-modèle basée sur les principes de Kriging est introduit.

2.4.1.a Méthodologie de GSA

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour analyser la sensibilité globale d'un modèle. Elles peuvent être classées entre [Punzo et Ciuffo, 2011] : (i) les tracés des points entrées/sorties ; (ii) les dérivés Sigma-normalisés ; (iii) le coefficient normalisé de régression ; (iv) les effets élémentaires ; (v) la modélisation du méta-modèle ; (vi) le filtrage de Monte-Carlo ; et (vii) les techniques basées sur la variance. Dans cette étude, nous nous intéressons exclusivement à cette dernière classe de méthode, qui consiste à déterminer la part de variance de la sortie due à la variance de chaque entrée (ou groupe des entrées).

Les méthodes basées sur la variance pour l'étude de sensibilité ont d'abord été utilisées par [Cukier et al., 1973], puis généralisées par Sobol pour fournir un concept d'implémentation par la méthode de Monte-Carlo. La méthode de l'étude de sensibilité globale basée sur la variance par la décomposition de Sobol a été choisie dans cette étude. Cette méthode considérait comme l'une des techniques d'analyse de sensibilité globale les plus efficaces et récentes. La formulation originale de la méthode provient de [Sobol, 1993; Sobol, 2001], qui fournissent la dérivation analytique et l'implémentation basée sur quasi Monte-Carlo. Le dernier réglage pour sa mise en œuvre pratique est dû à [Saltelli et al., 2010].

Estimateurs statistiques de GSA : indices de sensibilité basés sur la variance

Considérons un modèle mathématique, formé d'un ensemble de variables d'entrée, d'une fonction déterministe, et d'un ensemble de variables de sortie (ou réponses). Ce modèle s'écrit sous la forme suivante :

$$Y = f(Z_1, Z_2, \dots, Z_r) \quad [2. 4]$$

où Y est un scalaire. Nous voulons voir ce qui se passe à l'incertitude de Y , lorsqu'une des

variables d'entrée Z_i est fixée à une valeur spécifique z_i^* . La variance du résultat de Y , que nous appelons la variance conditionnelle, sera $V_{Z_{\sim i}}(Y|Z_i = z_i^*)$, où le symbolisme $Z_{\sim i}$ signifie que nous envisageons la variance à traverser toutes les variables, sauf le i -ème. On peut prévoir que plus de l'influence de la variable Z_i est grande, plus la variance conditionnelle est inférieure à la variance totale. La variance conditionnelle peut alors être considérée comme un indice de sensibilité pour Z_i . Le problème de cette formulation est que l'indice de sensibilité dépend de la valeur spécifique z_i^* . On considère alors la moyenne de cette mesure sur l'ensemble des points possibles z_i^* . Un effet de premier ordre basé sur la variance pour un paramètre générique Z_i peut s'écrire comme :

$$V_{Z_i}(E_{Z_{\sim i}}(Y|Z_i)) \quad [2. 5]$$

où Z_i est le i -ème paramètre et $Z_{\sim i}$ est la matrice de tous les paramètres excepté Z_i . En outre, il est connu que :

$$V(Y) = E_{Z_i} \left(V_{Z_{\sim i}}(Y|Z_i) \right) + V_{Z_i}(E_{Z_{\sim i}}(Y|Z_i)) \quad [2. 6]$$

L'équation [2. 6] montre que si un paramètre Z_i est important, alors $E_{Z_i} \left(V_{Z_{\sim i}}(Y|Z_i) \right)$ doit être petit. Cela signifie que plus $V_{Z_i}(E_{Z_{\sim i}}(Y|Z_i))$ se rapproche de la variance inconditionnelle $V(Y)$ plus l'influence de Z_i est forte.

Ainsi, nous pouvons définir l'indice de sensibilité de premier ordre de Z_i par rapport à Y comme :

$$S_i = (V_{Z_i}(E_{Z_{\sim i}}(Y|Z_i)))/V(Y) \quad [2. 7]$$

Les indices de sensibilité de l'équation [2. 7] peuvent être calculés pour chaque paramètre et pour toute la combinaison de chaque paramètre. L'indice de sensibilité de premier ordre est une mesure très importante pour comprendre combien une entrée de modèle peut réduire la variance globale des résultats. À partir des équations [2. 6] et [2. 7], nous avons $S_i \leq 1$. On considérera qu'un modèle est additif si :

$$\sum_{i=1}^r S_i = 1 \quad [2. 8]$$

Dans ce cas, la variance conditionnelle du modèle peut être la somme de l'effet de premier ordre de chaque variable. Habituellement, les modèles sont non-additifs, ce qui signifie que la combinaison conjointe de certaines variables peut être responsable d'une certaine part de la variance inconditionnelle. Dans ce cas, une valeur faible de l'indice de sensibilité de premier ordre signifie que la variable correspondant a peu d'effet sur la variance de la sortie. En effet, elle pourrait contribuer considérablement à la variance totale de la sortie par les moyennes de ses combinaisons avec les autres variables. En utilisant la décomposition

ANOVN-HDMR (Analysis of Variance-High Dimensional Model Representation) développée par [Sobol, 1993], il est possible de dire que l'analyse complète d'un modèle de r variables pour tous les éléments est découverte par l'équation suivante :

$$\sum_{i=1}^r S_i + \sum_{i=1}^r \sum_{j>1} S_{i,j} + \sum_{i=1}^r \sum_{j>1} \sum_{l>1} S_{i,j,l} + \dots + S_{1,2,3,\dots,r} = 1 \quad [2.9]$$

Cependant, une telle analyse nécessiterait de nombreuses évaluations du modèle. Afin de réduire les efforts requis, un indicateur synthétique peut être couplé avec l'indice de sensibilité de premier ordre est l'indice de sensibilité total défini de la manière suivante :

$$S_{T_i} = 1 - V_{Z_{\sim i}}(E_{Z_i}(Y|Z_i))/V(Y) = E_{Z_{\sim i}}(V_{Z_i}(Y|Z_{\sim i}))/V(Y) \quad [2.10]$$

L'indice de sensibilité total des paramètres d'entrée i donne la somme de tous les effets (interactions) du paramètre Z_i de premier ordre et des ordres supérieurs. Lorsque l'indice total est $S_{T_i} = 0$, le i -ème paramètre peut être fixé sans affecter la variance des sorties. Si $S_{T_i} \cong 0$, l'approximation fait dépendre de la valeur de S_{T_i} [Sobol et al., 2007], alors que $\sum_i^r S_{T_i} \leq 1$ ou $\sum_i^r S_{T_i} \geq 1$, les deux étant égaux à un seulement pour les modèles additifs.

Estimation de type quasi Monte-Carlo de GSA : la méthode basée sur la variance

Les calculs des indices de sensibilité basés sur la variance présentés dans les équations [2.7] et [2.10] ont fait l'objet de recherches au cours des dernières décennies. Différents approches et stratégies peuvent donner des résultats avec différentes précisions et efficacités. Ces calculs peuvent être effectués dans un cadre de Monte Carlo. L'approche adoptée dans nos travaux est l'approche quasi Monte-Carlo, spécifié dans [Saltelli et al., 2008; Saltelli et al., 2010]. Cette approche est résumée dans cette sous-section.

Deux matrices A et B de nombres quasi-aléatoires sont générés par la séquence $LP\tau$ de Sobol [Sobol, 1976] :

$$A = \begin{bmatrix} Z_1^{(1)} & Z_2^{(1)} & \dots & Z_r^{(1)} \\ Z_1^{(2)} & Z_2^{(2)} & \dots & Z_r^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ Z_1^{(N)} & Z_2^{(N)} & \dots & Z_r^{(N)} \end{bmatrix}_{(N \times r)} \quad [2.11]$$

$$B = \begin{bmatrix} Z_{r+1}^{(1)} & Z_{r+2}^{(1)} & \dots & Z_{2r}^{(1)} \\ Z_{r+1}^{(2)} & Z_{r+2}^{(2)} & \dots & Z_{2r}^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ Z_{r+1}^{(N)} & Z_{r+2}^{(N)} & \dots & Z_{2r}^{(N)} \end{bmatrix}_{(N \times r)} \quad [2.12]$$

Ces deux matrices sont utilisées comme les variables d'entrée du modèle [2. 4].

Un ensemble de r matrices C est obtenu par assemblage des r matrices qui sont égales à la matrice A excepte la i -ème colonne qui est prise celle de la matrice B , où i varie de 1 à r parmi les r matrices. La i -ème matrice C est C_i :

$$C_i = \begin{bmatrix} Z_1^{(1)} & Z_2^{(1)} & \dots & Z_{r+i}^{(1)} & \dots & Z_r^{(1)} \\ Z_1^{(2)} & Z_2^{(2)} & \dots & Z_{r+i}^{(2)} & \dots & Z_r^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ Z_1^{(N)} & Z_2^{(N)} & \dots & Z_{r+i}^{(N)} & \dots & Z_r^{(N)} \end{bmatrix}_{(N \times r)}, \text{ avec } i = 1 \dots r \quad [2. 13]$$

Le modèle est évalué pour toutes les $[N \cdot (r + 2)]$ combinaisons des variables d'entrée, telles que les matrices A , B et C . Les vecteurs de la sortie $y_A = f(A)$, $y_B = f(B)$ et $\{y_{C_i} = f(C_i) \mid i = 1 \dots r\}$ sont alors produits. Ces vecteurs sont suffisants pour l'évaluation de l'ensemble des indices de sensibilité de premier ordre et des indices de sensibilité totale. Pour cette raison, l'application de cette technique pour les méthodes basées sur la variance demande $[N \cdot (r + 2)]$ évaluations des modèles. Les indices de sensibilité peuvent ensuite être évalués en utilisant les formulations suivantes :

$$S_i = \left[\frac{\sum_{j=1}^N y_B^{(j)} (y_{C_i}^{(j)} - y_A^{(j)})}{N} \right] / \left[\frac{\sum_{j=1}^N (y_{A+B}^{(j)})^2}{2N} - \left(\frac{\sum_{j=1}^N y_{A+B}^{(j)}}{2N} \right)^2 \right] \quad [2. 14]$$

$$S_{Ti} = \left[\frac{\sum_{j=1}^N (y_A^{(j)} - y_{C_i}^{(j)})}{N} \right] / \left[\frac{\sum_{j=1}^N (y_{A+B}^{(j)})^2}{2N} - \left(\frac{\sum_{j=1}^N y_{A+B}^{(j)}}{2N} \right)^2 \right] \quad [2. 15]$$

Puisque N varie généralement de quelques centaines à plusieurs milliers, le nombre d'évaluations demandé par cette approche n'est pas négligeable, en particulier pour les modèles complexes et coûteux. Comme indiqué précédemment, le calcul des indices de sensibilité à partir des équations [11, 12] dépend du choix de la taille du nombre de Monte-Carlo (N). Il n'y a pas de façon universelle pour ce choix. Une stratégie possible consiste à évaluer les indices par chaque \hat{N} dans l'intervalle $[1, N]$. Il faut que N un nombre 'suffisamment' grand pour avoir les résultats stables. Ensuite, le tracé des indices de sensibilité en fonction de \hat{N} permet de reconnaître s'ils ont atteint une valeur stable ou non. Une valeur stable, c'est une valeur qui ne dépend plus de N . Tant que la valeur n'est pas stable, il est nécessaire d'augmenter encore N . Pour cette raison, les résultats de l'étude de sensibilité seront affichés sous cette forme graphique. Afin d'évaluer plus précisément si les indices calculés pour un échantillon N donné sont suffisamment stables, on peut calculer leurs intervalles de confiance. Ceci peut être facilement réalisé par un Bootstrap paramétrique [Saltelli et al., 2008]. Si l'intervalle de confiance est suffisamment petit, alors le nombre d'évaluations du modèle peut être considéré comme suffisant.

Dans notre étude de sensibilité du modèle de déclenchement de couloir de bus dynamique, une simulation du modèle nécessite environ de 17 minutes, et l'évaluation des 100 échantillons de modèle nécessite environ 14 jours. Toutefois, l'étude de sensibilité a besoin d'un nombre N toujours élevé. Ainsi, l'application de cette technique pour l'étude de sensibilité du déclenchement du couloir de bus dynamique devient infaisable, car pour avoir un résultat stable, notre étude peut avoir besoin de plusieurs milliers des évaluations, soit plus de deux ans de simulation. On pourrait se demander si l'utilisation d'un substitut (un méta-modèle) à la place du modèle de simulation pour réaliser une analyse de sensibilité basée sur la variance pourrait représenter un bon compromis entre la précision des résultats et la parcimonie du calcul par l'ordinateur. Bien sûr, la question est liée à la qualité du méta-modèle et à sa procédure d'estimation. Les sections suivantes traiteront de ces questions.

2.4.1.b Méthodologie du méta-modèle

Le but de cette sous-section est de présenter la méthodologie pour réaliser une analyse de sensibilité d'un modèle de simulation du couloir de bus dynamique en utilisant des techniques basées sur la variance par un méta-modèle. Celui-ci est estimé à partir d'un échantillon relativement petit des évaluations du modèle de simulation. Nous présentons dans un premier temps la méthode de l'étude de sensibilité globale basée sur la variance et la méthode d'estimation des indices de sensibilité de type quasi Monte-Carlo. Ensuite, le processus d'évaluation de sensibilité globale par un méta-modèle et la méthode d'estimation du méta-modèle (basée sur les principes de Kriging) sont introduits.

Processus de GSA par un méta-modèle

Nous constituons le méta-modèle par les principes de Kriging de la géo-statistique en tenant compte de la corrélation entre des échantillons différents (réels et provenant d'un modèle dérivé) en fonction de la distance entre les variables d'entrée [Sacks et al., 1989; Iooss, 2009]. De nombreuses études ont montré que ce modèle d'interpolation fournit un puissant cadre statistique pour calculer un prédicteur efficace de la réponse du modèle [Santner et al., 2003; Marrel et al., 2008], y compris dans le cas des modèles de simulation de trafic [Ciuffo et al., 2011]. Le choix de la fonction de corrélation doit être motivé par le phénomène sous-jacent. Cependant, cette considération générale doit être vérifiée cas par cas, comme tout modèle de simulation peut cacher des particularités qui ne seront pas prises en compte par cette fonction. Pour cela, plusieurs stratégies peuvent être adoptées pour estimer la « meilleure » et la « plus efficace » substitution au modèle de simulation. Pour plus de détails, le lecteur intéressé pourra se référer à [Kleijnen, 2008; Iooss, 2009].

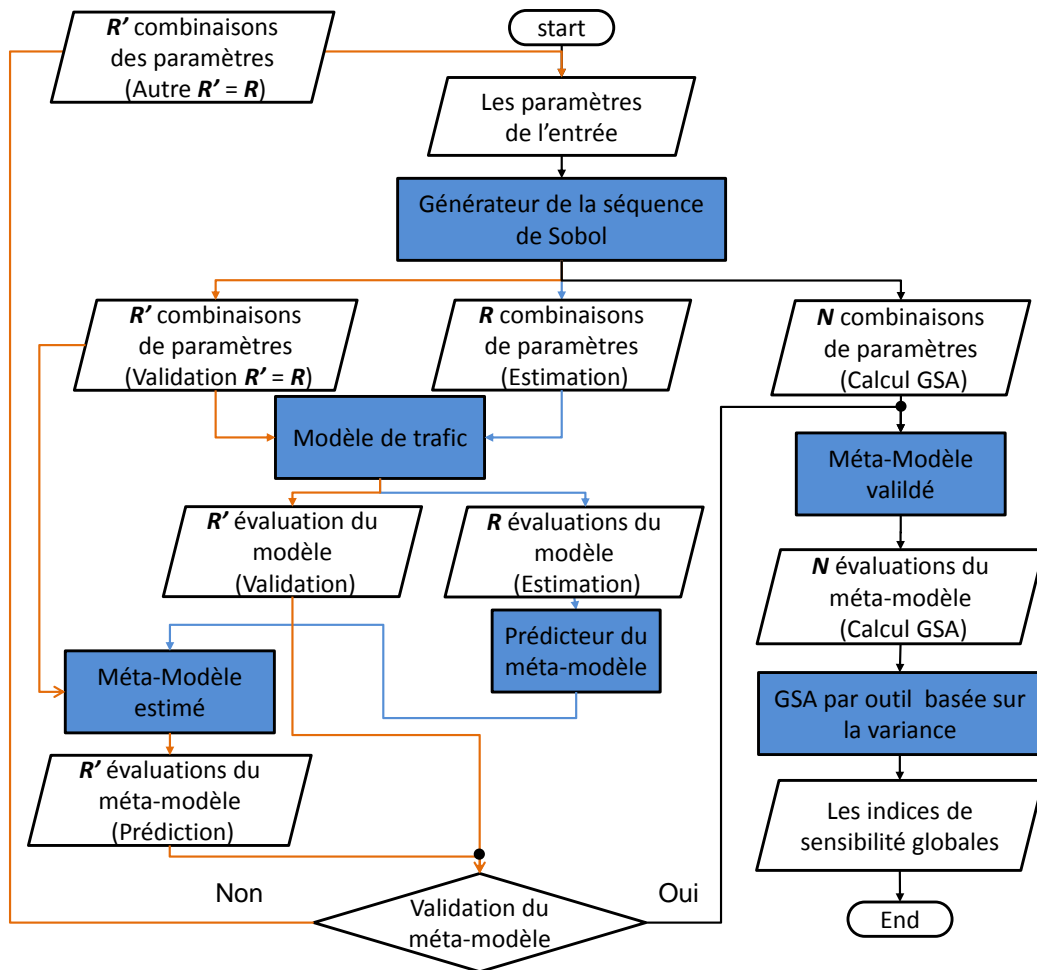


Figure 2. 14 : Processus de GSA par Méta-modèle.

Pour les études de simulation de trafic, [Ciuffo et al., 2013] ont adopté une approche plus simpliste. La méthodologie proposée est présentée schématiquement à la Figure 2. 14. Tout d'abord, les nombres quasi-aléatoires d'une séquence faiblement divergente sont considérés. Comme nous l'avons déjà mentionné précédemment, la faible divergence assure une bonne convergence de l'espace d'entrée. Chacune de ces séquences a un certain nombre récursif R des générations pour lesquelles la divergence est minimale. On commence par émuler le modèle sur les $2R$ premiers éléments d'une séquence. Avec les résultats des premières R combinaisons des entrées, une approximation du processus Gaussien est estimée. Ensuite, la qualité du méta-modèle est évaluée en comparant les sorties du modèle par les secondes R combinaisons des entrées (les R' combinaisons) avec les prédictions du méta-modèle des mêmes combinaisons R' . Si les convergences entre les résultats des modèles et les prévisions du méta-modèle correspondent à un degré suffisant, alors le méta-modèle peut être utilisé à la place du modèle de simulation. Sinon, ce processus doit être répété (une autre série de $R'=R$

combinaisons des évaluations sont effectuées) jusqu'à ce que le critère de la qualité établi soit respecté.

Une variable importante à définir est le critère de la qualité. Plus l'on souhaite qu'un méta-modèle soit proche du modèle, plus le nombre d'évaluations du modèle doit être important. La définition du critère est donc très importante et celui-ci est strictement lié à l'utilisation du méta-modèle. Dans le cas d'utilisation d'un méta-modèle pour l'étude de sensibilité d'un modèle numérique coûteux, il n'est pas vraiment nécessaire d'avoir une cohérence parfaite entre les évaluations du modèle et les prédictions du méta-modèle. Mais il est important que le méta-modèle soit capable de refléter la façon dont une entrée affecte les sorties du modèle. Dans l'expérience, [Ciuffo et al., 2013] ont prouvé que même avec un méta-modèle imparfait, l'estimation des indices de sensibilité s'est avérée être déjà satisfaisante.

Modélisation et prédiction du méta-modèle de Kriging

Bien que c'est nouveau dans le domaine du transport, les méta-modèles de Kriging sont devenus une méthode mathématique populaire dans d'autres domaines. Pour cette raison, seule une partie des éléments est fournie ci-dessous pour rendre le lecteur plus familier avec la méthode, et les détails sont disponibles dans les livres [Kleijnen, 2008; Stein, 1999].

Les méta-modèles de Kriging ont été développés tout d'abord en géo-statistique par Krige, même si la formulation mathématique n'a été présentée que quelques années plus tard par [Matheron, 1963]. Le type le plus simple de Kriging, le Kriging ordinaire, est généralement suffisant dans la pratique [Kleijnen, 2008; Kleijnen, 2009] et pris en compte dans notre travail. Il suppose que la sortie d'un modèle de la simulation $w(d)$ peut être estimée par :

$$w(d) = \{\mu + \delta(d) \mid d = [Z_1, Z_1, \dots, Z_r]\} \quad [2. 16]$$

Où : d : le vecteur des variables du modèle ;

μ : la sortie moyenne de la simulation en moyenne sur le domaine de l'ensemble des variables du modèle (ou au moins sur les points expérimentaux disponibles) ;

$\delta(d)$: un procédé de covariance stationnaire de la moyenne nulle.

Il est intéressant de savoir que, μ est une valeur constante dans le Kriging ordinaire, et il s'agit d'un modèle de régression dans le Kriging Universel. Dans le cas d'un modèle stochastique, on a vu que l'équation [2. 16] est mise en place lors que $w(d)$ est la moyenne des sorties de la simulation sur différentes répliques [Kleijnen, 2009].

La sortie par la prédiction de Kriging $y(d)$ pour une nouvelle combinaison des variables d est fournie par :

$$y(d) = \lambda(d, D)w(D) \quad [2. 17]$$

Où : D : la matrice de la combinaison des variables pour lesquelles la sortie de la simulation est connu ;

$\lambda(d, D)$: la matrice des pondérations pour la nouvelle combinaison estimée des variables d en utilisant les anciennes D .

Les valeurs de $\lambda(d, D)$ ne sont pas constantes, mais diminuent à mesure que la distance entre d et D augmente, c'est l'une des principales particularités de Kriging par rapport aux autres modèles de prédiction. Le choix des pondérations optimales est fait en utilisant le Meilleur Prédicteur Linéaire Non Bisaisé (Best Linear Unbiased Predictor : BLUP), ce qui minimise l'Erreur Quadratique Moyenne (Mean Squared Error) de l'indicateur dans l'équation [2. 17]. On peut prouver que la solution est :

$$\lambda_0 = \Gamma^{-1} \left[\gamma + I \frac{1 - I' \Gamma^{-1} \gamma}{I' \Gamma^{-1} I} \right] \quad [2. 18]$$

Où : I : le vecteur de n dimensions identiques (n est le nombre des combinaisons des variables dans l'ancienne D) ;

Γ : la matrice $n \times n$ semi-symétrique et positive avec les covariances des anciennes sorties $w(D)$ ($cov(w_i, w_j)$, avec $i, j = 1, \dots, n$) ;

γ : le vecteur de n dimensions avec les covariances entre les n anciennes sorties et la sorte de la combinaison des variables à prédire.

Enfin, il peut prouver que les équations [2. 16], [2. 17] et [2. 18] impliquent que :

$$y(d^*) = \hat{\mu} + \gamma(d^*)' \Gamma^{-1} (w - \hat{\mu} I) \quad [2. 19]$$

avec : $\hat{\mu} = (I' \Gamma^{-1} I)^{-1} I' \Gamma^{-1} w$.

Dans les applications de simulation, les éléments γ et Γ sont estimé en utilisant une fonction de corrélation, qui est le produit de k fonctions unidimensionnelles (k est le nombre des variables ou paramètres du modèle de simulation). Dans les applications de Kriging, une fonction populaire est la fonction corrélation de Gaussien, qui a été utilisée dans notre étude. Avec cela, les covariances sont calculées comme suit :

$$cov(w_i, w_j) = \prod_{g=1}^k \exp(-\theta_g (|d_{i,g} - d_{j,g}|)) \quad [2. 20]$$

Où : θ_g : un paramètre de la fonction de corrélation pour la variable g .

θ_g indique l'importance de la variable elle-même : plus θ_g est élevé, moins la variable g a de l'effet.

Afin de trouver le meilleur méta-modèle Kriging pour un modèle de simulation, il suffit donc d'estimer le vecteur de k dimensions : θ_g . Cette estimation est réalisée en utilisant un Estimateur de Maximum de Vraisemblance (Maximum Likelihood Estimator). Malheureusement, la maximisation sous contrainte demandée pour cette méthode n'est pas une solution simple [Kleijnen, 2009]. Pour atteindre le substitut du processus de Gaussien du modèle de la simulation de trafic, les Toolboxes Matlab DACE [Lophanev et al., 2002] ou ooDACE [ooDACE, 2013] peuvent être utilisées. Ces Toolboxes sont disponibles gratuitement. Dans la section suivante, un méta-modèle du déclenchement du couloir de bus dynamique est mis en œuvre en utilisant un Toolbox de Matlab. Une chose importante est de définir les valeurs initiales de 'theta'.

2.4.2 GSA du déclenchement du couloir de bus dynamique

Dans cette sous-section, les principaux éléments de la Figure 2. 14 sont présentés brièvement. Les estimateurs de sensibilité globale (l'indice de sensibilité de premier ordre et l'indice de sensibilité total) sont évalués pour les modèles du déclenchement du couloir de bus dynamique en considérant quatre indicateurs différents. À part les paramètres du trafic, un paramètre caractéristique du déclenchement du couloir de bus dynamique, la longueur d'insertion du déclenchement du couloir de bus dynamique en amont du premier feu (l_d), est également testé.

2.4.2.a Cas d'étude

Le scénario du couloir de bus dynamique de trois voies (Figure 2. 9b1 et b2) est analysé par l'étude de sensibilité globale. Concernant les indicateurs et les paramètres étudiés, nous avons pris les mêmes que l'étude de sensibilité locale. Les indicateurs sont le débit maximal observé Q_m , le débit moyen maximum entre deux passages de bus C_m et le temps de parcours moyen des véhicules TT_{vi} et des bus TT_{bus} . Les paramètres sont l'accélération bornée (a), le coefficient relaxation (ε), le tau (τ), la longueur de la voie d'insertion du déclenchement du BLIP (l_d), le pi rabattement (π_r), le pi mandatory_alpha (π_m) et le temps inter-bus (h).

Pour l'étude de sensibilité globale, les seuils des paramètres sont généralement adoptés. Ces seuils caractérisent les incertitudes dans les entrées. On doit donc chercher les espaces appropriés des paramètres, c'est-à-dire, une plage de variation assez serrée pour que

l'influence d'un paramètre sur les sorties soit strictement limitée. En effet, un trop grand espace impliquerait trop de l'incertitude pour faire des prédictions du modèle utilisables. Pour choisir cet espace, il est possible de s'appuyer sur des observations expérimentales, des arguments théoriques, les résultats des analyses inverses (par exemple, l'estimation des paramètres du modèle) ou des avis d'experts.

Donc, les différents paramètres à tester ainsi que leurs plages de variabilités sont alors été rapportés dans le Tableau 2. 4. Ces plages, qui sont l'entrée de l'analyse de sensibilité, sont appelées « distributions des paramètres de l'entrée » du processus de l'étude de sensibilité par méta-modèle (Figure 2. 14). Puisque aucune autre information n'est disponible, les différents paramètres doivent être distribués uniformément. En outre, la demande de trafic a été fixée à une valeur ne provoquant pas de saturation du trafic avec les valeurs de paramètres par défaut dans un scénario sans bus, mais une situation où les bus déclenchent comme des bouchons mobiles dans le cas des bus mêlant dans le trafic. La demande est aussi supposée d'être identique sur chaque voie. Une dernière remarque est qu'en raison du caractère aléatoire du modèle de changement de voie dans SymuVia, il est nécessaire d'étudier l'impact des répliques de simulation pour définir le nombre de répliques à effectuer. Il apparaît que ce nombre ne doit pas être inférieur à cinq pour donner une moyenne stable des sorties de la simulation.

Tableau 2. 4 : Plages des paramètres à testés dans l'étude de sensibilité globale.

Paramètre (abréviation)	Plage (Unité)	Type
Accélération (a)	[0:3] (m/s ²)	continu
Coefficient relaxation (ε)	[0:3] (m/s)	continu
Tau (τ)	[0:10] (m/s)	continu
Longueur de la voie d'insertion (l_d)	[20:180] (m)	entier
Pi rabattement (π_r)	[0:0.4] (sans unité)	continu
Pi mandatory_alpha (π_m)	[0:4] (sans unité)	continu
Fréquence de bus (h)	[1:5] * c (s)	entier

Dans notre étude, le méta-modèle Kriging a préalablement été estimé par un nombre de l'échantillon $N_{meta} = R = 2^9 = 512$ qui ont duré huit jours de simulation. Puisque le modèle contient sept paramètres d'entrée, l'estimation des indices de sensibilité nécessite $[N \cdot (7 + 2)]$ évaluations de méta-modèle associé. Les estimations des indices de sensibilité sont alors réalisées avec un pas de $\hat{N} = 2^8$ dans l'intervalle $[1, N]$. Comme indiqué précédemment, nous avons considéré des valeurs croissantes de N et vérifié a posteriori si ces valeurs étaient suffisamment élevées pour obtenir des indices stables. Les indices de sensibilité du méta-

modèle sont enfin calculés pour un nombre de Monte-Carlo $N = 2^7 \cdot \hat{N}$.

2.4.2.b Séquence quasi-aléatoire de Sobol

La séquence quasi-aléatoire de Sobol est utilisée. Cette séquence est habituellement appelée la séquence $LP\tau$. Elle a été initialement introduite en 1967 par Sobol I.M., et est considérée comme l'une des séquences les plus pertinentes dans l'implémentation de Monte-Carlo et dans l'évaluation des indices de sensibilité basés sur la variance [Saltelli et al., 2008]. [Homma et Saltelli, 1995] ont montré que l'utilisation des séquences $LP\tau$ de Sobol permettait une convergence plus rapide que la méthode Monte-Carlo basique et la méthode de l'hypercube latin. Fournir une description du principe de la séquence est au-delà de l'objectif de notre étude. Pour plus de d'informations, le lecteur pourra se référer à [Sobol, 1967; Sobol, 1976; Saltelli et al., 2008].

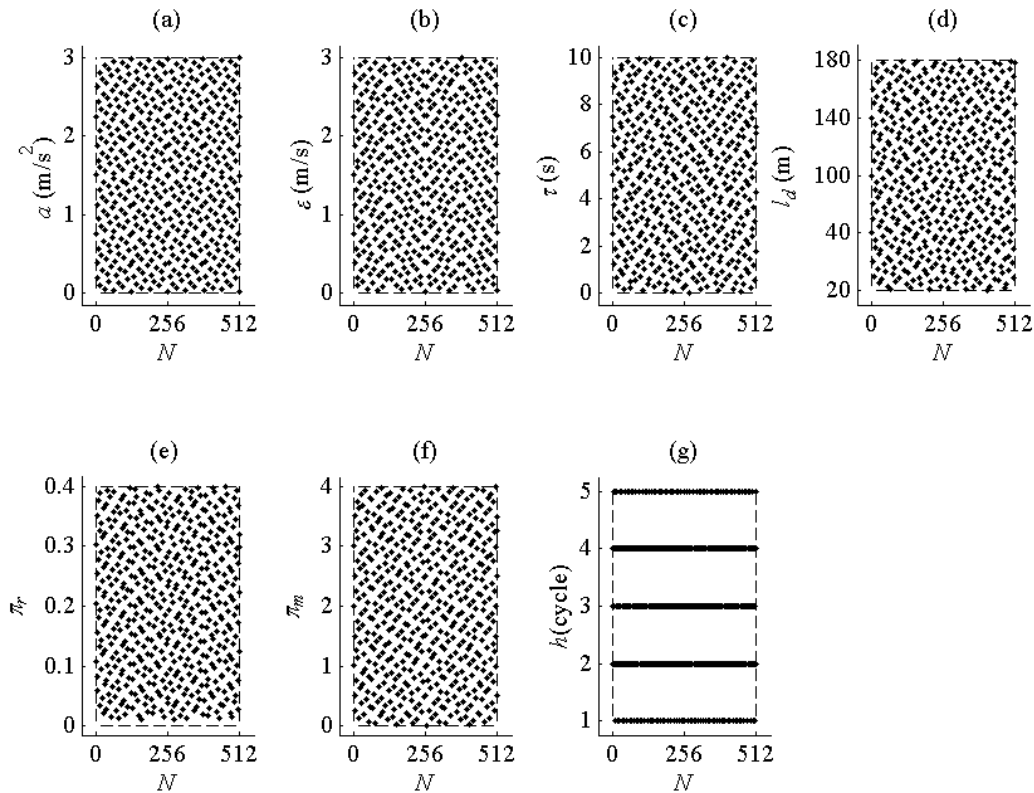


Figure 2. 15 : 2^9 échantillons de paramètres de la séquence quasi-aléatoire de Sobol.

L'implémentation utilisée pour le calcul des séquences quasi-aléatoires peut être trouvée dans [Centre, 2013]. Comme déjà mentionné, la divergence minimale de la séquence est

obtenue pour un nombre de points R égal à une puissance de deux. Pour cette raison, nous avons commencé à estimer le méta-modèle avec $R = 2^9 = 512$ combinaisons de l'entrée (la Figure 2. 15).

2.4.2.c Validation du méta-modèle du déclenchement du couloir de bus dynamique

Comme déjà souligné, différents critères peuvent être utilisés pour valider le méta-modèle estimé. Cela dépend également de l'application spécifique. Nous choisissons la méthode visuelle proposée par [Ciuffo et al., 2013] pour comparer visuellement les nuages des points tracés (des sorties en fonction des entrées) provenant du méta-modèle et du modèle dans le processus de la Figure 2. 14. En effet, les approches quantitatives [Iooss, 2009] ne représentent pas la façon la plus simple et correcte de valider le méta-modèle. La validation requiert que le méta-modèle reflète la relation entre l'entrée et la sortie et non pas qu'il soit capable de fournir une cohérence parfaite avec les sorties du modèle de simulation. En utilisant un échantillon de $R'=2^9$ combinaisons des paramètres, différent de celui utilisé pour estimer le méta-modèle, on peut valider le méta-modèle par la Figure 2. 16. Si les formes entre les résultats du modèle et les prédictions du méta-modèle correspondent, alors le méta-modèle peut être utilisé à la place du modèle de simulation. Sinon, ce processus est répété (une autre série de $R'=2^9$ combinaisons différentes des R premières combinaisons effectuées) jusqu'à ce que le critère de la qualité soit respecté.

La Figure 2. 16 nous montre la comparaison entre le méta-modèle et la simulation pour les quatre indicateurs testés par rapport aux sept paramètres considérés individuellement. La première colonne est le débit moyen observé (Q_m). La deuxième colonne est le temps de parcours moyen des véhicules (TT_{vl}). La troisième colonne est le temps de parcours moyen des bus (TT_{bus}). Et la dernière colonne est le débit maximal moyen entre deux passages de bus (C_m). Les points noirs sont les résultats de la simulation, et les croix rouges sont les résultats du méta-modèle du déclenchement du couloir de bus dynamique. Si l'on compare point par point, on peut facilement conclure que le méta-modèle ne peut pas rigoureusement reproduire le comportement du modèle. Cependant, d'après les images, nous pouvons facilement reconnaître les caractéristiques suivantes : i) les sorties répandues dans les mêmes plages pour le méta-modèle et le modèle sur chaque image, même si le modèle est plus oscillatoire ; ii) les rapports des distributions des points dans les nuages sont cohérents pour le méta-modèle et le modèle sur chaque image. À partir de ces caractéristiques communes, on peut conclure que les résultats de méta-modèle sont cohérents avec ceux du modèle. Par conséquent, le choix de cette méthode de validation est évident, et le méta-modèle de déclenchement du couloir de bus dynamique est validé. On peut alors l'utiliser pour l'étude de sensibilité globale.

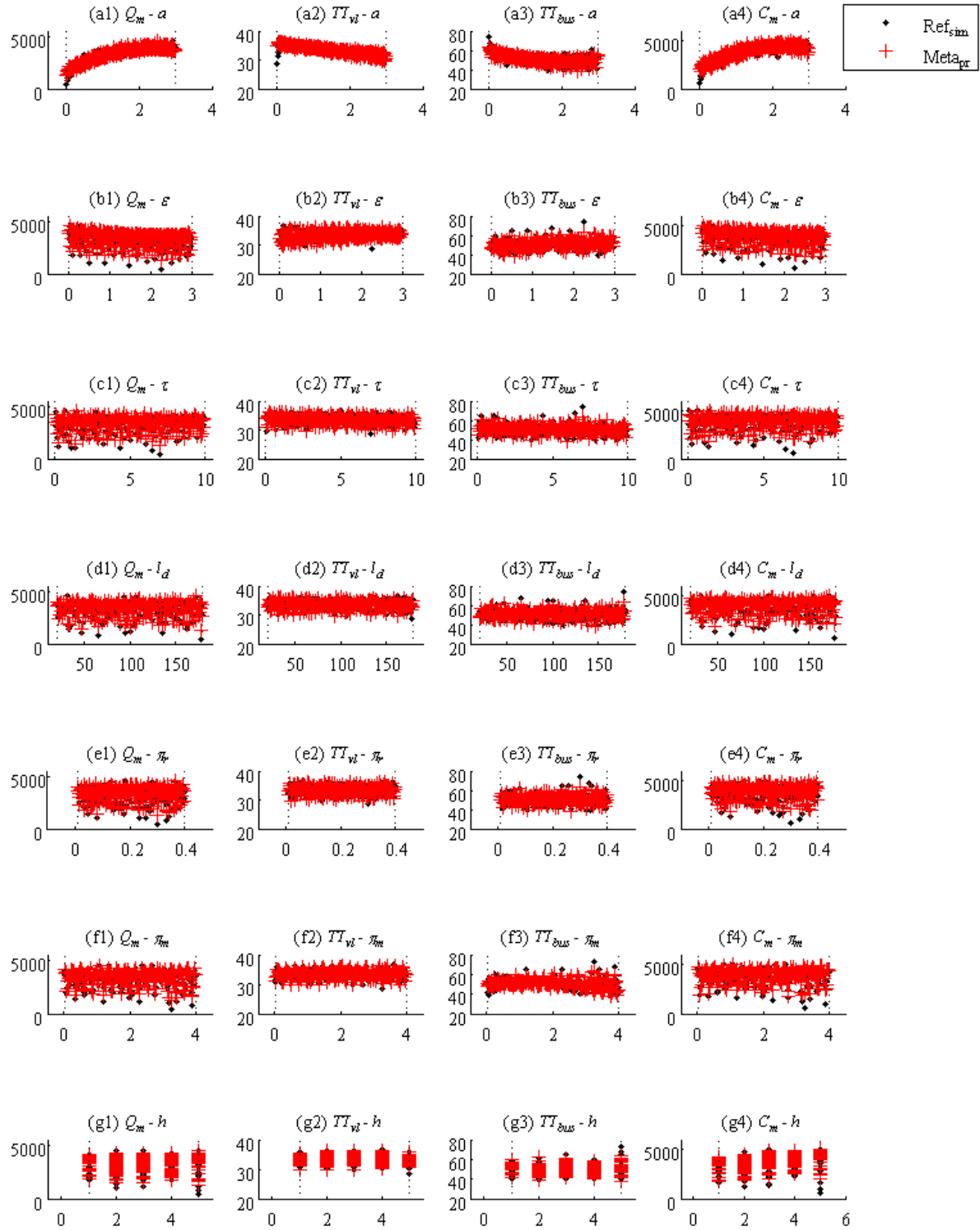


Figure 2. 16 : Validation de la prédiction du méta-modèle du déclenchement du couloir de bus dynamique.

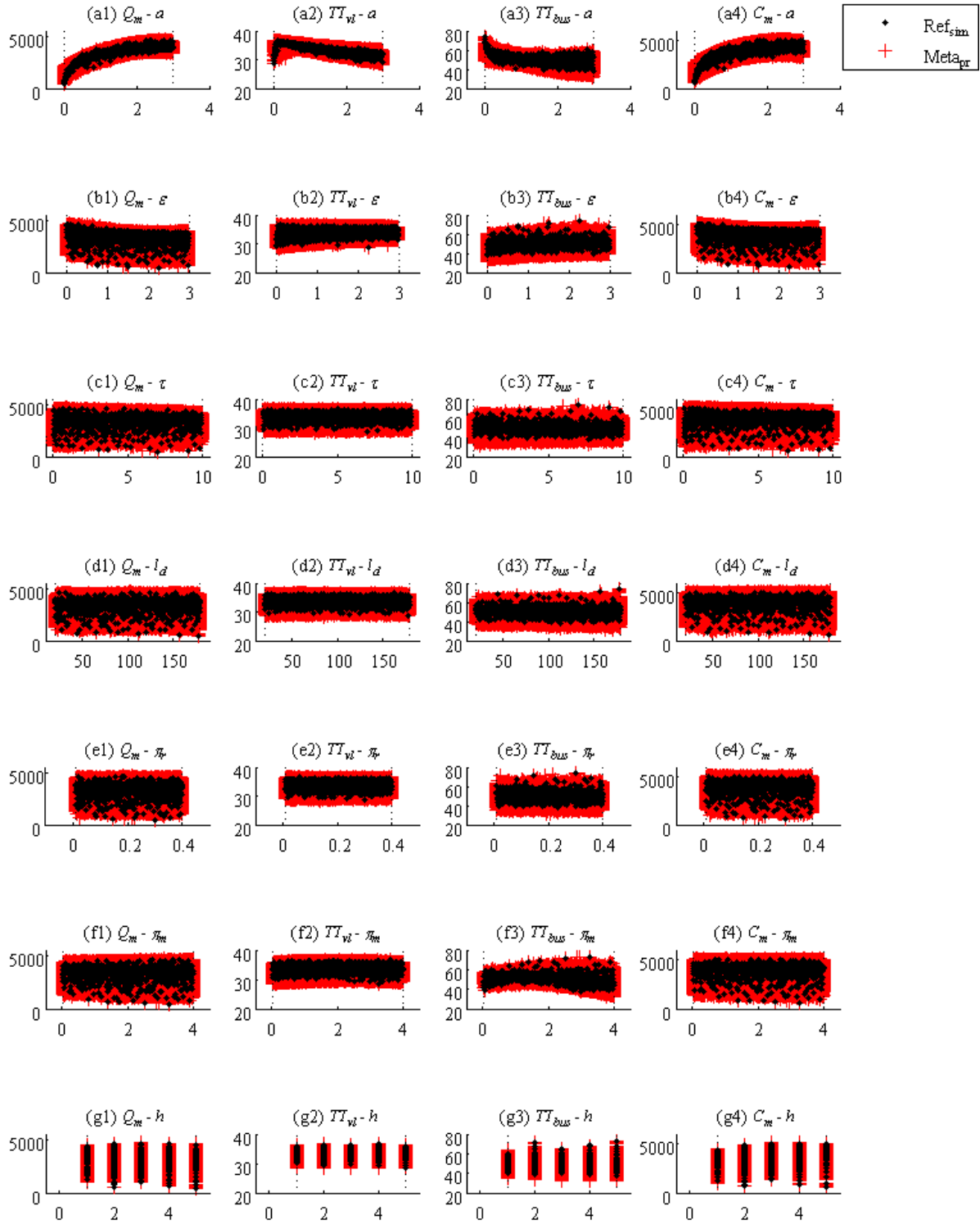


Figure 2.17 : Prédiction du méta-modèle pour l'étude de sensibilité globale.

2.4.2.d Influences globales des paramètres sur le déclenchement du couloir de bus dynamique

Dans cette sous-section, les résultats de l'étude de sensibilité du modèle sont présentés, en particulier les résultats des quatre indicateurs par rapport aux sept paramètres. Pour un nombre de Monte-Carlo $N = 2^{15} = 32\,768$, les sorties du méta-modèle sont représentées sur la Figure 2. 17. Les points noirs sont les résultats de la simulation, et les croix rouges sont les résultats du méta-modèle. On peut constater que les points manqués par le méta-modèle sur la Figure 2. 16 sont compensés quand on prend un échantillon plus gros.

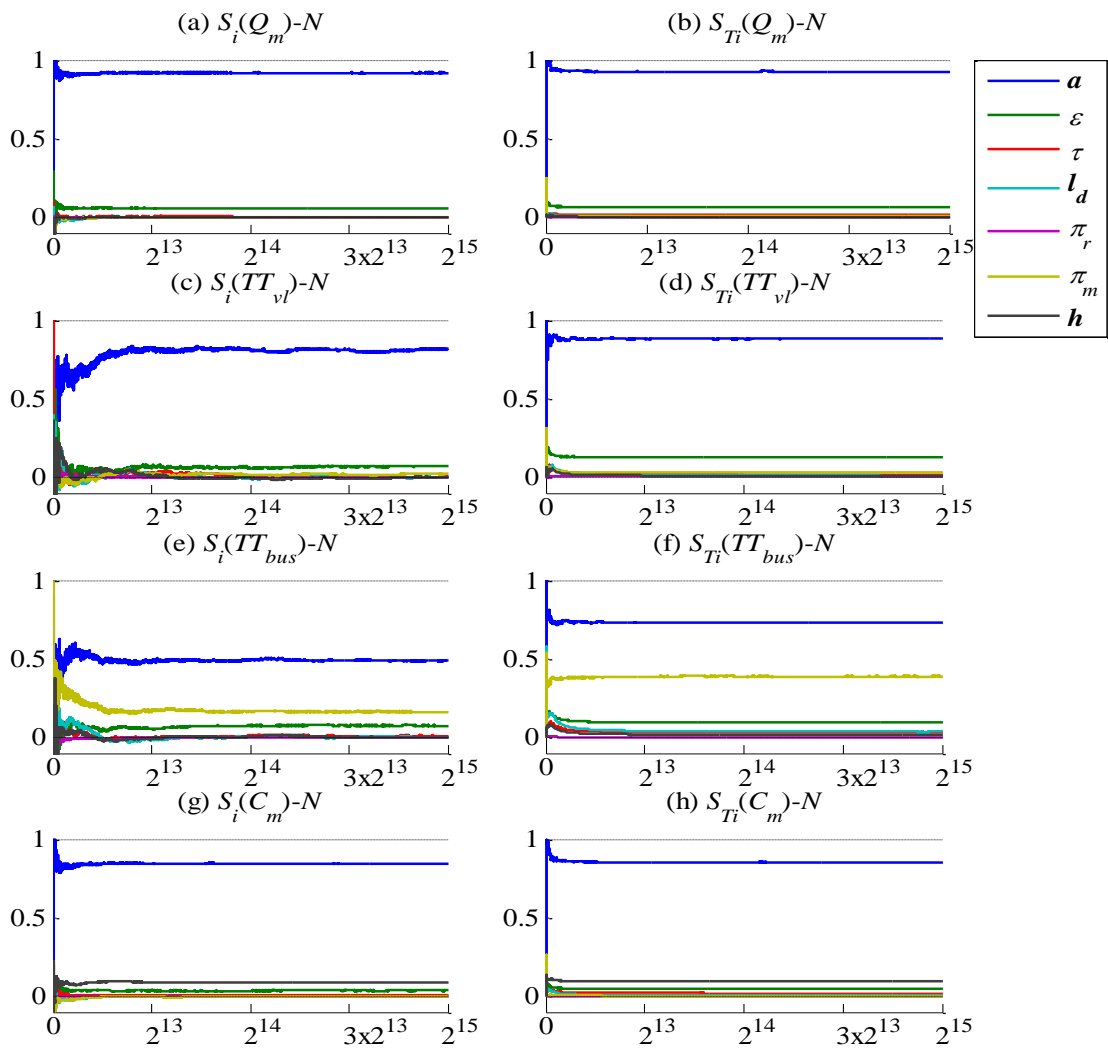


Figure 2. 18 : Évolutions des indices de sensibilités en fonctions du nombre de Monte-Carlo.

Ensuite, sur la Figure 2. 18, les résultats du méta-modèle du déclenchement du couloir de bus dynamique sont présentés. Ces résultats sont présentés à l'aide de l'indice de sensibilité de premier ordre et l'indice de sensibilité total : la colonne de gauche et la colonne de droite respectivement. Dans ce cas, les résultats sont assez stables pour un nombre N évaluations du méta-modèle supérieur à 2×10^4 . Par conséquent, $N = 2^{15}$ s'est avéré être suffisant pour que les indices soient stables.

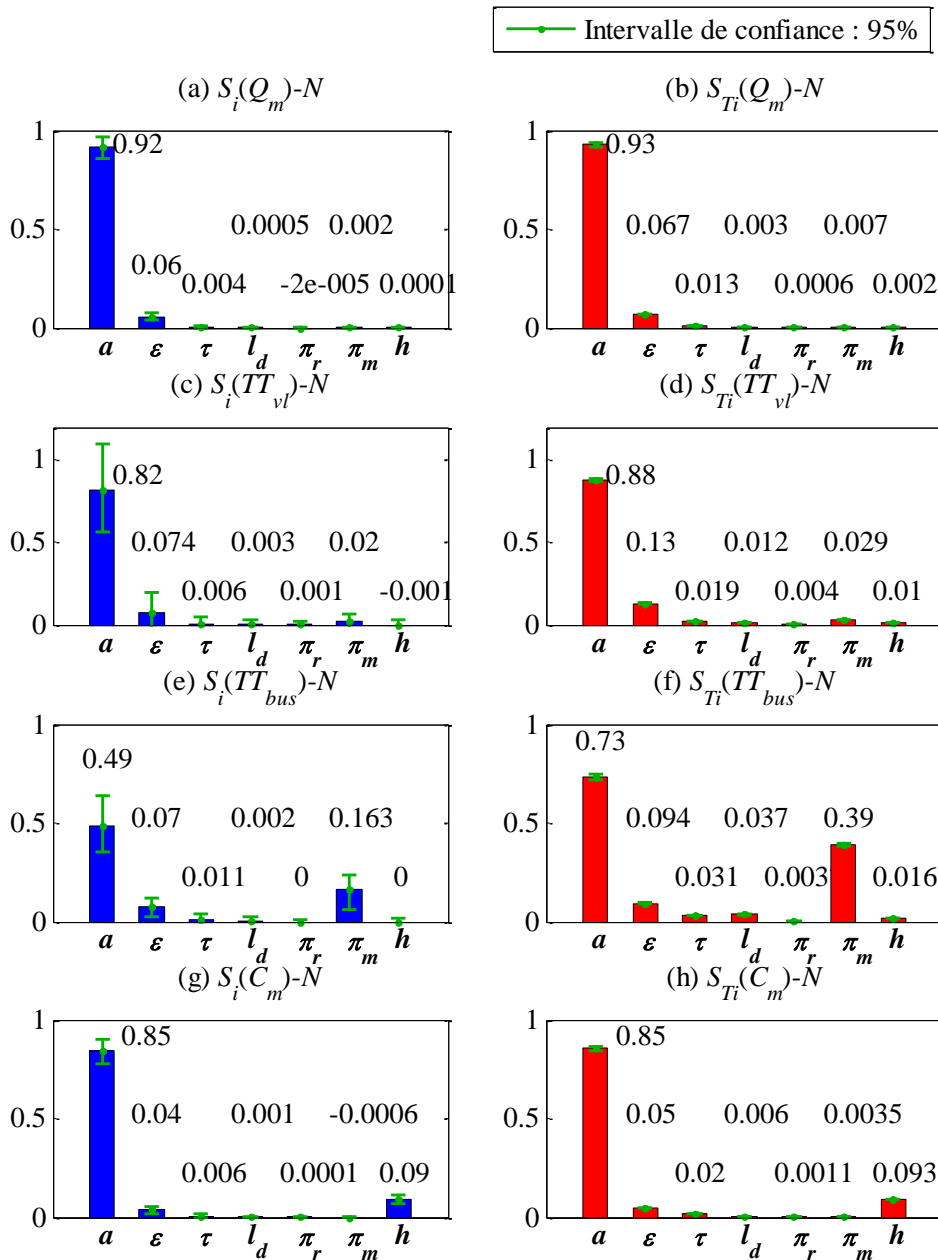


Figure 2. 19 : Indices de sensibilités et intervalles de confiances.

Enfin, la Figure 2. 19 présente les sorties dans un histogramme en indiquant les intervalles de confiance. La colonne de gauche est l'indice de sensibilité de premier ordre, et la colonne de droite est l'indice de sensibilité total. Il est intéressant de commenter les résultats des différentes analyses afin de comprendre l'influence relative des différents paramètres sur les sorties du modèle pour différents indicateurs. Les chiffres au-dessus de chaque barre des indices renseignent le lecteur sur la quantité de la variance que chaque paramètre représente (en propre et en combinaison avec tous les autres paramètres). Les intervalles de confiance de 95% pour les indicateurs de sensibilité globale sont également affichés par les courbes vertes verticales superposées aux barres. Le classement des indices de sensibilité du premier ordre pour chaque indicateur est proche de celui des indices de sensibilité total, même si des différences existent entre les indicateurs.

Le paramètre le plus influent est l'accélération (a) pour les deux indices de sensibilité des quatre indicateurs. Tous les autres paramètres ont des variances faibles, sauf pour le temps de parcours moyen des bus (TT_{bus}), la variance du Pi mandatory_alpha (π_m) est assez grande. Ce résultat est prévisible car l'accélération est connue pour avoir une forte influence sur la capacité du système de trafic notamment en présence de nombreux changements de voies. L'effet de l'accélération sur l'indice de sensibilité du premier ordre est très proche de celui sur l'indice de sensibilité total, sauf pour le temps de parcours moyen des bus (TT_{bus}). Ce rapprochement signifie que la variance expliquée par sa combinaison avec les autres paramètres est négligeable. Plus intéressant, l'accélération représente plus de 90% de la variance sur le débit observé moyen (Q_m). Cela signifie que le modèle est capable de prédire le débit moyen observé du déclenchement du couloir de bus dynamique avec une incertitude de moins de 10%, si l'on a une estimation correcte de l'accélération.

La longueur d'insertion du déclenchement du couloir de bus dynamique en amont du premier feu (l_d), a toujours une certaine part de la variance sur les quatre indicateurs pour la configuration du déclenchement du couloir de bus dynamique. Mais les valeurs des indices de sensibilités de ce paramètre sont assez petites. Il peut être considéré comme un paramètre qui n'a aucune influence sur le débit moyen observé (Q_m) et le débit maximal moyen entre deux passages de bus (C_m) : $\leq 1\%$; et peu d'influence sur les temps de parcours des bus (TT_{bus}) et des véhicules (TT_{vl}).

Comme prévu, la fréquence des bus (h) a la plus faible contribution à la variance sur le débit maximal moyen entre deux passages de bus (C_m) : environ 9% de la variance des sorties. Cela vient du fait que les autres indicateurs ne sont calculés que pendant un cycle de feu. Ceci doit être pris en compte lors de l'évaluation de l'incertitude dans les résultats. De plus, le coefficient de relaxation (ε) représente une partie importante de la variance pour les

quatre indicateurs. Enfin, pour les trois autres paramètres du modèle de simulation : le tau (τ) a une variance faible ; le Pi rabatement (π_r) n'affecte que très peu de la variance ; et le Pi mandatory_alpha (π_m) a une importante variance sur le temps de parcours moyen de bus. Cet effet est difficile à expliquer. Il semble cependant que ce paramètre influence la faculté des véhicules à libérer la voie de droite pour le bus et donc son temps de parcours. Ainsi, le Pi mandatory_alpha (π_m), généralement considéré comme constant dans la littérature, représente une grande partie de la variance sur le temps de parcours moyen des bus (TT_{bus}) et doit donc être calibré.

Pour finir, cette section a présenté l'étude de sensibilité du modèle de déclenchement du couloir de bus dynamique à l'aide des techniques basées sur la variance. Il est soutenu que l'application de l'étude de sensibilité est cruciale pour une bonne compréhension et une utilisation correcte du modèle, tout en reconnaissant que le principal obstacle à l'extension des techniques les plus sophistiquées est le nombre élevé de simulations qu'ils exigent habituellement. Pour cette raison, nous avons testé la possibilité d'effectuer une analyse de sensibilité non pas pour le modèle, mais par son approximation de méta-modèle. Les questions importantes qui se posent lors de l'estimation d'un méta-modèle ont été étudiées et commentées dans l'application spécifique au logiciel SymuVia. Parmi ces questions, il est important de choisir une stratégie d'échantillonnage appropriée basée sur les séquences des nombres à la divergence faible, ainsi que de choisir une classe de méta-modèles qui sont capables de reproduire la relation entre l'entrée et la sortie de manière robuste et fiable. La séquence de Sobol et le méta-modèle basé sur les principes de Kriging sont alors utilisés.

Le méta-modèle proposé a été validé par $R = 2^9$ simulations de SymuVia, et sa sensibilité évaluée par $N = 2^{15}$ combinaisons des entrées du méta-modèle. Quatre indicateurs enrichis sont étudiés. Les estimateurs des indices de sensibilité (l'indice de sensibilité de premier ordre et l'indice de sensibilité total) sont évalués pour les modèles de déclenchement du couloir de bus dynamique. À part les paramètres du trafic, la longueur d'insertion du déclenchement du couloir de bus dynamique en amont du premier feu (l_d), un paramètre caractéristique du déclenchement du couloir de bus dynamique est également testé. Il y a toujours une certaine part de la variance sur des quatre indicateurs liée à la configuration du déclenchement du couloir de bus dynamique. Les paramètres les plus influents sont l'accélération et le coefficient de relaxation pour les quatre indicateurs testés. Certains paramètres, qui sont généralement considérés comme constants dans la littérature, représentent une grande part de l'incertitude de la sortie et doivent donc être calibrés, par exemple le Pi mandatory_alpha (π_m). Toutes les variances des paramètres sur le modèle du déclenchement de BLIP pour les quatre différents indicateurs sont classifiées respectivement.

Pour vérifier les résultats du méta-modèle, on peut les comparer avec ceux du modèle de simulation comme dans l'article de [Ciuffo et al., 2013]. Pour réaliser une étude plus

approfondie et avoir plus de d'information, on peut élargir les plages des paramètres et répéter cette analyse. Cette méthodologie peut facilement être étendue à l'étude de sensibilité du couloir de bus dynamique à une échelle plus grande, par exemple la propagation du BLIP sur un boulevard urbain ou dans un quartier entier.

2.5 Conclusion

Ce second chapitre est donc dévolu à l'étude du déclenchement du système de couloirs de bus dynamiques. Cet aspect était jusqu'à présent délaissé par la littérature que ce soit d'une approche analytique ou expérimentale.

Après avoir introduit et formalisé un cas d'étude théorique, la phase de déclenchement est étudiée analytiquement. Les premiers résultats permettent à la fois d'évaluer la potentielle efficacité d'un couloir de bus dynamique. Il apparaît donc que, même si le déclenchement génère dans un premier temps des retards pour le bus, ces retards peuvent être très rapidement compensés, si le couloir de bus dynamique est mis en place sur plusieurs tronçons. L'approche analytique permet aussi de mettre en avant l'influence de la modélisation choisie. Il se trouve que lorsque le trafic est reproduit de manière précise, les débits observés sont plus faibles. Cela pousse donc à recourir à la simulation. En l'absence de données expérimentales, l'approche analytique fournit un gabarit concernant la dynamique à suivre par le simulateur.

Ainsi, la phase de déclenchement est ensuite étudiée en simulation. Cela permet de vérifier que le simulateur est cohérent avec la théorie et de réaliser une première étude de sensibilité local afin d'analyser localement les évolutions de quatre paramètres importants et voir leurs influences locales. En plus, une étude de sensibilité globale est ensuite réalisée et permet de classer les influences des paramètres. Les paramètres du DF les plus influents sont l'accélération et le coefficient de relaxation pour les quatre indicateurs testés. Le paramètre caractéristique du déclenchement du couloir de bus dynamique, la longueur d'insertion du déclenchement du couloir de bus dynamique en amont du premier feu, a toujours une certaine part dans la variance des quatre indicateurs liée à la configuration du déclenchement du couloir de bus dynamique. La comparaison de l'indice de sensibilité de premier ordre et l'indice de sensibilité total nous montre si un paramètre a un effet d'ordre supérieur sur les sorties du modèle.

Chapitre 3

Évaluation macroscopique d'un boulevard multimodal urbain

3.1 Introduction

Après l'étude du déclenchement du système de couloirs de bus dynamiques, ce troisième chapitre de la thèse s'intéresse désormais à l'évaluation d'un boulevard urbain parcouru par un trafic multimodal composé de véhicules particuliers et de bus. L'objectif est de pouvoir prédire et comparer l'efficacité de différents aménagements et/ou stratégies en faveur des bus. De la sorte, il est possible d'aider le gestionnaire à la décision en déterminant la stratégie optimale en fonction des conditions de trafic et des caractéristiques du site étudié.

Il est donc nécessaire d'être capable d'évaluer correctement le fonctionnement d'un boulevard multimodal. Les travaux associés sont nombreux. Ils peuvent être rattachés à deux catégories : (i) l'évaluation à partir d'observations et (ii) l'évaluation par la modélisation et la simulation.

(i) L'évaluation à partir d'observations est la première étape nécessaire à la compréhension d'un site d'étude. De ce fait, de nombreuses méthodes existent concernant l'estimation des distributions de temps de parcours, l'identification de relations entre les variables caractéristiques du trafic et les propriétés de l'infrastructure (réglage des feux, nombre de tronçons, etc.). Cependant, l'évaluation reste une tâche difficile du fait de la complexité du trafic : présence des bus, des feux de circulation, etc. De plus, ces méthodes ne sont pas prédictives et les résultats obtenus n'assurent donc d'aucune généralité. Il est donc très difficile de comparer différents aménagements avant de les avoir installés.

(ii) L'évaluation à travers la modélisation est une technique connue et répandue pour prédire le fonctionnement d'un site. C'est cette option que nous avons retenue pour le travail de thèse en choisissant de recourir à un modèle agrégé et facile à mettre en œuvre. Les

bénéfices de ce type de modèle sont nombreux comme le faible nombre de paramètres, la simplicité d'utilisation, etc. Cependant, il est nécessaire que le modèle retenu puisse prendre en compte à la fois les effets des feux de circulation, des bus dans le trafic et de couloirs de bus qu'ils soient dynamiques ou permanents. C'est l'enjeu de ce chapitre.

Dans un premier temps, un bref état de l'art permet d'identifier le modèle support à nos travaux, le diagramme fondamental de zone. Les outils méthodologiques nécessaires sont ensuite introduits. Ils permettent de proposer plusieurs méthodes d'estimation des diagrammes fondamentaux de zone applicables à plusieurs stratégies de gestion d'un boulevard urbain en faveur des bus. Une fois les diagrammes estimés, il est alors possible de comparer les différents aménagements et d'identifier les solutions optimales en fonction des conditions de trafic.

3.2 Modèle agrégé et simple d'un corridor urbain

Bien que de nombreuses théories aient été proposées pour reproduire l'écoulement moyen d'un trafic sur une zone ou un boulevard urbain au cours des soixante dernières années, il n'existe pour l'instant aucune méthode capable de prendre en compte simultanément l'impact des bus, des couloirs de bus dynamiques et des feux de circulation. Il est donc difficile de prédire le fonctionnement d'un boulevard urbain soumis à un trafic mixte ou même de synthétiser le comportement au sein d'un modèle simple et agrégé. Pourtant, un tel modèle possède un intérêt réel car il peut être utilisé facilement à des fins de planification. En effet, cette approche permet d'analyser et de comparer rapidement différentes stratégies de gestion du trafic.

De nombreux modèles ont été introduits pour reproduire à une échelle macroscopique l'écoulement du trafic sur un boulevard urbain. Ils reposent sur une idée commune qui est l'existence d'une relation fondamentale pour représenter les conditions moyennes de circulation. Cette relation s'avère être une extension du diagramme fondamental du modèle LWR à une échelle spatiale plus importante. Elle s'appelle le diagramme fondamental de zone ou MFD (Macroscopic Fundamental Diagram). Même si l'idée d'un MFD capable de reproduire à la fois les situations fluides et congestionnées d'une zone urbaine est ancienne, les preuves expérimentales de son existence sont assez récentes [Geroliminis et Daganzo, 2008]. De plus, les auteurs ont montré que le MFD est une propriété intrinsèque de la nature du réseau et reste donc constant même si la demande change. Le MFD constitue donc un outil performant pour évaluer et contrôler l'écoulement d'un réseau urbain. Il y a donc un enjeu majeur à pouvoir estimer un MFD prenant en compte à la fois l'effet de feux, des bus et/ou des couloirs de bus dynamiques. Malheureusement, la littérature ne propose pas de méthode

adaptée pour remplir cette tâche. L'objectif de ce chapitre est donc d'étudier plusieurs méthodes capables d'estimer des MFD pour un boulevard multimodal urbain.

Dans la perspective de concevoir ces nouvelles méthodes d'estimation, il est nécessaire de bien comprendre l'influence des bus à l'échelle locale. Pour ce faire, nous nous appuyerons sur la théorie du bouchon mobile (moving bottleneck, MB) introduite par Newell [1998], ainsi que sur ces différentes méthodes de discrétisation [Daganzo et Laval, 2005a; Daganzo et Laval, 2005b] qui permettront de faire le lien entre un bus dans le trafic et un couloir de bus dynamique. Nous serons alors ensuite en mesure de prendre en compte ces deux situations dans l'estimation des MFD. Nous centrerons alors sur trois situations différentes : (S1) laisser les bus dans le flot de véhicules particuliers, (S2) introduire des couloirs de bus dynamiques ou (S3) créer des couloirs de bus permanents. Afin d'évaluer et de comparer ces différentes solutions, il est nécessaire d'estimer les MFD correspondants.

Pour ce faire, nous allons présenter ici trois méthodes différentes. Elles reposent toutes sur les propriétés du modèle LWR et de ses extensions. Ainsi, après avoir introduit plus particulièrement la notion de MFD et celle de bouchon mobile, la méthode M1 est introduite. Il s'agit d'une adaptation de la méthode proposée par [Leclercq et Geroliminis, 2013]. S'appuyant sur la théorie variationnelle, les auteurs ont proposé une technique analytique permettant d'estimer un MFD. Cette technique va être modifiée pour prendre en compte les bus dans le trafic et les couloirs de bus dynamiques.

La méthode M2, quant à elle, repose sur le calcul des diagrammes espace-temps des conditions de trafic. C'est une application directe du modèle LWR.

Enfin, la méthode M3 est entièrement réalisée en simulation. Il s'agit d'estimer le MFD à partir des trajectoires des véhicules simulées à l'aide de la plateforme SymuVia.

Dans une dernière partie, les principaux résultats obtenus à l'aide de ces trois méthodes sont présentés et confrontés. Cette démarche permet de comparer différents aménagements d'un boulevard urbain et de rendre un premier diagnostic sur l'optimisation du système de transport.

Ce chapitre a donné lieu à une publication dans l'édition 2013 de la revue Transportation Research Record ainsi qu'à deux communications dans des conférences à comités de lecture : le TRB 2013 et le symposium LATSIS 2012. Enfin, une dernière publication est en cours de préparation pour soumission dans une revue sur la question de la comparaison des aménagements.

3.3 Outils méthodologiques

Nous allons présenter ici les outils méthodologiques nécessaires à la compréhension et à la modélisation de l'impact des bus et des couloirs de bus dynamiques sur le trafic. Dans un premier temps, nous nous intéresserons à l'échelle locale où les bus peuvent agir comme des bouchons mobiles (MB). Ensuite, nous présenterons les liens théoriques qui peuvent être faits entre les bus dans le trafic et le concept de couloir de bus dynamique. Enfin, nous verrons comment modéliser et évaluer à l'échelle macroscopique le fonctionnement du boulevard multimodal urbain.

3.3.1 Théorie du MB

Les premiers travaux portant sur la prise en compte des effets d'un véhicule lent ont été proposés par [Gazis et Herman, 1992]. Cependant, leur analyse est restée très partielle. Pour combler ce manque, la théorie du MB a été introduite par [Newell, 1993; Newell, 1998]. Elle permet de décrire analytiquement l'impact d'un long convoi de véhicules lents sur le flux des véhicules particuliers. Ce long convoi est représenté comme une contrainte ponctuelle et mobile dans le temps du débit. Quant à elle, la première résolution numérique de cette théorie a été établie par [Lebacque et al., 1998]. Enfin, [Munoz et Daganzo, 2002] ont confirmé que l'approximation ponctuelle du MB était valide en comparant les résultats de la théorie du MB avec des données issues du terrain.

Dans la théorie du MB, un véhicule lent, i.e. qui roule moins vite que le reste du flux de véhicules particuliers, peut agir comme un bouchon mobile qui génère un ralentissement en amont. En revanche, le trafic reste fluide en aval du véhicule lent. Ces états de trafic, respectivement U et D, peuvent facilement être repérés sur le diagramme fondamental (Figure 3. 1a). La pente de la droite reliant les points U et D correspond à la vitesse du MB, u_b . Le débit correspondant à l'état D (q_D), est la capacité liée au MB. La solution pour un cas simple dans le diagramme espace-temps est alors présentée sur la Figure 3. 1b.

Il est important de noter que, dans la théorie proposée par [Newell, 1998], la trajectoire du MB est définie de manière exogène. Cela nécessite la connaissance de $u_b(t)$ et $q_D(t)$ avant de passer à la modélisation. Dans notre cas, nous pouvons aisément supposer que la vitesse des bus est constante et que $q_D(t) = q_x(n - 1)/n$.

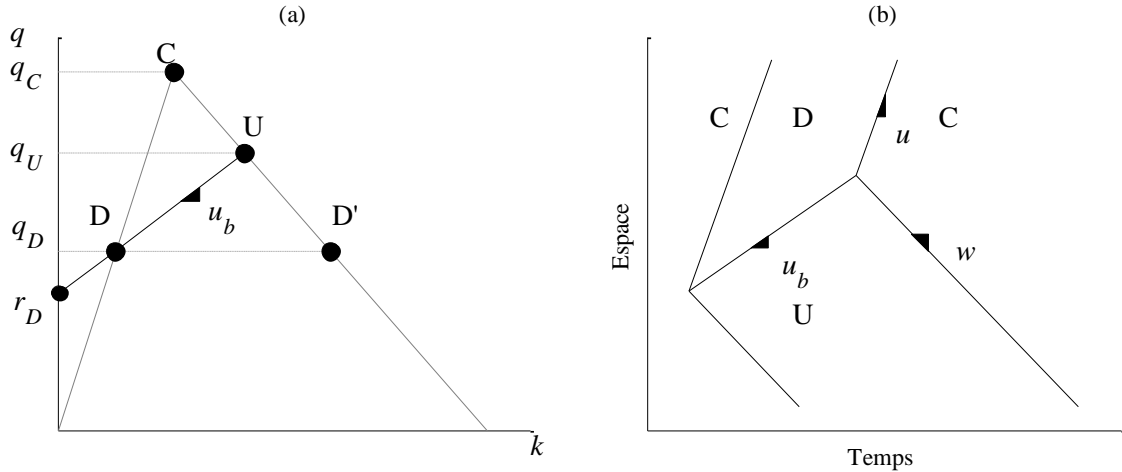


Figure 3. 1 : (a) Représentation du MB sur un DF triangulaire (b) solution pour un cas simple dans le diagramme espace-temps.

Afin de calculer les solutions du modèle KW (LWR) en présence d'un MB, il faut d'abord définir les zones où le MB est actif. Pour ce faire, il est nécessaire d'introduire la notion de débit de dépassement. Pour une zone de trafic homogène à l'état d'équilibre A, i.e. q_A et k_A sont constants et reliés par le DF, alors le débit dépassant le MB est : $r_A = q_A - k_A \cdot u_b$. (Newell, 2002). Il s'agit du débit maximal pouvant dépasser le MB. Sur la Figure 3. 6, il est alors possible de différencier 5 cas :

- cas 1 : la situation est fluide et le débit de dépassement r_A est inférieur à $r_D = q_D - k_D \cdot u_b$. Dans ce cas, le MB est inactif. Il n'influence pas le flux de véhicules particuliers car le débit de dépassement n'est pas contraint.
- Cas 2 : la situation est fluide, mais $r_A > r_D$. Le MB est alors actif, car il contraint le débit de dépassement.
- Cas 3 : la situation est fluide, i.e. il y a une remontée d'une file d'attente depuis la sortie du site d'étude, et $r_A > r_D$. Le MB est alors actif.
- Cas 4 : la situation est congestionnée, et $r_A > r_D$. Dans ce cas, le MB est actif. Le bus influence le flux de véhicules.
- Cas 5 : la situation est congestionnée, mais $r_A < r_D$ et $v_A > u_b$. Dans ce cas, le MB n'est plus actif. Le bus n'influence pas le flux de véhicules. Cependant le flux de véhicules roule à une vitesse inférieure à celle des bus. Le MB est alors impacté par le flux de véhicules particuliers.

La résolution du modèle LWR pour ces différents cas est proposée dans la suite du

document. Les solutions peuvent être déterminées analytiquement et de manière exacte mais aussi de manière approchée. Il faut noter que les états congestionnés correspondent à des congestions qui remontent de l'aval. Dans ce cadre, Daganzo et Laval [2005a] ont donc proposé de remplacer la trajectoire continue du MB, $x(t)$, par une fonction continue par morceaux, $x_d(t)$, paramétrée par un espacement D_x (Figure 3. 2a). L'erreur introduite par cette approximation sur le nombre total de véhicules, i.e. les courbes de véhicules cumulés (CVC) calculées en sortie du site d'étude, reste bornée. Cette borne tend vers zéro lorsque le pas d'espacement D_x tend lui aussi vers zéro.

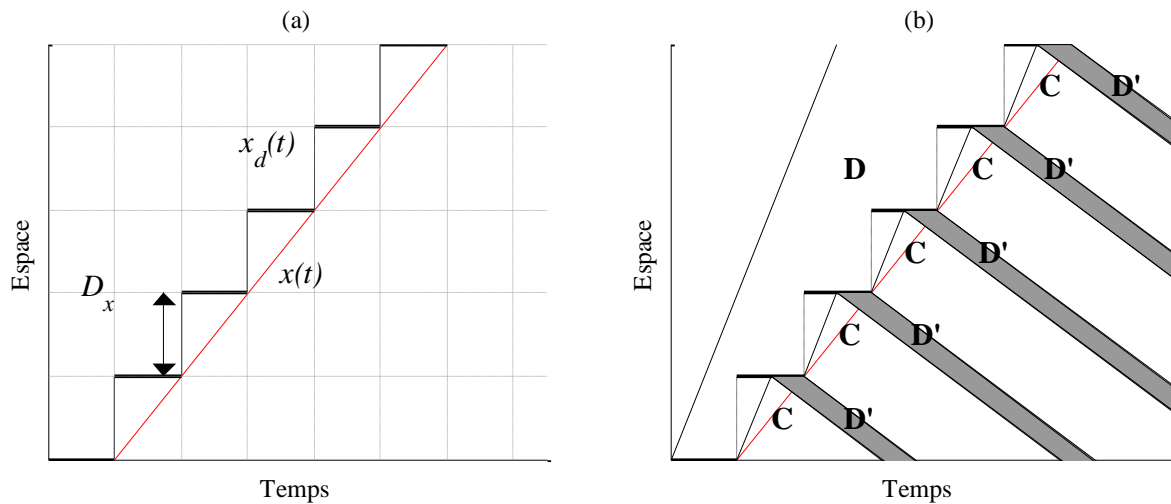


Figure 3. 2 : (a) Approximation des trajectoires (b) calcul de la solution.

Le seul désavantage de cette méthode [Laval, 2004] est que les débits, les concentrations et les vitesses calculées ne convergent pas vers les valeurs exactes. Ces quantités varient entre deux états C et D' comme illustré sur la Figure 3. 2b. Une autre méthode numérique, qui produit un débit lisse et qui peuvent surmonter cet inconvénient, ont été développées plus tard [Daganzo et Laval, 2005b].

Enfin, une méthode basée sur la théorie variationnelle a été récemment introduite par [Daganzo, 2005b; Daganzo, 2005c]. Elle dépasse toutes les autres puisqu'elle permet de résoudre le problème des MB de manière exacte. C'est cette méthode qui est utilisée pour réaliser les calculs analytiques dans cette thèse. Elle est pleinement détaillée par Leclercq [2008].

3.3.2 Liens entre MB et BLIP

Il est intéressant de revenir sur la discrétisation mise en œuvre, car elle permet de mettre en avant les liens entre les solutions $S1$ et $S2$, i.e. entre un MB et un couloir de bus dynamique. En effet, un couloir de bus dynamique peut être vu comme une discrétisation grossière du bouchon mobile.

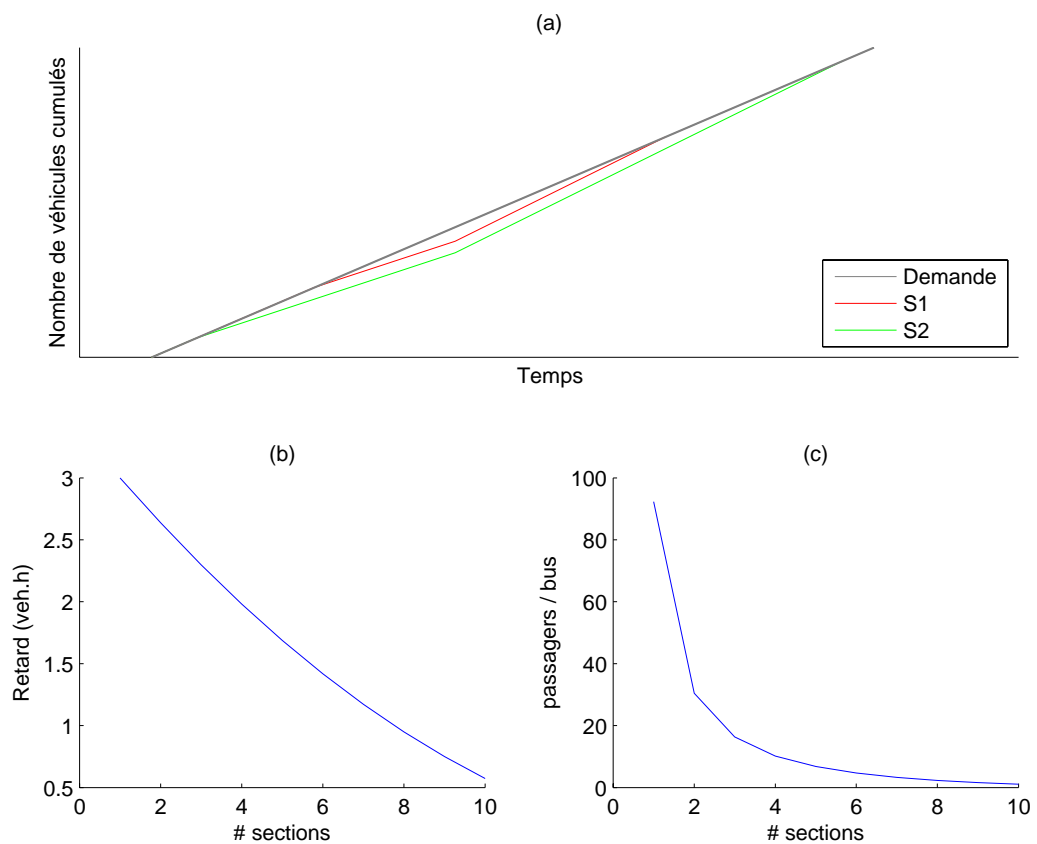


Figure 3. 3 : (a) Solutions en courbes de véhicules cumulés, (b) évolution du retard en fonction du nombre de sections réservées au couloir de bus dynamique et (c) occupation du bus pour compenser le retard en fonction du nombre de section réservées au couloir de bus dynamique.

Comme expliqué précédemment, il s'agit d'approximer la trajectoire du MB par une fonction en escalier $x_d(t)$ avec des pas d'espace de longueur Dx . Le long de cette fonction $x_d(t)$, la capacité est réduite à celle du MB q_D [Daganzo et Laval, 2005a; Daganzo et Laval, 2005b]. Cette discrétisation introduit une erreur sur le calcul de la solution. Cette erreur peut être calculée à l'aide de la théorie variationnelle. À des fins de simplicité, ce principe est

introduit pour un bus traversant le site d'étude à vitesse constant u_b et ne subissant pas l'impact des feux.

La discrétisation introduit une erreur sur le calcul de la solution. Dans le cas d'un couloir de bus dynamique, cette erreur se traduit physiquement par un retard subi par les véhicules particuliers. Il est donc possible de calculer analytiquement le retard généré par $S2$. Ce retard dépend de la longueur d'activation du couloir de bus dynamique. La Figure 3. 3 présente l'évolution du retard en fonction de D_x .

Il est donc possible d'observer, sans surprise, que plus l'espace réservé pour le bus est petit, moins le couloir de bus dynamique gêne le trafic des véhicules particuliers. Il est aussi intéressant de se questionner sur le nombre de passagers dans les bus nécessaire pour combler la perte en capacité en fonction du nombre de sections réservées au couloir de bus dynamique. On peut donc s'apercevoir que, s'il est possible de faire une gestion fine de l'allocation de la voirie, il suffit d'une dizaine de personnes dans les bus pour que le système soit à l'équilibre. Le couloir de bus dynamique est donc une solution prometteuse.

Ce dernier résultat est à nuancer avec les situations de trafic considérées dans cette première étude. D'une part, nous nous sommes intéressés uniquement à des situations peu congestionnées. D'autre part, les feux de circulation ne sont pas pris en compte dans cette première modélisation. Pour pallier ces deux limites, nous allons désormais chercher à modéliser et à estimer le fonctionnement du boulevard à une échelle macroscopique pour chacune des situations. De ce fait, nous serons capables de comparer les résultats obtenus pour toutes les conditions de trafic envisageables et de conclure à la primauté des différentes solutions.

3.3.3 MFD

3.3.3.a Définition et concepts

Il y a une trentaine d'années [Herman et Prigogine, 1979; Mahmassani et al., 1984], le concept de MFD vise à reproduire de manière agrégée les conditions de trafic d'une zone urbaine. Dans le cas d'un boulevard urbain, l'idée de MFD peut être synthétisée de la manière suivante. Il ne s'agit plus de reproduire l'intégralité des trajectoires de véhicules et/ou des différentes zones d'état d'équilibre de trafic mais de représenter une situation par sa valeur moyenne. Ainsi, pour chacune des situations A1 et A2 de la Figure 3. 4a et b, il est possible d'en estimer la valeur moyenne spatiale du débit et de la concentration (la Figure 3. 4c). L'hypothèse de l'existence d'un MFD impose que ces grandeurs soient reliées par une fonction, le MFD, tant pour les situations fluides que pour les situations congestionnées.

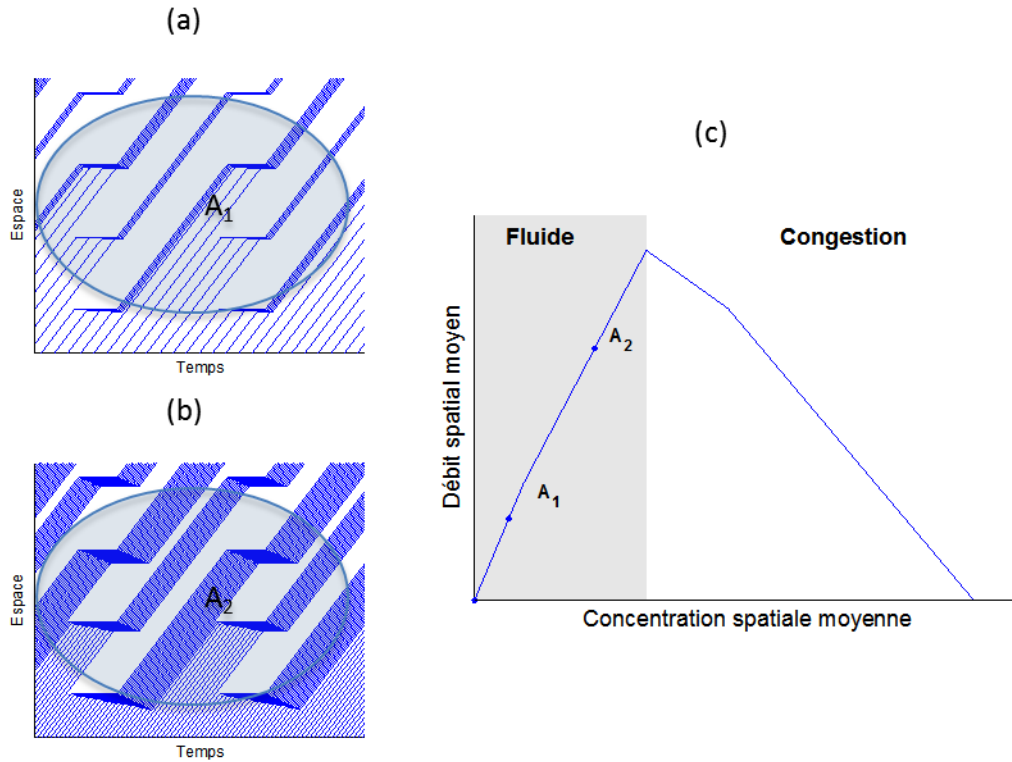


Figure 3.4 : Exemple des situations reproduites par le MFD.

D'un point de vue phénoménologique, cela impose d'observer des situations qui soient stationnaires dans le temps, de se placer à une échelle temporelle qui soit supérieure à la cyclicité des feux de circulation et à une échelle spatiale incorporant plusieurs tronçons. Le MFD estimé alors prend en compte à la fois la dynamique du trafic et celle des feux.

Il existe plusieurs façon d'estimer le MFD : (i) à partir d'observations empiriques ou (ii) analytiquement.

3.3.3.b Méthodes d'estimation

Bien que l'idée de MFD soit ancienne, les premières observations expérimentales sont assez récentes [Geroliminis et Daganzo, 2008]. Dans ce travail, les auteurs ont utilisé les données issues de boucles de comptages situées dans le centre-ville pour estimer le MFD. La méthode utilisée est une simple agrégation des débits et des concentrations observés, pondérés par la longueur des rues. Cette méthode permet de réaliser des moyennes spatiales pertinentes.

Néanmoins, les méthodes reposant sur l'observation de données de boucles de comptages, peuvent introduire un biais dans l'estimation du MFD comme l'ont montré [Courbon et Leclercq, 2011]. Ce biais, ou cette erreur, dépend de la distribution spatiale des boucles de comptages sur le réseau. Ces observations peuvent aussi être renforcées par des données issues de véhicules traceurs. Cependant, il faut un nombre suffisant de véhicules traceurs pour que l'estimation du MFD soit pertinente.

Pour pallier les limites des méthodes d'estimation à partir d'observation, il est possible de recourir à des méthodes analytiques. Le principal avantage d'une méthode analytique est de pouvoir estimer directement le MFD d'un site au travers de ses caractéristiques fixes et facilement mesurable : nombre de voies, longueurs des tronçons, paramétrages des feux, etc. [Daganzo et Geroliminis, 2008] ont posé les fondations nécessaires à ces méthodes. Il s'agit d'utiliser des observateurs fictifs mobiles et d'utiliser les grands principes de la théorie variationnelle [Daganzo, 2005b; Daganzo, 2005c]. Ces bases vont être présentées et utilisées dans la suite du travail.

3.4 Deux nouvelles méthodes

À partir des travaux existants, deux nouvelles méthodes d'estimation vont donc être proposées. La première méthode M1 s'appuie sur les travaux de [Leclercq et Geroliminis, 2013]. L'impact des bus est ajouté de manière endogène puisque les bus vont venir directement modifier les capacités et le réseau permettant d'estimer le MFD. La seconde méthode M2 repose sur un ajout exogène de l'impact des bus. En effet, il s'agit de calculer des diagrammes espace-temps du corridor à l'aide d'un MFD estimé sans les bus et de venir ajouter l'impact des bus qui agissent alors comme un bouchon mobile. Enfin, nous présenterons une troisième méthode s'appuyant entièrement sur la micro simulation du trafic.

3.4.1 Méthode M1

La méthode M1 considère directement l'effet conjoint des feux tricolores et des bus, considérés comme des restrictions de capacité mobile dans l'estimation du MFD. Cette méthode étend les travaux sur l'estimation du MFD présentés dans [Leclercq et Geroliminis, 2013] dans le cas où des restrictions de capacité mobiles sont présentes sur le réseau. Les travaux originaux utilisent la théorie variationnelle pour définir un ensemble de coupes dans le plan (k, q) qui définissent une borne supérieure pour le MFD qualifiant un boulevard urbain. Il ne s'agit pas ici de présenter dans le détail les éléments théoriques proposés par [Leclercq et Geroliminis, 2013] mais seulement les principes généraux. Les informations et

justifications théoriques concernant la théorie variationnelle proprement dite peuvent être trouvées dans [Daganzo, 2005b; Daganzo, 2005c; Daganzo et Menendez, 2005] ainsi que dans [Leclercq, 2008].

Les premiers travaux sur l'estimation des MFD sur une artère ont été proposés par [Daganzo et Geroliminis, 2008]. Ils montrent qu'un MFD peut être valablement estimé par un ensemble de coupes $\{C_j\}$. Une coupe correspond à une droite dans le plan (k, q) finie par son ordonnée à l'origine r_j et par sa pente v_j , i.e. $q = r_j + kv_j$. Les coupes sont associées à des observateurs mobiles fictifs qui parcourent le boulevard à une vitesse v_j . Ces observateurs n'ont pas de dimension, ne sont pas influencés par les feux tricolores ou le trafic et n'ont pas d'influence sur celui-ci. r_j correspond au débit auquel le trafic peut dépasser l'observateur se déplaçant à la vitesse v_j dans le cas optimum (débit de dépassement maximum). Ce débit dépend du diagramme fondamental représentant les états de trafic locaux sur l'artère et du réglage des feux tricolores. En pratique, le MFD peut donc être estimé sous une forme linéaire par morceaux en considérant la courbe enveloppe définie par l'ensemble des coupes. Il suffit donc d'être capable d'estimer les valeurs de r_j pour un ensemble suffisamment représentatif de valeurs discrètes $\{v_j\}$ comprises entre $-w$ et u . [Daganzo et Geroliminis, 2008] proposent de se focaliser uniquement sur un ensemble spécifique de coupes dénommé « coupes pratiques » ou *practical cuts* (CP). Les CP correspondent à des trajets spécifiques des observateurs qui n'utilisent que les valeurs de vitesse u et 0 lorsque la vitesse moyenne v_j est positive, et les vitesses w et 0 quand v_j est négative. La valeur de v_j définit les proportions des valeurs unitaires de vitesse utilisées le long du trajet. Les CP sont définies en pratique en affectant aux observateurs une vitesse u (ou w) entre deux feux et en les retardant uniformément à chaque feu afin d'obtenir la vitesse moyenne de référence souhaitée v_j . Le temps d'attente à chaque feu est noté ε_j . Enfin, la capacité stationnaire est ajoutée en considérant les observateurs fictifs qui s'arrêtent aux feux. Cette méthode est détaillée de manière complète dans [Geroliminis et Boyaci, 2012]. Elle présente cependant d'une limite importante qui la rend inadaptée au cas où des restrictions de capacité mobile sont présentes sur l'artère. En effet, elle ne fournit une estimation précise (borne supérieure serrée) du MFD que dans le cas où le réglage des feux et la topographie de l'artère sont réguliers, c'est à dire lorsque que les feux ont tous le même réglage et que le décalage des débuts de vert est constant entre deux feux. Dans le cas où le réglage des feux n'est pas régulier le MFD défini à partir des CP peut être significativement supérieur au MFD caractérisant effectivement le boulevard.

Les travaux de [Leclercq et Geroliminis, 2013] ont permis de lever cette limitation en généralisant le concept des CP. Plutôt que de se focaliser sur certains trajets particuliers au sein de l'artère, ces auteurs proposent de définir un graphe qui a pour propriété de contenir les CP mais également l'ensemble des trajets « optimaux » associés à chaque vitesse v_j . La

notion d'optimalité doit être entendue au sens de la théorie variationnelle, c'est à dire que pour une vitesse donnée v_j on est sûr que le chemin permettant de calculer la valeur minimale de r_j est bien inclus dans le graphe y compris dans le cas de réglage de feux non régulier. La méthode de construction de graphes proposée par [Leclercq et Geroliminis, 2013] assure également que le graphe construit contient un nombre minimal d'arcs ce qui garantit l'efficacité des calculs.

Pour être plus précis, deux graphes sont en fait nécessaires, l'un pour caractériser les trajets fluides (de l'amont vers l'aval, $v_j \geq 0$) et l'autre pour caractériser les trajets congestionnés (de l'aval vers l'amont, $v_j < 0$). Nous ne présenterons ici que la méthodologie de construction du graphe associé à des valeurs de v_j positives. Le graphe correspondant à des valeurs de v_j négatives s'obtient simplement en remplaçant u par $-w$ et en considérant l'artère dans la direction opposée. Encore une fois, le lecteur est invité à se reporter aux travaux de Leclercq et Geroliminis [2013] pour obtenir toutes les justifications théoriques démontrant que le graphe présenté ci-dessous a bien toutes les propriétés souhaitées. Le graphe associé aux valeurs de v_j positives est composé de trois types d'arcs, cf. Figure 3. 5a:

- Les arcs de type (a) correspondent exactement aux phases de rouge de l'ensemble des feux tricolores ;
- Les arcs de type (b) correspondent aux phases de vert de l'ensemble des feux tricolores ;
- Les arcs de type (c) ont une vitesse u . Ils doivent être créés à la fin de chaque phase de rouge pour l'ensemble des feux tricolores. Ils se propagent ensuite jusqu'à rencontrer un arc de type (a) où ils s'arrêtent. Chaque fois qu'un arc de type (c) rencontre un arc de type (b) un nœud doit être créé. L'arc de type (c) continue alors sa progression vers l'aval et l'arc de type (b) croisé se trouve décomposé en deux sous-arcs de type (b).

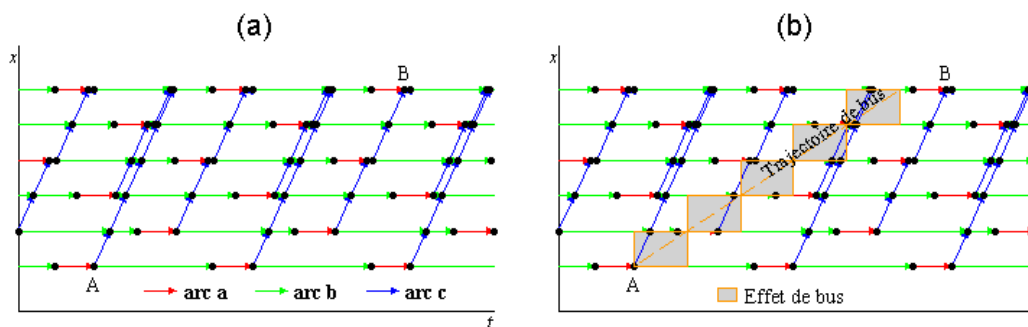


Figure 3. 5 : Méthode directe d'estimation des MFD par la théorie variationnelle : (a) sans bus et (b) avec bus.

Une fois le graphe construit, la coupe j est défini par l'ensemble des chemins du graphe qui ont les même points initiaux et finaux, c'est à dire la même vitesse v_j , cf. les points A et B sur la Figure 3. 5a. La valeur de r_j peut alors être calculée en appliquant un algorithme classique de plus court chemin entre ces deux points, par exemple l'algorithme de Dijkstra. Les coûts sur les arcs sont définis par la théorie variationnelle. Les coûts sont donc respectivement égaux pour les arcs de type (a), (b) et (c) à 0, q_x et 0 (le coût correspondant aux arcs de type (c) pour le graphe associé aux vitesses v_j négatives est égal à wk_x). Dans le cas où les réglages des feux sont réguliers, le graphe ainsi défini est périodique. Un seul point initial est suffisant pour une vitesse v_j donnée. Dans le cas où les réglages sont irréguliers, il faut faire le calcul pour plusieurs points initiaux et moyenner les valeurs de r_j pour chaque couple A, B afin de définir la valeur de r_j définissant la coupe j .

L'extension proposée ici pour prendre en compte l'effet des bus est assez simple. En effet, comme nous l'avons déjà indiqué [Newell, 1998] et d'autres auteurs par la suite, cf. [Leclercq et al., 2004] pour une revue complète, ont montré que l'impact de tels véhicules sur le trafic environnant peut être représenté comme une condition limite mobile qui réduit localement la capacité disponible (plus précisément la capacité de dépassement le long de la condition limite). Une telle restriction de capacité mobile n'est pas forcément active, c'est à dire qu'elle ne devient une contrainte que si le débit en amont est suffisamment fort pour que la contrainte de capacité soit effective.

Les travaux de [Daganzo et Laval, 2005a, b] permettent de prendre facilement en compte l'effet de ces restrictions mobiles de capacité dans le cadre méthodologique des graphes variationnels que nous venons de présenter. En effet, ces auteurs ont montré qu'une restriction de capacité mobile peut être approximée par une succession de restrictions de capacité fixe qui suivent la trajectoire du bus. Cette approximation introduit une erreur mais les auteurs ont montré que la borne supérieure de cette erreur était relativement faible. Ainsi, nous pouvons considérer qu'un bus à l'intérieur d'un tronçon réduit la capacité disponible d'une voie sur l'ensemble du lien tant que celui-ci est présent dans le lien. Ceci génère à l'intérieur de l'artère des domaines spatio-temporels où la capacité est réduite proportionnellement d'une voie par rapport au nombre initial de voies. Ces zones sont représentées de manière grisée sur la Figure 3. 5b. L'effet des bus peut directement être pris en compte en réduisant les coûts des arcs du graphe variationnel qui sont inclus dans ces régions. En pratique, seul les arcs de type (b) voient leurs coûts modifiés de la valeur q_x à la valeur $q_x(n-1)/n$ où n représente le nombre initial de voies. Pour le graphe associé aux valeurs de v_j négatives il faut également appliquer le même facteur de réduction $(n-1)/n$ aux coûts des arcs de type (c) qui croisent les zones de restriction de capacité.

Pour finir la présentation de la méthode M1, il faut noter que même si le réglage des feux est régulier, l'introduction de bus rend le graphe variationnel irrégulier. Il faut donc considérer plusieurs points de départ du réseau pour chaque valeur de v_j afin d'estimer correctement les valeurs de τ_j .

3.4.2 Méthode M2

La méthode M2 introduit l'effet des bus sur le trafic de manière exogène. L'idée est assez simple. Il s'agit d'utiliser le modèle KW en remplaçant le DF par le MFD du site étudié, estimé sans la présence des bus. Cette estimation peut facilement être réalisée à l'aide la méthode de [Leclercq et Geroliminis, 2013]. Etant données des conditions aux limites, i.e. la demande en entrée du boulevard et la capacité en sortie, le modèle KW permet de calculer analytiquement le diagramme espace-temps des conditions de trafic sur le site. Il faut noter que l'impact des feux de circulation est déjà pris en compte dans l'estimation du MFD.

Il s'agit alors d'ajouter l'impact du bus sur le trafic. Les bus se déplaçant à une vitesse inférieure à celle du trafic, ils peuvent agir comme des MB. La prise en compte d'un MB s'appuie sur la théorie proposée par [Newell, 1998]. Cette approche permet alors de déterminer analytiquement la dynamique résultante de l'écoulement. Les diagrammes espace-temps peuvent alors être calculés facilement.

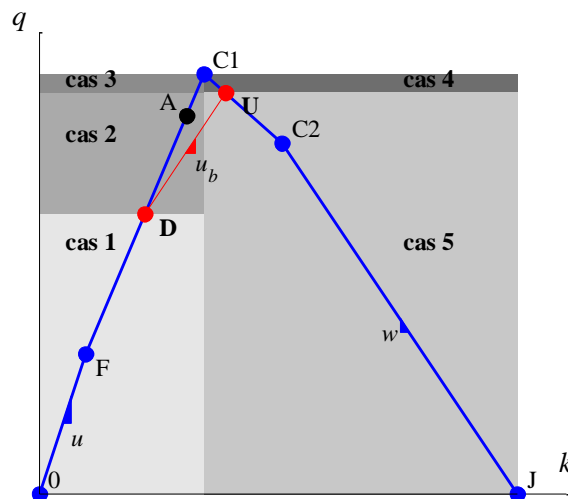


Figure 3. 6 : Application de la théorie du MB sur le MFD.

L'influence des bus sur le trafic dépend des conditions de circulation. Comme présenté en page 69, il est possible d'identifier cinq cas différents (Figure 3. 6). Dans la suite de cette partie, nous considérons uniquement le cas 2 qui est le plus simple à comprendre la méthode exogène. Le détail des autres cas est présent dans les articles liés à cette partie.

Ainsi dans le cas 2, le trafic des véhicules particuliers est fluide mais le débit est assez fort pour que le bus agisse comme un MB (Figure 3. 7b). Nous observons donc un état A tout le long du site (Figure 3. 7a). L'entrée du bus sur le corridor va donc générer en aval l'état D correspondant à la capacité du bouchon mobile (une voie étant occupée par le bus). En amont du bus, le trafic se retrouve alors en situation congestionnée, i.e. à l'état U la capacité restreinte du bouchon mobile. La frontière entre ces deux états correspond à la trajectoire du bus. Il faut noter ici que nous ne prenons pas en compte directement l'impact des arrêts de bus sur le bus. Cette influence peut indirectement être traitée à travers la vitesse moyenne du bus. La frontière entre l'état A, en entrée du site, et l'état U, se déplace à la vitesse u_{AU} , vitesse donnée par le MFD. Lorsque le bus quitte le boulevard, un état de trafic C_1 correspondant à la capacité maximale est observé. Cet état remonte le boulevard à la vitesse w (w_1), qui constitue la frontière avec l'état U. Une fois cet état U disparu, la frontière avec l'état A est donnée par le MFD et permet de calculer le moment de disparition de l'état C_1 .

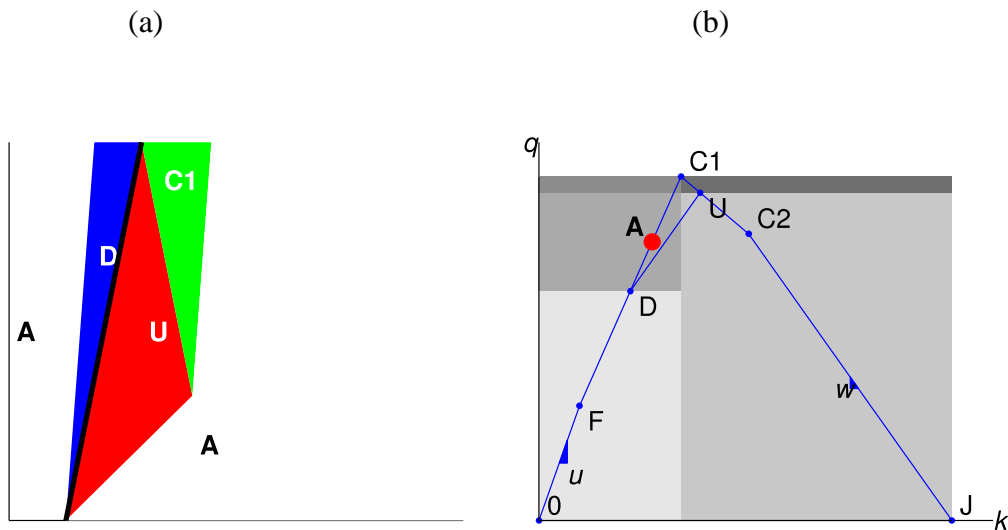


Figure 3. 7 : (a) Diagramme espace temps et (b) point de fonctionnement.

Il faut noter que le motif obtenu dépend de la fréquence des bus. En effet, le prochain bus peut venir impacter ce motif (pour de fortes fréquences). On obtient donc deux situations pour le cas 2 (Figure 3. 8).

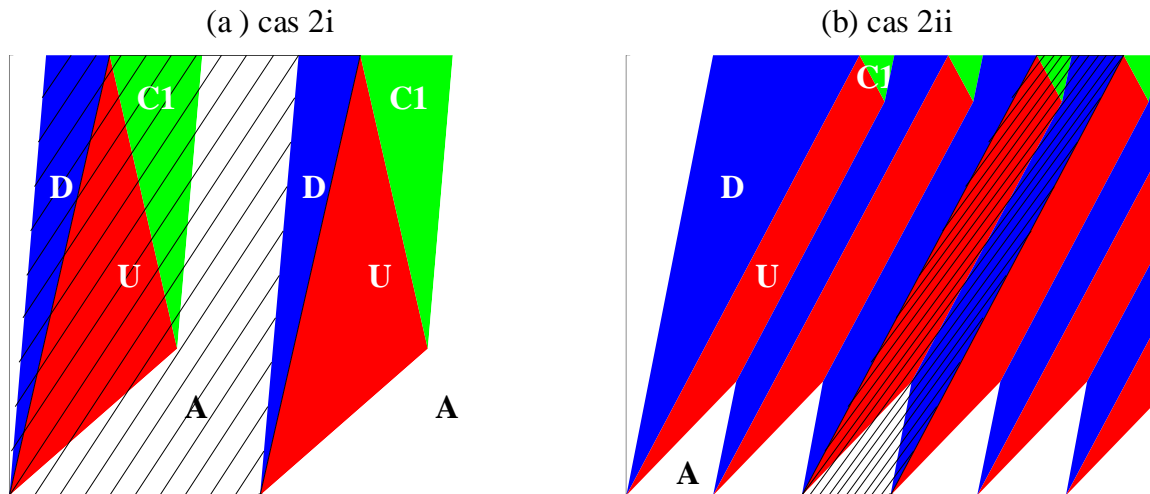


Figure 3. 8 : Diagrammes espace-temps pour une succession de bus : (a) faible fréquence (cas 2i) et (b) forte fréquence (cas2ii).

Nous disposons donc maintenant des coordonnées des zones de l'espace de chaque état d'équilibre. De plus, il faut noter que les motifs sont périodiques et qu'il suffit donc de calculer le diagramme espace-temps pour une paire de bus depuis le passage de second bus, les motifs barrés dans la Figure 3. 8.

Il est donc facile de calculer le débit moyen spatial et la concentration moyenne spatiale par la définition d'Edie [Edie, 1965]. Ces valeurs permettent donc d'estimer un point du MFD prenant en compte l'impact des bus. On peut alors considérer que l'effet des bus a été ajouté de manière exogène.

En modifiant les conditions aux limites, il est alors possible de déterminer les diagrammes pour toutes les situations de trafic envisageables : du fluide au congestionné. Les situations fluides sont alors reproduites en faisant varier le débit d'entrée jusqu'à la capacité maximale. Les situations congestionnées sont reproduites en contraignant la capacité de sortie jusqu'au débit nul. Les principes présentés pour le cas 2 peuvent être étendus aux autres cas. De la sorte, il est alors possible d'estimer l'intégralité du MFD.

Enfin, cette méthode peut être étendue aux couloirs de bus dynamiques. Cependant les calculs sont beaucoup plus fastidieux et l'apport théorique est limité. Il ne s'agit en effet que d'une discrétisation spatio-temporelle de la trajectoire du bus. Les éléments nécessaires à la

mise en œuvre de la méthode M2 dans le cas des couloirs de bus dynamiques sont introduits dans le complément sur la comparaison des aménagements.

3.4.3 Synthèse

Deux méthodes d'estimations des MFD pour un corridor urbain multimodal ont donc été introduites. Les résultats produits peuvent donc être inter-comparés que ce soit pour le cas des bus dans le trafic ou le cas des couloirs de bus dynamiques. Ne disposant pas de données réelles pour confronter ces deux méthodes à une référence commune, il apparaît alors pertinent de comparer ces deux méthodes à des résultats obtenus en simulation. Ainsi, une troisième méthode M3 est donc proposée. Il s'agit d'une méthode dite de production.

Pour ce faire, nous allons recourir à un simulateur microscopique du trafic routier, prenant en compte à la fois les bus mais aussi les couloirs de bus dynamiques. Les différentes situations de trafic pourront alors être reproduites et le MFD être estimé directement à partir des trajectoires de véhicules.

Nous avons fait le choix ici d'utiliser la plateforme SymuVia. Cette plateforme de simulation correspond à une résolution lagrangienne du modèle LWR, ce qui assure une cohérence à la fois avec les deux précédentes méthodes mais aussi avec la notion même de MFD. En effet, [Courbon et Leclercq, 2011] ont proposé une méthode d'estimation permettant de retrouver parfaitement le MFD d'un site théorique.

Tableau 3. 1 : Synthèse de travaux réalisés.

Méthodes Solutions	M1	M2	M3
<i>S1</i>	P1 et P2	P1	P1
<i>S2</i>	P2	D	D
<i>S3</i>	P2	D	D

La plateforme SymuVia permet de reproduire des phénomènes supplémentaires par rapport aux approches analytiques. En effet, SymuVia incorpore les dernières extensions du modèle LWR comme le changement de voies ou l'accélération bornée. Les détails de cette méthode sont présentés dans l'article TRR 2013.

L'ensemble des recherches menées dans cette troisième partie peut donc être synthétisé par le Tableau 3. 1. Elles ont donné lieu à deux publications. La première porte sur la

comparaison des différentes méthodes (P1 - parcours en ligne du tableau) pour le cas des bus. Le second article vise quant à lui à comparer différents aménagements pour un site théorique. La méthode M1 a été retenue pour cette étude (P2 - parcours en colonne du tableau). Les autres cases ont été étudiées mais non publiées (D pour Draft).

3.5 Principaux résultats

Cette partie présente les principaux résultats obtenus sur la question de l'estimation des MFD d'un boulevard multimodal. Le travail s'articule autour de deux objectifs : (i) l'inter-comparaison des méthodes proposées et (ii) la comparaison de différents aménagements en faveur de bus.

3.5.1 Comparaison des méthodes

Le premier objectif est donc de comparer les résultats obtenus avec les différentes méthodes proposées : M1, M2 et M3. Les détails de cette comparaison croisée ont été présentés dans [Xie et al., 2013].

Pour ce faire, nous avons choisi de nous concentrer sur l'évolution de la vitesse moyenne des véhicules et des bus en fonction de la demande q_A et de la période h des bus. Par ailleurs, en plus des trois méthodes, nous proposons de nous référer aux niveaux de services trouvés dans le HCM 2010. Ces niveaux constituent une sorte de référence.

3.5.1.a Vitesses moyennes

La première étape consiste à calculer des vitesses moyennes des véhicules et des bus qui soient cohérentes d'une méthode à une autre. Pour ce faire, nous allons utiliser les temps de parcours instantanés. En effet, des formulations complètement cohérentes peuvent être facilement trouvées. La relation centrale à ces formulations sera la définition du débit moyen et de la concentration moyenne proposée par [Edie, 1965].

La méthode M1 est le cas le plus simple. Elle ne requiert aucun calcul supplémentaire. En effet, la vitesse moyenne des véhicules V_1^{veh} peut directement être calculée à partir des MFD estimés et de la relation fondamentale $q = kv$. De ce fait, V_1^{veh} est égale à q/k . La vitesse moyenne du bus V_1^{bus} peut être calculée de la même manière. La seule différence est que la V_1^{bus} ne peut excéder la vitesse maximale du bus u_b . La Figure 3. 9a propose l'évolution de V_1^{veh} et V_1^{bus} en fonction des conditions de trafic possible. Il est intéressant de remarquer

qu'en congestion les bus ne sont impactés qu'à partir du moment où la vitesse du flux de véhicules particuliers est inférieure à u_b .

Pour la méthode M2, le calcul des vitesses moyennes est un peu plus compliqué. Les définitions d'Edie doivent être adaptées à notre cas particulier. Pour ce faire, il est important de remarquer que les diagrammes espace-temps calculés sont périodiques. Ces diagrammes sont composés de différentes zones A_i où le trafic est à l'équilibre. Les coordonnées de ces zones sont parfaitement connues. Il est donc possible de calculer le débit moyen spatial (Q) et la concentration moyenne spatiale (K) comme :

$$Q = \frac{\sum A_i q_i}{\sum A_i} \quad [3.1]$$

$$K = \frac{\sum A_i k_i}{\sum A_i} \quad [3.2]$$

Où A_i est l'aire des différentes zones à l'équilibre du diagramme espace-temps, k_i et q_i la concentration et le débit dans ces zones. La vitesse moyenne de véhicules V_2^{veh} peut alors être calculée comme étant égale à Q/K . Quant à elle, la vitesse moyenne des bus V_2^{bus} est calculée comme précédemment. La Figure 3. 9b propose l'évolution de ces vitesses moyennes en fonction des conditions de trafic.

Enfin pour la méthode M3, il est possible de calculer directement k et q à partir de la définition originale proposée par Edie. En effet, les trajectoires individuelles des véhicules sont fournies par SymuVia. Par conséquent, nous connaissons parfaitement la longueur l_j et le temps t_j , où l_j est la longueur de trajectoire de véhicule j dans une fenêtre spatio-temporelle et t_j est le temps de parcours associé. La principale difficulté repose dans le fait de trouver une fenêtre spatio-temporelle cohérente avec les méthodes précédentes. Cependant, cette fenêtre ne peut pas correspondre à celles calculées analytiquement par la méthode M2. Dans ce cas, il faudrait toujours appliquer la méthode M2 puis la méthode M3 et les approches seraient donc redondantes. Nous avons donc décidé d'utiliser une longue fenêtre spatio-temporelle après une phase de charge du réseau. Cette fenêtre correspond à l'intégralité du site pour sa longueur et à plusieurs périodes de bus pour sa durée. La Figure 3. 9c illustre l'évolution de V_3^{veh} et V_3^{bus} pour les mêmes conditions de trafic que les méthodes M1 et M2.

Les résultats des méthodes peuvent maintenant être comparés. Les Figure 3. 10a-d proposent les valeurs moyennes des vitesses des véhicules et des bus pour chacune des méthodes, en fonction des conditions de trafic et de la fréquence de bus. Dans ces études, les phases de feu restent à $c = 90s$, $g = 60s$, $r = 30s$ et $\delta = 0s$. Au premier coup d'œil, les variations semblent minimales. Cependant, certaines différences existent. Par exemple, l'influence du MB n'est pas observée pour les mêmes intervalles de débits.

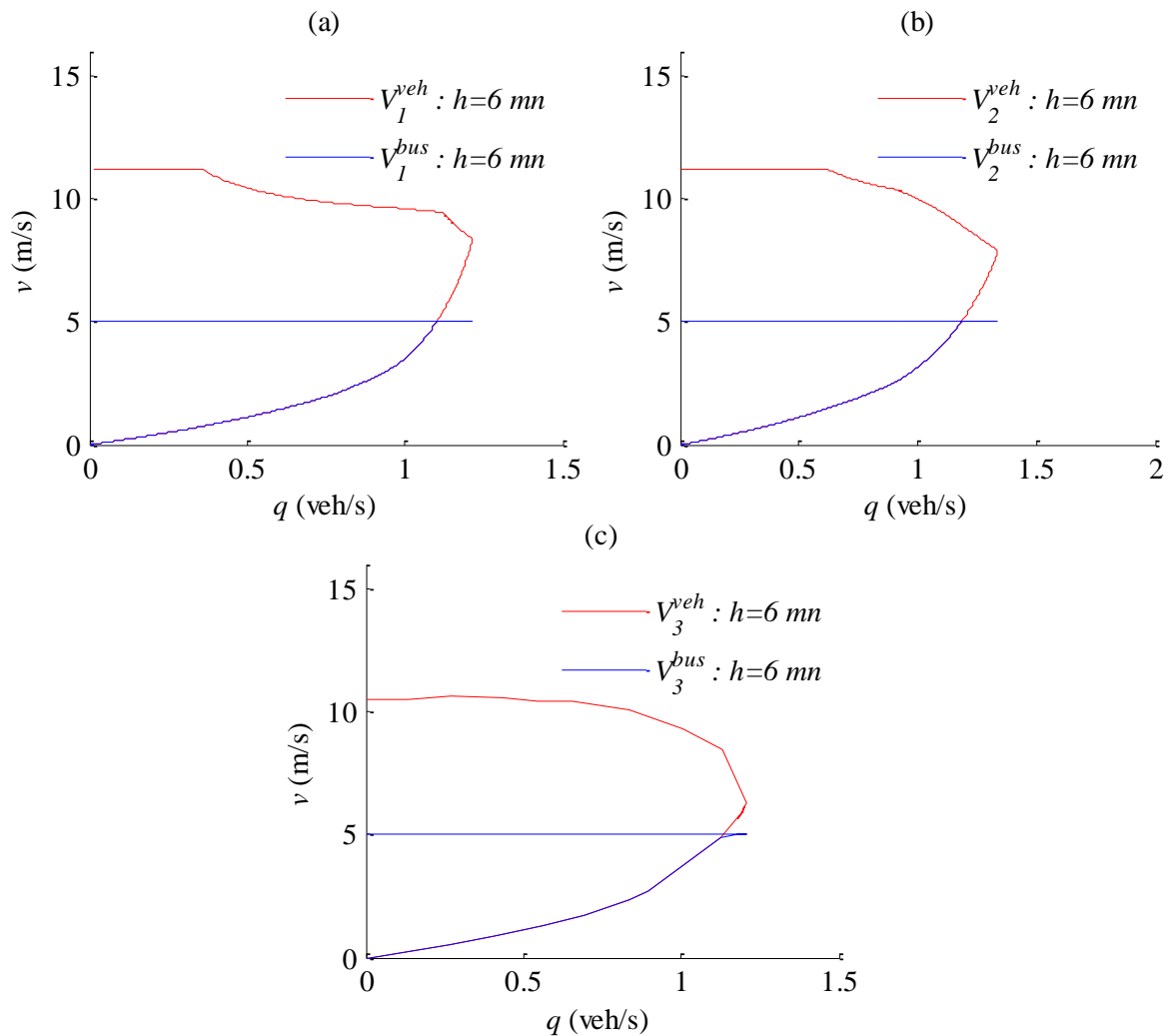


Figure 3.9 : Courbes vitesses débits pour les méthodes (a) M1, (b) M2 et (c) M3.

Par ailleurs, les débits maximaux observés dépendent de la méthode puisque chaque méthode possède ses propres hypothèses de modélisation. Précisément, les influences des feux et du MB ne sont pas corrélés dans la méthode M2 (les bus ne sont pas ralentis par les feux rouges) contrairement aux méthodes M1 et M3. Cela explique sûrement pourquoi le débit maximal observé est plus grand dans le cas de la méthode M2. Cette capacité plus grande est aussi à mettre au profit de la discrétisation du MB dans la méthode M1. En effet, comme expliqué dans la partie sur le MB, cette discrétisation implique une erreur qui se traduit par une restriction plus forte. Par ailleurs, le MB peut être inactif pour la méthode M2, qui homogénéise le site, mais actif pour certaines parties du site dans le cas de la méthode M1. Cela explique pourquoi les intervalles où le MB est actif diffèrent d'une méthode à

l'autre. Cela explique aussi pourquoi la méthode M2 a tendance à sous-estimer l'influence du bus.

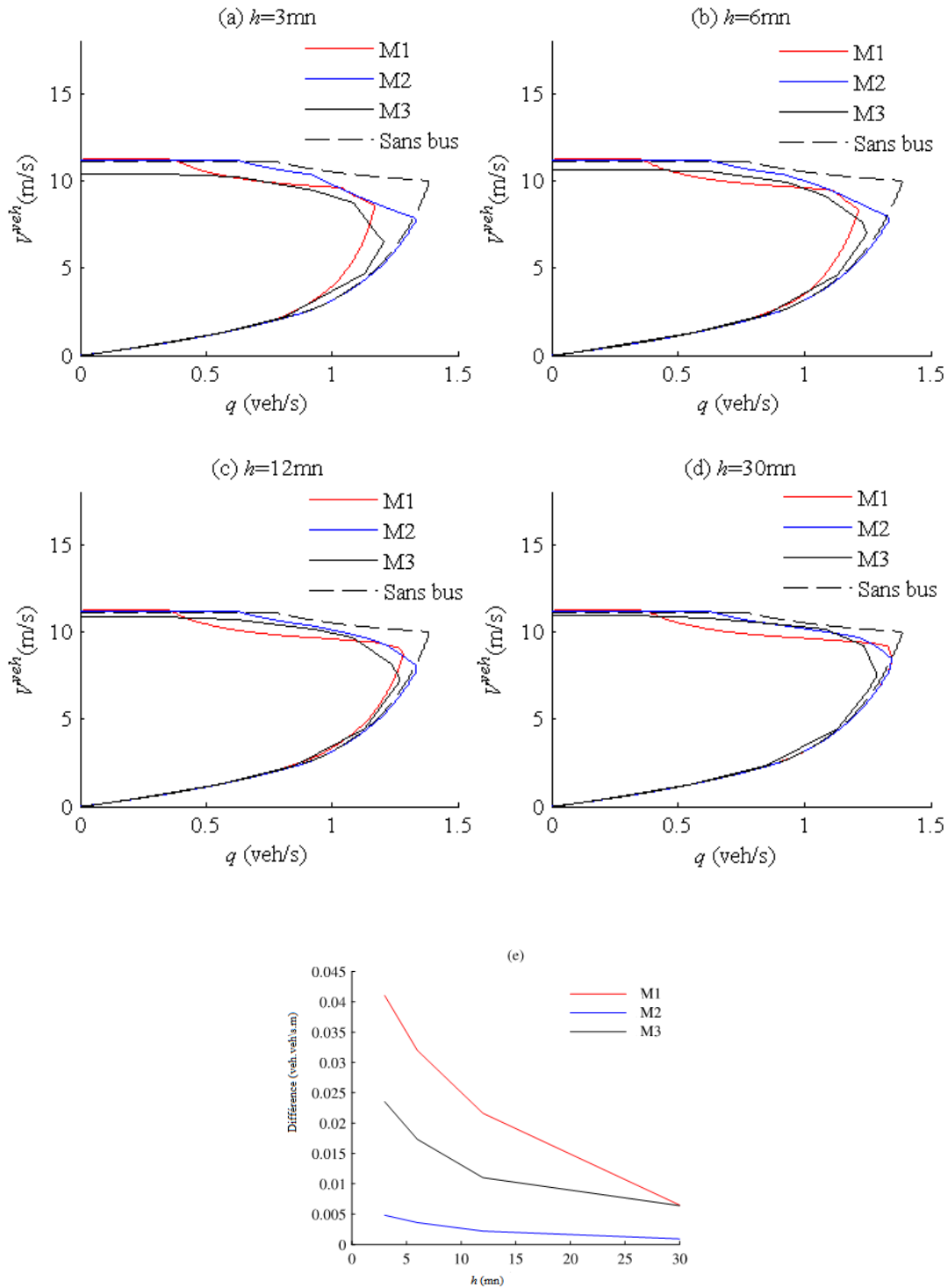


Figure 3. 10 : Comparaison des différentes méthodes pour plusieurs fréquence : (a) 3 mn, (b) 6 mn, (c) 12 mn, (d) 30 mn et (e) différence.

Nous pouvons aussi nous apercevoir que la méthode M3 fournit des valeurs moyennes de vitesses plus faibles que les méthodes analytiques. Cela s'explique facilement par le fait que le phénomène de changement de voie est reproduit dans les simulations de la méthode M3. Or, ces changements de voies augmentent le temps de parcours des véhicules. Par conséquent, cela réduit aussi le débit maximal observé et justifie les observations des Figure 3. 10a-d.

Quant à elle, la Figure 3. 10e propose l'écart des différentes méthodes avec la situation de référence du boulevard sans la présence de bus. Pour ce faire, nous avons calculé la différence de débit pour toutes les conditions de trafic envisageables, c'est-à-dire, la différence des aires. Cet indicateur agrégé montre que les méthodes sont toujours classées dans le même sens. La méthode M1 est la plus sensible à la présence des bus tandis que la méthode M2 semble sous-estimer l'influence des bus. Les résultats de la méthode M3 sont situés entre les deux autres méthodes. Enfin, il faut tout de même remarquer que les trois méthodes convergent vers la situation de référence lorsque la période de bus augmente.

3.5.1.b Niveaux de services (Level Of Services – LOS)

Les résultats des différentes méthodes sont maintenant confrontés aux niveaux de services fournis par le [HCM, 2010]. Nous allons utiliser uniquement les LOS liés aux véhicules particuliers car les LOS pour les transports collectifs ne sont pas cohérents avec notre approche : prise en compte des arrêts, du temps de montées des passagers, etc. Les détails de calcul des LOS peuvent être trouvés dans HCM [2010].

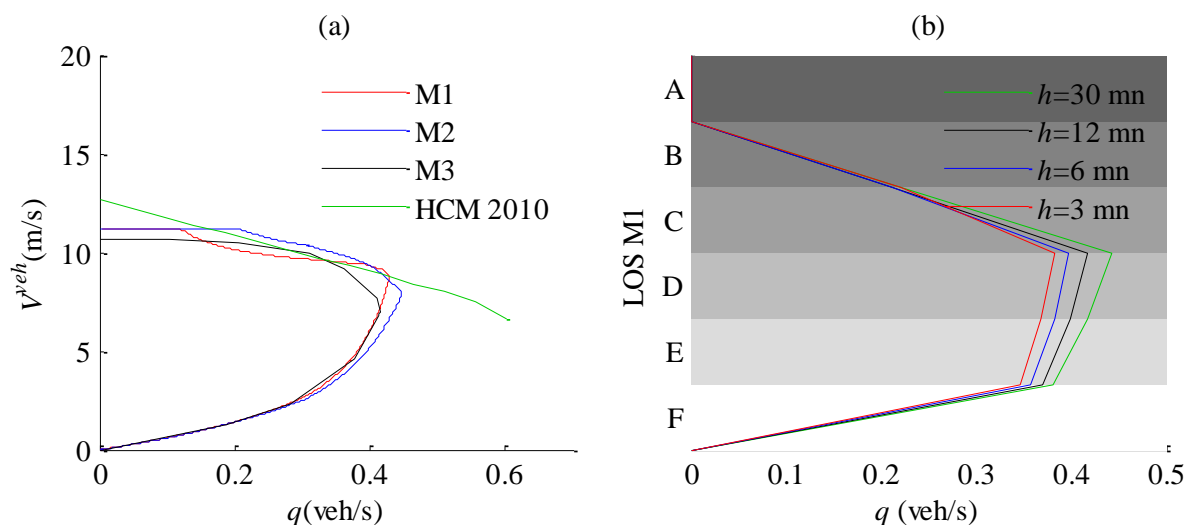


Figure 3. 11 : Comparaison avec les abaques du HCM 2010 (a) courbe débit-vitesse et (b) niveaux de service.

Les courbes vitesses-débits sont donc déterminées pour notre cas d'étude (Figure 3. 11a). Il se trouve que les LOS du HCM sous-estiment les effets des feux de circulation sur la vitesse de parcours des véhicules particuliers. Ce n'est pas une surprise puisque la corrélation entre des feux successifs n'est pas prise en compte dans les LOS. Le second défaut des LOS est que le HCM ne fournit pas de vitesses pour les situations congestionnées et en particulier lorsqu'une file d'attente remonte de l'aval. Les méthodes que nous avons proposées comblent ce manque.

Enfin, nous avons exprimé les courbes vitesses-débits de M1 dans la gradation proposée par le HCM (Figure 3. 11b). Il apparaît que la lettre A n'est jamais obtenue. Les niveaux D et E correspondent à des situations transitoires. En effet, l'intervalle des débits correspondants est très faible comparé aux niveaux B, C et F. Des résultats similaires sont obtenus pour les méthodes M2 et M3.

3.5.2 Comparaison des aménagements

Maintenant que les méthodes ont été analysées en profondeur et comparées, nous pouvons passer à leur application pour comparer différents aménagements d'un boulevard urbain en faveur des bus. Comme expliqué précédemment, nous allons nous concentrer sur trois situations : (S1) laisser les bus dans le flot de véhicules particuliers, (S2) introduire des couloirs de bus dynamiques ou (S3) créer des couloirs de bus permanents. Pour ce faire, nous avons choisi de n'utiliser que la méthode M1 car elle permet de capturer le plus finement l'influence des bus. Mais avant de déterminer les situations favorables à une solution par rapport aux autres, il est nécessaire de construire un indicateur adapté à l'évaluation d'un trafic multimodal.

3.5.2.a Indicateurs

Une des principales difficultés est de trouver un indicateur unifié pour comparer les différentes situations. Le principal problème réside dans le fait que, dans le cadre classique de la théorie du trafic, un bus compte pour un unique véhicule. Cependant, le nombre de passagers réellement présents dans le bus est bien supérieur à ceux contenus par un véhicule particulier. Par conséquent, le nombre de passagers n'est pas pris en compte dans la définition classique du MFD.

Pour pallier cette limite, nous allons étendre la notion de MFD. Pour ce faire, il s'agit de pondérer les différents modes de transport par le nombre de personnes présentes dans les véhicules.

Dans un premier temps, nous allons donc introduire ce concept. Puis, nous verrons comment il peut être appliqué aux MFD estimés par la méthode M1. Enfin, cela nous permettra de conclure sur les domaines de primauté des différentes solutions.

La notion de p-MFD

Afin de prendre en compte le nombre de passagers transportés par chaque mode de transport, nous allons maintenant chercher à exprimer le débit comme un nombre de passagers par unité de temps, i.e. pax/h. Ce débit est noté ϕ et a deux composantes : (i) le flot de passagers généré par les véhicules particulier ϕ_c et (ii) le flot de passagers transportés par les bus ϕ_t :

- (i) ϕ_c est directement dérivé du débit de véhicules particuliers donnés par le MFD et du taux de remplissage moyen d'un véhicule particulier ρ_c [pax/veh].
- (ii) ϕ_t est, quant à lui, calculé à partir de la fréquence des bus et du nombre de passager dans les bus ρ_t [pax/bus].

Par ailleurs, il est pertinent d'introduire la variable τ correspondant à la proportion du nombre de passagers utilisant les véhicules particuliers : $\phi_c = \tau\phi$.

À l'instar de la notion de MFD, il s'agit de déterminer la fonction reliant ϕ à la concentration en passagers, notée δ , traduisant la fonction optimale du système de transport. Pour une demande donnée, i.e. ϕ , il faut donc déterminer la répartition optimale qui conduit à une vitesse moyenne la plus grande possible. Cela revient donc à déterminer la concentration en passager δ la plus faible possible.

Par conséquent :

$$\delta = \min_{\tau} \left[\frac{\phi_c}{v_c} + \frac{\phi_t}{v_t} \right] \quad [3. 3]$$

où v_c et v_t sont respectivement les vitesses des véhicules et des bus.

La relation ainsi calculée est bien exprimée en passagers et est notée p-MFD. Nous allons donc maintenant chercher à la déterminer analytiquement.

La dynamique des véhicules particuliers est modélisée au travers d'un MFD et donc de ses paramètres u , q_x et k_x . Nous supposons que le taux de remplissage d'un véhicule est ρ_c . Par ailleurs, rappelons que le fonctionnement de la ligne de bus est représenté au travers de sa période h , de la vitesse maximale des bus u_b et du taux de remplissage maximal des bus ρ_t . Nous pouvons maintenant déterminer le p-MFD pour chacune des solutions.

Situation fluide

La situation fluide correspond donc aux situations où l'intégralité de la demande ϕ cherchant à s'écouler sera satisfaite par le système de transport. Il s'agit donc de déterminer δ solution de [3. 3]. Il faut noter que la répartition τ par mode va donc varier en fonction de ϕ . La Figure 3. 12 montre le p-MFD obtenu.

Il s'en suit assez naturellement que les usagers commencent par utiliser au maximum les véhicules particuliers. Une fois la capacité atteinte, les passagers se reportent sur le système de bus jusqu'à saturation des deux modes de transports. La Figure 3. 12a1 confirme ces considérations en proposant l'évolution de τ en fonction de ϕ . On voit donc clairement que les véhicules particuliers sont dans un premier temps le mode de transport favorisé, puisque plus rapide. Puis, on assiste ensuite au report modal vers les transports collectifs lorsque le trafic est saturé. La valeur finale τ^* est la répartition à maintenir si l'on souhaite atteindre la capacité maximale du système de transport.

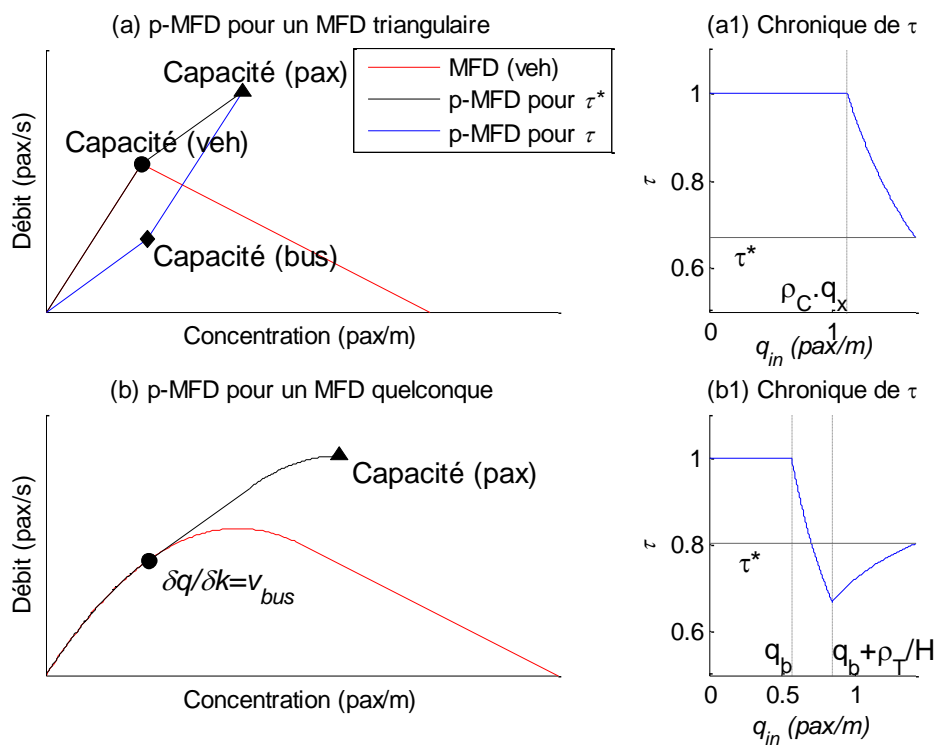


Figure 3. 12 : p-MFD pour (a) MFD triangulaire et (b) MFD quelconque.

Il est important de noter que le même travail peut être fait à partir d'une forme

quelconque du MFD des véhicules (Figure 3. 12b1). La construction est un tout petit peu plus compliquée. En revanche, l'évolution de τ avec la demande en passager diffère. En effet, les véhicules particuliers sont dans un premier temps le mode favori, puis on assiste à un report modal sur les bus jusqu'à saturation du système de transport collectif. À partir de ce moment-là, les passagers sont forcés de se reporter sur les véhicules particuliers jusqu'à atteindre la saturation du système de transport.

Le processus est le même pour les trois solutions envisagées. Les différences entre les p-MFD des solutions *S1*, *S2* et *S3* proposées en Figure 3. 16 sont dues aux différences de vitesses pour les bus. En effet, nous avons supposé que les bus peuvent atteindre une vitesse supérieure lorsqu'une partie de la voirie leur est réservée.

Situation congestionnée

Concernant la situation congestionnée, il faut supposer une restriction de capacité q_{out} en sortie du site d'étude. Cette restriction va donc ralentir les véhicules particuliers et les bus dans le cas *S1*. Dans les cas *S2* et *S3*, les bus ne subissent aucun ralentissement puisqu'une partie de la voirie leur est réservée.

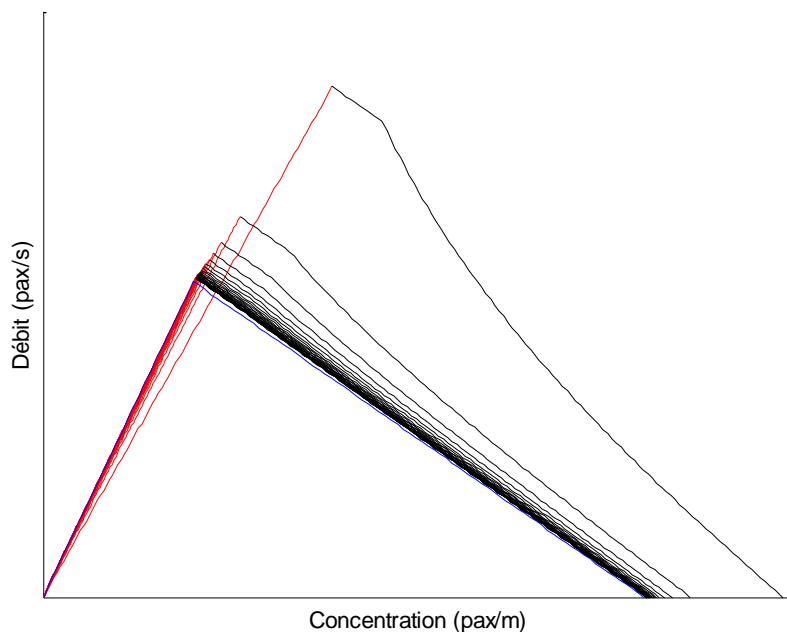


Figure 3. 13 : p-MFD pour différentes valeurs de fréquence de bus pour la solution *S1*.

L'impact de la congestion sur les véhicules particuliers est directement pris en compte au travers du MFD. En revanche, il faut traduire l'impact de cette restriction sur le système de bus.

Pour de faibles restrictions, i.e. $v(q_{out}) > u_b$, les bus ne sont pas touchés par la congestion routière. En revanche, si $v(q_{out}) < u_b$, alors il faut modifier la vitesse des bus le long du boulevard urbain. Pour ce faire, nous supposons ici que le nombre de bus en activité reste constant. Par conséquent, une vitesse réduite des bus a pour impact direct d'augmenter la période h entre deux passages successifs du bus. En effet ces grandeurs sont liées par l'équation : $n_{bus} = (L/hv_{bus})$. Il est donc possible de caractériser l'impact de la congestion sur le système de bus et d'obtenir la partie congestionnée du p-MFD pour le cas où les bus sont dans le trafic. La Figure 3. 13 présente les p-MFD pour plusieurs valeurs de h variées de 1 mn à 1 h. Notez que nous avons supposé que le MFD des véhicules particuliers (la courbe bleue) ne dépend pas de h .

Dans les cas S2 et S3, la congestion n'a pas d'impact sur le système de bus. Il suffit donc de prendre en compte la partie congestionnée du MDF des véhicules particuliers pour obtenir le p-MFD complet. La Figure 3. 14 illustre les p-MFD estimés pour le cas S2 et S3. Ils sont identiques pour tous les deux, parce que nous avons pris un MFD triangulaire pour les véhicules particuliers (la courbe bleue). Ce qui ne dépend pas de la fréquence de bus. Cette hypothèse sera relaxée dans la suite.

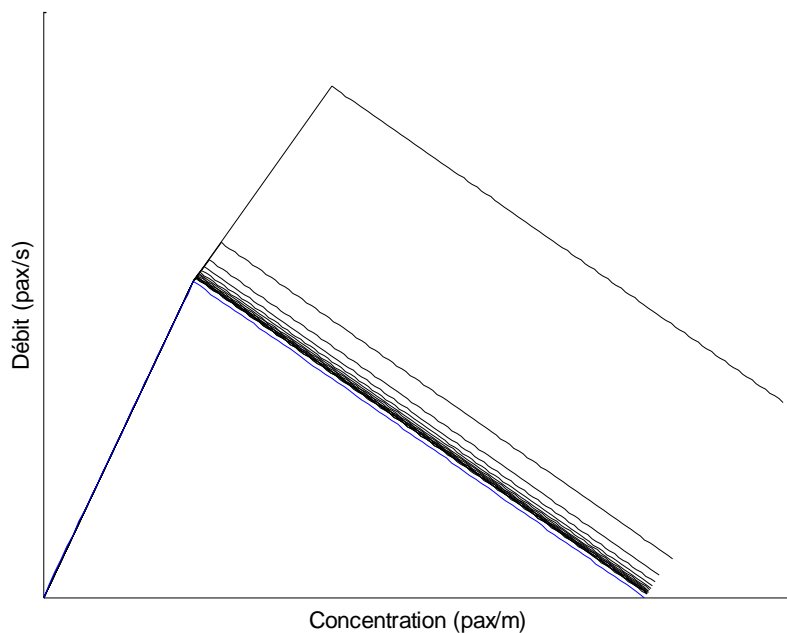


Figure 3. 14 : p-MFD pour différentes valeurs de fréquence de bus pour la solution S2 et S3.

Nous avons maintenant un indicateur agrégé pour déterminer quelles sont les situations de primauté des différents aménagements envisagés. Pour ce faire, il suffit d'exprimer les MFD estimés en passagers et de comparer les résultats.

3.5.2.b Résultats

Pour le site d'étude, les différents MFD ont été estimés par la méthode M1. Une fois ces relations obtenues, il est donc possible de les exprimer en passager afin de pouvoir comparer proprement les différentes solutions. Plusieurs scenarios sont étudiés : $h=3, 6, 9$ et 12 mn. Les résultats sont présentés sur la Figure 3. 15.

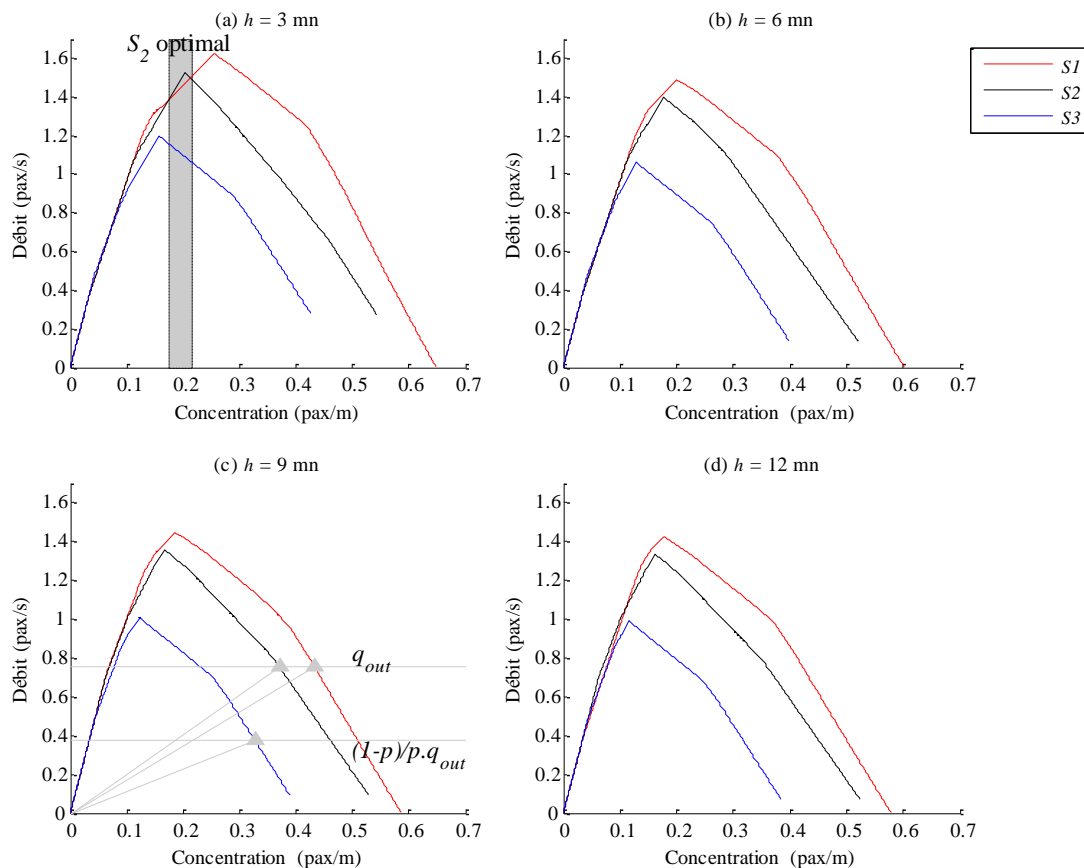


Figure 3. 15 : Comparaisons des trois solutions pour différentes fréquences de bus : (a) $h = 3$ mn, (b) $h = 6$ mn, (c) $h = 9$ mn, et (d) $h = 12$ mn.

Il apparaît clairement que la solution *S1* est la plus efficace quelles que soient les conditions de trafic. Néanmoins, le bénéfice est moindre lorsque la période des bus décroît. Ce résultat est finalement assez logique : il est utile de mettre en place un site dédié aux bus uniquement lorsque la fréquence est importante. Il faut que le système de transport collectif soit fortement utilisé. De plus, on peut supposer que le fait de favoriser le déplacement des bus peut améliorer à la fois l'attractivité du système mais aussi la vitesse moyenne des bus. Nous allons tester cette seconde hypothèse.

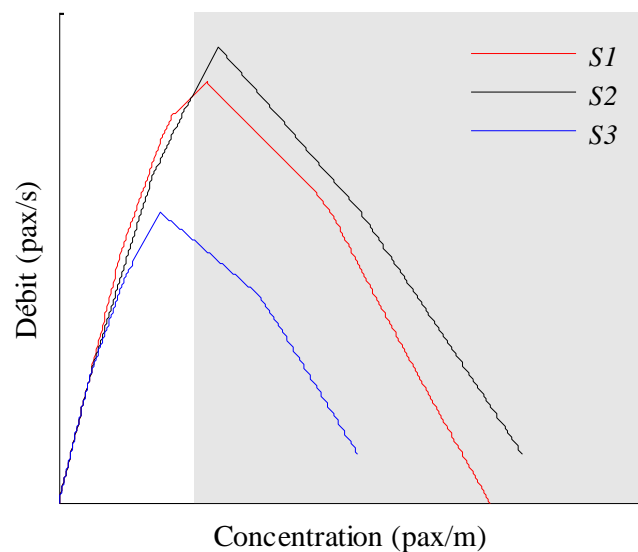


Figure 3. 16 : Comparaison des trois solutions pour un cas plus réaliste.

La Figure 3. 16 propose des p-MFD pour chacune des solutions mais avec des vitesses différentes. Ainsi, dans le cas *S1*, la vitesse des bus est de 3 m/s, dans le cas *S2* de 5 m/s et dans le cas *S3* de 8 m/s. Ce choix traduit le fait que les bus circulent plus facilement lorsqu'ils ont une infrastructure dédiée. Il se trouve alors que la solution *S2* est souhaitable pour des demandes proches de la capacité. Ainsi pour une demande donnée, la vitesse moyenne des passagers est plus élevée dans le cas *S2* que dans le cas *S1*. Pour ces situations de trafic, il est donc envisageable de mettre en œuvre un couloir de bus dynamique.

Pour aller plus loin, il est aussi possible de s'intéresser au cas congestionné. Il se trouve alors que les solutions *S2* et *S3* sont à privilégier. En effet, dès que le flot de véhicules particuliers est contraint, la vitesse moyenne la plus faible est observée pour la solution *S1*. Cependant, concernant la solution *S2*, il faut être capable de créer des couloirs de bus pour ces

situations très congestionnées. Même si les difficultés sont nombreuses, il est tout de même envisageable d'y arriver.

3.6 Conclusion

Ce troisième chapitre cherche donc à évaluer simplement et rapidement le fonctionnement de divers aménagements en faveur des bus d'un corridor urbain. Pour ce faire, nous avons choisi de recourir au MFD.

La première étape est donc de déterminer des méthodes d'estimation prenant en compte l'influence des bus sur le trafic mais aussi des couloirs de bus dynamiques. Trois méthodes ont été proposées : une méthode analytique prenant en compte le bus et les couloirs de bus dynamiques de manière endogène, une méthode analytique prenant en compte le bus et les couloirs de bus dynamique de manière exogène, et une méthode en simulation. Les résultats ont ensuite été comparés. Ils sont assez proches et nous avons donc opté pour la première méthode qui est la plus simple à mettre en œuvre.

La seconde étape est la comparaison des aménagements. Nous avons donc décidé d'étendre la notion de MFD pour prendre en compte le nombre de passagers présents dans les bus et les véhicules particuliers. Ce nouvel indicateur agrégé permet d'évaluer et de comparer le fonctionnement du système de transport dans son ensemble. Il apparaît alors que la situation la plus favorable, en termes de capacité, est de laisser le bus libre dans le trafic. Cependant, avec des hypothèses plus réalistes, le couloir de bus dynamique s'avère être la solution à privilégier en régime très dense ou congestionné.

Synthèse et perspectives

L'objectif de ces travaux de thèse était d'étudier et modéliser une nouvelle méthode de régulation du trafic en faveur des bus : les couloirs de bus dynamiques. Il s'agissait de comprendre l'influence de ce dispositif sur le fonctionnement physique du flot des véhicules particuliers mais aussi d'être capable de le reproduire en modélisation et simulation afin de pouvoir prédire l'efficacité des couloirs de bus dynamiques. L'enjeu final est la comparaison de différents aménagements d'un même site.

Résultats obtenus

Cet objectif peut être considéré comme atteint par l'élaboration des méthodes permettant à la fois d'étudier la phase déclenchement du système de couloirs de bus dynamiques mais aussi de modéliser le trafic à l'échelle d'un boulevard urbain dans son intégralité. Ces différentes méthodes permettent de comparer des aménagements et de rendre un premier diagnostic sur leurs domaines d'utilisation de différentes solutions en faveur des bus (couloirs des bus permanents ou dynamiques). Les principaux résultats obtenus dans les différents chapitres sont maintenant rappelés.

La gestion dynamique des voies de circulation est un dispositif innovant mais tout de même fréquemment utilisé. Cependant, la temporalité de la dynamique reste assez importante puisqu'il s'agit avant tout d'initiatives portant sur la réversibilité des voies en fonction de l'heure de la journée, de la création de voies auxiliaires en utilisant les bandes d'arrêt d'urgence pendant les heures de pointe ou de la réservation d'une voie à un certain type de véhicule jugé prioritaire. Ce dernier dispositif, sous forme de couloirs permanents, est classiquement utilisé pour favoriser la circulation des bus. Néanmoins, les premières expérimentations de couloirs de bus dynamiques, i.e. création du couloir uniquement lorsque le bus est présent, sont apparues au cours de la dernière décennie. Les observations expérimentales montrent que ce type de dispositif peut être efficace pour les bus (baisse du temps de parcours) tout en ayant un effet limité sur la capacité dédiée aux véhicules particuliers. Simultanément, des premiers travaux analytiques ont été proposés. On peut retenir deux verrous scientifiques. D'une part, la phase de déclenchement, pourtant cruciale puisque génératrice d'une réduction de capacité, n'est jamais étudiée. D'autre part, on ne

dispose pas de modèle simple et agrégé pour évaluer à partir de rien l'efficacité d'un couloir de bus dynamique.

La première étape a donc consisté à centrer le travail de thèse sur la phase de déclenchement du système de couloirs de bus dynamiques. Cette phase a été identifiée comme cruciale car c'est le lieu de la première réduction de capacité. Elle conditionne le fonctionnement du boulevard urbain. Nous avons décidé de retenir une technologie simple pour le déclenchement du dispositif. Le bus est détecté à l'aide d'un capteur en amont du premier carrefour à feux. Une fois détecté, la voie de droite lui est réservée à partir du début du prochain cycle. Une fois l'intersection franchie, la voie est rendue à l'ensemble des véhicules. Dans un premier temps, le problème a été résolu analytiquement. Plusieurs niveaux de détails de modélisation ont été testés. Ces modèles ont permis de calculer le débit maximum observé et le temps de parcours des véhicules et du bus. Il s'avère que les couloirs de bus dynamiques sont dans un premier temps contreproductifs puisqu'ils génèrent une file d'attente plus importante à cause de la réduction de capacité. Néanmoins, il est possible de déterminer que si le boulevard est composé de 6 tronçons alors le temps gagné par le bus sur le boulevard compense ce retard initial. Par ailleurs, les indicateurs calculés dépendent de la précision de modélisation. Ce constat nous a poussés à recourir à la simulation afin de reproduire de façon détaillée les phénomènes physiques liés à la circulation urbaine : changements de voies, relaxation, etc. La simulation a permis de confirmer les tendances observées de manière analytique. Une étude globale de sensibilité a aussi été entreprise afin de déterminer les paramètres les plus influents. Il a été montré qu'il s'agit de l'accélération et le coefficient de relaxation. Et la longueur de détection des bus et des paramètres du trafic a toujours une certaine part de la variance liée à la configuration du déclenchement du couloir de bus dynamique.

La seconde étape de travail s'est donc naturellement tournée vers le fonctionnement global d'un boulevard urbain lors de l'activation d'un couloir de bus dynamique. Pour ce faire, nous avons décidé de recourir à un modèle simple et agrégé. L'objectif a été de pouvoir comparer différents aménagements à partir de rien et d'identifier leurs domaines d'application en fonction des conditions de trafic. Parmi les outils proposés par la littérature, le MFD a été identifié comme un modèle pertinent pour remplir ce rôle. Cependant, un verrou scientifique persiste à savoir que les méthodes d'estimation existantes ne prennent en compte ni l'influence des bus sur le trafic, ni l'influence des couloirs de bus dynamiques. Trois méthodes palliant ces défauts ont donc été proposées. Elles diffèrent dans leur conception puisque la méthode M1 prend en compte les influences des bus et des couloirs de bus dynamiques de manière endogène (avant l'estimation du MFD), la méthode M2 intègre ces influences de manière exogène (modification de l'estimation du MFD) et la méthode M3 est une méthode basée uniquement sur la simulation. La comparaison croisée des résultats nous a poussés à utiliser la méthode M1 dans le reste de notre travail car elle faisait le bon

compromis entre une représentation détaillée des phénomènes physique et une facilité d'utilisation. À partir des MFD estimés, trois aménagements ont pu être comparés : un couloir de bus permanent, un couloir de bus dynamique ou laisser le bus dans le trafic. Il s'avère que la dernière situation est toujours optimale lorsqu'aucune hypothèse d'amélioration du fonctionnement des bus n'est prise en compte. En revanche, en utilisant des scénarios plus réalistes, i.e. augmentation de la fréquence et de la vitesse des bus lorsqu'une voie leur est dédiée, les couloirs de bus dynamiques sont à privilégier pour des conditions de trafic très denses ou congestionnées. Cette comparaison des aménagements a été réalisée à l'aide d'une extension du MFD. Le p-MFD permet de prendre en compte le nombre de passagers présents dans les bus et les véhicules particuliers.

Perspectives

Les perspectives de ce travail de thèse reposent essentiellement sur l'étude d'un cas plus complexe et réaliste que le boulevard urbain. En effet, même si le cas étudié dans la thèse propose des caractéristiques réalistes, de nombreuses hypothèses ont été faites pour pouvoir mener de front une approche analytique et en simulation.

La première extension à ce cas d'étude est la prise en compte de mouvements tournants. Il s'agit donc de rajouter aux intersections des véhicules qui entrent et qui sortent. Ces échanges vont venir modifier la dynamique de la circulation urbaine et donc le fonctionnement du système dans son ensemble. Pour adresser ce nouveau problème, une approche en simulation est à privilégier car la prise en compte des mouvements tournants dans l'estimation des MFD est une tâche identifiée comme difficile par la littérature.

La seconde extension porte sur le comportement des bus. Leurs arrêts n'ont pas été reproduits directement mais intégrés de manière moyenne à travers une vitesse de parcours réduite. Il pourrait être envisageable de reproduire plus fidèlement leurs arrêts ainsi que les manœuvres d'approche. Des pistes de travail peuvent être identifiées dans la littérature que ce soit d'un point de vue analytique ou en simulation.

La dernière extension à donner à ces travaux de thèse consiste à différencier le comportement des véhicules particuliers à travers un taux de respect des consignes. En effet, l'efficacité des couloirs de bus dynamiques repose sur la volonté des usagers à libérer la voie pour les bus. Cette extension peut être envisagée de manière analytique, en supposant un débit résiduel sur la voie de droite, ou en simulation puisque SymuVia le permet.

Bibliographie

- [Balk, 1999] K. Balk. Development and laboratory testing of an intelligent bus priority approach. *Presented at the TRB 1999 Mid-year TSP Committee Meeting, 1999.*
- [Balk *et al.*, 2000] K. Balk, D. Urbanik et L. Conrad. Development and evaluation of transit signal priority strategies. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1727:12–19, 2000.
- [Centre, 2013] European Commission-Joint Research Centre. Quasi-random sequence generator by sobol' (up to 51 dimensions in matlab and fortran). *Available at <http://sensitivity-analysis.jrc.ec.europa.eu/software/index.htm>. Last accessed July 26, 2013.*
- [Certu, 2009] Certu. La gestion dynamique des voies. 2009.
- [Chiabaut et Leclercq, 2011] N. Chiabaut et L. Leclercq. Wave velocity estimation through automatic analysis of cumulative vehicle count curves. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2249:1–6, 2011.
- [Ciuffo *et al.*, 2013] B. Ciuffo, J. Casas, M. Montanino, J. Perarnau et V. Punzo. From theory to practice: Gaussian process metamodels for the sensitivity analysis of traffic simulation models. a case study of the aimsun mesoscopic model. *Presented at the 92th TRB Annual Meeting.*, 2013.
- [Ciuffo *et al.*, 2011] B. Ciuffo, V. Punzo et E. Quaglietta. Kriging metamodeling to verify traffic micro-simulation calibration methods. *Presented at the 90th TRB Annual Meeting*, 2011.
- [Courbon et Leclercq, 2011] T. Courbon et L. Leclercq. Cross-comparison of macroscopic fundamental diagram estimation methods. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 20:417–426, 2011.
- [Cukier *et al.*, 1973] R.I. Cukier, C.M. Fortuin, K.E. Schuler, A.G. Petscheck et J.H. Schailbly. Study of the sensitivity of coupled reaction systems to uncertainties in rate coefficients. *The Journal of Chemical Physics*, 26:1–42, 1973.
- [Daganzo, 2005b] C. F. Daganzo. A variational formulation of kinematic waves: basic
-

- theory and complex boundary conditions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 39 (2):187–196, février 2005b.
- [Daganzo, 2005c] C. F. Daganzo. A variational formulation of kinematic waves: solution methods. *Transportation Research Part B: Methodological*, 39 (10):934–950, décembre 2005c.
- [Daganzo et Geroliminis, 2008] C. F. Daganzo et N. Geroliminis. An analytical approximation for the macroscopic fundamental diagram of urban traffic. *Transportation Research Part B: Methodological*, 42 (9):771–781, novembre 2008.
- [Daganzo et Laval, 2005a] C.F. Daganzo et J. A. Laval. On the numerical treatment of moving bottlenecks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 39:31–46, 2005a.
- [Daganzo et Laval, 2005b] C.F. Daganzo et J.A. Laval. Moving bottlenecks: A numerical method that converges in flows. *Transportation Research Part B: Methodological*, 39:855–863, 2005b.
- [Daganzo et Menendez, 2005] C.F. Daganzo et M. Menendez. A variational formulation of kinematic waves : bottleneck properties and examples. *H.S. Mahmassani 16th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, Pergamon, Washington D.C., USA*, pages 345–364, 2005.
- [Edie, 1963] L.C. Edie. Discussion of traffic stream measurements and definitions. *Proceedings of the 2nd International Symposium on the theory of Road Traffic Flow, OECD, Paris*, pages 139–154, 1963.
- [Edie, 1965] L.C. Edie. Discussion of traffic stream measurements and definitions. *Proceedings of the 2nd International Symposium on the theory of Road Traffic Flow, OECD, Paris*, pages 139–154, 1965.
- [Eichler et Daganzo, 2006] M. Eichler et C.F. Daganzo. Bus lanes with intermittent priority : strategy formula and an evaluation. *Transportation Research Part B: Methodological*, 40(9):731–744, 2006.
- [Gazis et Herman, 1992] D.C. Gazis et R. Herman. The moving and "phantom" bottlenecks. *Transportation Science*, 26(3):223–229, 1992.
- [Geroliminis et Boyaci, 2012] N. Geroliminis et B. Boyaci. The effect of variability of urban system characteristics in the network capacity. *Transportation Research Part B: Methodological*, 46(10):1607–1623, 2012.
-

-
- [Geroliminis et Daganzo, 2008] N. Geroliminis et C. F. Daganzo. Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: some experimental findings. *Transportation Research Part B: Methodological*, 42(9) (9):759–770, novembre 2008.
- [Harriet *et al.*, 2005] R. S. Harriet, H. Brendon, I. Miomir et F. Gannett. Transit signal priority (tsp) : a planning and implementation handbook. *United States Department of Transportation, Federal Transit Administration*, 2005.
- [HCM, 2010] HCM. National research council, highway capacity manual. 2010.
- [Herman et Prigogine, 1979] R. Herman et I. Prigogine. A two-fluid approach to town traffic. *Science*, 204:148–151, 1979.
- [Homma et Saltelli, 1995] T. Homma et A. Saltelli. Use of sobol’s quasi random sequence generator for integration of modified uncertainty importance measure. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 32(11):1164–1173, 1995.
- [Iooss, 2009] B Iooss. Numerical study of the metamodel validation process. *Proceedings of the First International Conference on Advances in System Simulation*, 2009.
- [Jacques, 2005] J. Jacques. Analyse de sensibilité globale. [http : // math. univ-lille1.fr / jacques /](http://math.univ-lille1.fr/jacques/), 2005.
- [Kleijnen, 2008] J.P.C. Kleijnen. Design and analysis of simulation experiment. springer. *International Series in Operations Research and Management Science, Stanford, USA*, 2008.
- [Kleijnen, 2009] J.P.C Kleijnen. Krigingmetamodeling in simulation: A review. *European Journal of Operational Research*, 192:707–716, 2009.
- [Laval et Leclercq, 2008] J. Laval et L. Leclercq. Microscopic modeling of the relaxation phenomenon using a macroscopic lane-changing model. *Transportation Research Part B: Methodological*, 42(6):511–522, 2008.
- [Laval, 2004] J. A. Laval. Hybrid models of traffic flow : impacts of bounded vehicle accelerations. *Thesis of doctor, University of California, Berkeley*, 2004.
- [Lebacque *et al.*, 1998] L.P. Lebacque, J.B. Lesort et F. Giorgi. Introducing buses into first-order macroscopic traffic flow models. *Transportation Research Record*, 1664:70–79, 1998.
- [Leclercq, 2007] L. Leclercq. Bounded acceleration close to fixed and moving bottlenecks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 41(3):309–319, 2007.
-

-
- [Leclercq *et al.*, 2004] L. Leclercq, S. Chanut et J.B. Lesort. Moving bottlenecks in lighthill-whitham-richards model : a unified theory. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1883:3–13, 2004.
- [Leclercq et Geroliminis, 2013] L. Leclercq et N. Geroliminis. Estimating mfd's in simple networks with route choice. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2013.
- [Leclercq *et al.*, 2011] L. Leclercq, J. A. Laval et N. Chiabaut. Capacity drops at merges: an endogenous model. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 17:12–26, 2011.
- [Leclercq et Chevallier, 2007] Laval J. A. Leclercq, L. et E Chevallier. The lagrangian coordinates and what it means for first order traffic flow models. *Proceedings of the 17th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, London*, pages 735–753, 2007.
- [Li *et al.*, 2008] Y. Li, P. Koonce, M. Li, K. Zhou, Y. Li, S. Beard, W. Zhang, L. Hegen, K. Hu, A. Skabardonis et Z. Sonja Sun. Transit signal priority research tools. *United States Department of Transportation*, 2008.
- [Lighthill et Whitham, 1955] M. Lighthill et J. Whitham. On kinematic waves. i. flow movement in long rivers. ii. a theory of traffic flow on long crowded road. *Proceedings of Royal Society*, A229:281–345, 1955.
- [Lophanev *et al.*, 2002] S.N. Lophanev, H.B. Nielsen et J. Sondergaard. Dace: A matlabkriging toolbox, version 2.0. *IMM Technical Report IMM-REP-2002-12. Technical University of Denmark.*, 2002.
- [Mahmassani *et al.*, 1984] H. S. Mahmassani, J. C. Williams et R. Herman. Investigation of network-level traffic flow relationships: some simulation results. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 971:121 – 130, 1984.
- [Marrel *et al.*, 2008] A. Marrel, B. Iooss, F. Van Dorpe et E. Volkova. An efficient methodology for modeling complex computer codes with gaussian processes. *Computational Statistics and Data Analysis*, 52:4731–4744, 2008.
- [Matheron, 1963] G. Matheron. Principles of geostatistics. *economic geology*. 58 (8):1246–1266, 1963.
- [Munoz et Daganzo, 2002] J.C. Munoz et C.F. Daganzo. Moving bottlenecks: a theory grounded on experimental observation. *15th International Symposium on Transportation and Traffic Theory (M.A.O. Taylor, ed.)*, Programon-Elsevier, Oxford, United Kingdom, pages 441–462, 2002.
-

-
- [Nakanishi, 1997] Y. Nakanishi. Part 1: Bus: Bus performance indicators: On-time performance and service regularity. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1571(1):1–13, 1997.
- [Newell, 1993] G. F. Newell. A simplified theory of kinematic waves in highway traffic: Part i, general theory; part ii, queuing at freeway bottlenecks; part iii, multi-destination flows. *Transportation Research Part B: Methodological*, 27:281–313, 1993.
- [Newell, 1998] G. F. Newell. A moving bottleneck. *Transportation Research Part B: Methodological*, 32(8):531 – 537, 1998.
- [Newell, 2002] G.F. Newell. A simplified car-following theory: a low-order model. *Transportation Research Part B: Methodological*, 36:195–205, 2002.
- [Nouvier, 2004] J. Nouvier. L'affectation variable des voies et de l'espace public. *Ecomm*, 2004.
- [ooDACE, 2013] ooDACE. oodacetoobox. <http://www.sumo.intec.ugent.be/?q=ooDACE>, 2013.
- [Punzo et Ciuffo, 2011] V. Punzo et B. Ciuffo. Sensitivity analysis of car-following models : methodology and application. *Presented at the 90th meeting of the Transportation Research Board Annual Meeting*, 2011.
- [Richards, 1956] P.I. Richards. Shockwaves on the highway. *Operational Research*, 4:42–51, 1956.
- [Sacks *et al.*, 1989] J. Sacks, W.J. Welch, T.J. Mitchell et H.P. Wynn. Design and analysis of computer experiments. *Statistical Science*, 4:409–435, 1989.
- [Saltelli *et al.*, 2010] A. Saltelli, I. Annoni, P. and Azzini, F. Campolongo, M. Ratto et S. Tarantola. Variance based sensitivity analysis of model output. design and estimator for the total sensitivity index. *Computer Physics Communications*, 181:259–270, 2010.
- [Saltelli et Annoni, 2010] A. Saltelli et P. Annoni. How to avoid a perfunctory sensitivity analysis. *Environmental Modelling and Software*, 25:1508–1517, 2010.
- [Saltelli *et al.*, 2000] A. Saltelli, K. Chan et E.M. Scott. Sensitivity analysis. *Wiley*, 2000.
- [Saltelli *et al.*, 2008] A. Saltelli, T. Ratto, M. and Anres, F. Campolongo, J. Cariboni, D. Gatelli, M. Saisana et S. Tarantola. Global sensitivity analysis-the primer. *John Wiley and Sons Ltd, Cheichester England*, 2008.
- [Saltelli *et al.*, 2004] A. Saltelli, S. Tarantola, F. Campolongo et M. Ratto. Sensitivity
-

- analysis in practice: A guide to assessing scientific models. *John Wiley and Sons Ltd, Cheichester England*, 2004.
- [Santner *et al.*, 2003] T. Santner, B. Williams et W. Notz. The design and analysis of computer experiments. *Springer*, 2003.
- [SIRI, 2010] H. SIRI. Modélisation du trafic routier pour l'évaluation des voies de bus dynamiques. *Memoire de tfe, Vaulx-en-Velin : ENTPE, sous la direction de N. Chiabaut.*, 2010.
- [Sobol, 1967] I.M. Sobol. On the distribution of points in a cube and the approximate evaluation of integrals. *Comput.Math.Math.Phys*, 7:86–112, 1967.
- [Sobol, 1976] I.M. Sobol. Uniformly distributed sequences with an additional uniform property. *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 16 (5):236–242, 1976.
- [Sobol, 1993] I.M. Sobol. Sensitivity analysis for non-linear mathematical models. *Mathematical Models and Computational Experiment*, 1:407–414, 1993.
- [Sobol, 2001] I.M. Sobol. Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their monte carlo estimates. *Mathematics and Computers in Simulation*, 55:271–280, 2001.
- [Sobol *et al.*, 2007] I.M. Sobol, S. Tarantola, D. Gatelli, S. Kucherenko et W. Mauntz. Estimating the approximation error when fixing unessential factors in global sensitivity analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, 92:957–960, 2007.
- [Stein, 1999] M.L. Stein. Interpolation of spatial data: some theory for kriging. *Springer, New York*, 1999.
- [Storlie *et al.*, 2009] C.B. Storlie, L.P. Swiler, J.C. Helton et C.J. Sallaberry. Implementation and evaluation of nonparametric regression procedures for sensitivity analysis of computationally demanding models. *Reliability Engineering and System Safety*, 94:1735–1763, 2009.
- [SymuVia, 2013] SymuVia. Symuvia in licit of entpe/ifsttar. <http://www.inrets.fr/linstitut/unites-de-recherche-unites-de-service/licit/equipements-scientifiques/symuvia-symbruit.html>, 2013.
- [Todd *et al.*, 2006] M. Todd, M. Barth, M. Eichler, C. F. Daganzo et S. A. Shaheen. Enhanced transit strategies: bus lanes with intermittent priority and its technology architectures for tod enhancement. *Institute of Transportation Studies, University of*
-

California, Davis, 2006.

- [Viegas, 1997] J. Viegas. Turn of the century, survival of the compact city, revival of public transport. *Transforming the port and transportation business*, pages 51–63, 1997.
- [Viegas et Lu, 1999] J. Viegas et B. Lu. Bus priority with intermittent bus lanes. *Proceeding of Seminar D, European Transportation Conference, Cambridge, UK, 1999.*
- [Viegas et Lu, 2001] J. Viegas et B. Lu. Widening the scope for bus with priority with intermittent bus lanes. *Transportation Planning and Technology*, 24:87–110, 2001.
- [Viegas et Lu, 2004] J. Viegas et B. Lu. The intermittent bus lane signal settings within an area. *Transportation Research Part C*, 12:453–469, 2004.
- [Viegas et al., 2007] J. Viegas, R. Roque, B. Lu et J. Viera. Intermittent bus lane system: demonstration in lisbon, portugal. *paper submitted to the Transportation Research Board Annual Meeting, 2007.*
- [Volkova et al., 2008] E. Volkova, B. Iooss et F. Van Dorpe. Global sensitivity analysis for a numerical model of radionuclide migration from the rc "kurchatov institute" radwaste disposal site. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 22:17–31, 2008.
- [Xie et al., 2013] X. Xie, N. Chiabaut et L. Leclercq. Multimodal level of service for urban streets: cross-comparison of estimation methods. *The 92nd meeting of the Transportation Research Board, 2013.*
- [Zyryanov et Mironchuk, 2012] V. Zyryanov et A. Mironchuk. Simulation study of intermittent bus lane and bus signal priority strategy. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 48:1464–1471, 2012.
-

Annexes

Annexe 1

Chiabaut, N., Xie, X. et Leclercq, L. [2013]. Performance analysis for different designs of a multimodal urban arterial. *Transportmetrica B*, soumis.

1 **Performance analysis for different designs of a**
2 **multimodal urban arterial**

3

4

5 Nicolas Chiabaut*

6 Xiaoyan Xie

7 Ludovic Leclercq

8

9 * Corresponding author

10 Email: nicolas.chiabaut@entpe.fr

11

12 Université de Lyon

13 IFSTTAR / ENTPE

14 Laboratoire Ingénierie Circulation Transport LICIT

15 Rue Maurice Audin

16 F-69518 Vaulx-en-Velin, France

17

18

19 Paper submitted for presentation to the 93rd meeting of the Transportation Research
20 Board

21 Submission date: August 1st, 2013

22 Paper number: 14-0124

23 5560 Words + 7 figures + 0 table = 7310 words

24

25 **ABSTRACT**

26

27 This paper aims to introduce an analysis framework to assess and compare different
28 designs of an urban multimodal arterial before their implementation. Especially, the
29 work focuses on dedicated bus lanes and intermittent bus lanes, which are compared to
30 the reference case where the buses and cars are mixed. First, analytical considerations
31 highlight the influence of buses and intermittent bus lanes on traffic dynamics in free-
32 flow conditions. Second, the paper resorts to an aggregated and parsimonious model to
33 account for both free-flow and congested traffic states. Such a model often provides a
34 better understanding and valuable insights on multimodal traffic dynamics on the
35 arterial. To this end, the concept of passenger fundamental diagram is introduced. With
36 this new relationship, efficiency of the global transport system, i.e. behaviors of cars and
37 buses, is assessed and domains of applications of the different transit strategies are
38 identified.

39

40 INTRODUCTION

41

42 In urban areas, cities and transit agencies have to face an accelerating demand for
43 mobility. Attractiveness of public transports is significantly impacted by traffic
44 congestion. Especially, bus travel times can be deteriorated due to the traffic congestion
45 and notably queues at intersections. Such disturbances limit the quality and
46 effectiveness of buses since they experience major delays during peak hours.
47 Consequently, it strengthens the competitiveness of individual vehicle compared to
48 transit systems. To reverse this trend, many transit agencies and/or cities have
49 developed and implemented several solutions for allowing buses to avoid traffic queues.
50 These solutions may apply at different levels: optimizing the bus itself (articulated bus,
51 double-decker bus, etc.), controlling bus lines or changing road infrastructures. We will
52 focus at this last level by considering the various strategies that can improve transit
53 system efficiency. Basically, transit strategies fall into three categories: (i) solutions
54 related to transit signal priority (TSP), (ii) dedicated bus lanes (DBL) and (iii) dynamic
55 allocation of lanes.

56

57 (i) The objective of TSP is to provide priority to transit vehicles at signalized
58 intersections while minimizing the adverse impacts on the rest of the traffic stream.
59 This can be done off-line (based on pre-determined time-table) or on-line. Thus, when
60 a bus arrives at a signalized intersection, it requests the priority on the downstream
61 traffic signal with an in-vehicle device or by a fixed sensor. This solution is easy to
62 implement and allows a great saving of time by removing all red phases. TSP
63 solutions and strategies related to TSP (for instance pre-signals) have been studied by a
64 handful of studies (1-6). However, the effectiveness of TSP depends on the bus detection
65 system because unnecessary priority requests do not improve bus travel times while
66 significantly increase the cars delay by disrupting normal signal control operations.
67 Moreover, the effectiveness of TSP strongly decreases in dense traffic and can yield on
68 strong congestions on the secondary network.

69

70 (ii) DBLs have become widely accepted and spread all over the world. The most
71 common way of creating DBL is by converting an existing car lane because space is very
72 limited in urban areas. This conversion removes all the delays due to car traffic

73 congestion except if intersections are gridlocked. Associated with other features such as
74 TSP, benefits of these solutions have been highlighted by various studies (4-6). However,
75 this system can greatly compromise the level of service for private vehicle users by
76 generating additional congestions.

77

78 (iii) To overcome this limitation, researchers (7-10) have proposed different variations
79 of the concept of dynamic bus lanes. This system is based on the idea that intermittent
80 opening of the bus lane to general traffic can increase the capacity of DBL. Thus an
81 intermittent bus lane (IBL) seeks to restrict individual vehicles from changing into the
82 lane ahead of the bus only when it is coming. The first experimentation carried out in
83 Lisbon reveals that IBLs can improve efficiency of bus systems in urban area without
84 significantly degrading car traffic (8). Recent analytical investigations (9-11) evaluate
85 the feasibility, costs and benefits of IBLs and try to identify the domain of application of
86 IBLs.

87

88 The sequel of the paper focuses on the two last solutions. The objectives are (i) to
89 provide a framework for the comparison of the performance of transit strategies and (ii)
90 to apply this new method to the case of IBL and DBL strategies. Therefore, the optimal
91 domains of application of these strategies can be determined and help cities and/or
92 transit agencies to compare and to anticipate performance of different control
93 operations before implementation. A comparison with the “do-noting” alternative where
94 the bus stays in the traffic is also performed.

95

96 In this paper, we resort to an aggregated and parsimonious model to evaluate and
97 compare the different transit strategies. Such a model often provides a better
98 understanding and valuable insights on arterial traffic dynamics. The macroscopic
99 fundamental diagram (MFD) can play this role. Indeed, several studies have shown that
100 MFD is a reliable tool for traffic agency to manage and evaluate solutions for improving
101 mobility. Moreover, recent works (12-15) propose accurate method to analytically
102 estimate MFD for arterial based on its characteristics (number of lanes, traffic signal
103 parameters, etc.). These existing methods will be extended to account for both buses and
104 IBL strategies.

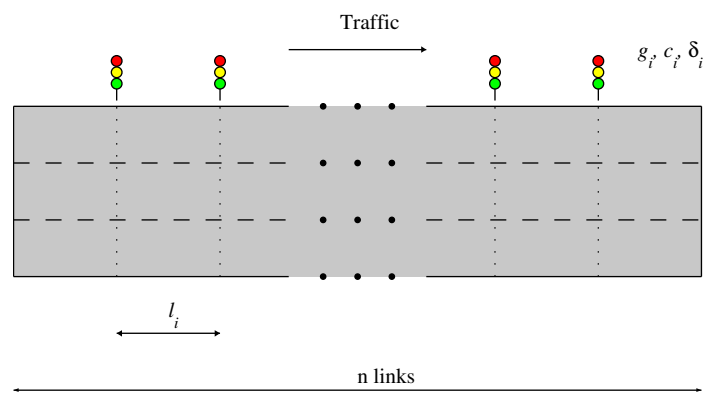
105

106 However, one of the remaining lacks of MFD is that it only expresses the performance of
 107 the system in terms of vehicles. Consequently, the mean number of passengers present
 108 in each transport mode is not considered. To the author's best knowledge, (9) have
 109 presented the only instance trying to overcome this drawback. They seek to calculate
 110 average pace for each mode and calculate the changes before and after IBL
 111 implementation. However, the number of passenger is roughly accounted for and the
 112 analysis stays very qualitative according to the authors themselves. Thus we propose in
 113 the paper to extend the concept of MFD in order to take into account the number of
 114 passengers traversing the arterial and not only the number of vehicles.

115
 116 The paper is organized as follow: Section 2 briefly specifies the study case. Section 3
 117 focuses on traffic flow dynamics under IBL strategy and presents a method to evaluate
 118 and analyze traffic at the arterial level. Section 4 introduces the notion of passenger
 119 macroscopic fundamental diagram (p-FD). Section 5 is devoted to the comparison of the
 120 different selected transit strategies. Finally, Section 6 proposes a discussion.

121
 122 **CASE STUDY**

123 In this paper, we consider here a hypothetic urban arterial (see Figure 1) composed of n
 124 successive links with traffic signal and p lanes. The length of link i is l_i and its signal
 125 settings are: green g_i , red r_i , cycle c_i and offset δ_i from a common reference. The total
 126 length of the arterial is L . In the remaining of the paper, we assumed $n=11$ links, $p=3$
 127 lanes and $l_i=200$ m. Concerning the traffic signal settings, g_i is equal to 60s and c_i to 90s.
 128 For sake of simplicity, we supposed that there is no offset, $\delta_i=0$.



129
 130
 131
 132

Figure 1: study case

133 In this arterial, we assumed that three different transit strategies can be applied: (*S1*)
134 the “do-noting” alternative where the bus is embedded in the car flow, (*S2*) IBL strategy
135 and (*S3*) DBL strategy.

136
137 All lanes of the arterial are modeled as a single pipe and traffic on each link is supposed
138 to obey a triangular fundamental diagram (FD) that only depends on three observable
139 parameters: free-flow speed u [m/s], wave speed w [m/s] and jam density k_x [veh/m]
140 (*20-21*). Capacity q_c [veh/s] and optimum density k_c [veh/m] can be easily derived:
141 $q_c = uw\kappa/(u + w)$ and $k_c = q_c/u$. For the numerical examples in this paper we have
142 used $u = 15$ m/s, $w = 5$ m/s and $\kappa = 0.185$ veh/m ($q_c = 2.08$ veh/s = 7500 veh/h).

143
144 Concerning the bus system, bus stops are not explicitly represented in this paper. To this
145 end, buses travel along the arterial with a lower average speed to mimic existence of bus
146 stops: $u_b = 8$ m/s. The bus time-headway is denoted h and various values are tested in the
147 sequel of the paper. It is worth noticing that h and u_b can be related to n_{bus} the number
148 of bus in operation on the arterial: $n_{bus} = L/(h.u_b)$.

149

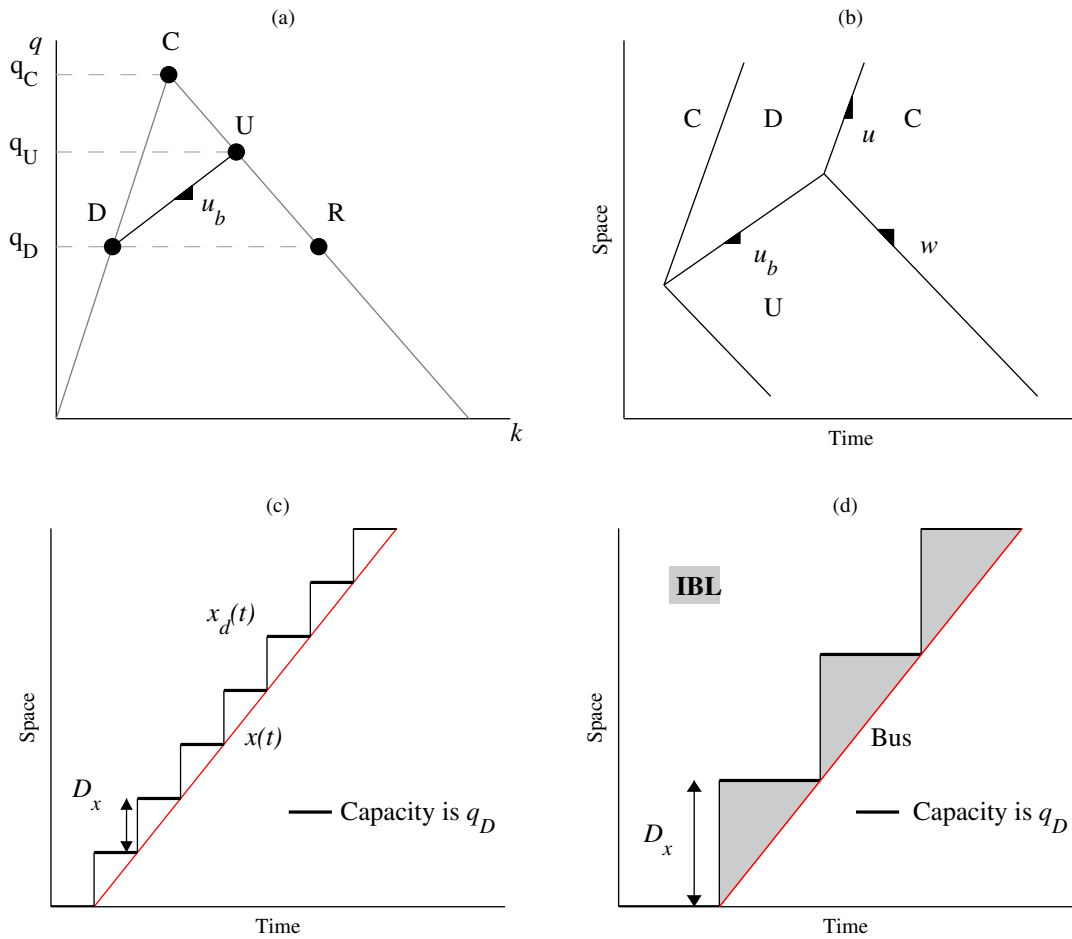
150 ESTIMATION OF MFD FOR A MULTI-MODAL ARTERIAL

151

152 Connections between MB and IBL strategies

153 When a bus shares a lane with cars, it acts as moving bottleneck (MB) that locally
154 reduces the available capacity. Note that such a bottleneck is said to be active when it
155 really influences the surrounding traffic (*16-17*). Therefore in case *S1*, the bus can be
156 modeled as an ordinary MB that traverses arterial at speed u_b . As in (*18*), buses are
157 treated as point bottlenecks, i.e. they have no spatial dimension. When the MB is active,
158 it generates different traffic conditions upstream and downstream of the bus trajectory.
159 State **D** corresponds to the downstream traffic conditions (see Figure 2a), which
160 corresponds to a free-flow situation. The associated flow is assumed to be equal to the
161 capacity of the reduced system (minus one lane): $q_D = q_c \cdot \frac{p-1}{p}$ (*17,27-28*). State **U**
162 describes the upstream congested condition. The associated flow can be completely
163 determined based on the state **D** and the speed of the MB u_b (see Figure 2a). Figure 2b
164 shows the solution of a simple example in time-space diagram. The bus enters an
165 arterial flowing at capacity (state **C**), traverses at u_b and leaves the arterial. According to

166 kinematic wave theory, interface between states U and D travels at speed u_b along the
 167 arterial. Note that R corresponds to the congested situation with the same flow than
 168 state D .
 169



170

171

172

173

174

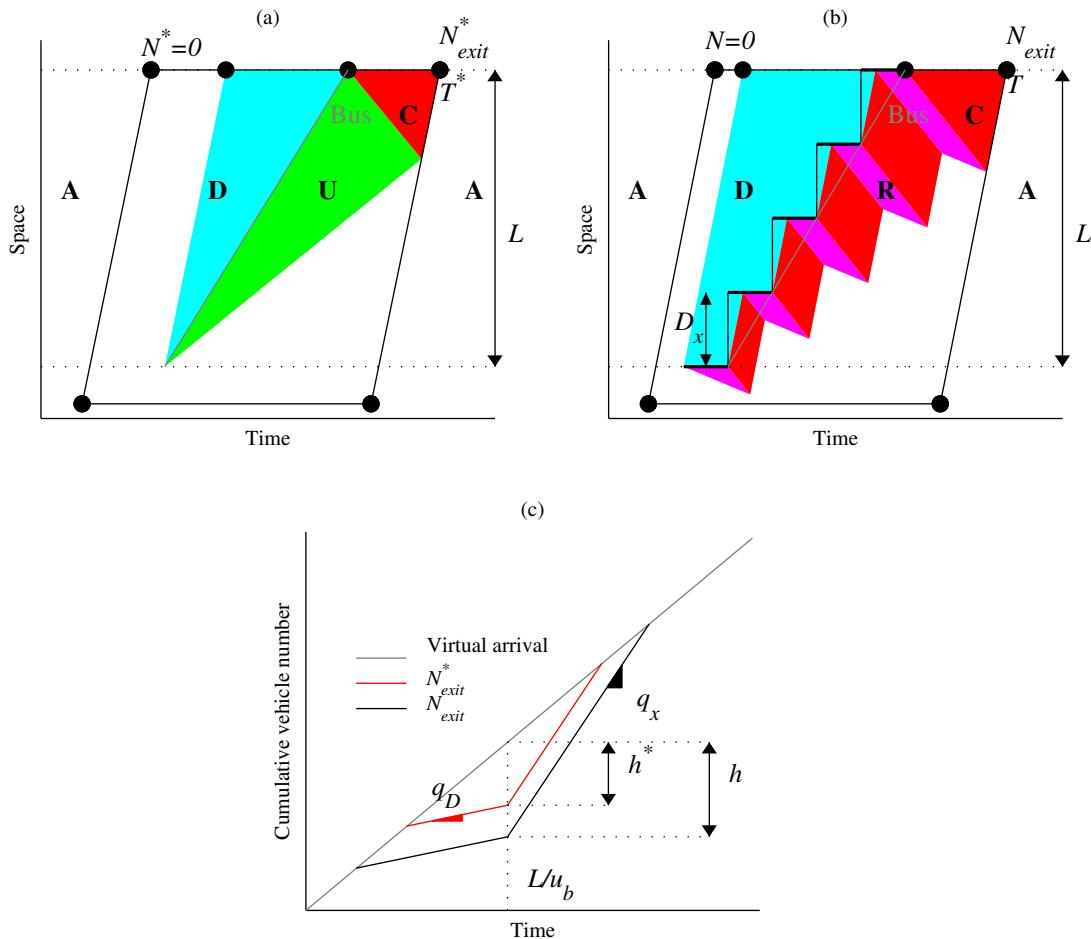
Figure 2: (a) MB theory in triangular FD (b) simple example
 (c) Discretization of the MB trajectory (d) IBL implementation

175 As proposed in (17), the continuous trajectory $x(t)$ of a MB can be approximated by a
 176 step-function $x_d(t)$, see Figure 2c. Note that the space step of $x_d(t)$ is equal to D_x . Thus,
 177 one simply defines a static bottleneck capacity q_d along the created lattice. In this
 178 framework, the impacts of the MB are modeled as successive capacity reductions. It is
 179 interesting to notice that the discretization of the MB can be easily connected to the case
 180 $S2$. Indeed, the IBL implementation is only an approximation of the MB trajectory with a
 181 larger D_x , see Figure 2d. In that case, the IBL is implemented on successive portions of
 182 length D_x of the arterial.

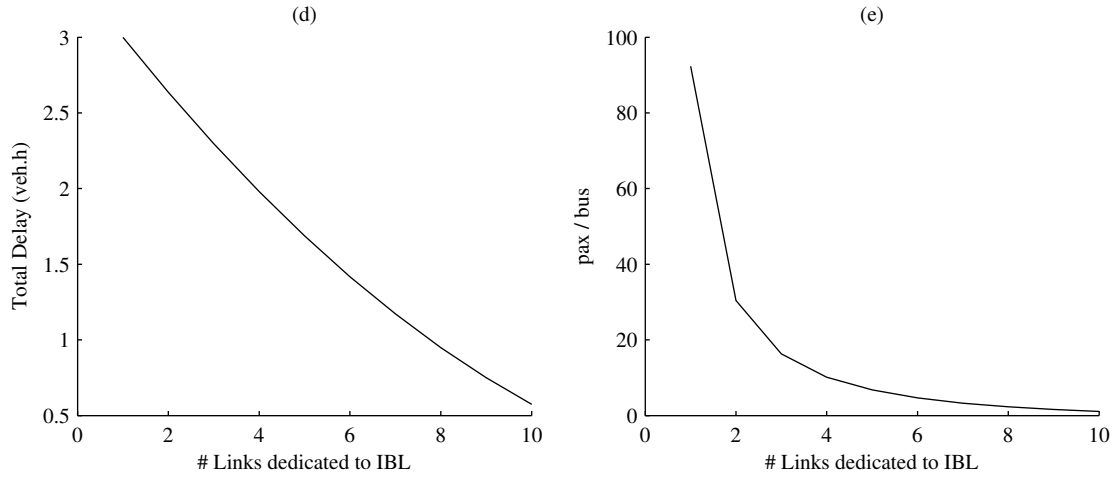
183 (17) mentioned that such a discretization lattice introduces an error in terms of vehicle
 184 number. It is thus appealing to focus on this error to analytically shed light on the
 185 impacts of IBL on traffic dynamics. This error can be calculated according to the
 186 variational theory (18-20). Let $N(t,x)$ be the cumulative number of vehicles that travel
 187 through the theoretical site. Study of variations of N provides a convenient scheme to
 188 calculate N at exit of the arterial when the queue has been vanished, i.e. N_{exit} .

189
 190 Figure 3 shows the paths that can be used to calculate the error introduced by the
 191 approximation method. To this end, we aim to determine the variation of N between a
 192 common reference vehicle ($N=0$) and the last vehicle delayed. Notice that the inflow is
 193 denoted q_A and is assumed to be smaller than q_U for sake of simplicity.

194



195



196
197 **Figure 3: time-space diagrams of (a) $S1$ (MB) (b) $S2$ (IBL)**

198 **(c) Queuing diagrams for solution $S1$ and $S2$**

199 **(d) Evolution of delay with the number of links dedicated to IBL**

200 **(e) Bus occupancy required to balance the delays created by IBL**

201

202 Figure 3a depicts the time-space diagram of traffic conditions when MB is continuously
203 modeled. When a bus enters into the arterial, it becomes an active MB and generates
204 state D downstream and state U upstream. Both states are separated by a wave
205 travelling at speed u_b . Once the bus left the arterial, state C is generated and propagates
206 upstream at speed w until the queue is recovered. From a practical perspective, this first
207 situation corresponds to the above-defined case $S1$. In the sequel of the paper, the
208 corresponding variables are denoted with a superscript *. Especially, it is useful to
209 determine the time T^* required by the queue to recover because $N_{exit}^* = q_A \cdot T^*$. To this
210 end, the path defined by the black lines and the black dots in Figure 3a can be used and it
211 comes from vehicle conservation that:

212
$$T^* = \frac{1}{q_C - q_A} \left[\frac{D_l}{u_b} (q_D - q_A - q_C) + \frac{L}{u_b} (q_C - q_D) \right] \quad (1)$$

213 Figure 3b shows the associated time-space diagram when the IBL strategy is triggered.
214 In that case, the fixed capacity reduction generates state D downstream and state R
215 upstream. When the reduction is relaxed, state C is created and propagates upstream at
216 speed u until it reaches the next capacity reduction. The path defined by the black lines
217 and the black dots, which is different from the path of situation $S1$, makes possible to
218 calculate N_{exit} . The reader can easily verify that the time T required by the queue to
219 recover is now given by:

220
$$T = T^* + \frac{1}{q_C - q_A} \gamma \quad (2)$$

221 where $\gamma = (q_A - q_D) \cdot \frac{D_x}{u_b}$. The cumulative number of vehicles leaving the arterial N_{exit} is
 222 now equal to $q_A \cdot T$.

223
 224 Consequently, the error in terms of vehicles number introduced by the discretization
 225 process, i.e. the IBL strategy, can be calculated as $\Delta N = N_{exit} - N_{exit}^*$:

$$226 \quad \Delta N = \frac{q_A}{c - q_A} \gamma \quad (3)$$

227 Notice that this error tends towards zero when D_x reduces (17). From a practical
 228 perspective, it means that the queue needs more time to recover when IBL is active, i.e.
 229 for solution $S2$. Thus such a strategy introduces a delay that can also be analytically
 230 calculated. To this end, Figure 3c shows the virtual arrival and effective departure of
 231 cars at exit of the arterial. The main differences between a continuous MB, i.e. $S1$, and
 232 the IBL case, i.e. $S2$, are that (i) queuing begins sooner due to the onset of the IBL and (ii)
 233 lasts longer because the queue required more time to recover.

234
 235 Based on the graphical observations of Figure 3c, which shows the associated queuing
 236 diagram at exit of the arterial, the total delay TTD is calculated as the area between the
 237 arrival of cars and the effective departure. To this end, altitudes h^* and h of the queuing
 238 triangles have to be determined:

$$239 \quad h^* = \frac{L}{u_b} (q_A - q_D) \quad (4a) \quad \text{and} \quad h = h^* + \gamma \quad (4b)$$

240 Finally, it comes that the total delay of $S1$ and $S2$ are respectively:

$$241 \quad TTD^* = \frac{h^*}{2} \left(T^* + \frac{L}{u_b} - \frac{L}{u} \right) \quad (5a) \quad \text{and} \quad TTD = TTD^* + \frac{\gamma}{2} \left(h^* + \frac{1}{q_A - q_D} + T \right) \quad (5b)$$

242 TTDs provides a first comparison of solutions $S1$ and $S2$. Figure 3d shows the evolution
 243 of $TTD - TTD^*$ with the length of the arterial dedicated to the bus, i.e. D_x . The delay
 244 decreases with number of links of the arterial simultaneously dedicated to the bus. This
 245 is not surprising because the error of the discretization process decreases with the D_x
 246 according to equation (3).

247
 248 It is thus appealing to determine the required number of passenger in a bus to balance
 249 the delay introduced by the IBL solution. Indeed, the bus passengers save time at each
 250 intersection because the bus can now jump queues. This benefit is easily determined
 251 from traffic signal parameters and is equal to $r/2$. The required number of passengers in
 252 the bus is analytically calculated by comparing the total delay introduced to the time

253 saving. This is the main insight revealed by Figure 3e. It turns out that only 20
254 passengers are required for large D_x (bus time-headway is equal to 10min). The
255 required number drops to less than 10 for smaller D_x . IBL seems to be a promising
256 solution to promote transit system.

257

258 However, this last result must be balanced because (i) we only focus on free-flow
259 situation and (ii) influence of traffic signals is not considered. Even if both issues can be
260 addressed within the same framework, it turns out that the task is very complicated and
261 tedious. Therefore, the study focuses now at the arterial level and resorts to MFD. Use of
262 MFD makes possible (i) to easily reproduce both free-flow and congested traffic
263 situations and (ii) to accurately account for impacts of traffic signals on traffic flow
264 dynamics.. Moreover, recent works (14) provide a method to accurately estimate MFD of
265 multi-modal networks. This method can be easily extended to account for IBL.

266

267 Consequently, estimated MFDs can be used to evaluate and compare the different
268 solutions for the studied arterial. However, it turns out that MFDs are not sufficient to
269 evaluate multi-modal arterial. Indeed, MFDs only represent dynamics of car traffic flow.
270 Consequently, the definition of MFD is extended to account for the number of
271 passengers in each transport modes. This new relationship called passenger MFD, p-FD,
272 relates the number of passengers in the arterial to the space-mean speed. It only
273 depends the car MFD and on the characteristics of the bus system.

274

275 **Estimation method**

276 The aim of this section is to describe the method to endogenously estimates MFDs and
277 accounts for traffic signal settings and buses represented as a moving obstruction. This
278 method presented in (15) extends works of (14) that defines an accurate estimation
279 method founded on VT for arterials with heterogeneous traffic signal parameters. The
280 extension deals with introducing the impacts of moving bottlenecks and IBL into the
281 proposed framework. The detailed presentation of the method proposed by (15) is out
282 of the scope of this paper.

283

284 *General methodology*

285 The foundation of the variational method comes from (21). This paper shows that a MFD
286 can be defined by a set of cuts $\{C_j\}$. A cut corresponds to a line in the (k,q) plane
287 parameterized by its y-intercept r_j and its slope v_j , i.e. $q=r_j+kv_j$. Cuts are associated to
288 moving observers that moves into the considered arterial with a constant speed v_j .

289

290 (14) provides a simple solution to determine r_j for different value of v_j . It defines a
291 sufficient but minimal variational graph that encompasses all the optimal paths
292 associated to a mean speed v_j in order to properly estimate r_j even in heterogeneous
293 cases. To be precise, two variational graphs have to be constructed to deal with free-flow
294 ($v_j \geq 0$) and congested cuts ($v_j < 0$). We will only present how to define the free-flow graph
295 (the congested graph can be obtained by replacing u by w and considering the arterials
296 in the reserve direction). Then the two graphs have to be merged to determine the
297 optimal paths. The free-flow graph is composed of three kinds of edges, see Figure 4a:

- 298 a. the red phases of all traffic signals;
- 299 b. the green phases of all traffic signals;
- 300 c. the paths with speed u that start from the ends of all red times of each signal and
301 propagate until another edge (a). Vertices should be added anytime such a path
302 crosses edges (b) and (a).

303

304 The proof of sufficiency can be found in (14). Cuts j are defined by all the paths into the
305 variational graph that have the same initial and final points, i.e. the same speed v_j . The
306 associated r_j corresponds to the least-cost between these initial and final points. Note
307 that cost rate associated to edges (a) (b) and (c) are respectively 0, q_c and 0 (costs
308 associated to edges (c) in the congested graph are wk_x).

309

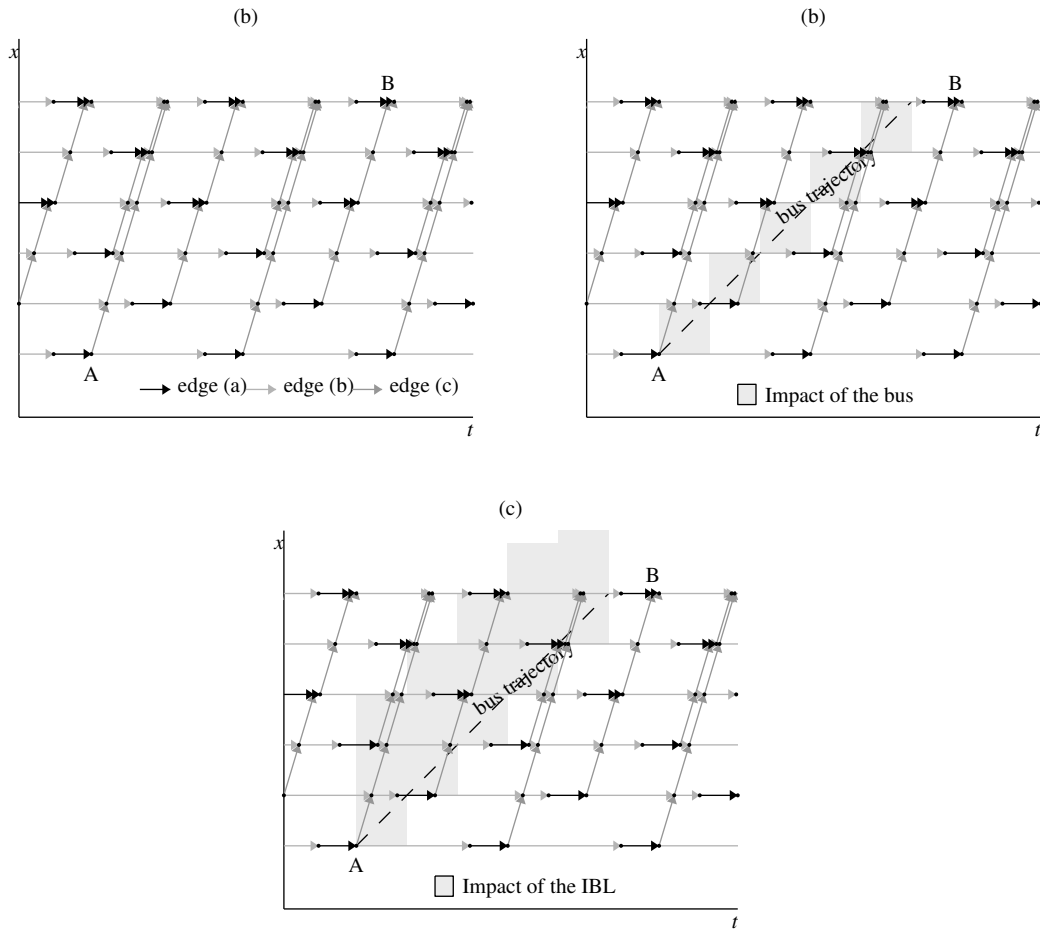


Figure 4: Variational method to endogenously estimate the MFD
(a) without buses (b) with buses (c) with IBL strategy

310
 311
 312
 313
 314
 315
 316
 317
 318
 319
 320
 321
 322
 323
 324
 325
 326

Extension to MB and IBL cases

The above variational method can be easily extended to account for buses. Indeed, MB theory and especially the discretization process that has been previously presented can be applied. A MB can be approximated by a succession of fixed bottlenecks. This key result provides a simple way to extend the variational method. Indeed, we can consider that a bus inside a link reduces the available capacity from one lane until it leaves the links. This defines into the arterial time-link regions where the capacity is reduced; see gray shape around the bus trajectory in Figure 4b. The unique difference for IBL case is the space-step of the discretization lattice, i.e. the length of the gray shape around the bus trajectory is longer (see Figure 4c). This length depends on the characteristics of the IBL strategy. As previously explained, the more links are dedicated to the bus, the more delays are created.

327 The capacity reduction due to the discretization process can be taken into account by
328 modifying the costs of the edges that cross such regions. In practice, only cost rates on
329 edge (b) have to be modified and switched to q_D . Note that introducing buses makes the
330 studied case unregular (buses are introduced according to a given frequency). Thus,
331 several initial points have to be considered. To be sure that the mean value of r_j is
332 properly estimated, i.e. that we consider enough initial points, we check that the
333 standard deviation of r_j is lower than 10% of its mean value.

334

335 Figure 5a presents the resulting free-flow and congested cuts calculated for an arterial
336 and a bus system headway of 3 min. Note that none of the variational graphs provide the
337 stationary cut corresponding to the minimum capacity observed at the most
338 constraining traffic signals. This cut can easily be added. Red lines in Figure 5a show the
339 only relevant cuts that fully define the MFD. Figure 5b depicts the estimated MFDs for
340 various values of bus time-headway h . It clearly shows that the presence of bus transit
341 systems on the arterials reduces the maximal capacity. Moreover, it is not surprising
342 that the maximal capacity decreases with the increase of h . Figure 5b also reveals that
343 bus has a major effect on the MFD shape in the vicinity of the top of the MFD. Hence, bus
344 is an active MB in this domain of traffic conditions.

345

346 Finally, Figure 5c depicts the estimated MFDs when IBL is implemented. Note that three
347 links are dedicated to the bus. As in the MB case, the maximal capacity is reduced and
348 depends on h such as the congested part of the MFD. The key question is now how to
349 compare the estimated MFDs of the different cases.

350

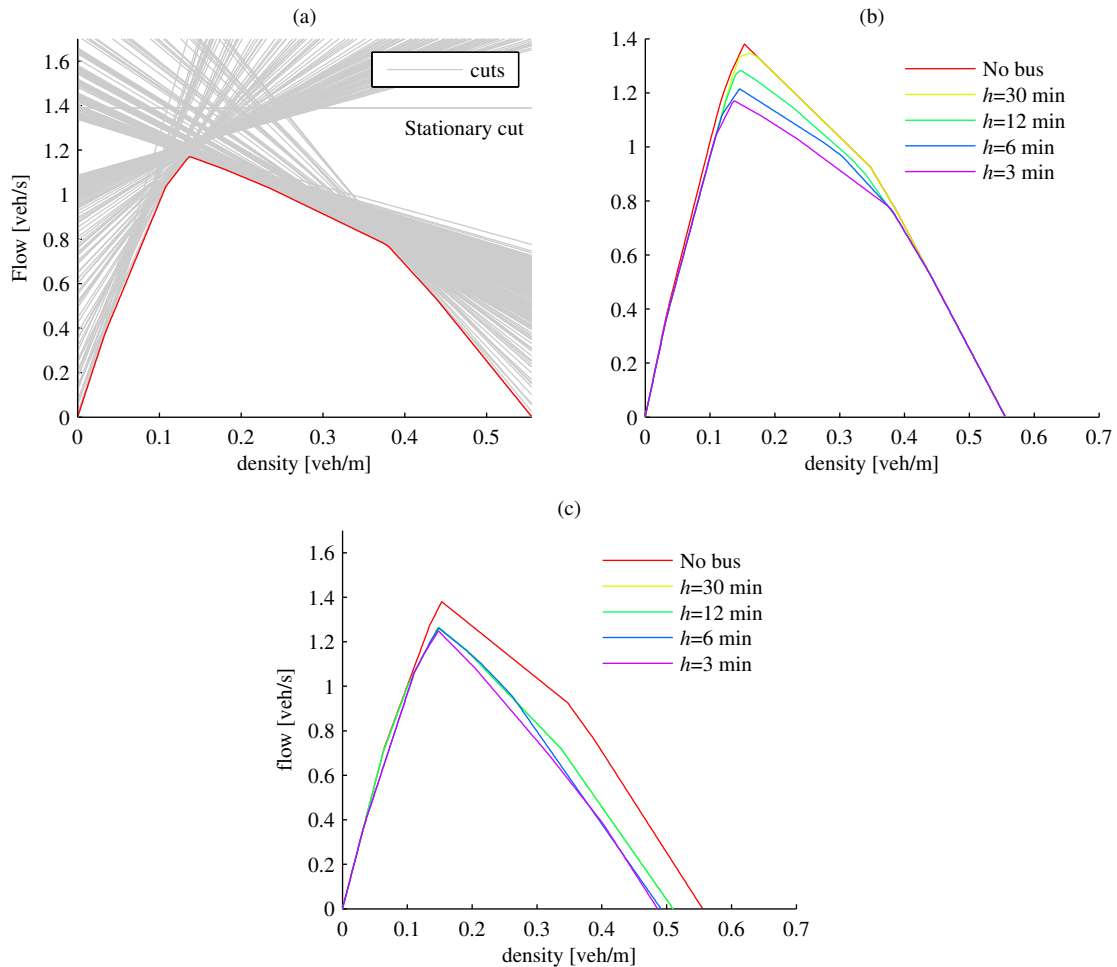


Figure 5: Estimated MFD with method M1:
(a) whole sets of cuts for a given headway ($h=3\text{min}$)
(b) estimated MFDs for different headways
(c) estimated MFDs for IBL strategy

351
 352
 353
 354
 355
 356
 357

PASSENGER FUNDAMENTAL DIAGRAM (p-FD)

358

359
 360 In this section, we extend the definition of MFD to propose a unified relationship that
 361 combines both modes: cars and buses. The idea is to relate the number of passengers in
 362 the arterial to space-mean speed of these passengers. Indeed, the classical MFD is not
 363 sufficient to compare the different strategies because a bus counts for a unique vehicle.

364

365 To this end, the flow is now expressed in terms of passenger per time [pax/h]. Let ϕ
 366 denotes this flow. ϕ is equal to the sum of the passengers using cars ϕ_c and the
 367 passengers using transit system ϕ_t . It is worth noticing that ϕ_c directly derives from the

368 car MFD while ϕ_t must be obtained from the characteristics of the transit system. As in
 369 the classical definition of MFD, it is thus really appealing to link the flow to the density of
 370 passenger in the arterial Δ . However, this is not trivial because Δ has to be expressed in
 371 terms of passenger per space [pax/km]. To cope this issue, we have to determine the
 372 total number of passenger on the arterial and to divide it by the length of the arterial. It
 373 turns out that the mode choice of passenger between cars and buses has an impact on
 374 the flow and density. This ratio is denoted τ and is equal to ϕ_c/ϕ_t .

375

376 The individual optimal solution is obtained when passenger seeks to minimize its travel
 377 time, i.e. maximize its speed. Thus, density Δ is simply equal to:

$$378 \quad \Delta = \min_{\tau} \left[\frac{\phi_c}{v_c} + \frac{\phi_t}{v_t} \right] \quad (6)$$

379 where v_c and v_t are respectively the space-mean speed of the cars and the buses. The
 380 estimated relationship is called the p-FD and is expressed in terms of passengers. We
 381 now aim to analytically determine the shape of the p-FD for the different transit
 382 strategies considered in the paper.

383

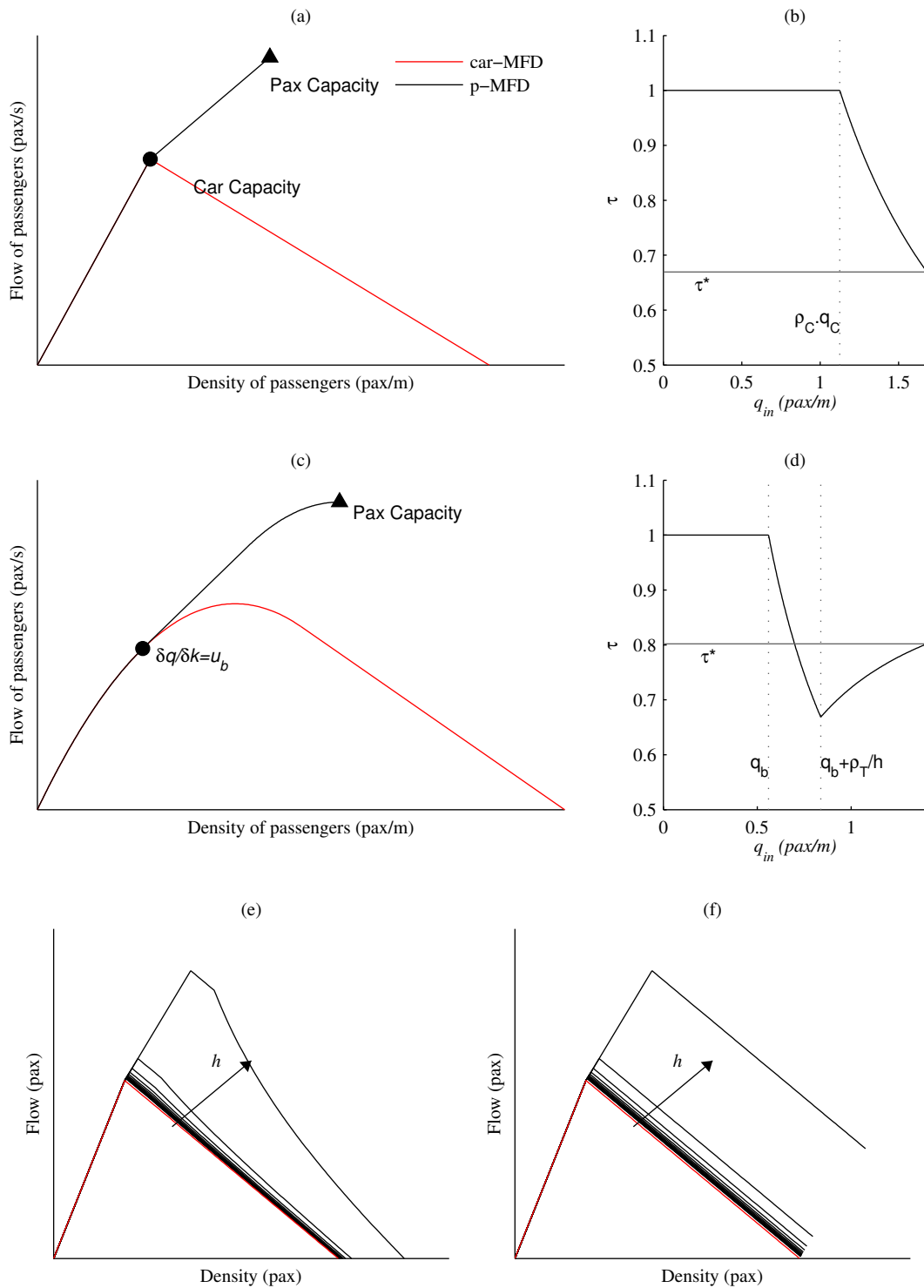
384 For sake of simplicity, we firstly assume a triangular car MFD for sake of simplicity. Its
 385 parameters are the free-flow speed u , the maximal flow capacity q_c and the jam density
 386 k_x . The characteristics of the transit systems are still the bus time-headway h and the
 387 maximal speed of the buses u_b . We also assume that the maximal passenger capacity of a
 388 car is ρ_c [pax/veh] and the maximal capacity of a bus is ρ_t [pax/bus]. We can now
 389 determine the p-FD for all the possible traffic situations.

390

391 **Free-flow conditions**

392 The free-flow conditions correspond to the situations where the total passenger demand
 393 is satisfied by the system. The p-FD is directly obtained by solving equation xx. Figure 6a
 394 presents the resulting p-FD in case of a triangular car MFD. It turns out that passenger
 395 mode allocation τ is not constant. This is confirmed by Figure 6b that shows the
 396 evolution of τ with respect to the passengers demand level. Car is the unique mode until
 397 the demand reaches the car capacity $\rho_c q_c$. Then passengers have to switch from cars to
 398 the transit system. Note that this corresponds to the optimal situation where passengers
 399 are ready to change mode rather than to degrade the traffic conditions.

400



401

402

403

404

405

406

407

408

409

Figure 6: (a) free-flow part of the p-FD for a triangular MFD and (b) evolution of τ with inflow (c) free-flow part of the p-FD for a curved MFD and (d) evolution of τ with inflow (e) complete p-FD for $S1$ with a triangular MFD (f) complete p-FD for $S2$ and $S3$ with a triangular MFD

This method can be applied for any shape of MFD, see Figure 6c. However, calculations are more complicated (22) and details are not presented here. Note that the evolutions

410 of τ with respect to the demand level are slightly different from the triangular MFD case,
411 see Figure 6d. To obtain the individual optimal solution, i.e. passengers always seek to
412 minimize their speed, car is the unique mode until a certain demand value that
413 corresponds to q_b such as $\partial q / \partial k = u_b$ (22); then passengers switch to the transit
414 system until all the buses are full; finally, the remaining car capacity is used until the
415 system's capacity is reached. All the details can be found in (22).

416

417

418 **Congested conditions**

419 We now aim to determine the p-FD when traffic is congested. To this end, we assume
420 that the outflow of the arterial is restricted to q_{out} . This capacity reduction may
421 constrain the cars and the buses in case *S1*. However, q_{out} only affects the cars in case *S2*
422 and *S3* because a lane is dedicated for the buses and makes possible for them to avoid
423 congestion.

424

425 In case *S1*, the impacts of q_{out} on the p-FD must be determined. For cars, MFD directly
426 accounts for this capacity reduction. Space-mean speed of the cars decreases with q_{out} .
427 For buses, they are not impacted for small congestion, i.e. when $v(q_{out}) > u_b$. However,
428 when $v(q_{out}) < u_b$, the buses are slow down by the downstream queues. Characteristics
429 of the transit system have to be dynamically modified. To this end, we assume that the
430 number of bus n_{bus} in operation stay constant. Consequently, the speed reduction
431 implies an increase of the time-headway h because $n_{bus} = L / (h \cdot v_t)$. It makes possible to
432 account for congestion for both modes and to determine the congested part of the p-FD
433 according to equation xx. Figure 6e shows the p-FD for several values of h from 1min to
434 1h. Note that we have assumed that the car MFD (in red in Figure 6e) does not depend
435 on h .

436

437 In case *S2* and *S3*, congestion does not influence the transit system. Consequently, it is
438 sufficient to add the bus system capacity to the congested part of the MFD. Figure 7
439 depicts the p-FDs estimated for case *S2* and *S3*. They are identical for both cases because
440 we have assumed a triangular MFD for cars, which does not depend on the bus time-
441 headway. This assumption will be relaxed in the sequel of the paper.

442

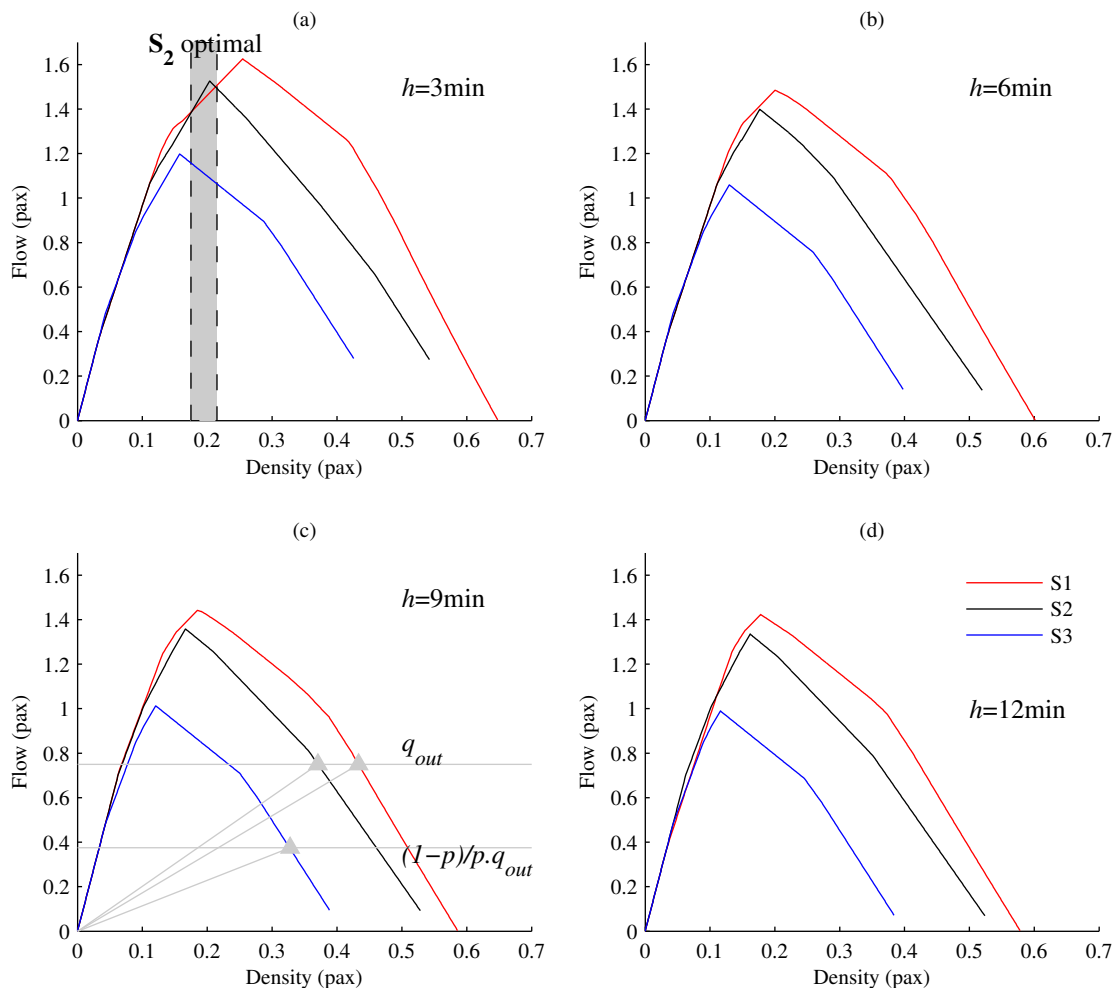
443 **RESULTS**

444 The aim of this section is to apply the previous methodology to the cases $S1$, $S2$ and $S3$ in
 445 order to evaluate and compare these strategies. Therefore, it makes possible to identify
 446 the different domains of application.

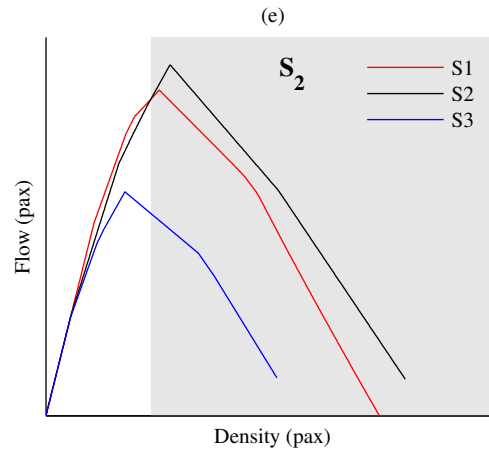
447

448 **First results**

449 In this section, MFDs have been estimated for cars using the extended method of (14) for
 450 the three different cases of the paper. Based on these estimations, the associated p-FDs
 451 have been calculated. Note that we consider four different values of h : 3min, 6min, 9min
 452 and 12min. We also assumed that ρ_c is equal to 1, ρ_t is equal to 20 and that the free-flow
 453 speed of the buses is $u_b=10\text{m/s}$ for all the cases. Figure 7 depicts the associated p-FDs
 454 and makes possible to compare the strategies.



455



456
457 **Figure 7: p-FD for $S1$, $S2$ and $S3$ when (a) $h=3\text{min}$ (b) $h=6\text{min}$ (c) $h=9\text{min}$ (d) $h=12\text{min}$**
458 **(e) for more realistic case**
459

460 It turns out that $S1$ always leads to the best situations in term of capacity except for
461 $h=3\text{min}$ where an optimal application domain can be identified for $S2$ (grey area in
462 Figure 7a). This is not surprising because the flow of buses remains strongly lower than
463 car flow even for high frequencies. However, it is worth noticing that the mean speed of
464 passengers is maintained higher for case $S2$ in congestion. Figure 7c shows the mean
465 speed for each case when the car flow is congested, i.e. exit capacity is reduced to q_{out} .
466 Note that the capacity is reduced to $(p-1)/p \cdot q_{out}$ in case $S2$ because one lane is always
467 dedicated to the bus. It appears that mean speed is higher in case $S2$ because,
468 simultaneously, capacity is maintained for car traffic and buses can freely traverse the
469 arterial. Therefore, performance of the transit system increases.

470

471 **More realistic situation**

472 As previously mentioned, $S2$ and $S3$ could reduce delays and increase reliability of buses.
473 Consequently, bus speed u_b are now supposed higher in case $S2$ and $S3$ ($u_b=10\text{m/s}$) than
474 in case $S1$ ($u_b=8\text{m/s}$). Delay reduction and reliability increasing could also help to
475 promote the bus mode rather than individual car mode. Induced demand for the transit
476 system could then be expected in the long term. It will lead to an increase of bus
477 frequency to serve this new demand. Consequently, h is assumed lower in case $S2$ and $S3$
478 ($h=6\text{min}$) rather than in case $S1$ ($h=9\text{min}$). The associated domains of application are
479 depicted in Figure 7e. Solution $S2$ can now be attractive in terms of capacity when
480 passenger demand is high and when car traffic is congested. Moreover, the critical
481 density is also bigger in case $S2$.

482

483 **CONCLUSION**

484 This paper developed tools to analytically assess and compare various designs of an
485 urban arterial. To the best authors' knowledge, few works look at comparing buses
486 operations before implementation (23). To this end, this paper builds on past research
487 an analysis framework to determine the domains of applications of two different
488 strategies, dedicated bus lane and intermittent bus lane, versus the reference situation
489 of mixed lane, i.e. buses remain stuck in the traffic.

490 First analytical considerations unveiled the connections between impacts of a bus and
491 an IBL on traffic dynamics. It turns out that it exists a scaling effect between these two
492 situations. This first approach makes possible to compare these two situations at a
493 glance. However, these first results only concern free-flow traffic conditions.

494 Furthermore, the paper resorts to MFD to cross-compare the different transit strategies
495 for the whole range of traffic conditions. MFD is a reliable tool to manage and assess
496 solutions for improving mobility. Indeed, the latest works on MFD (14-15) provide a
497 accurate estimation method that accounts both for traffic signal and multiple modes.
498 Here, the paper only introduces a variation of this existing method to capture impact of
499 IBL on traffic dynamics.

500 The MFD for the different designs are then cross-compared. To this end, the paper
501 extends the MFD definition to account for the mean number of passenger in each mode.
502 The objective is to obtain a unique function to determine the domains of relevance for
503 each transit strategy, where system's cost is minimized. Thus the paper unveils
504 conditions under which IBL strategies must be implemented or triggered

505 The results of this paper can be generalized for any design of the arterial. One of the next
506 extensions will be to include a more realistic modeling of the bus system. Ongoing works
507 investigates how to incorporate dynamics of motion laws of the buses (boarding and
508 alighting of passengers at bus stops). It will make possible to test operations of the bus
509 lines and to assess impact on traffic dynamics.

510

511

512 **ACKNOWLEDGEMENTS**

513 This research was partly funded by the “Région Rhône-Alpes” and by the French
514 Ministry of Sustainable Development through the ADViCe project (11-MT-PREDITG02-2-
515 CVS-050). The authors are grateful to Dr. Eric Gonzales for his valuable comments.

516

517 **REFERENCES**

- 518 1. Balke, K.; Dudek, C. & Urbanik II, T., 2000, Development and Evaluation of Intelligent Bus Priority
519 Concept, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1727, 12-19.
- 520 2. Duerr, P., 2000, Dynamic Right-of-Way for Transit Vehicles: Integrated Modeling Approach for
521 Optimizing Signal Control on Mixed Traffic Arterials, *Transportation Research Record: Journal of the*
522 *Transportation Research Board* 1731, 31-39.
- 523 3. Furth, P. & Muller, T. H., 2000, Conditional Bus Priority at Signalized Intersections: Better Service with
524 Less Traffic Disruption, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*
525 1731, 23-30.
- 526 4. Janos, M. & Furth, P., 2002, Bus Priority with Highly Interruptible Traffic Signal Control: Simulation of
527 San Juan's Avenida Ponce de Leon, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research*
528 *Board* 1811, 157-165.
- 529 5. Lin, W.-H., 2002, Quantifying Delay Reduction to Buses with Signal Priority Treatment in Mixed-Mode
530 Operation, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1811, 100-106.
- 531 6. Skabardonis, A., 2000, Control Strategies for Transit Priority, *Transportation Research Record: Journal of*
532 *the Transportation Research Board* 1727, 20-26.
- 533 7. Viegas, J. & Lu, B., 1996, Turn of the century, survival of the compact city, revival of public transport, in
534 *H. Meersman & E. Van de Voorde, ed., Transforming the Port and Transportation Business*, pp. 55-63.
- 535 8. Viegas, J. & Lu, B., 2004, The Intermittent Bus Lane signals setting within an area, *Transportation*
536 *Research Part C: Emerging Technologies* 12(6), 453-469.
- 537 9. Eichler, M. & Daganzo, C. F., 2006, Bus lanes with intermittent priority: Strategy formulae and an
538 evaluation', *Transportation Research Part B: Methodological* 40(9), 731-744.
- 539 10. Eichler, M., 2006, Bus lanes with intermittent priority: assessment and design, *Master's thesis, Dept. of*
540 *City and Regional Planning, University of California, Berkeley*.
- 541 11. Chiabaut, N, Xie, X., Leclercq, L., 2012, Road capacity and travel times with Bus Lanes and Intermittent
542 Priority Activation: Analytical Investigations. *Transportation Research Record: Journal of the*
543 *Transportation Research Board*, 2315, 182-190
- 544 12. Boyaci, B., Geroliminis, N., 2011, Exploring the Effect of Variability of Urban Systems Characteristics in
545 the Network Capacity, in *Proceedings of the 90th TRB annual meeting*.
- 546 13 Boyaci, B., Geroliminis, N., 2010, Estimation of the network capacity for multimodal urban systems, in
547 *Proceedings of the 6th International Symposium on Highway Capacity*.
- 548 14. Leclercq, L., Geroliminis, N., 2013, Estimating MFDs in Simple Networks with Route Choice,
549 *Transportation Research Part B: Methodological*, in press.

- 550 15. Xie, x., Chiabaut, N., Leclercq, L., 2013, Macroscopic Fundamental Diagram for Urban Streets and Mixed
551 Traffic: Cross-comparison of Estimation Methods. *Transportation Research Record: Journal of the*
552 *Transportation Research Board*, to be published.
- 553 16. Daganzo, C. F., Laval, J. A., 2005, On the numerical treatment of moving bottlenecks, *Transportation*
554 *Research Part B: Methodological* 39(1), 31-46.
- 555 17. Daganzo, C. F., Laval, J. A., 2005, Moving bottlenecks: A numerical method that converges in flows,
556 *Transportation Research Part B: Methodological* 39(9), 855-863.
- 557 18. Daganzo, C. F., Menendez, M., 2005, A variational formulation of kinematic waves: Bottleneck
558 properties and examples, in *H.S. Mahmassani, ed., 16th International Symposium on Transportation and*
559 *Traffic Theory, Pergamon, Washington D.C., USA*, 345-364.
- 560 19. Daganzo, C. F., 2005, A variational formulation of kinematic waves: basic theory and complex
561 boundary conditions, *Transportation Research Part B: Methodological* 39(2), 187-196.
- 562 20. Daganzo, C. F., 2005, A variational formulation of kinematic waves: Solution methods, *Transportation*
563 *Research Part B: Methodological* 39(10), 934-950.
- 564 21. Daganzo, C. F., Geroliminis, N., 2008, An analytical approximation for the macroscopic fundamental
565 diagram of urban traffic, *Transportation Research Part B: Methodological* 42(9), 771-781.
- 566 22. Gonzales, E., Chiabaut, N., 2014, Extensions of the Network Fundamental Diagram to Multimodal
567 Traffic, *Working Paper Draft*
- 568 23. Zheng, N., Geroliminis, N., 2013, On the distribution of urban road space for multimodal congested
569 networks, *Transportation Research Part B: Methodological*, in press
- 570

Annexe 2

Xie, X., Chiabaut, N. et Leclercq, L. [2013]. Macroscopic Fundamental Diagram for Urban Streets and Mixed Traffic: Cross-comparison of Estimation Methods. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, à paraître.

Multimodal Level of Service for Urban Streets: Cross-comparison of Estimation Methods

Xiaoyan Xie
Nicolas Chiabaut*
Ludovic Leclercq

Université de Lyon
IFSTTAR / ENTPE
Laboratoire Ingénierie Circulation Transport LICIT
Rue Maurice Audin
F-69518 Vaulx-en-Velin
Tel: +33 4 72 04 77 58
Fax: +33 4 72 04 77 12
* Corresponding author
Email: nicolas.chiabaut@entpe.fr

Paper submitted for presentation and publication to the 92nd meeting of the Transportation Research Board
Submission date: August 1, 2012
Paper number: 13-0105
4650 Words + 11 figures + 0 table = 7400 words

Abstract

In the last decade, many papers focused on describing vehicular traffic stream of an arterial on an aggregate level. Unfortunately, among this considerable body of research, only few papers account for bus systems. Our paper tries to fill this gap by investigating two potential methods to estimate macroscopic fundamental diagrams of multimodal transport systems of a signalized arterial. The first approach models endogenously motion of bus by extending the work by the moving bottleneck theory, whereas the second approach proposes to incorporate exogenously effects of buses. The estimated macroscopic fundamental diagrams are then cross-compared to results provided by micro-simulation software that finely reproduce traffic stream. It turns out that mean speeds of vehicles and buses produced by the different methods are similar and consistent. Finally, results of the three methods are expressed in terms of levels of service and confronted with the levels of service of the HCM2010.

INTRODUCTION

Study of mixed traffic streams in cities and arterials is a topic of increasing concerns. A large body of works is dedicated to analyze explanatory variables that characterize dynamics of such networks (1-3). These papers aim to evaluate arterials and city networks performance by using traffic measurements. The largest part of this literature has been directed toward improving techniques to monitor traffic streams (4-5), to measure travel times (6) or to derived relationships between traffic flow and signal control settings (7). However, evaluation remains a tedious task because of the complicated traffic behavior especially caused by (i) traffic signals and (ii) bus transit systems traversing arterials. Another approach for a better understanding of arterial traffic dynamics is to resort to accurate models.

Various theories have been proposed to reproduce traffic stream on an aggregate level. Among this existing body of works, models that are adapted to characterize traffic in arterials have to account for (i) traffic signal and (ii) transit systems. Many of these papers are based on the key idea that it exists a macroscopic fundamental diagram (MFD) able to reproduce both free-flow and congested traffic conditions. Earlier studies were devoted to look for such relationship in data of real-world network or arterials. However, evidences of existence of MFD have been exhibited only very recently (3,7). On their seminal works, the authors pointed out a major insight: the MFD is an intrinsic property of the network itself and remain invariant when demand changes. MFD is thus a reliable tool for traffic agency to manage and evaluate solutions for improving mobility. (8) furnished a very good example of how MFD can be used to dynamically control signals to prevent congestion. It is thus appealing to estimate an accurate MFD for various urban sites and traffic. In this sense, many papers have been recently directed toward highlighting links between shapes of the MFD and different simulated or measured parameters (9-10), exploring impact of distributions of vehicles and space on MFD (11) or investigating bifurcation and instability issues of and MFD (12-13). Unfortunately, this large body of works does not account for multiple modes.

(14-15) have presented the only instance trying to overcome this drawback of representation to the author's knowledge. They introduced a methodology to estimate a MFD for an arterial with mixed-traffic bus-car lanes or with dedicated bus lanes. This work extends for multi-modal networks the Variational theory (VT) proposed in (7). Impacts of bus stops are incorporated in the estimation method by considering these stops as point bottlenecks that locally reduce capacity. However, a bus has also a major influence on traffic when bus travels at a lower speed than the flow speed, i.e. when bus acts as an active moving bottleneck (MB). (16) also propose a MFD estimation method for heterogeneous hyperlinks, i.e. a series of successive links with different traffic signal. Based on the VT, this method directly provides the upper envelop of the MFD.

However, the existing methods do not account for buses. Our paper tries to fill this gap by investigating two potential methods to model multimodal transport systems of a signalized arterial. These methods are build on past research in arterial modeling based on MFD representation as well as past research in accounting for buses in traffic flow as moving bottlenecks. Two different approaches are proposed: (i) to improve the method of (16) and (ii) to propose a new estimation process.

So, the first method (M1) extends the work of (16) by introducing the effect of buses with a temporal and local reduction of the capacity of the arterial when a bus is present. This reduction will influence the shape of the estimated MFD. Consequently, buses are endogenously incorporated in the MFD estimation process.

On the contrary, the second method (M2) will exogenously account for impacts of buses. Time-space diagrams of an urban arterial are analytically calculated based on the associated MFD estimated without buses (7). Bus is considered as a MB (17-18) that will modify the time-space diagrams. Then, traffic flow dynamics of arterials can be easily assessed through these diagrams.

Finally, results of these two methods are cross-compared with results obtained with micro-simulation software. We use the software SymuVia that is fully consistent with both methods. This analysis is focused on mean speed of vehicles and buses in the arterial. These results will also be confronted with the multimodal Level of Services (LOS) provided in the HCM2010 (19).

Section 2 briefly specifies the study case. Section 3 presents details of the endogenous approach whereas Section 4 is focused on the exogenous method. Then, Section 5 is devoted to the micro-simulation of the urban corridor. Finally, Section 6 proposes to cross-compare the results of the different estimation methods with the multimodal LOS provided in the HCM2010.

CASE STUDY

Consider here a hypothetic urban arterial (see Figure 1) composed of n successive links with traffic signal and p lanes. The length of link i is l_i and its signal settings are: green g_i , cycle c_i and offset δ_i from a common reference. The total length of the arterial is L . Traffic on each link is supposed to obey a triangular fundamental diagram (FD) that only depends on three observable parameters: free-flow speed u [m/s], wave speed w [m/s] and jam density κ [veh/m] (20-21). Capacity q_C [veh/s] and optimum density k_C [veh/m] can be easily derived: $q_C = u w \kappa / (u + w)$ and $k_C = q_C / u$. Notice that all the links share the same FD for sake of simplicity.

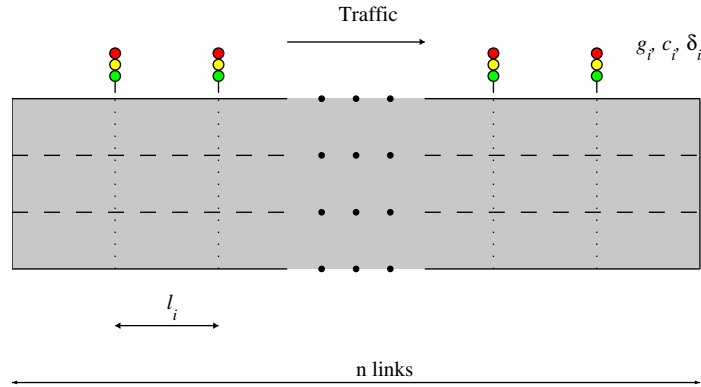


Figure 1: study case

In the remaining of the paper, we assumed that the arterial is composed of 11 successive 3 lanes links ($l_i=200\text{m}$). Concerning the traffic signal settings, g_i is equal to 60s and c_i to 90s. For sake of simplicity, we supposed that there is no offset. Finally, u is equal to 15 m/s, w is fixed to 5m/s and κ to 0.185veh/m ($q_C = 2.08$ veh/s =7500 veh/h). We also assumed that buses travel along the arterial with a reduced speed to mimic existence of bus stations: $u_b=8$ m/s.

ENDOGENOUS APPROACH

The aim of this section is to propose a first method that endogenously estimates MFDs and accounts for traffic signal settings and buses represented as a moving obstruction. This method extends previous works from (16) that defines an accurate estimation method founded on VT for arterials with heterogeneous traffic signal parameters. The extension deals with introducing the impacts of moving bottlenecks into the proposed framework. The detailed presentation of the variational method proposed by (16) is out of the scope of this paper, only the key elements will be recap below. Note that VT was described in Daganzo's seminal papers (22-24).

The foundation of the variational method comes from (7). This paper shows that a MFD can be defined by a set of cuts $\{C_j\}$. A cut corresponds to a line in the (k, q) plane parameterized by its y-intercept r_j and its slope v_j , i.e. $q=r_j+k v_j$. Cuts are associated to moving observers that moves into the considered arterial with a constant speed v_j . Such observers have no dimension and are not influenced by traffic signals. r_j corresponds to the maximal passing rate that such an observer can encounter depending on the FD and the signal settings. In practice, to piecewise-linearly estimate a MFD one only have to define a set of discrete values $\{v_j\}$ and determine the associate r_j values. (7) propose to only focus on practical cuts to estimate r_j . Practical cuts correspond to specific paths of the moving observer that can only experiment speeds u and 0 when mean speed v_j is positive or w and 0 when mean speed v_j is negative. These paths are constructed in practice by assigning a speed u (or w) to observers when moving into a link and then delaying them at green signals with different constant values ϵ_j . The mean speed v_j is then calculated afterwards and only depends on ϵ_j . This method has been applied in (14-15) but suffers from a limitation that is not compatible with further introducing buses. Indeed, in unregular cases (heterogeneous signal timings or presence of moving obstructions), this method only provides an upper bound for r_j . Thus, cuts do not necessarily tightly define the MFD.

(16) blow up with this limitation by generalizing the concept of practical cuts. Instead of focusing on particular paths into the arterials, they define a sufficient but minimal variational graph that encompasses the practical cut paths but also all the other optimal paths associated to a mean speed v_j in order to properly estimate r_j even in heterogeneous cases. To be precise, two variational graphs have to be constructed to deal with free-flow ($v_j \geq 0$) and congested cuts ($v_j < 0$). We will only present how to define the free-flow graph (the congested graph can be

obtained by replacing u by w and considering the arterials in the reserve direction). This graph is composed of three kinds of edges, see Figure 2a:

- the red phases of all traffic signals;
- the green phases of all traffic signals;
- the paths with speed u that start from the ends of all red times of each signal and propagate until another edge (a). Vertices should be added anytime such a path crosses edges (b) and (a).

The proof of sufficiency can be found in (16). Cuts j are defined by all the paths into the variational graph that have the same initial and final points, i.e. the same speed v_j . The associated r_j corresponds to the least-cost between these initial and final points. Note that cost rate associated to edges (a) (b) and (c) are respectively 0, q_c and 0 (costs associated to edges (c) in the congested graph are $w\kappa$). Note also that in regular cases (identical traffic signal settings, constant offset and no buses) only one initial point has to be considered because the network is periodic. In unregular cases, r_j values have first to be calculated for different origin points and then averaged for all origin points to properly define cut C_j .

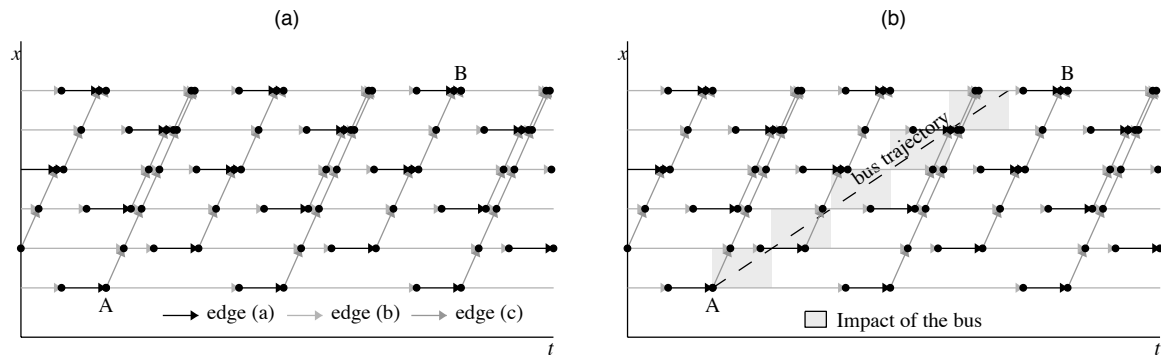


Figure 2: Variational method to endogenously estimate the MFD (a) without buses (b) with buses

The above variational method can be easily extended to account for buses. Indeed, (17) and further other authors see (18) for a review, shows that the impacts of such vehicles on the global traffic stream can be represented as a moving bottleneck that locally reduces the available capacity. Note that such a bottleneck is said to be active when it really has an influence on the surrounding traffic. (25-26) have shown that such a moving bottleneck can also be approximated by a succession of fixed bottlenecks that follows the bus trajectory with a bounded error. This key result provides a simple way to extend a variational method. Indeed, we can consider that a bus inside a link reduces the available capacity from one lane until it leaves the links. This defines into the arterial time-link regions where the capacity is reduced, see gray shape around the bus trajectory in Figure 2b. This capacity reduction can be taken into account by modifying the costs of the edges that cross such regions. In practice, only cost rates on edge (b) have to be modified and switched to $(p-1)/p \cdot q_c$ where p is the number of lanes. Note that introducing buses makes the studied case unregular. Thus, several initial points have to be considered. To be sure that the mean value of r_j is properly estimated, i.e. that we consider enough initial points, we check that the standard deviation of r_j is lower than 10% of its mean value.

Figure 3a presents the resulting free-flow and congested cuts calculated for an arterial and a bus system headway of 3 min. Note that none of the two variational graphs provide the stationary cut corresponding to the minimum capacity observed at the most constraining traffic signals. This cut can easily be added. Red lines in Figure 3a show the only relevant cuts that fully define the MFD. Figure 3b depicts the estimated MFDs for various values of bus time-headway h . It clearly shows that the presence of bus transit systems on the arterials reduces the maximal capacity. Moreover, it is not surprising that the maximal capacity decreases with the increase of h . Figure 3b also reveal that bus has a major effect on the MFD shape in the vicinity of the top of the MFD. Hence, bus is an active MB in this domain of traffic conditions.

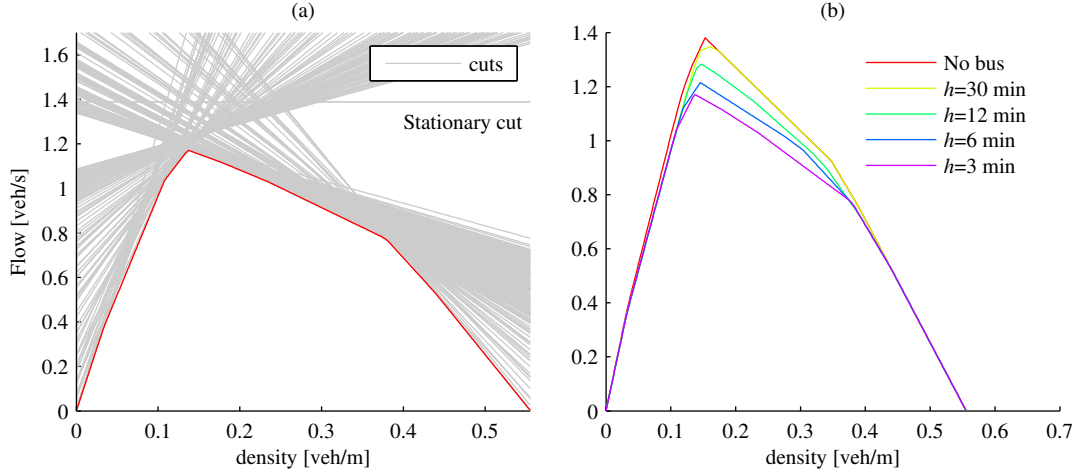


Figure 3: Estimated MFD with method M1: (a) whole sets of cuts for a given headway ($h=3\text{min}$) (b) estimated MFDs for different headways

EXOGENOUS APPROACH

On the contrary of the previous model, method M2 endogenously encompasses effects of buses. To this end, time-space diagrams are calculated based on the MFD estimated without the presence of buses. This MFD can easily be calculated according to findings of (7) or through the process introduced by method M1. This MFD is displayed in Figure 4. Notice that we use a MFD that is bi-linear in both free-flow and congested situations, for sake of simplicity. However, method M2 can be applied to any piece-wise linear MFD. Figure 4 displays the equilibrium states of traffic flow on arterial that turn out to be of interest throughout the paper. For any equilibrium traffic state A (point of the MFD), the flow and the density are respectively denoted q_A and k_A . State F corresponds to the limit between maximal free-flow speed u and free-flow speed u_f ; C is the full arterial capacity; C_I corresponds to the change of congested wave speed; J is the full arterial jam density.

The buses can now be modeled as ordinary MB that traverses arterial at speed u_b . Notice that u_b is lower than u and u_f to incorporate the dwell time due to bus stops. As in (27), buses are treated as point bottlenecks. When the MB is active, it generates different traffic conditions upstream and downstream of the bus trajectory. The associated equilibrium states are depicted in Figure 4. State D corresponds to the downstream traffic conditions, which is in free-flow situation. The associated flow is assumed to be equal to the capacity of the reduced system (minus one lane) including the effect of signals: $q_D = q_C \cdot \frac{p-1}{p}$ (17,28-29). State U describes the upstream condition, which is in congested situation. The associated flow can be completely determined based on the state D and the speed of the MB u_b (see Figure 4). According to KWT, interface between states U and D travels at speed u_b along the arterial. It is worth noticing that the MB is active for a given traffic state A when passing rate associated to state A is higher the passing rate of state D , i.e. $r_A = q_A - u_b k_A > r_D = q_D - u_b k_D$.

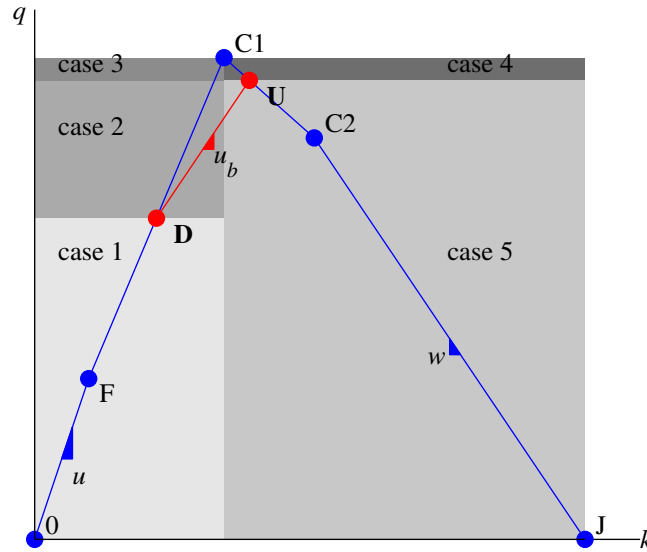


Figure 4: MFD of the arterial without bus

Time-space diagrams can now be calculated. The associated patterns depend on the input flow and the exiting rate of the arterial. Indeed, various levels of the entry demand and the exit bottleneck are tested to mimic all the traffic conditions described by the MFD. Situations can be classified based on three criterions: traffic state conditions, active/inactive MB and propagation of the upstream shockwave generated by the entry of the bus in the arterial. Based on these levels, one can identified five cases that are sum-up in Figure 4.

- a. case 1: free-flow (FF) state, bus is an inactive MB ($r_A < r_D$), no upstream shockwave;
- b. case 2: FF state, bus is an active MB ($r_A > r_D$), upstream shockwave moves forward ($q_A < q_U$);
- c. case 3: FF state, bus is an active MB ($r_A > r_D$), upstream shockwave moves backward ($q_A > q_U$);
- d. case 4: congested (C) state, bus is an active MB ($r_A > r_D$), upstream shockwave moves backward
- e. case 5: C state, bus is an inactive MB ($r_A < r_D$), upstream shockwave moves backward.

For each of these cases, many subcases can also be identified based on the bus headway value h . We will only detail the obtained patterns for case 2 and let the reader verify for the remaining cases. Indeed, case 2 is the more generic and easiest situation to explain the framework of our method.

In case 2, the demand inflow q_A is comprised between q_D and q_U and the exiting rate is equal to the maximum capacity C . Because $q_A > q_D$, when the bus enters in the arterial, it becomes an active MB and generates state D downstream and state U upstream. Both states are separated by a wave travelling downstream at speed u_b . Once the bus has left the arterial, state C is created and propagates upstream at speed w . Figure 5a displays the resulting pattern.

This pattern remains valid if the next bus enters in the arterial a time h later when the congestion generated by the first bus has totally been vanished. In that case, the same pattern is observed for all the buses (see Figure 5a, case 2i). Otherwise, state D generated by the entry of the next bus reaches existing state U . It modifies the patterns as depicted by Figure 5b (case 2ii). It is worth noticing that the patterns are periodic after the passage of the second bus (hatched areas in Figure 5). Consequently, it is sufficient to focus on only one pair of buses once the stationary situation has been reached.

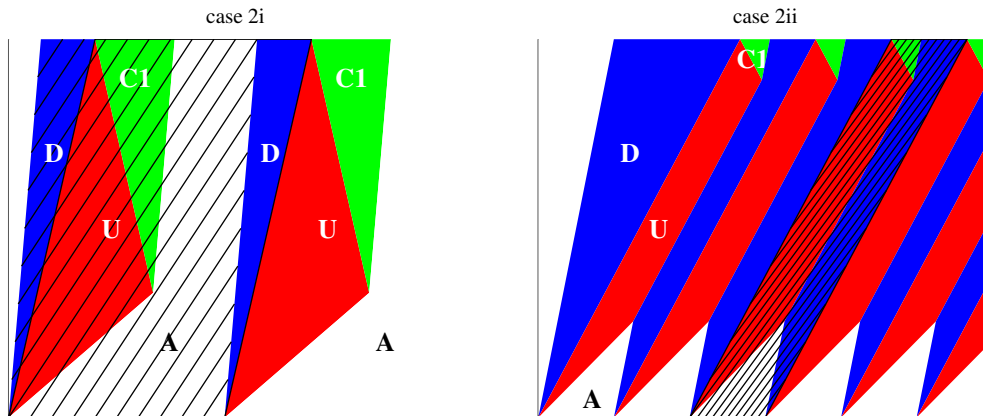


Figure 5: Time-space diagram for case 2i (large bus headways) and case 2ii (small bus headways)

We let the reader verify that this work can be easily extended for the other cases. Figure 6 shows the results of the remaining cases. It is important to notice that these time-space diagrams are analytically calculated, i.e. coordinates of every states area are known. It would be very helpful to determine mean travel-times of vehicles and buses but also the resulting MFD. Moreover, the patterns are always periodic, which also make the evaluation of the method easier.

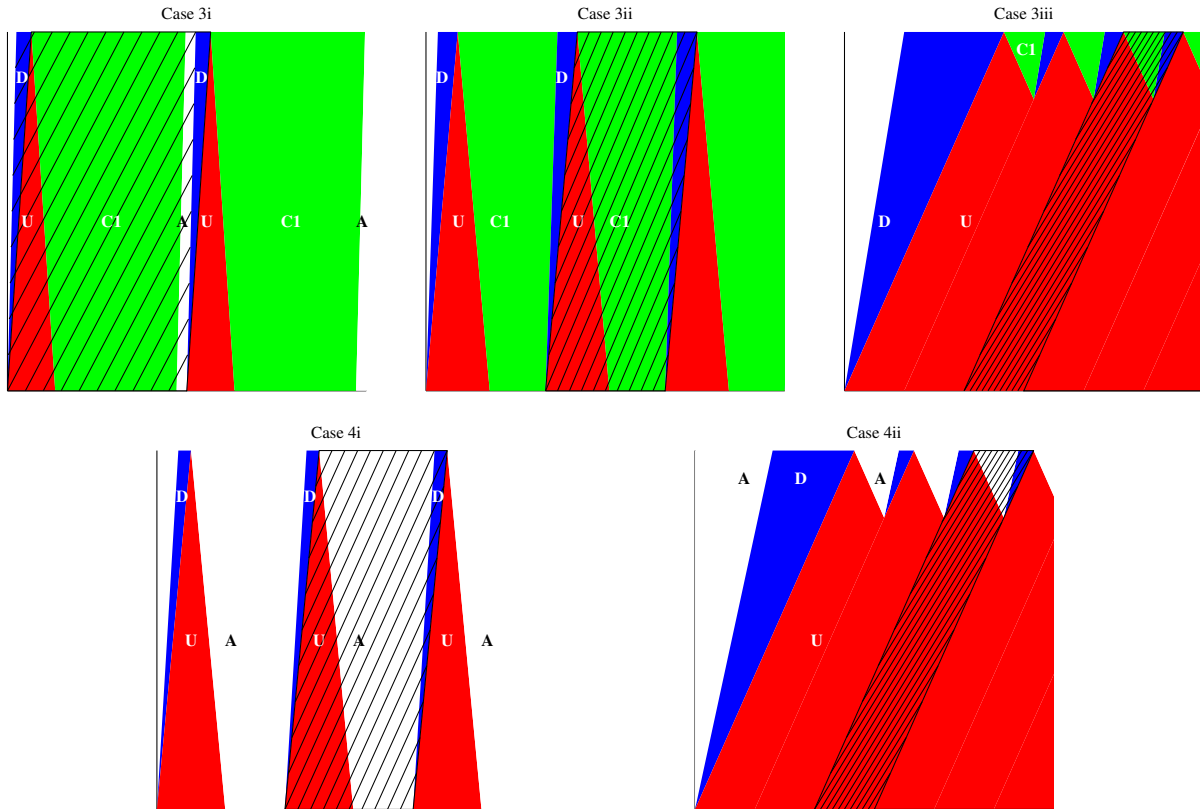


Figure 6: Time-space diagrams for the remaining cases

Figure 7 displays MFDs estimated with method M2 for different values of bus headway. Details of the calculation of K and Q are presented in the final section. The results are not surprising because high headways decrease the capacity of the arterial. For example, the maximal capacity is reduced of more than 8%.

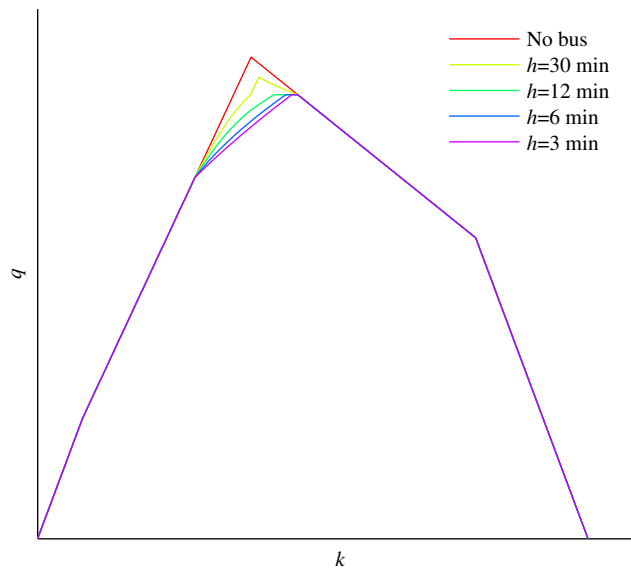


Figure 7: MFD estimated with method M2 for different bus headways

MICRO-SIMULATION

The third method (method M3) proposed in this paper is based on microscopic simulation software. This allows controlling every aspect of the simulated environment and gives also access to vehicles trajectories. The simulation set-up is close as possible to characteristics of the arterial used for both previous methods. The used

software, called SymuVia, is based on a Lagrangian discretization of the KWT. Details of the resulting car-following law can be found in (30-31). This car-following law relies on the existence of a triangular FD. We used the same traffic parameters, u_f , w , and κ as in previous methods. Moreover, the model has been refined to take into account bounded acceleration, lane-changing phenomenon and relaxation after lane-changing phenomenon (32-33). Thus, the simulation software is able to accurately reproduce the impacts of the MB on the remaining of the traffic in the arterial.

MFD can now be estimated with the simulated results. We used the trajectories-based approach proposed by (34). The authors resort to Edie's definitions (35) to calculate flow and density. (35) computes density k and flow q based on the observation of vehicles across a space-time window A :

$$k = \sum_j \frac{l_j}{|A|} \quad (2)$$

$$q = \sum_j \frac{t_j}{|A|} \quad (3)$$

where l_j and t_j are respectively the length traveled and the time spent in the area by vehicle j and $|A|$ the area of A . It turns out that such measurements perfectly match MFD definition (34). In the case of a single pipe, the estimated measurements perfectly match the theoretical MFD. Thus, simulations can be performed for any value of demand. We also add an exit bottleneck to generate congested states. Thereby, the congested part of the MFD will also be appraised.

Time-space diagrams similar to the diagrams of method M2 are obtained (see Figure xx). Impacts of the MB are clearly highlighted. It generates lane-changing phenomenon upstream of the MB and reduces the capacity downstream. Figure 8 shows MFDs obtained for various values of bus headway h .

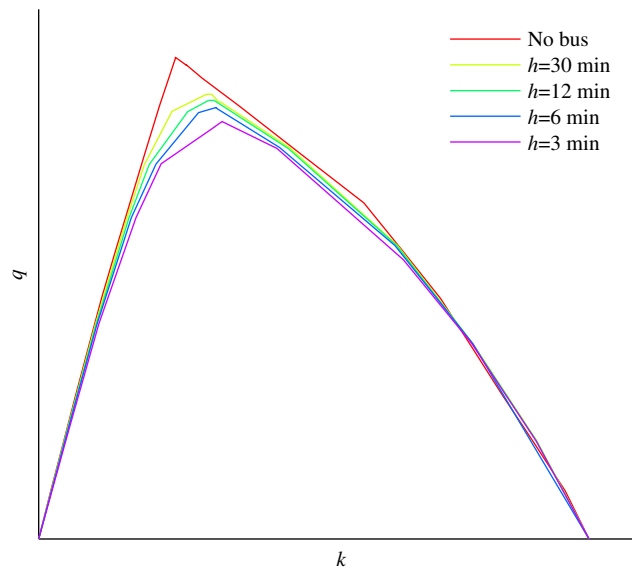


Figure 8: MFD estimated from simulated trajectories (Method M3)

CROSS-COMPARISON

The three methods we proposed aim to reproduce the effects of buses on arterial traffic dynamics. A bus may create a local and temporal capacity reduction, which leads to an increase of travel-time. This increase clearly depends on the demand level q_a but also on the bus headway h . It is thus appealing to study the evolution of vehicles and bus mean speed with respect to q_a but also to h . Results of the methods are cross-compared based on this indicator but also with LOS of the HCM 2010, which provided a frame of reference.

Calculation of mean speed values

Consistent mean speeds of vehicles and buses have to be calculated to cross-compare the three methods. To this end, we will use instantaneous travel-times. Indeed, formulations that are fully consistent between the three approaches can be found. The centerpiece of these formulations is the definitions of density and flow proposed by (35).

Method M1: This is the simplest case. It does not require any extra calculation. Mean speeds of the vehicles V_1^{veh} are directly derived from estimated MFD and from the fundamental relationship $q=k \cdot v$. Thus, it turns out that V_1^{veh} is equal to k/q . Mean speeds of the buses V_1^{bus} can be calculated in the same way except that V_1^{bus} cannot exceed the maximal speed of the buses u_{bus} . Figure 9a displays the mean speed values for the range of possible traffic conditions. It is interesting to notice that, in congestion, speed of the buses is not reduced until the speed of the equilibrium state is lower than u_{bus} . It means that even if q is lower than q_U , i.e. the MB is not active, the buses are not impacted by the traffic congestion.

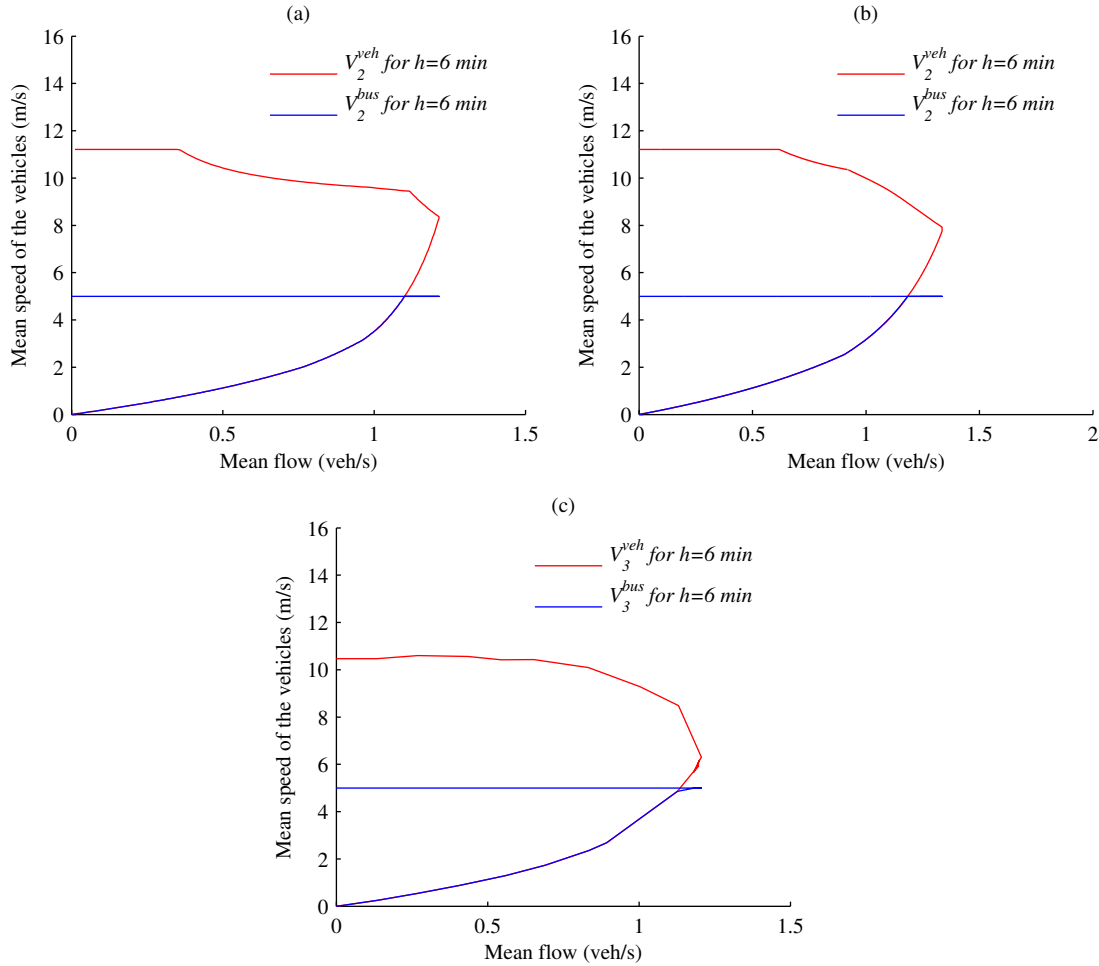


Figure 9: mean speed of (a) method M1 (b) method M2 and (c) method M3

Method M2: Calculating mean speeds is a more tedious in that case. Edie's definitions have to be adapted to this particular case. It is worth noticing that periodic patterns can be identified for each case (hashed areas in Figure 5 and Figure 6). These patterns are composed of different areas A_i where traffic is in equilibrium state. Coordinates of these areas are analytically known such as values of flow and density. It is thus appealing to calculate averaged density K and flow Q based on these patterns. Then, K and Q are calculated as

$$K = \frac{1}{hl} \cdot \sum_i \frac{k_i}{A_i} \quad (4)$$

$$Q = \frac{1}{hl} \cdot \sum_i \frac{q_i}{A_i} \quad (5)$$

Where A_i are the different equilibrium space-time area, k_i and q_i the respective density and flow. This leads to the averaged speed $V_2^{veh} = Q/K$. As previously explained, mean speeds of the buses V_2^{bus} can be calculated in the same way except that V_2^{bus} cannot exceed the maximal speed of the buses u_{bus} . Of course, these results depend on the bus headway, the entry demand and the exit rate. Figure 9b depicts the mean speeds of vehicles and buses for the range of possible traffic conditions.

Method M3: Results provided by method M3 make possible to calculate directly k and q as in Edie's original definitions. As previously explained, trajectories of vehicles are available. Consequently, l_j and t_j can be easily

computed. The main difficulty for method M3 is to use a space-time window consistent with the previous approaches. However, this window cannot exactly match the analytical areas calculated by method M2 otherwise methods M2 and M3 will be redundant. Consequently, we decided to use, in addition to an arterial warm-up time, a very long space-time window (more than ten times the bus headway h). Figure 9c highlights the mean speeds V_3^{veh} and V_3^{bus} for the same range of traffic conditions than methods M1 and M2.

Finally, results of the three approaches can be cross-compared. Figure 10 sums up the mean speed values for each method. At a first glance, it is worth noticing that results are close from each other. However, it turns out that differences exist. Indeed, the effects of the MB are observed for different ranges of flow values depending on the used method. Maximal observed capacities also depend on the method. However, these results are not surprising since difference exist in the framework of the method. For instance, method M2 reproduces traffic flow by a unique aggregated traffic state. On the contrary, method M1 presents various traffic states along the arterial. Thus, the MB can be inactive in method M2 whereas the MB can be active in some part of the arterial in method M1. It explains why the ranges of MB activity differ from one method to another. This also leads to the fact that method M2 underestimates the effects of the bus and provides higher capacities. Higher capacities of method M2 are also due to the fact that the trajectory of the MB is discretized in the framework of method M1. This discretization induces an extra delay in the vehicle travel time calculation according to (25-26). As a result, the maximal capacity decreases (see Figure 10). One can also see that method M3 furnishes mean speed values lower than the two analytical methods. Lane-changing maneuvers caused by the MB increase the vehicle travel time. Consequently, it also reduces the capacity and explains results of Figure 10.

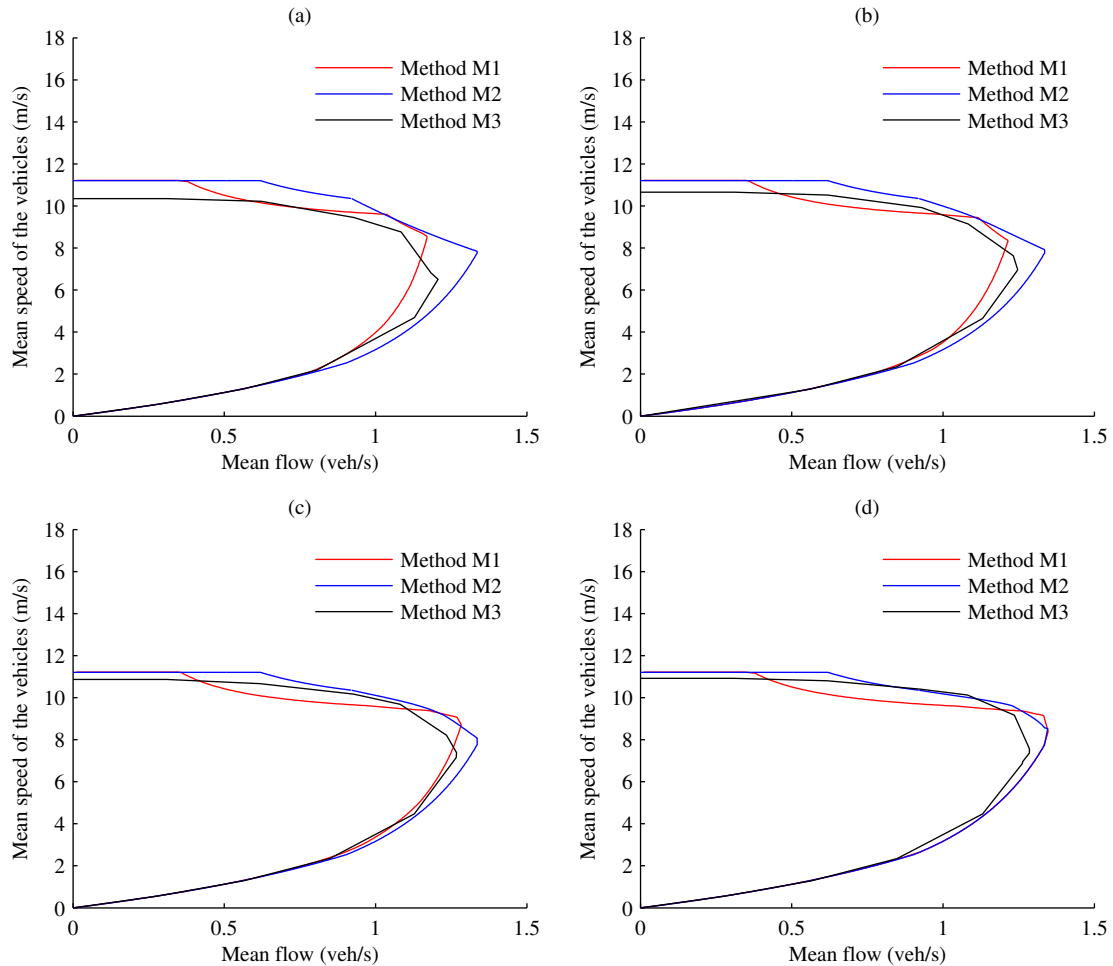


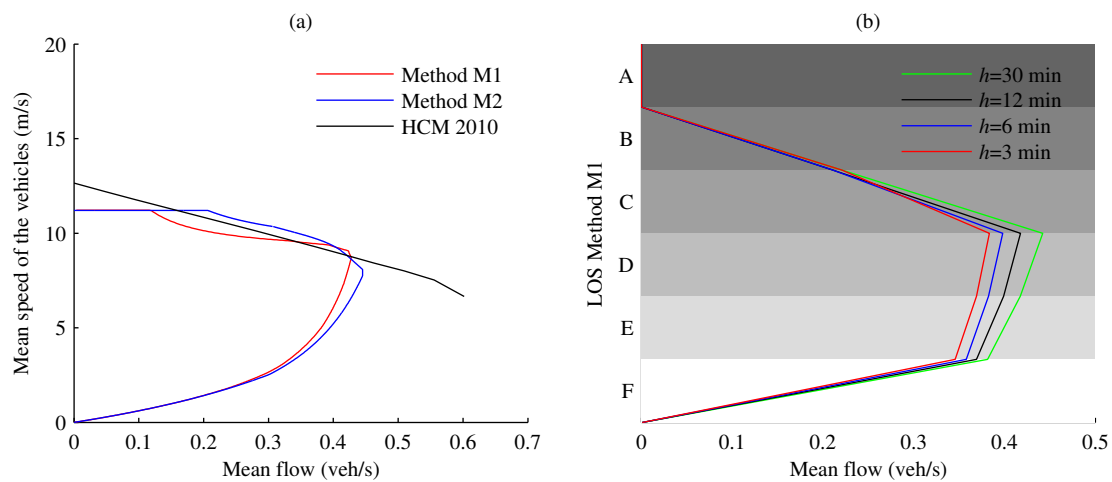
Figure 10: Comparison of mean speed obtained with the different methods
(a) $h=3\text{min}$ (b) $h=6\text{min}$ (c) $h=12\text{min}$ (d) $h=30\text{min}$

Level Of Services (LOS)

The results are now confronted to the LOS proposed by the HCM 2010 (19). We only focused on the automobile LOS because transit LOS are not consistent with our approach. Indeed, this methodology is applicable for bus system that stops along the arterials and boards passengers. This is not the case in our paper. Then, the automobile LOS measures are computed based on the methodology proposed for urban street segments. Details can be found in (19).

Speed-flow relationship is calculated for our study case (see Figure 11a). The point is that LOS of the HCM underestimated effects of the traffic signal on the running speed of the vehicles. It is not surprising because correlation between successive traffic signal is not accounted for in this methodology. The second drawback is that the HCM does not provided running speed values for congested situations and especially when spillbacks occur. Our methods clearly fill this gap that is of great importance for city managers.

Then, the HCM running speed thresholds for urban street segments are used to convert mean speed estimated for methods M1 and M2 into LOS letter grades. Figure 11b clearly shows that the grade A is never obtained. Grade D and E corresponds to transient situations. Ranges of mean flow are very small compare to ranges of grade B, C and F. Notice that Figure 11b displays only results of method M1. Similar results are obtained for method M2.



**Figure 11: (a) Comparison of the three methods with HCM 2010
(b) LOS obtained with method M1 for the different headway values**

DISCUSSION

By extending past research on MFD estimation methods, this paper has demonstrated the potential for using MFD to analytically evaluate performance of an arterial. To this end, we first refine the work of (16) to account for buses in traffic. This method is based on the VT and consists in defining a suitable graph. It provides all the necessary cuts that defined the upper envelop of the MFD. The second approach relies on the analytical study of time-space diagrams. According to Edie's definitions, it has been shown that it is possible to estimate MFDs that account for buses based on the KW theory and the MFD calculated without presence of buses. Finally, we directly estimate MFDs from vehicle trajectories provided by micro-simulation software that is fully consistent with both previous methods.

Then, these three methods have been cross-compared based on estimated mean speed values. The methods furnish average running speed of vehicles and buses for range of all possible traffic conditions (both free-flow and congested situations). It turns out that methods provide similar results. Moreover, observed differences are easily understandable by the fact that discordances exist between the modeling processes: MB discretization, aggregation of impacts of traffic signal, lane-changing phenomenon, etc.

Finally, methods are compared with the LOS of the HCM 2010. These results are promising, especially in the light of the fact that methods fill the drawbacks of the LOS: congested situations are also appraised. Furthermore, running speed of vehicles estimated by method M1 and M2 are more realistic because effects of successive traffic signal are accounted for. These methods significantly improved the understanding and the

evaluation of traffic dynamics of an arterial. One of the next extensions of the methods presented in this paper will be a more realistic modeling of bus systems. Although impacts of buses on traffic are already accounted for, ongoing work is investigating how to incorporate dynamics of motion laws of the bus systems (boarding and alighting of passengers). These results can be of great importance to practitioner to manage arterials and bus systems.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was partly founded by the “Région Rhône-Alpes”.

REFERENCES

1. Herman, R., Prigogine, I., 1979, A two-fluid approach to town traffic, *Science* 204, 148 - 151.
2. Mahmassani, H. S., Williams, J. C., Herman, R., 1984, Investigation of Network-level traffic flow relationships: some simulation results, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 971, 121 - 130.
3. Geroliminis, N., Daganzo, C. F., 2008, Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings, *Transportation Research Part B: Methodological* 42(9), 759 - 770.
4. Skabardonis, A., Geroliminis, N., 2005, Real-Time Estimation of Travel Times on Signalized Arterials, in *Proc. of the 16th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*.
5. Zhang, H., 1999, Link-Journey-Speed Model for Arterial Traffic, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1676, 109 - 115.
6. Liu, H., Ma, W., 2007, Time-Dependent Travel Time Estimation Mode for Signalized Arterial Network, in *Proceedings of the 86th TRB annual meeting*.
7. Daganzo, C. F., Geroliminis, N., 2008, An analytical approximation for the macroscopic fundamental diagram of urban traffic, *Transportation Research Part B: Methodological* 42(9), 771 - 781.
8. Ott, R., 2002, The Zurich experience, In *Alternatives to Congestion Charging*, Transport Policy Committee.
9. Buisson, C., Ladier, C., 2009, Exploring the Impact of Homogeneity of Traffic Measurements on the Existence of Macroscopic Fundamental Diagrams, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2124, 127 - 136.
10. Ji, Y., Daamen, W., Hoogendoorn, S., Hoogendoorn-Lanser, S., Qian, X., 2010, Investigating the Shape of the Macroscopic Fundamental Diagram Using Simulation Data, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2161, 40 - 48.
11. Geroliminis, N., Sun, J., 2011, Properties of a well-defined macroscopic fundamental diagram for urban traffic, *Transportation Research Part B: Methodological* 45(3), 605 - 617.
12. Daganzo, C. F., Gayah, V. V., Gonzales, E. J., 2011, Macroscopic relations of urban traffic variables: Bifurcations, multivaluedness and instability, *Transportation Research Part B* 45(1), 278 - 288.
13. Gayah, V. V., Daganzo, C. F., 2011, Clockwise hysteresis loops in the Macroscopic Fundamental Diagram: An effect of network instability, *Transportation Research Part B: Methodological* 45(4), 643 - 655.
14. Boyaci, B., Geroliminis, N., 2011, Exploring the Effect of Variability of Urban Systems Characteristics in the Network Capacity, in *Proceedings of the 90th TRB annual meeting*.
15. Boyaci, B., Geroliminis, N., 2010, Estimation of the network capacity for multimodal urban systems, in *Proceedings of the 6th International Symposium on Highway Capacity*.
16. Leclercq, L., Geroliminis, N., 2013, Estimating MFDs in Simple Networks with Route Choice, *Transportation Research Part B: Methodological*, submitted.
17. Newell, G. F., 1998, A moving bottleneck, *Transportation Research Part B: Methodological* 32(8), 531 - 537.
18. Leclercq, L., Chanut, S., Lesort, J.-B., 2004, Moving Bottlenecks in Lighthill-Whitham-Richards Model: A Unified Theory, *Transportation Research Record* 1883, 3 - 13.
19. TRB, National Research Council (2010), *Highway Capacity Manual*.
20. Chiabaut, N., Buisson, C., Leclercq, L., 2009, Fundamental Diagram Estimation Through Passing Rate Measurements in Congestion, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 10(2), 355 - 359.
21. Chiabaut, N., Leclercq, L., 2011, Wave Velocity Estimation Through Cumulative Vehicle Count Curves Automatic Analysis, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2249, 1 - 6.
22. Daganzo, C. F., 2005, A variational formulation of kinematic waves: basic theory and complex boundary conditions, *Transportation Research Part B: Methodological* 39(2), 187 - 196.
24. Daganzo, C. F., 2005, A variational formulation of kinematic waves: Solution methods, *Transportation Research Part B: Methodological* 39(10), 934 - 950.
25. Daganzo, C. F., Laval, J. A., 2005, On the numerical treatment of moving bottlenecks, *Transportation Research Part B: Methodological* 39(1), 31 - 46.
26. Daganzo, C. F., Laval, J. A., 2005, Moving bottlenecks: A numerical method that converges in flows, *Transportation Research Part B: Methodological* 39(9), 855 - 863.

27. Daganzo, C. F., Menendez, M., 2005, A variational formulation of kinematic waves: Bottleneck properties and examples, in H.S. Mahmassani, ed., 16th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, Pergamon, Washington D.C., USA, 345 - 364.
28. Eichler, M., Daganzo, C. F., 2006, Bus lanes with intermittent priority: Strategy formulae and an evaluation, *Transportation Research Part B: Methodological* 40(9), 731 - 744.
29. Gazis, D. C., Herman, R., 1992, The moving and "phantom" bottlenecks, *Transportation Science* 26(3), 223 - 229.
30. Newell, G. F., 1993, A simplified theory of kinematic waves in highway traffic, part I: General theory, *Transportation Research Part B: Methodological* 27(4), 281 - 287.
31. Newell, G. F., 2002, A simplified car-following theory: a lower order model, *Transportation Research Part B: Methodological* 36(3), 195 - 205.
32. Leclercq, L., Laval, J. A., Chevallier, E., 2007, The lagrangian coordinates and what it means for first order traffic flow models, *Transportation and Traffic Theory 2007 (ISTTT17)*, Elsevier, 735 - 754.
33. Laval, J. A., Leclercq, L., 2008, Microscopic modeling of the relaxation phenomenon using a macroscopic lane-changing model, *Transportation Research Part B* 42(6), 511 - 522.
34. Courbon, T., Leclercq, L., 2011, Cross-comparison of macroscopic fundamental diagram estimation methods, in *Proceeding of the 14th European Working Group on Transportation Meeting*.
35. Edie, L. C., 1963, Discussion of traffic stream measurements and definitions, in OECD, ed., *Proceedings of the 2nd International Symposium On the Theory of Traffic Flows*, 139 - 154.

Annexe 3

Chiabaut, N., Xie, X., Leclercq, L. [2012]. Road capacity and travel times with Bus Lanes and Intermittent Priority Activation: Analytical Investigations. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2315, 1, 182-190.

Road Capacity and Travel Times with Bus Lanes and Intermittent Priority Activation Analytical Investigations

Nicolas Chiabaut, Xiaoyan Xie, and Ludovic Leclercq

This study is focused on capacity and travel times in a signalized corridor and bus lanes with intermittent priority (BLIPs). These strategies consist of opening the bus lane to general traffic intermittently when a bus is not using it. Although the benefits of such strategies have been pointed out in the literature, the activation phase has received little attention. In an attempt to fill this gap, the activation of BLIP strategies was studied analytically. To this end, the extended kinematic wave model with bounded acceleration was chosen. BLIP activation reduced capacity and increased the travel time of buses. However, even if this strategy seems to be counterproductive at first, it clearly increases the performance of transit buses on a larger scale.

Attractiveness of public transport is significantly affected by urban traffic congestion. Such disturbances limit the quality and effectiveness of buses since they experience major delays during peak hours. Consequently, it strengthens the competitiveness of individual vehicles compared with shared transport systems. To reverse this trend, many transit agencies, cities, or both, have developed and implemented several solutions for allowing buses to avoid traffic queues. Dedicated bus lanes (DBLs) have become widely accepted all over the world. Associated with transit signal priority (TSP), DBLs show benefits that have been highlighted by a handful of studies (1–6). Unfortunately, two major problems can be noted during heavy traffic: (a) the effectiveness of TSP is reduced since the green phases of traffic signals have to accommodate buses as well as the remaining traffic and (b) DBLs are not appropriate since one lane is no longer available for individual vehicles and therefore capacity is reduced.

To overcome these drawbacks, Viegas and Lu have introduced the concept of an intermittent bus lane (IBL) (7). This system is based on the idea that opening the bus lane to general traffic intermittently when it is not in use by buses can increase the capacity of a DBL by a bus. Thus, an IBL consists in restricting individual vehicles from changing into the lane ahead of the bus only when the bus is coming. This variable solution will provide a bus lane for the time strictly necessary for each bus to pass. Moreover, TSPs are often combined to flush the queues at traffic signals and clear the way for the bus.

Experimentation carried out in Lisbon, Portugal, reveals an overall increase of up to 20% in the bus average speed, with no sig-

nificant influence on the general traffic stream (8). Consequently, IBLs seem to present great potential to improve the efficiency of bus systems in urban areas. Some optimization processes of the control commands have been proposed by Viegas and Lu to maximize the efficiency of IBLs and to guarantee a good trade-off between travel times of buses and increases in general traffic congestion (8). However, traffic in which the bus is embedded can be reproduced by microsimulation software. Therefore, impacts of IBLs on the general traffic stream cannot be analytically assessed. This limitation is very restrictive since the analytical approach can be useful in identifying general characteristics about the feasibility, costs, and benefits of an IBL before implementation.

To this end, Eichler and Daganzo have studied bus lanes with intermittent priority (BLIPs), one of the IBL variants (9). In the case of BLIPs, general traffic is forced out of the lane reserved for the bus, whereas in the IBL case, vehicles already in the bus lane are not required to leave the lane. The authors used kinematic wave (KW) theory to analytically evaluate the feasibility, costs, and benefits of BLIPs. BLIP solutions are compared with the DBL and do-nothing alternatives to identify the domain of application of BLIPs. However, the use of the KW theory is a limiting condition since traffic is modeled as a single stream where vehicles are homogeneous. Especially, neither lane changes nor bounded acceleration is taken into account. “Bounded acceleration” refers to the finite ability of vehicles to accelerate. Unfortunately, they can have a major impact in the vicinity of lane reduction, that is, near the signals where BLIP solutions are set off. Consequently, the impacts of the activation of BLIP strategies on the remaining traffic are not studied here, especially near and upstream of the first traffic signal.

This study tries to fill the specific deficiencies of the previous studies. The focus is on the starting of BLIPs at the first traffic signal of the experimental site because saturation flow can be reduced by BLIP activation. Thus, a BLIP variant on a long street will be considered in which the DBL is activated when a bus enters the experimental site and until it passes the first signal. Consequently, individual vehicles ahead of the bus experience a lane reduction when the BLIP is active. A capacity drop can then be observed at the first signal for two reasons: (a) the bounded acceleration of stopped vehicles that constrain the upstream flows and (b) the merge phenomenon, which also reduces the capacity.

MODELING BLIP ACTIVATION

The object of the current analysis is how BLIP strategies are set off. BLIP strategies could be realized in several practical ways (8). The proposed approach is an activation technique based on traffic

Université de Lyon, Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux and Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Laboratoire Ingénierie Circulation Transports, Rue Maurice Audin, F-69518 Vaulx-en-Velin, France. Corresponding author: N. Chiabaut, nicolas.chiabaut@entpe.fr.

Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2315, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2012, pp. 182–190.
DOI: 10.3141/2315-19

signals and bus detection. Here the bus is detected with an inductive loop but many other solutions exist (an embedded Global Positioning System device, surveillance camera, etc.). An overview of the technical systems can be found elsewhere (8, 10).

When a bus is detected at a distance L from the intersection (time t_b^0), the signal cycle during which the bus will cross the stop line is predicted on the basis of the free-flow bus travel time. Then the BLIP strategy is activated at the start of the next signal cycle until the bus actually passes the intersection (time t_b). During the activation, cars are required to leave the bus lane just before the road section in which the BLIP strategy occurs. Consequently, the vehicles are experiencing a lane reduction, which can lead to delays and capacity drops. The only focus here is on a liberal strategy in which the restriction is imposed in front of the bus (8).

Thus, a two-lane road is considered that can be diagrammed as shown in Figure 1a. A BLIP system operates downstream of the traffic signal located at $x = 0$. In this section ($x > 0$), the right lane is reserved for the bus.

Since the only focus is on the activation of the BLIP, no bus stops are represented on the theoretical site. Consequently, buses are supposed to travel at the same speed as other vehicles. Activation of BLIP strategies causes disturbances in the traffic stream, although the bus cannot be considered as a moving bottleneck that reduces the capacity locally. The capacity is reduced and delays are created because of the traffic signal and the lane reduction, but not as much as in the DBL case. Indeed, the bounded acceleration of the stopped vehicles at the traffic signal constrains the upstream flow of the rest of the queue during their acceleration phase until they reach free-flow speed, and the insertion of vehicles at the merge with lower speed also constrains the upstream flow until the vehicles reach the speed of the target lane. It is thus appealing to study and quantify the effects of the activation. To this end, the KW theory is used to account for both capacity drop sources.

KW Theory with Bounded Acceleration of Stopped Vehicles

Even if KW theory has limitations, capacities and travel times are reasonably well predicted. Thus, the traffic is supposed to obey a

fundamental diagram (FD), which is assumed to be triangular (11–13) and only depends on three observable parameters: free-flow speed u in kilometers per hour, wave speed w in kilometers per hour, and jam density κ in vehicles per kilometer (see Figure 1b). Capacity C in vehicles per hour and optimum density k_c in vehicles per kilometer can be easily derived: $C = uw\kappa/(u + w)$ and $k_c = C/u$. As proposed by Viegas and Lu (8), it is convenient to define the FD of the reduced roadway when the BLIP strategy is active (Figure 1b).

The macroscopic variables are defined as follows. For any equilibrium traffic state A (a point on the FD), the flow and the density are respectively denoted q_A in vehicles per hour and k_A in vehicles per kilometer. Figure 1b also displays the equilibrium state, which turns out to be of interest throughout the study. Thus, state B_1 corresponds to the capacity of the reduced roadway, B_2 is the congested conditions with the same flow as state B_1 on the full roadway, state A is the generic uncongested demand, state O is the empty roadway, state C is the full roadway capacity, and state J is the full roadway jam density.

Of particular interest is the time–space diagram during activation of the BLIP strategy. By using this diagram, capacities and travel times of buses can easily be calculated. These variables depend on the traffic volume as well as on the bus arrival time at the traffic signal. The KW model describes traffic dynamics for the theoretical site, given the parameters of the FD and additional parameters such as the cycle length c , the red time r , the shock wave speed u_{AB} between equilibrium states A and B_2 , and the shock wave speed u_{AJ} between equilibrium state A and J (see Figure 1b).

Moreover, the KW theory is extended to account for the bounded acceleration of vehicles (14). Vehicles are supposed to accelerate at a constant rate a in m/s^2 . This rate is assumed identical for all vehicles. Consequently, the first vehicle at the stop line constrains the flow upstream until it reaches free-flow speed u . Figure 2 shows the associated time–space diagram under BLIP activation, where γ denotes the time required by the queue to recover.

N is the cumulative number of vehicles that have been introduced in the theoretical site. A study of the variations of N provides a convenient numerical scheme to calculate this time (15). One can define two horizontal paths to calculate the variation of N : U_1-U_2 located a distance L from the intersection and D_1-D_2 at $x = 0$. According to

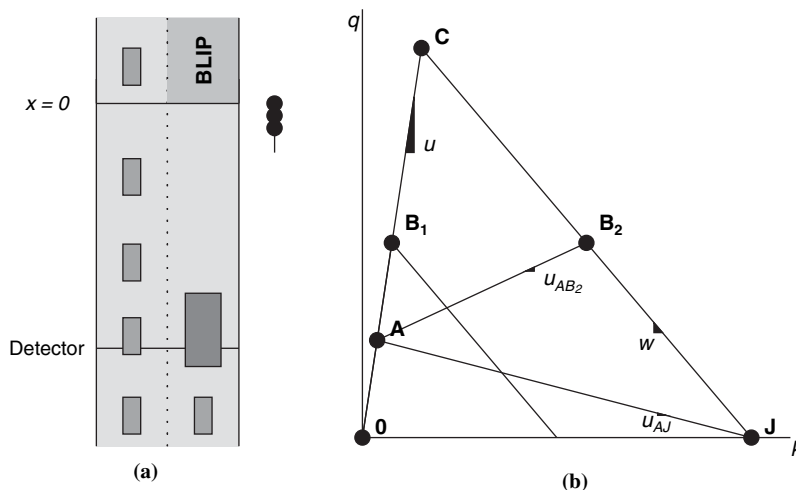


FIGURE 1 Modeling BLIP activation: (a) experimental site and (b) FD of KW model.

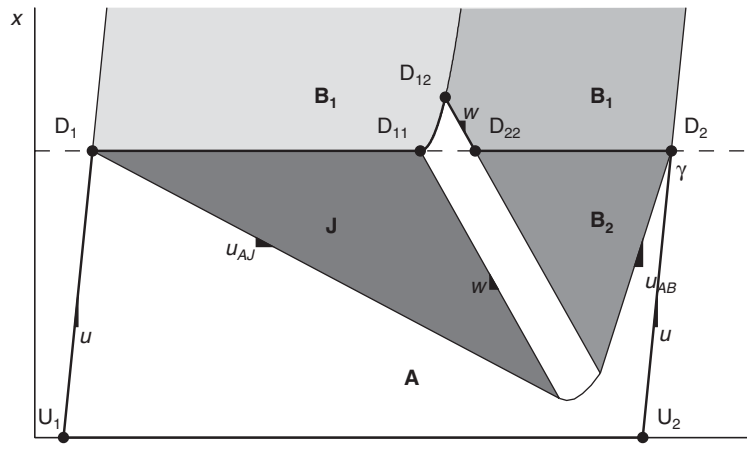


FIGURE 2 Time-space diagram at traffic signal.

Daganzo, increases in N must be the same on both paths (15). Along U_1-U_2 the variation of N is equal to the demand volume that passes locations L during γ : $q_A \cdot \gamma$. But the increase in N along the horizontal path from D_1 and D_2 (see Figure 2) is also the same as on the alternative path $D_1-D_{11}-D_{12}-D_{22}-D_2$. This path follows the first vehicle trajectory and then reaches D_{22} along a characteristic with slope w . From D_{11} to D_{12} , the passing rate is equal to zero because no vehicle can pass. According to Leclercq et al., the increase along $D_{11}-D_{12}-D_{22}$ is equal to $p w \kappa$, where p is the lane reduction ratio (in this case $p = 1/2$) (16). Consequently, the increase from D_1 to D_2 is equal to $p w \kappa \cdot (t_{22} - t_{12}) + q_B (\gamma - t_{22})$.

Let t_i be the instant corresponding to point D_i . Then time t_{22} is easily obtained from the kinematic equation of the first vehicle. Indeed, t_{12} represents the time duration required by the first vehicle to reach free-flow speed and is equal to $r + u/a$. Consequently, t_{22} is given by

$$t_{22} = \frac{u}{a} \left(\frac{u}{2w} + 1 \right) + r$$

Finally, the following condition must be verified:

$$q_A \cdot \gamma = p w \kappa (t_{22} - t_{12}) + q_B (\gamma - t_{22})$$

which becomes

$$\gamma = \frac{1}{q_B - q_A} [p w \kappa (t_{22} - t_{12}) + q_A t_{22}]$$

From the value of γ and the bus crossing time t_b , seven cases can be identified. Figures 3 and 4 display the associated time-space diagrams. The transient states are estimated by these time-space diagrams in contrast to the study proposed by Eichler and Daganzo (9). In the latter case, traffic upstream of the intersections is considered instantaneously at state B_2 when the demand q_A is higher than q_B . It will be shown that this assumption has a strong influence because the tendencies of the curves of demand versus observed capacity are on opposite sides.

Queue Cleared in One Cycle ($\gamma < c$)

Cases in which the queue clears at the end of the first cycle are considered first. The flow q_m that can pass the intersection and the travel time of the bus depend on the crossing time t_b of the bus (and indirectly on the detection time t_b^0). Three subcases can be identified: i, the bus passes the intersection during congested traffic state B ($t_b \geq t_{22}$ and $t_b \leq \gamma$); ii, the bus passes the intersection at a speed lower than u_b because of its bounded acceleration ($t_b \leq t_{22}$); and iii, the bus passes the intersection when congested traffic state B is cleared up ($t_b \geq \gamma$).

Case i ($t_b \geq t_{22}$ and $t_b \leq \gamma$) In the first case (Figure 3a), traffic state B_2 holds when the bus arrives at the traffic signal. Consequently, the bus passes the intersection at congested speed u_b . The condition required for this specific case is that the congested wave emanating from the instant when the first vehicle reached speed u (time t_{12}) crosses the intersection (time t_{22}).

Focusing on the variation of N , the bus travel time and observed flow can be calculated. Since function N is constant along the bus trajectory, the increase of N during t_b along the path $D_1-D_{11}-D_{12}-D_{22}-D_2$ is equal to the increase along the horizontal path U_1-U_2 . It follows that

$$q_A \left(t_b^0 + \frac{L}{u} \right) = p w \kappa (t_{22} - t_{12}) + q_B (t_b - t_{22})$$

and

$$t_b = \frac{1}{q_B} \left[q_A \left(t_b^0 + \frac{L}{u} \right) - p w \kappa (t_{22} - t_{12}) \right] + t_{22}$$

It turns out that the bus travel time is a function τ of t_b^0 :

$$\tau(t_b^0) = t_b - t_b^0$$

The flow q_m that can pass the intersection is constrained by the reduced roadway and the bounded acceleration of the first vehicle

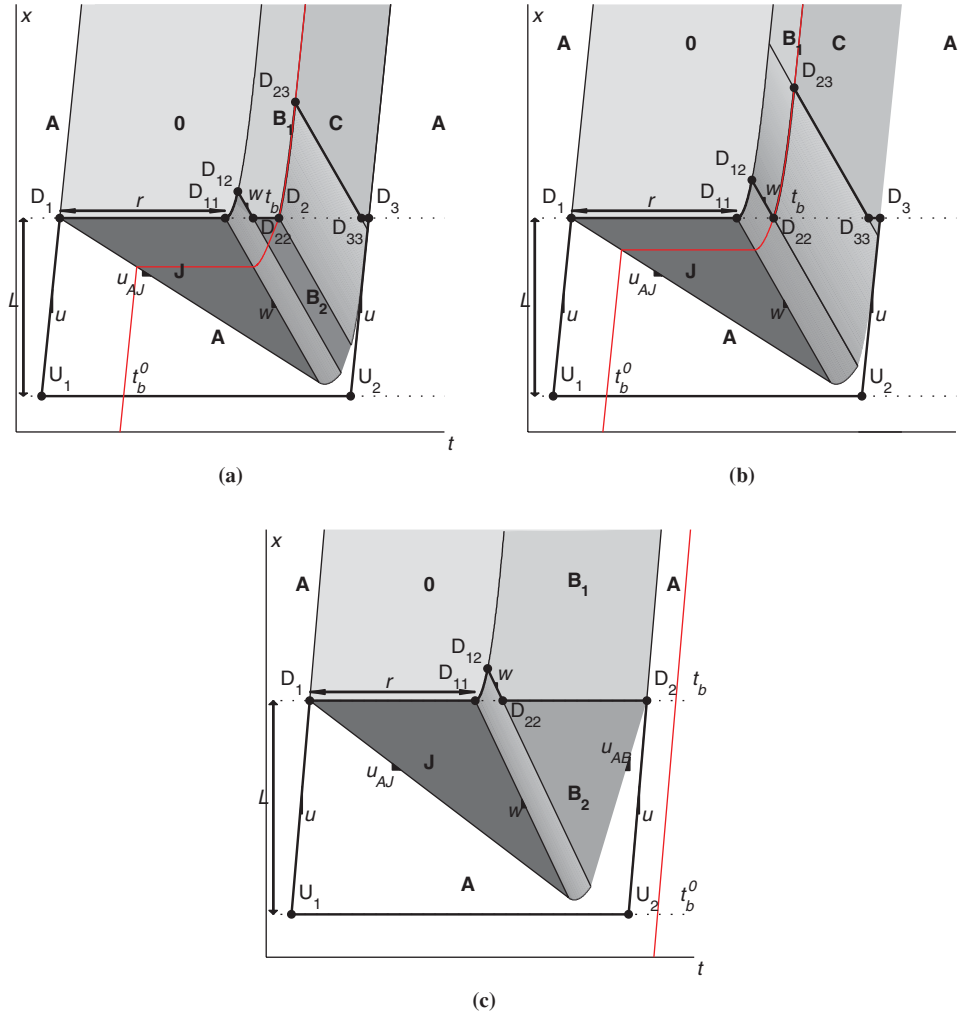


FIGURE 3 Time-space diagram when queue cleared in one cycle: (a) Case i, (b) Case ii, and (c) Case iii.

and the bus. With the path D_1 - D_{11} - D_{12} - D_{22} - D_2 - D_{22} - D_{33} - D_3 , variational theory provides the formulation of q_m :

$$q_m(t_b^0) = \frac{1}{c} [pw\kappa(t_{22} - t_{12}) + q_B(t_b - t_{22}) + w\kappa(t_{33} - t_{23}) + C(c - t_{33})]$$

Case ii ($t_b \leq t_{22}$) In Case ii (Figure 3b), the bus meets the transient traffic state upstream of the traffic signal. Indeed, the congested wave emanating from the instant (and location) when the first vehicle has reached speed u_b has not crossed the intersection. Consequently, the bus passes the traffic signal at a speed lower than u_b . As a result, the flow is never constrained by the reduced roadway. Indeed, traffic state B never happens because all lanes are open to vehicles after the bus has passed.

The focus now is on the path D_1 - D'_{11} - D'_{12} - D'_{22} - D'_{23} - D'_{33} - D'_3 . To verify that the bus crosses the intersection at time t_b ,

$$t_b = \frac{q_A}{pw\kappa} \left(t_b^0 + \frac{L}{u} \right) + t'_{12}$$

where

$$t'_{12} = 2 \sqrt{\left(t_b^0 + \frac{L}{u} \right) \frac{q_A}{\kappa} + r}$$

The travel time of the bus is still given by

$$\tau(t_b^0) = t_b - t_b^0$$

The flow that can pass the intersection is equal to

$$q_m(t_b^0) = \frac{1}{c} [pw\kappa(t_b - t'_{12}) + w\kappa(t'_{33} - t'_{23}) + C(c - t'_{33})]$$

Case iii ($t_b \geq \gamma$) In Case iii, the queue recovers before the end of the cycle and the bus arrives after the queue. Thus, it has not had to slow down or stop upstream of the intersection (see Figure 3c).

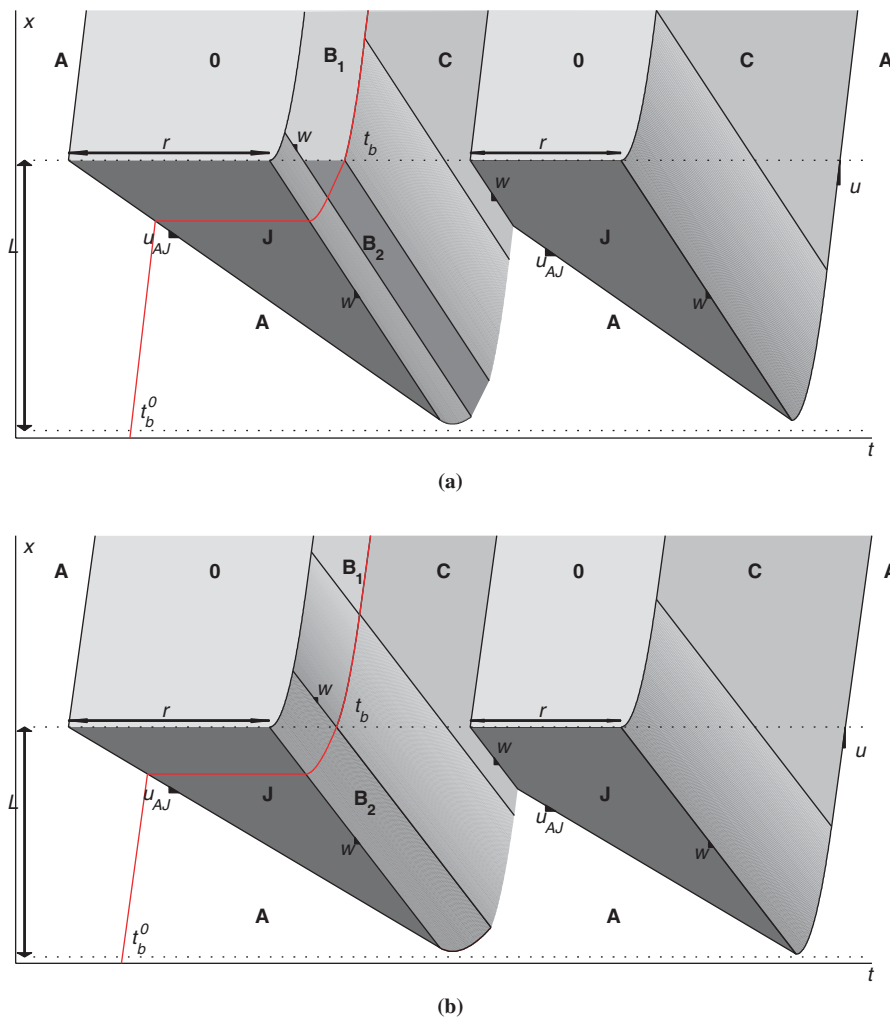


FIGURE 4 Time-space diagram when queue not cleared in one cycle: (a) Case iv and (b) Case v.

Consequently, the travel time of the bus is equal to the free-flow travel time; that is,

$$\tau(t_b^0) = \frac{L}{u}$$

The flow that can pass the intersection is

$$q_m(t_b^0) = \frac{1}{c} [pw\kappa(t_{22} - t_{12}) + q_B(t_b - t_{22}) + C(c - t_{22})]$$

Queue Not Cleared at End of First Cycle

Here the cases concern the queue's needing more than one cycle to be cleared. The bus can pass during either the first or the second cycle. On the basis of those facts, observed flows and bus travel times can be calculated by focusing on vehicle accumulation. Four cases are identified: the first two previous cases are recovered but with a queue that needs more than one cycle to clear; iv, the bus passes the intersection during congested traffic state B and during the first cycle ($t_b \geq t_{22}$ and $t_b \leq \gamma$); and v, the bus passes the

intersection at a speed lower than u_b ($t_b \leq t_{22}$). The two additional cases correspond to the same situation but when the bus arrives during the second signal cycle: vi, the bus meets traffic state B and passes the intersection during the second cycle ($t_b \geq c + r + t_{22}$), and vii, the bus meets transient traffic states and crosses the intersection at a speed lower than u_b during the second cycle ($t_b \leq c + r + t_{22}$ and $t_b \geq c + r$).

Cases iv ($t_b \geq t_{22}$) and v ($t_b \leq t_{22}$) In Case iv, the queue needs two cycles to recover but the bus can still cross the intersection during the first cycle (see Figure 4, a and b). Consequently, Cases i and ii of the previously studied situation are recovered. The formulations of t_b and q_m are still valid.

Case vi ($t_b \geq c + r + t_{22}$) In Case vi, the bus needs two cycles to cross the intersection. Moreover, it meets congested traffic state B upstream of the traffic signal and thus passes the intersection at speed u_b . Figure 5a shows the time-space diagram. It follows that

$$q_A\left(t_b^0 + \frac{L}{u}\right) = (1 + p)w\kappa(t_{22} - t_{12}) + q_B(t_b - t_{22} - r)$$

and the travel time of the bus can be calculated.

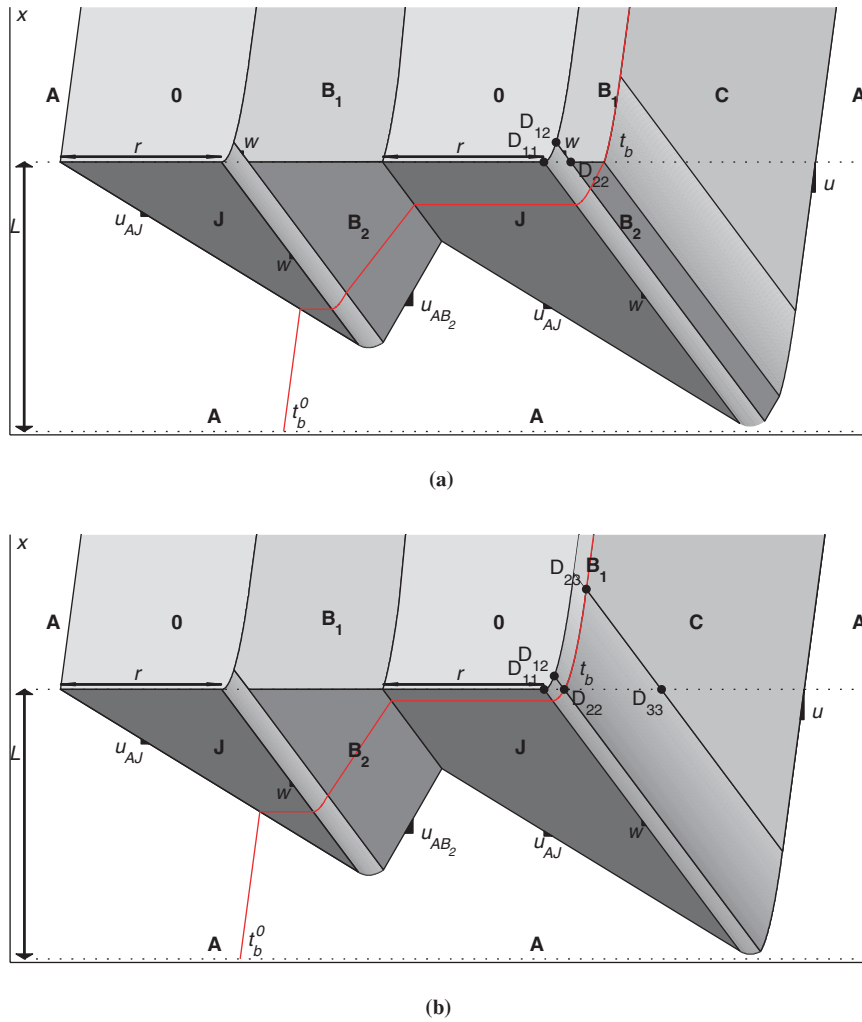


FIGURE 5 Time-space diagram when queue is not cleared in one cycle: (a) Case vi and (b) Case vii.

It follows that it is still a function τ of t_b^0 given by

$$\tau(t_b^0) = t_b - t_b^0$$

$$\text{where } t_b = \frac{1}{q_B} \left(q_A \left(t_b^0 + \frac{L}{u} \right) - (1+p)w\kappa(t_{22} - t_{12}) \right) + t_{22} + r$$

The flow that can pass the intersection is thus equal to

$$q_m(t_b^0) = \frac{1}{2c} \left[(1+p)w\kappa(t_{22} - t_{12}) + q_B(t_b - t_{22} - r) + C(c - t_b) \right]$$

Case vii ($t_b \leq c + r + t_{22}$ and $t_b \geq c + r$) In the last case, the queue needs two cycles to recover and the bus also needs two cycles to cross the intersection. In the opposite of Case v, the bus passes the intersection at a speed lower than u_b because the congested traffic state B is still not observable. Figure 5b shows the time-space diagram. With the path $D_1-D'_{11}-D'_{12}-D'_{22}-D'_{23}-D'_{33}-D'_3$, it follows that

$$q_A \left(t_b^0 + \frac{L}{u} \right) = p w \kappa(t_{22} - t_{12}) + q_B(c - t_{22}) + p w \kappa(t_b - t'_{12})$$

and the travel time of the bus can be calculated. It follows that it is still a function τ of t_b^0 given by

$$\tau(t_b^0) = t_b - t_b^0$$

$$\text{where } t_b = \frac{1}{q_B} \left(q_A \left(t_b^0 + \frac{L}{u} \right) - w\kappa(t_{22} - t_{12}) \right) + t'_{12}$$

The flow observed is thus equal to

$$q_m(t_b^0) = \frac{1}{2c} \left[p w \kappa(t_{22} - t_{12}) + q_B(c - t_{22}) + C(c - t_b) + p w \kappa(t_b - t'_{12}) \right]$$

Bounded Acceleration of Merging Vehicles

A further key element should be considered to estimate the capacity: upstream of the intersection individual vehicles have to merge from two lanes into a unique lane. This situation leads to capacity drop; that is, merging vehicles have to accelerate and they constrain the

upstream flow to a reduction between 10% and 30% (17–19). Even if the bounded acceleration of stopped vehicles has been accounted for, the merging maneuvers were not modeled in the previous section. The KW model has to be refined to incorporate the lane-changing phenomenon that also leads to a capacity drop upstream of the lane reduction. To that end, the formulation proposed by Leclercq et al. was used to show the effects of the merging vehicles and to estimate the capacity drop (16).

This model is quite simple although it accounts for most of the key elements of the merging mechanism. It provides the indicator d , which quantifies the relative capacity drop. In other words, d is the complement of the ratio between the effective capacity Q and the capacity C given by the FD:

$$d = 1 - \frac{Q}{C}$$

The merge ratio α has a little influence on d (20). This capacity drop cannot be directly compared with experimental values found in the literature. Indeed, a fixed reference C was chosen to calculate the capacity drop. In the experimental world, the capacity drop is often defined in reference to the maximal flow observed just before the capacity drop, which is always lower than C .

Leclercq et al. furnish a formulation of d that depends on the FD parameters, the acceleration of the vehicles, and the length l of the merge section (16):

$$d = 0.402 - 0.332a + 0.122a^2 - 1.85 \cdot 10^{-2}a^3 - 6.76 \cdot 10^{-4}l + 1.73 \cdot 10^{-6}l^2 + 6.82 \cdot 10^{-2}w - 3.12 \cdot 10^{-3}w^2 + 0.724\kappa$$

where a is expressed in m/s^2 , l in meters, w in m/s , and κ in vehicles per meter.

Consequently, the flow during BLIP activations is not constrained to q_b because of the reduced roadway but to $(1-d) \cdot q_b$ because of the capacity drop. In the same way, capacity is limited to $(1-d) \cdot C$. This feature can be easily accounted for in the previous formulations of travel times and observed flows by replacing q_b and C by $(1-d) \cdot q_b$ and $(1-d) \cdot C$.

EFFECT OF BLIP ACTIVATION

The previous subsection highlighted the impacts of BLIP activation on traffic dynamics. A BLIP creates queues upstream of the first intersection and reduces capacity. This reduction clearly depends on the demand level q_a . It is thus appealing to study the evolution of the observed flow q_m and bus travel times τ with respect to q_a but also the influence of BLIP activation on bus travel times.

Analytical Evaluation

According to the previous section, travel times τ and observed flow q_m depend on the detection time of the bus. For ease of understanding, detection times are supposed to be uniformly distributed. Consequently, mean values $\bar{\tau}$ of τ and \bar{q}_m of q_m can be easily calculated in the function of q_a . Moreover, various choices of modeling are compared. Results provided by the previously presented model (bounded acceleration of stopped and merging vehicles) are plotted in Figure 6 as solid lines (Model 2). The dashed lines correspond

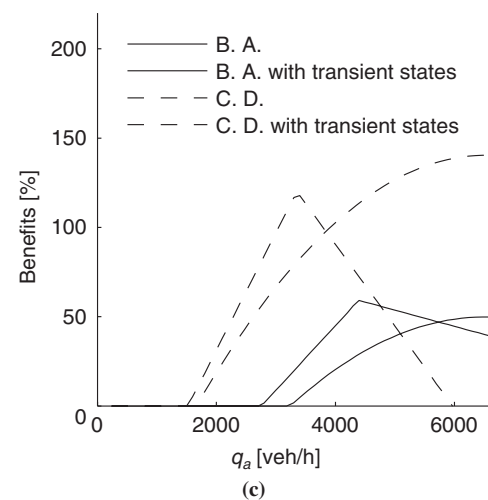
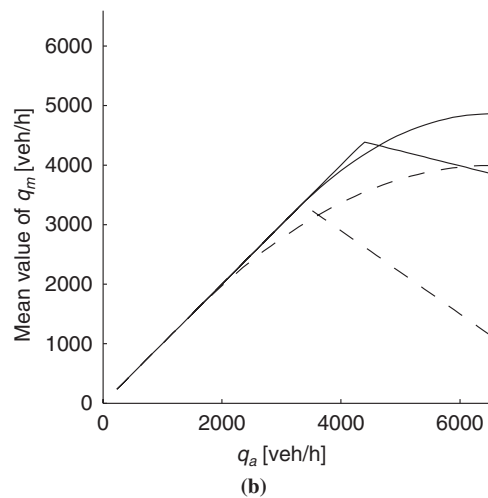
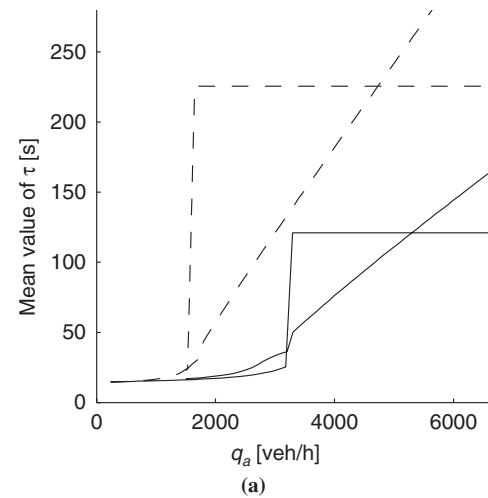


FIGURE 6 Evaluation of BLIP: (a) evolution of $\bar{\tau}$, (b) evolution of \bar{q}_m , and (c) benefits versus q_a (B. A. = bounded acceleration; C. D. = capacity drop).

to results obtained without accounting for the bounded acceleration of merging vehicles (Model 1). In the same way, red lines denote results calculated by not considering transient states (Models 1 and 2 without transient states).

Figure 6a shows the evolution of $\bar{\tau}$ versus q_a . It is not surprising that $\bar{\tau}$ increases with q_a and that travel times are higher when capacity drop is modeled. Figure 6a also demonstrates the impact of the modeling choice. When transient states are not accounted for, $\bar{\tau}$ becomes constant to L/u_b when the demand exceeds the saturation flow of the first signal.

In the same way, Figure 6b shows the evolution of \bar{q}_m with q_a for the various models. It clearly shows that the more detailed the model, the lower the flow. Moreover, the trend differs from one model to the other. Indeed, \bar{q}_m converges toward a constant value when the model does not reckon transitions.

Impacts on Bus Travel Time in Whole Corridor

The previous results show that such a strategy seems to be counter-productive at first glance. However, now a larger scale must be focused on to assess the efficiency of BLIPs on bus travel times. Indeed, if the

case of a signalized corridor under BLIP regulation associated with TSP is considered, buses are delayed at the first signal but will save time at the following intersection.

Figure 7a shows that travel time of the bus decreases while the bus experiences delays at the first signal. It appears that six intersections are enough to observe the efficiency of the BLIP strategies. Consequently, such strategies are well adapted for long urban corridors and thus for bus rapid transit systems.

However, the efficiency of BLIP strategies depends on the detection time of the bus, that is, the arrival time. For simplicity, arrival times have been assumed uniformly distributed. This assumption is now relaxed to assess the influence of bus system characteristics on bus performance.

Figure 7b highlights the impact on travel times of three shapes of distribution: a uniform distribution, a Poisson distribution, and a normal distribution. It is clearly shown that the shape of the distribution has a strong impact. Moreover, if other bus performance indicators are considered such as the travel time variability, the results are much better for normal and Poisson distributions (see Figure 7c). This finding is not surprising because such distributions are more centered near the start of the green signal. Consequently, the capacity of the downstream highway is reduced for a shorter time.

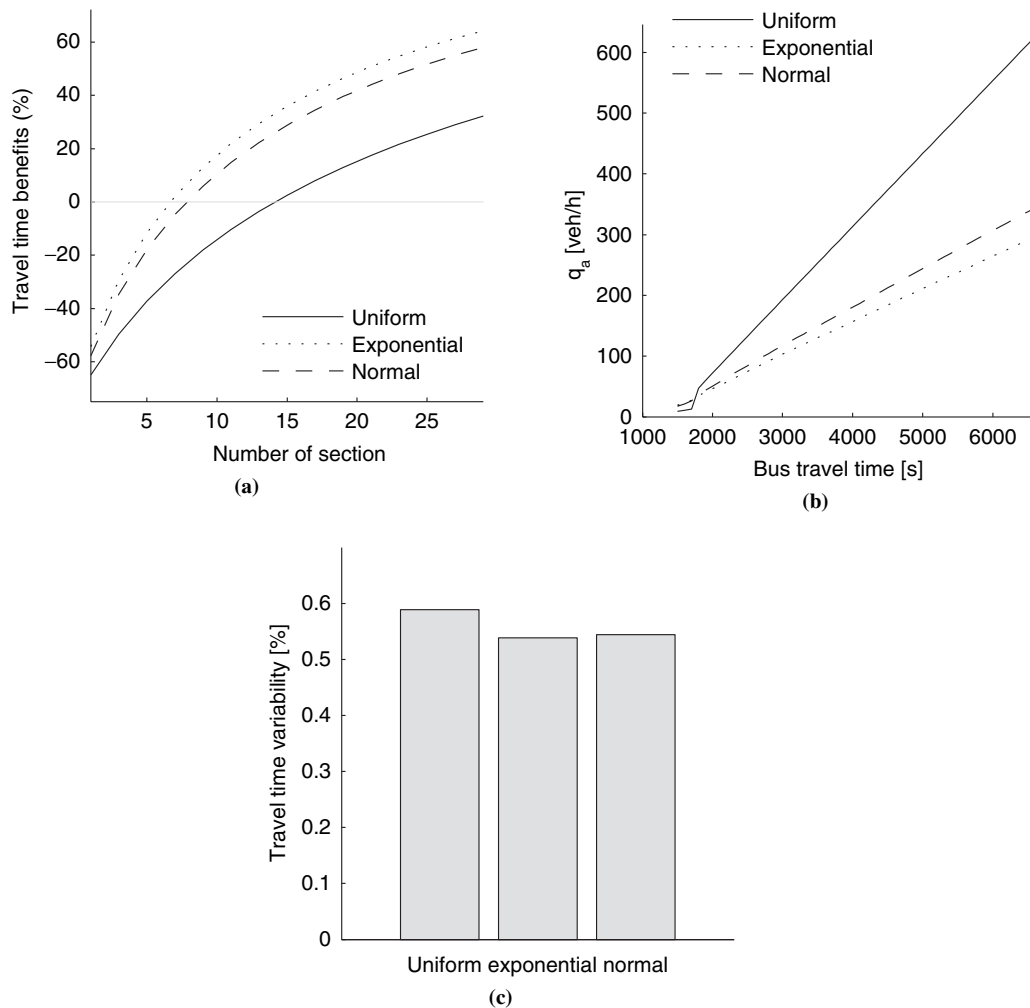


FIGURE 7 Effects of BLIPs on bus performance: (a) bus travel time benefits, (b) influence of distribution of arrival times, and (c) impacts on travel time variability.

DISCUSSION OF RESULTS

The effects of BLIP strategy activations were examined through an analytical approach. The KW model was extended to account for bounded acceleration of vehicles and capacity drop. Even if this model is quite simple, it suffices for modeling the various cases of BLIP activation.

The model predicts that the starting of a BLIP triggers a capacity reduction at the first signal and increases the travel times of the bus. The results strongly depend on the modeling assumption. Consequently, this study reinforces the importance of reproducing traffic flow in detail.

BLIP strategies appear to be competitive solutions to promote bus transit systems. Indeed, BLIP strategies associated with TSP reduce both travel times of buses and travel time variability. Transit customers and transit providers deem these indicators as two of the most appropriate and important characteristics of a transit system (21). The study also shows that the distribution of bus arrival times has a strong effect on bus performance. It is thus appealing to control the traffic signal with bus detection. Thereby, the capacity reduction is limited such as the increase of bus travel time.

Finally, even if the capacity drop is modeled, the formulas here do not account for the entire phenomenon linked to lane-changing maneuvers. The relaxation process after lane changing especially is not taken into account by the model. The relaxation phenomenon takes place when the lane-changing vehicle imposes a short spacing immediately after the lane change with its leader or follower. During this time interval, observed flows are higher than flows given by the FD. Consequently, this phenomenon tends to increase the flow that can pass the intersection and to reduce the capacity drop. To authors' knowledge, there is no easy way to analytically account for relaxation. Therefore, simulation has to be used for modeling this phenomenon. Such an attempt is currently being investigated by the authors. Preliminary results are encouraging, but research in this realm must continue.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank the Highways Agency of the United Kingdom for providing the data used in this work. This research benefited from participation in European Union COST (Cooperation in Science and Technology) Action, MULTITUDE: Methods and Tools for Supporting the Use, Calibration and Validation of Traffic Simulation Models. The research was partly funded by the Region Rhône-Alpes.

REFERENCES

- Balke, K. N., C. L. Dudek, and T. Urbanik II. Development and Evaluation of Intelligent Bus Priority Concept. In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1727, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2000, pp. 12–19.
- Duerr, P. Dynamic Right-of-Way for Transit Vehicles: Integrated Modeling Approach for Optimizing Signal Control on Mixed Traffic Arterials. In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1731, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2000, pp. 31–39.
- Furth, P. G., and T. H. J. Muller. Conditional Bus Priority at Signalized Intersections: Better Service with Less Traffic Disruption. In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1731, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2000, pp. 23–30.
- Janos, M., and P. G. Furth. Bus Priority with Highly Interruptible Traffic Signal Control: Simulation of San Juan's Avenida Ponce de Leon. In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1811, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2002, pp. 157–165.
- Lin, W.-H. Quantifying Delay Reduction to Buses with Signal Priority Treatment in Mixed-Mode Operation. In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1811, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2002, pp. 100–106.
- Skabardonis, A. Control Strategies for Transit Priority. In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1727, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2000, pp. 20–26.
- Viegas, J., and B. Lu. Turn of the Century, Survival of the Compact City, Revival of Public Transport. In *Transforming the Port and Transportation Business* (H. Meersman and E. Van de Voorde, eds.), Acco, Leuven, Belgium, 1996, pp. 55–63.
- Viegas, J., and B. Lu. The Intermittent Bus Lane Signals Setting Within an Area. *Transportation Research Part C*, Vol. 12, No. 6, 2004, pp. 453–469.
- Eichler, M., and C. F. Daganzo. Bus Lanes with Intermittent Priority: Strategy Formulae and an Evaluation. *Transportation Research Part B*, Vol. 40, No. 9, 2006, pp. 731–744.
- Eichler, M. *Bus Lanes with Intermittent Priority: Assessment and Design*. Master's thesis. Department of City and Regional Planning, University of California, Berkeley, 2006.
- Chiabaut, N., C. Buisson, and L. Leclercq. Fundamental Diagram Estimation Through Passing Rate Measurements in Congestion. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 10, No. 2, 2009, pp. 355–359.
- Chiabaut, N., L. Leclercq, and C. Buisson. From Heterogeneous Drivers to Macroscopic Patterns in Congestion. *Transportation Research Part B*, Vol. 44, No. 2, 2010, pp. 299–308.
- Chiabaut, N., and L. Leclercq. Wave Velocity Estimation Through Automatic Analysis of Cumulative Vehicle Count Curves. In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2249, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2011, pp. 1–6.
- Leclercq, L. Bounded Acceleration Close to Fixed and Moving Bottlenecks. *Transportation Research Part B*, Vol. 41, No. 3, 2007, pp. 309–319.
- Daganzo, C. F. A Variational Formulation of Kinematic Waves: Basic Theory and Complex Boundary Conditions. *Transportation Research Part B*, Vol. 39, No. 2, 2005, pp. 187–196.
- Leclercq, L., J. Laval, and N. Chiabaut. Capacity Drops at Merges: An Endogenous Model. *Transportation Research Part B*, Vol. 45, No. 9, 2011, pp. 1302–1313.
- Elefteriadou, L., R. P. Roess, and W. R. McShane. Probabilistic Nature of Breakdown at Freeway Merge Junction. In *Transportation Research Record 1484*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1995, pp. 80–89.
- Persaud, B., S. Yagar, and R. Brownlee. Exploration of the Breakdown Phenomenon in Freeway Traffic. In *Transportation Research Record 1634*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1998, pp. 64–69.
- Cassidy, M. J., and R. L. Bertini. Some Traffic Features at Freeway Bottlenecks. *Transportation Research Part B*, Vol. 33, No. 1, 1999, pp. 25–42.
- Daganzo, C. F. The Cell Transmission Model, Part II: Network Traffic. *Transportation Research Part B*, Vol. 29, No. 2, 1995, pp. 79–93.
- Nakanishi, Y. J. Bus Performance Indicators: On-Time Performance and Service Regularity. In *Transportation Research Record 1571*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1997, pp. 1–13.

The Traffic Flow Theory and Characteristics Committee peer-reviewed this paper.

Annexe 4

Xie, X., Chiabaut, N., Leclercq, L. [2012]. Improving Bus Transit in Cities with Appropriate Dynamic Lane Allocating Strategies. *Transportation Research Arena, Athens, 23-26 April 2012. / Procedia - Social and Behavioral Sciences, Transportation Research Arena 2012.* 48, 1472-1481.

Transport Research Arena– Europe 2012

Improving bus transit in cities with appropriate dynamic lane allocating strategies

Xiaoyan Xie^{a,*}, Nicolas Chiabaut^a, Ludovic Leclercq^a

^aUniversité de Lyon, IFSTTAR-ENTPE, LICIT, Rue Maurice Audin, 69518, Vaulx-en-Velin, France

Abstract

This paper describes how dynamic lane allocation strategies may improve bus transit. The considered strategies are bus lanes with intermittent priorities (BLIPs). These strategies consist in intermittently opening the bus lane to general traffic when not in use by a bus. Even if benefits of such strategies have been pointed out in the literature, the activation process has received little attention. Chiabaut et al. (2012) has firstly proposed an analytical approach for BLIPs activation. However, the analytical (extended) kinematic wave model uses a rough description of lane-changing maneuvers. This paper tries to overcome this limitation through a refined approach using the simulation package SymuVia. The simulated results show a good agreement with analytical results. For comparable case, simulation enables more sophisticated case to be investigated. A sensitivity analysis is carried out to identify the parameters that have the most influence on BLIPs activation efficiency.

© 2012 Published by Elsevier Ltd. Selection and/or peer review under responsibility of the Programme Committee of the Transport Research Arena 2012

Keywords: Bus transit; Dynamic strategies; Traffic flow; Modeling; Sensibility analysis

1. Introduction

Attractiveness of public transports is significantly impacted by urban traffic congestion. Such disturbances limit the quality and effectiveness of buses since they experience major delays during peak hours. Consequently, it strengthens the competitiveness of individual vehicle rather than bus transit system. To reverse this trend, many transit agencies and/or cities have developed and implemented several solutions for allowing buses to avoid traffic queues. Dedicated bus lanes (DBLs) have become widely accepted and spread all over the world. Associated with Transit Signal Priority (TSP), benefits of

* Corresponding author. Tel.: +33-472-047-051; fax: +33-472-047-712.
E-mail address: xiaoyan.xie@entpe.fr.

these solutions have been highlighted by a handful of studies (Balke et al. 2000, Duerr 2000, Furth & Muller 2000, Janos & Furth 2002, Lin 2002 and Skabardonis 2000). Unfortunately, two major lacks can still be pointed out during heavy traffic: (i) effectiveness of TSP is reduced since green phases of traffic signal have to arrange for both buses and remaining traffic; (ii) DBLs are not necessarily appropriated because the lane reduction limits the available capacity for traffic.

To overcome these drawbacks, Viegas & Lu (1996) have introduced the concept of an Intermittent Bus Lane (IBL). This system is based on the idea that capacity of a DBL can be increased by opening the bus lane to general traffic intermittently when not in use by a bus. Thus, an IBL consists in preventing vehicles from reaching the bus lane only when such a vehicle is actually driving. TSPs are often combined to flush the queues at traffic signals and clear the way for the bus. First experimentation carried out in Lisbon reveals an overall increase of up to 20% in the bus average speed, with no significant influence on the general traffic stream (Viegas & Lu 2004). Consequently, IBLs seem to present a high potential to improve efficiency of bus systems in urban area. Nevertheless, impacts of IBLs on the general traffic stream cannot always be analytically assessed. This limitation is very restrictive since traffic flow theory can be very useful to analyze the feasibility, costs and benefits of an IBL before implementation.

To this end, Eichler & Daganzo (2006) have studied bus lanes with intermittent priority (BLIP), one of the IBL variants. In this particular case, general traffic are forced out the lane reserved for the bus whereas in the IBL case, vehicles already in the bus lane are not requested to leave the lane. The authors used the kinematic wave (KW) theory to analytically evaluate the feasibility, costs and benefits of BLIPs. BLIPs solutions are compared with the DBL and "do-nothing" alternatives to identify the domain of application of BLIPs. However, the use of the KW theory is a limiting condition since traffic is modeled as a single pipe stream where vehicles are homogeneous. Especially, neither lane changes nor bounded acceleration are taken into account. These phenomena can have a major impact in the vicinity of lane reduction, i.e. near the signals where BLIPs solutions are set off. Moreover, BLIPs are considered in this paper as black-boxes. Thus, the authors do not study impacts of commands on the general traffic.

Chiabaut et al. (2012) filled the specific lacks of the previous references. BLIPs activation at the first traffic signal of the experimental site is modeled explicitly by an analytical approach, because saturation flow can be reduced due to BLIPs activation. Thus, a BLIPs variant on a long street is considered where DBL is activating when the bus enters in the experimental site and until it passes the first signal. Consequently, individual vehicles ahead of the bus experience a lane reduction when BLIPs is active. A capacity drop can then be observed at the first signal because of the bounded acceleration of the queuing vehicles and the merge phenomena of lane-changing vehicles. The obtained results appear to have encouraging effects on the operation. However, these analytical results strongly depend on the modeling assumptions, and the capacity drop model here cannot take into account all phenomena linked to lane-changing maneuvers, especially the relaxation process. Moreover, each model has several complex cases to analyze.

To work on BLIPs activation while overcoming these issues, this paper proposes a simulation approach. The simulation package is used to study BLIPs activation at the first traffic signal. This notably makes it possible to account for relaxation process after lane-changing. Toward this end, simplified analytical models adapted to reproduce BLIPs activation at the first traffic signal of the experimental site are presented and evaluated in section 2. Then, these models are refined and simulated. A sensitivity analysis is carried out to identify the most influential parameters on BLIPs activation efficiency in section 3. Finally, section 4 presents a discussion of BLIPs activation.

2. Modeling of dynamic control strategies

BLIPs strategies could be implemented in several practical ways, overviews in Viegas & Lu (2004)

and Eichler & Daganzo (2006). In this paper we propose to use an activation technique based on traffic signals and bus detection. If a bus is detected at a distance L from the intersection, the downstream roadway is reduced for the next signal cycle and until the bus passes the intersection. Notice that we only focus on liberal strategy where the restriction is applied in front of the bus (Eichler & Daganzo 2006).

2.1. Description of BLIPs sites

Thus, we consider the 2-lane and 3-lane unidirectional roads, a sketch see Fig 1a. A BLIPs system operates downstream of the traffic signal located at $x = 0$. In this section ($x > 0$), the right lane is dedicated to the bus.

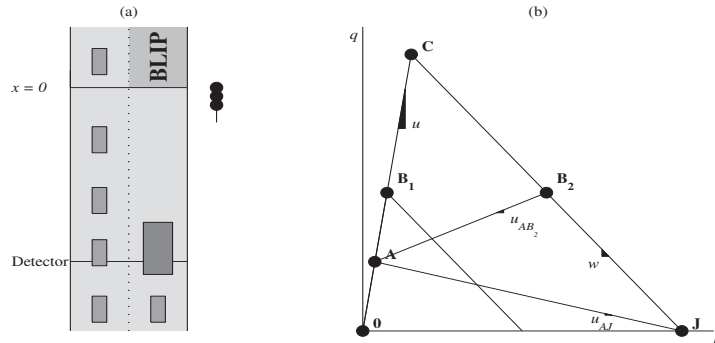


Fig. 1. (a) sketch of the first site; (b) fundamental diagram

Since we only focus on BLIPs activation, no bus stops are considered on the site. Consequently, buses are supposed to run at the same speed as the others vehicles. Activation of BLIPs strategies yields to disturbances in traffic stream, albeit bus cannot be considered as moving bottleneck that reduces locally the capacity (Leclercq 2007). Indeed, the merge behavior upstream of the traffic signal and the bounded acceleration of vehicles reduce the capacity and create delay, but not as much as a DBL. It is thus appealing to study and quantify the effects of the activation. To this end, we resort to the extended KW theories with bounded acceleration.

With that these strategies focus on buses, but can be easily extended to other type of vehicles, i.e. taxis, urgency vehicles, ambulances, trucks, etc.

2.2. Modeling of dynamic control strategies

The traffic is supposed to obey to a triangular fundamental diagram (FD) (Chiabaut & Leclercq 2011) that only depends on three observable parameters: free-flow speed u (km/h), wave speed w (km/h) and jam density κ (veh/km) (see Fig 1b). Capacity C (veh/h) and optimum density k_c (veh/km) can be easily derived: $C = u w \kappa / (u + w)$ and $k_c = C / u$. As proposed in Eichler & Daganzo (2006), it is convenient to define the FD of the reduced roadway when BLIPs strategy is active (see Fig 1b).

The macroscopic variables are defined as follows. For any equilibrium traffic state A (point on the FD), the flow and the density are respectively denoted q_A (veh/h) and k_A (veh/km). Fig 1b also displays the equilibrium state that turns out to be of interest throughout the paper. Thus, state O is the empty roadway, state C is the full roadway capacity and state J is the full roadway jam density, state A is the generic uncongested demand, state B_1 corresponds to the capacity of the reduced roadway and state B_2 the congested conditions with the same flow as state B_1 on the full roadway.

Of particular interest is the time-space diagram during BLIPs activation. Thereby, The KW model describes traffic dynamics for the theoretical site, given the parameters of the FD and additional parameters such as the cycle length c , the red phase r , the shock wave speed u_{AB2} between equilibrium state A and B_2 , the shock wave speed u_{AJ} between equilibrium state A and J , and the shock wave speed w between equilibrium state J and B_2 (see Fig 1b).

Moreover, the KW theory is extended to account for bounded acceleration of queuing vehicles (Leclercq 2007). Vehicles are supposed to accelerate at a constant acceleration rate a (km/h^2). This rate is assumed identical for all vehicles. Consequently, the first vehicle at the stop line constrained the upstream flow until it reaches free-flow speed u . There are two main travel situations for the bus. One case, the queue caused by traffic signal red phase discharges in one cycle (see Fig 2). Bus arrives at first signal intersection at an arbitrary time after the discharge of queue. The signal upstream is in congested state B_2 during the discharge of the queue, and state B_1 for downstream. The upstream and downstream traffic flows are in the same state A after the discharge of the queue. In this case, the bus runs with the fastest travel time: the free-flow travel time, i.e. L/u . If the bus arrives at first traffic signal before the discharge of queue, the hypothetical flow pattern changes to be more complex and to be in several different subcases. The bus travel time in this section should be greater. Another case, if the queue discharges during more than one cycle. The illustration of traffic flow is more complex than the previous cases and there are also various subcases.

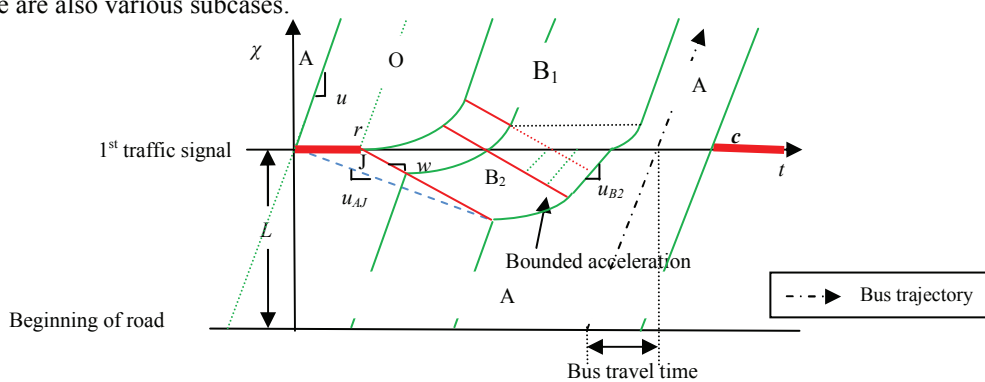


Fig. 2. Time-space diagram of BLIPs activation with bounded acceleration

Observed flow and bus travel time can be easily calculated by using the variational theory. The analytical formulae are presented in details in Chiabaut et al. (2012) and the extended LWR model with bounded acceleration of inserting vehicles can also be calculated analytically by using the presented capacity drop formulae. However, these analytical formulae strongly depend on the modeling assumptions and there are so many theoretical cases for a LWR model. Furthermore, the capacity drop model here cannot take into account all phenomena linked to lane-changing maneuvers, especially the relaxation process (Laval & Leclercq 2008). Because there is no easy way to analytically account for relaxation. Hence, to overcome these issues and to refine the model, we resort to a simulation approach.

3. Simulation study

In this section, the refined BLIPs activation model is investigated in the sensitivity analysis. This analysis will focus on acceleration, relaxation coefficient and insertion length upstream of the BLIPs system. Note that these last parameters are not considered in the analytical approach.

3.1. Simulation tool

Simulations are performed with a dynamic microscopic traffic flow model. The model used is SymuVia¹, which is based upon a Lagrangian resolution of the LWR model (Newell 2002; Leclercq 2007). Consequently, it reproduces individual trajectory of vehicles. Moreover, the model has been refined to take into account bounded acceleration, lane-changing and relaxation after lane-changing. Thus, capacity drop generated by the merging behavior upstream of the lane reduction is accurately reproduced by the model (Leclercq et al. 2011).

The simulation tool is considered with the same triangular FD as for the analytical approach. The capacity of the lane can easily be derived as previously mentioned. The lane-changing model requires two extra parameters: the relaxation coefficient that is the difference in speed experienced by a lane-changer to attain a safe gap with its leader and the time to execute a lane-changing maneuver.

3.2. Description of simulation sites

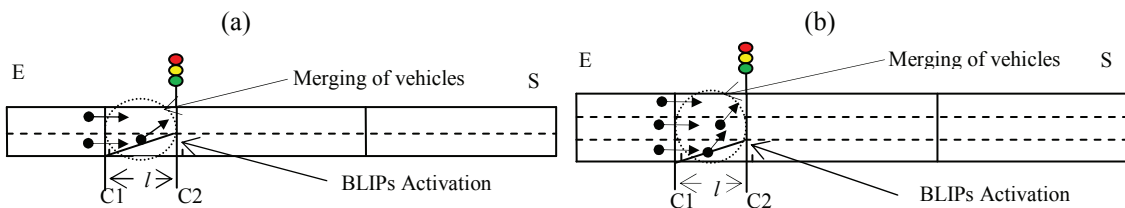


Fig. 3. Simulation sites (a) case (i); (b) case ii

Two simple cases are simulated: 2-lane (case (i)) and 3-lane (case (ii)) unidirectional roads (see Fig 3). These scenarios are similar to these considered in the analytical approach. C1 and C2 are the sensors which can detect the vehicles' cumulative numbers and passing times at each location. E is the entrance, and S is the exit. l is the insertion length upstream of the BLIP system. The arrows are the vehicles travel directions. The road and traffic parameters are defined in Table 1.

Table 1. (a) Road parameters; (b) Traffic parameters

Road parameters	Value (unit)	Traffic parameters	Value (unit)
Length of section (L)	300 (m)	Free flow speed, (u)	15 (m/s)
Signal cycle (c)	80 (s)	Wave speed, (w)	3 (m/s)
Red phase (r)	20 (s)	Capacity per lane, (C_i)	2200./3600 (veh/s)
Offset (δ)	0 (s)	Jam density per lane, (κ_i)	0.244 (veh/m)
Length of reduced lane (l)	100 (m)		

Investigations of bus transit (Nakanishi 1997) show that the most important indicators are the average of observed flow ($QmOb$), the average of maximum flow between 2 passages of bus ($Cmoy$), and the average of bus and vehicle travel times (TT). Note that observed flows and travel times depend on the bus detection time. For ease of understanding, detection times are supposed to be uniformly distributed.

¹ SymuVia: http://www.entpe.fr/fr/internet/contenu/departements/transports/laboratoire_licit/plateformes_de_simulation/plateforme_symubruit_symuvia/symuvia

The entering flow is assumed equally to be distributed on each lane. Moreover, for each tested case, we define the reference scenarios: case (i^{*}) for case (i) and case (ii^{*}) for case (ii). For these scenarios, the parameter values are: $\varepsilon = 0.55$ s (relaxation coefficient); $a = 1.5$ m/s² (acceleration rate); $l = 100$ m (insertion length upstream of the BLIP system); $\tau = 4$ s (time to execute a lane-change maneuver); $H = 1$ cycle (bus frequency). Notice that the frequency refers here to the time between two successive buses. The upstream demand (q_A) is equal to 3300 veh/h for case (i^{*}) and 5000 veh/h for case (ii^{*}).

Due to the randomness of the lane-changing model in SymuVia, it is necessary to study the impact of simulation replication to define the number of replications to perform. It appears that number is equal to 8 for case (i^{*}) and 10 for case (ii^{*}).

3.3. Comparison of the analytical and simulated results

First of all, validity of the outputs provided by the simulation tool has to be verified. To this end, the results of the LWR model with bounded acceleration of queuing vehicles are compared to the simulated ones. Notice that, the relaxation parameter is now fixed and equal to 12 s to be consisted between the both approaches. Because the bigger ε is, the less relaxation impacts traffic stream.

We compare here the evolutions of the average of observed flow with respect to the demand level ($QmOb$ vs q_A). Fig 4a depicts the results of case (i) and Fig 4b of case (ii). It appears that when the demand q_A is much smaller than the capacity of the reduced situation ($q_A < 2000$ veh/h for case (i) and $q_A < 2200$ veh/h for case (ii)), simulated results perfectly match analytical curves. Nevertheless, when demands reach or exceed the reduced capacities, simulated results are always smaller than analytical ones. This is not surprising because the simulation tool reproduces phenomena that are not taking into account by the analytical model and that reduce capacity for high values of demand. Finally, it turns out that tendencies of both approaches are consistent. Thus, one can safely conclude that simulated results are in agreement with analytical ones.

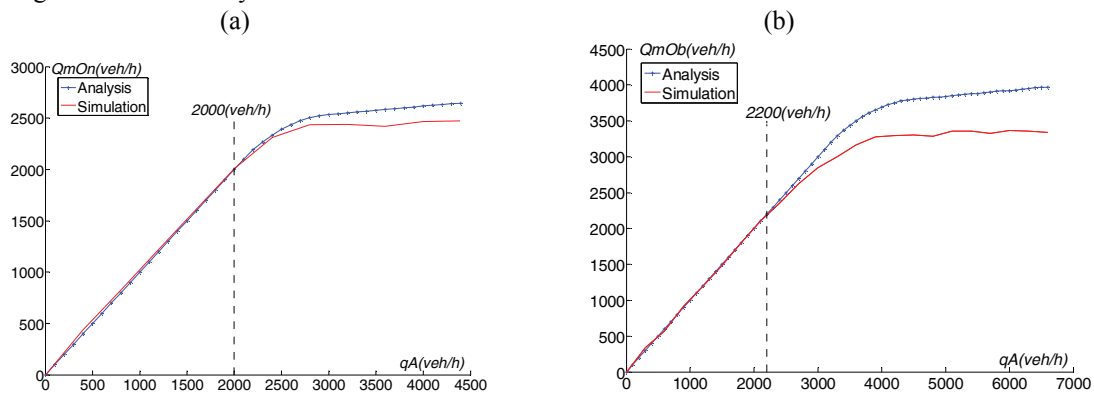


Fig. 4. Comparisons of the average observed flow between analysis and simulation: (a) case (i); (b) case (ii).

3.4. Sensitivity analysis

This section aims to identify the parameters that have the main influences on traffic flow. Each parameter is separately tested for a typical range of values. Then, the evolutions of the selected traffic indicators with regards to the parameter are investigated for three demand levels: 2500, 3300, and 4000 veh/h for case (i); 4000, 5000, and 6000 veh/h for case (ii). Results are presented in details in the following and compared to the reference scenarios case (i^{*}) and case (ii^{*}) that are denoted by dots.

Firstly, the sensitivity study is focused on the acceleration rate. It shows that when a increases, the average of observed flow increases (see Fig 5a). It is not surprising because inserting vehicles need less time to reach the target lane speed for high value of acceleration. Moreover, $QmOb$ increases faster when $a < 1.5$. Indeed, the growth rate of $QmOb$ decreases from 10% ($a > 1.5$) to 2% ($a < 1.5$). Consequently, $QmOb$ is more sensitive to a few low values of this parameter. Besides, since demand rises for a fixed acceleration in one scenario, $QmOb$ increases with demand. $QmOb$ goes up more at point $a = 3$ than at point $a = 0.75$ with the same growth rate of demand. Lastly, the growth rate of $QmOb$ along with the same growth rate of demand in case (i) is much bigger than that in case (ii) at the same acceleration point.

Fig 5b presents the evolution of $Cmoy$ with respect to the bus frequency H . Note that $Cmoy$ converges toward a constant when the bus frequency increases. This sounds consistent with physical observation because BLIPs is not often activated. Secondly, $Cmoy$ increases faster when $a < 1.5$ for a given demand. This is consistent with the previous observation (see Fig 5a). Moreover, $Cmoy$ even rises at most 85% along with demand growth rate with the same H and a values. Eventually, when H and a value are fixed, the growth rate of $Cmoy$ along with demand growth rate is the same for both cases: at most 85%.

In Fig 5c, bus or vehicle travel time decreases faster when $a < 1.5$ for a given demand. It totally falls off about 10s in the range of a . Moreover, when the demand increases at fixed value of acceleration in one case, the TT rises along with demand growth. When demand is higher, the difference of bus TT (or vehicle TT) between two demands is reduced. Bus TT is bigger than vehicle TT for the same demand and acceleration values. Finally, for a given demand, the difference between bus TT and vehicle TT almost remains constant in the range of a : about 15s for case (i) and about 10s for case (ii).

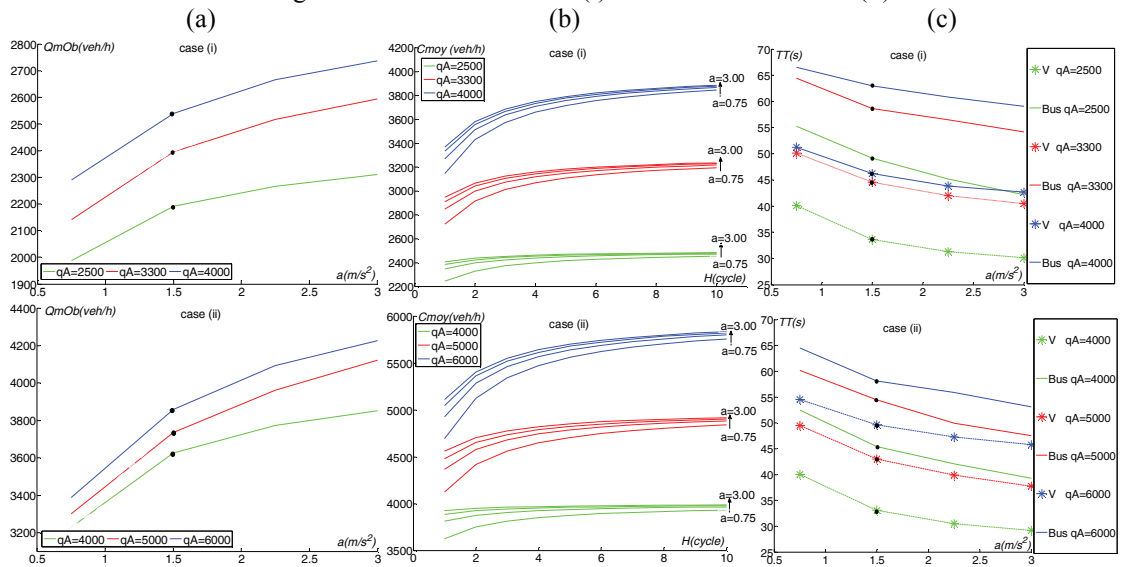


Fig. 5. Sensitivity to a : (a) sensitivity of $QmOb$; (b) sensitivity of $Cmoy$; (c) sensitivity of TT .

We focus now on the relaxation parameter ϵ . Fig 6a points out that $QmOb$ decreases when ϵ increases. This is not surprising. If ϵ is small, vehicles accept shortest gap to follow their leader. Consequently, the observed flow increases. Moreover, $QmOb$ decreases faster for low values of ϵ ($\epsilon < 0.55$). Then, for a given ϵ , $QmOb$ increases with the demand for both cases. Finally, the growth rate of $QmOb$ along with demand growth rate in case (i) is bigger than that in case (ii) at the same ϵ point.

As previously observed, $Cmoy$ is constant for high values of H (see Fig 6b). Notice that this value does not depend on the relaxation parameters but only on the demand. Moreover, bus or vehicle travel time

increases faster when $\varepsilon < 0.55$ for a given demand (see Fig 6c). Variation is about 5s in the range of ε for both cases.

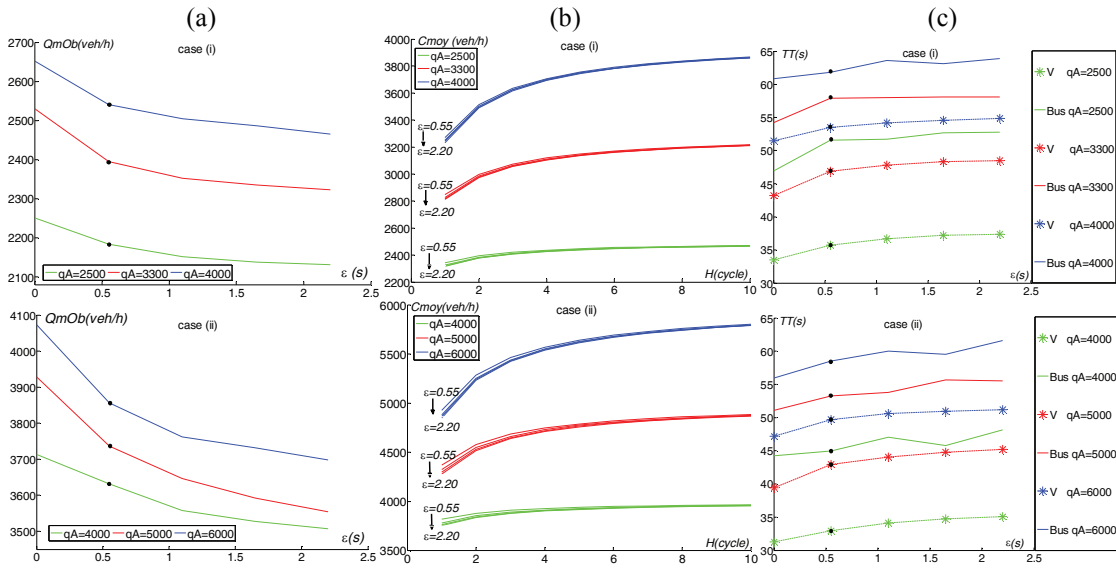


Fig. 6. Sensitivity to ε : (a) sensitivity of $QmOb$; (b) sensitivity of $Cmoy$; (c) sensitivity of TT .

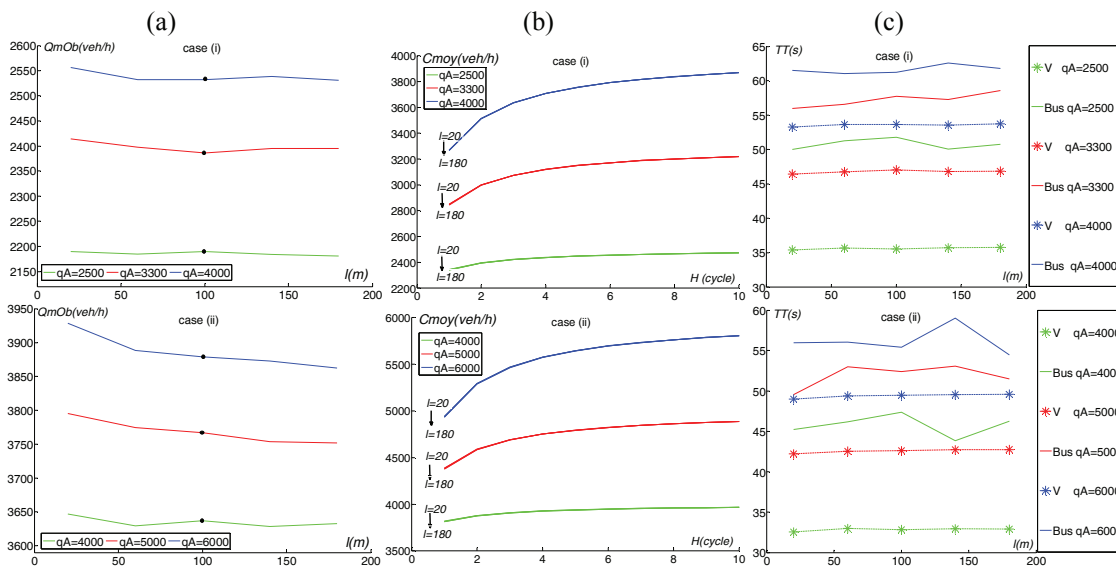


Fig. 7. Sensitivity to l : (a) sensitivity of $QmOb$; (b) sensitivity of $Cmoy$; (c) sensitivity of TT .

Fig 7 highlights the sensitivity of indicators to the insertion length upstream of the BLIP system. It turns out that $QmOb$ slightly decreases when l increases from 20 to 180 m (see Fig 7a). It is worth noticing that most of the drop of $QmOb$ occurs before l reaches 100 m. Moreover, $Cmoy$ reaches a constant value in the range of H . l has almost no impact on $Cmoy$. Fig 7c points out that bus TT is greater

than vehicle TT . Both TT s almost keep constants in the range of l . It appears that TT does not depend on l .

Finally, Table 2 quantifies the sensitivity of the indicators to the various parameters. The two scenarios lead to similar evolutions but different change rates. That is possibly caused by the lane-changing from the middle lane to the left lane. It turns out that the acceleration rate and the relaxation coefficient have the main influences on the outputs. The bus frequency has an important impact on $Cmoy$. This shows that BLIPs is more efficient with a greater bus frequency. The insertion length upstream of the BLIP system seems to have a weak influence on $QmOb$ and have almost no influence both on $Cmoy$ and bus and vehicle TT . The remaining parameters have few impacts during BLIPs activation.

Table 2. Sensitivities of indicators on parameters

Indicators		Step	QmOb	TT	Cmoy
Parameters					
Acceleration (a)		0.75 m/s^2	+++++	+++++	+
Relaxation coefficient (ε)	Low values	0.55 s	++	+++	+
	Large values	3 s	+++	+++	+
Insertion length upstream of the BLIP system (l)		40 m	+	0	0
Max change lane time duration (τ)		1 s	0	0	feeble
Pi drawdown (π_d)		0.1	0	0	0
Bus frequency (H)		1 cycle			++++

4. Discussion

In this paper, BLIPs activation are refined and performed in simulation. Simulated results show a fairly good agreement with analytical results provided by the extended KW theory with bounded acceleration. Parameters that have the main influence on the BLIPs activation model outputs are identified through sensitivity analysis. In addition, bus TT is always greater than vehicle TT in the activation situations. Both TT s augment with the demands' increases. Since BLIPs creates queues upstream of the first signal intersection and reduces road capacities, $QmOb$ and $Cmoy$ are always smaller than q_A in higher demands.

The previous results show that such strategies seem to be counter-productive at the first glance: BLIPs activation triggers a capacity drop at the first signal and increases the bus travel time. However, the capacity reduction of BLIPs activation is not as much as DBLs, and if BLIPs associated with TSP reduces both bus travel time and its variability (Chiabaut et al. 2012). Therefore, BLIPs strategies appear to be competitive solutions to improve transit bus system.

However, there are also limitations for these simulations. In practice, roads are heterogeneous with more complex intersection. However, this is still a convenient method to verify the analytical model, and it gives first insights to test for an experimentation of BLIPs activation. To go further, BLIPs methods have to be studied at a larger scale to determine the global benefits of BLIPs. This is being investigated by the authors. First results for urban corridor composed of street with several traffic signals are coming.

Acknowledgements

The authors would greatly thank Cécile Becarie for her daily assistance. This research was partly founded by the "Région Rhône-Alpes".

References

- Balke, K. et al. (2000). Development and evaluation of intelligent bus priority concept. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1727, No. -1, 12–19, 2000.
- Chiabaut, N. et al. (2012) Road capacity and travel times with bus lanes with intermittent priority activation: analytical investigations, *paper accepted for presentation to the 91th meeting of the Transportation Research Board*, 2012.
- Chiabaut, N. & Leclercq, L. (2011). Wave Velocity Estimation through Cumulative Vehicle Count Curves Automatic Analysis. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. to be published, 2011.
- Duerr, P. (2000). Dynamic Right-of-Way for Transit Vehicles: Integrated Modeling Approach for Optimizing Signal Control on Mixed Traffic Arterials. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1731, 31–39, 2000.
- Eichler, M. & Daganzo, C., F. (2006). Bus lanes with intermittent priority: Strategy formulae and an evaluation. *Transportation Research Part B, Methodological*, Vol. 40, No. 9, 731–744, 2006.
- Furth, P. & T. Muller, H. (2000). Conditional Bus Priority at Signalized Intersections: Better Service with Less Traffic Disruption. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1731, 23–30, 2000.
- Janos, M. & Furth, P. (2002). Bus Priority with Highly Interruptible Traffic Signal Control: Simulation of San Juan's Avenida Ponce de Leon. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1811, 157–165, 2002.
- Laval, J. & Leclercq, L. (2008). Microscopic modeling of the relaxation phenomenon using a macroscopic lane-changing model. *Transportation Research Part B*, 42(6), 511-522, 2008.
- Leclercq, L. (2007). Bounded acceleration close to fixed and moving bottlenecks, *Transportation Research Part B*, 41, 309-319, 2007.
- Leclercq, L. et al. (2007). The Lagrangian coordinates and what it means for first order traffic flow models. *Proceedings of the 17th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, Ed.: Allsop, R.E., Bell, M.G.H., Heydecker, B.G., Elsevier, London, 735-753, 2007.
- Leclercq, L. et al. (2011). Capacity Drops at Merges: an endogenous model, *Transportation Research Part B*, in press, 2011.
- Lin, W.-H. (2002). Quantifying Delay Reduction to Buses with Signal Priority Treatment in Mixed Mode Operation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1811, 100–106, 2002.
- Nakanishi, Y. (1997). PART 1: Bus: Bus Performance Indicators: On-Time Performance and Service Regularity. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1571, No. -1, 1–13, 1997.
- Newell, G.F. (2002). A simplified car-following theory: a low-order model. *Transportation Research Part B*, Vol.36, 195-205, 2002.
- Skabardonis, A. (2000). Control Strategies for Transit Priority. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1727, No. -1, 20–26, 2000.
- Viegas, J. & Lu, B. (1996). Turn of the century, survival of the compact city, revival of public transport. *In Transforming the Port and Transportation Business* (H. Meersman and E. Van de Voorde, eds.), Uitgeverij Acco, Antwerp, Belgium, 55–63, 1996.
- Viegas, J. & Lu, B. (2004). The Intermittent Bus Lane signals setting within an area. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 12, No. 6, 453 – 469, 2004.

FOLIO ADMINISTRATIF

THESE SOUTENUE DEVANT L'ECOLE NATIONALE DES TRAVAUX PUBLICS DE L'ETAT

NOM : XIE Prénoms : Xiaoyan	DATE de SOUTENANCE : 29 octobre 2013
TITRE : Étude et Modélisation des Couloirs de Bus Dynamiques	
NATURE : Doctorat xxxx École doctorale : Mécanique, Énergétique, Génie civil et Acoustique (MEGA)	Numéro d'ordre : 2013-ENTP-
Spécialité : Génie Civil	
Code B.I.U. – Lyon : T xx/xxx/xx / et bis CLASSE :	
RESUME : <p>En milieu urbain, le trafic routier a un impact considérable sur la qualité des systèmes de transports, et en particulier, sur les transports collectifs de surface. Ainsi, les bus sont directement ralentis par les files d'attente et les congestions. Ils sont donc considérés comme moins ponctuels que les autres modes de transports. La conséquence directe est de renforcer la compétitivité du véhicule particulier par rapport aux transports en commun (TC). Même si les couloirs de bus ou les sites propres permettent de limiter les effets de la circulation, il en résulte potentiellement une utilisation inefficace de l'espace urbain pour les autres véhicules. Il est donc nécessaire d'avoir recours à des techniques innovantes de gestion du trafic pour améliorer la qualité du réseau TC.</p> <p>Dans cette perspective, la thèse étudie le concept de couloirs de bus dynamiques. Cette stratégie de gestion dynamique de la voirie consiste à réserver, lorsqu'un bus est effectivement présent, une voie à ce dernier. Un couloir de bus temporaire est alors créé et la compétitivité des bus vis-à-vis des autres véhicules se voit renforcée. Après un état de l'art des solutions de gestion dynamique de la voirie, ce nouveau dispositif est étudié et modélisé.</p> <p>Tout d'abord, la phase de déclenchement du système de couloirs de bus dynamiques est abordée. Il s'agit de déterminer analytiquement les effets sur la performance d'un boulevard urbain théorique. Il s'avère que même si la phase de déclenchement est, dans un premier temps contreproductif (baisse de la capacité et augmentation des temps de parcours des véhicules), ce coût est rapidement comblé par les bénéfices obtenus en aval de la zone de déclenchement lorsque le bus peut éviter les files d'attentes aux prochains feux de circulation. Cette étude analytique est ensuite renforcée par l'utilisation de la micro-simulation du trafic, qui donne accès à une représentation plus détaillée des phénomènes physiques.</p> <p>Dans un second temps, un modèle agrégé et simple du fonctionnement d'un boulevard urbain multimodal est proposé. En s'appuyant sur les travaux existants concernant le diagramme fondamental macroscopique, ce modèle permet de comparer différents aménagements (un couloir de bus dynamique et un couloir de bus permanents) avec la situation où rien n'est fait pour les bus. Les résultats obtenus permettent de déterminer les différents domaines d'application de ces aménagements en fonction des conditions de trafic.</p>	
MOTS CLES : trafic routier, bus, modélisation, dynamique, macroscopique, transport en commun	
Laboratoire(s) de recherches : Laboratoire d'Ingénierie Circulation Transports (LICIT), unité mixte ENTPE / IFSTTAR	
Directeur de thèse : Ludovic Leclercq et Nicolas Chiabaut	
Président du jury : xxxx xxxxx Composition du jury : Cécile Appert-Rolland (R), Jorge Laval (R), Samuel Sellam, Aurélien Duret, Ludovic Leclercq, Nicolas Chiabaut	