



Programme 190 – 0190 – THUR –BASF
Action 13 sous-action 04
11-MT-PREDITG02-2-CVS-050
Convention n° CHORUS 2100527197

ADViCe : Allocation Dynamique des Voies de Circulation

Dossier porté par l'
**Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement
et des Réseaux (IFSTTAR) –**

*Laboratoire Ingénierie Circulation Transport (LICIT), unité mixte avec l'Ecole
Nationale des Travaux Publics de l'Etat (ENTPE)*

Laboratoire Ergonomie et Sciences Cognitives pour les Transports (LESCOT)

En partenariat avec :

Volvo IT –

Département Innovation

Commissariat à l'Energie Atomique –

Leti

Ecole Centrale de Lyon –

Laboratoire d'InfoRmatique en Image et Systèmes d'information (LIRIS)

EGIS Mobilité –

Coordinateur scientifique :

Nicolas Chiabaut (IFSTTAR-ENTPE/LICIT), 04 72 04 77 58, nicolas.chiabaut@entpe.fr



Evaluation théorique de l'allocation dynamique des voies par la simulation

Livrable finale de la tâche 3

Rédacteur :

Nicolas Chiabaut (IFSTTAR / ENTPE - LICIT)

Ayant participé aux travaux :

Nicolas Chiabaut, Ludovic Leclercq, Xiaoyan Xie (IFSTTAR / ENTPE - LICIT)

Introduction	4
Chapitre I Étude du déclenchement des couloirs de bus dynamiques	5
<i>I.1 Introduction</i>	5
<i>I.2 Étude analytique</i>	7
I.2.1 Diagramme espace-temps.....	8
I.2.2 Modélisation de la chute de capacité.....	12
I.2.3 Évaluation de l'impact du déclenchement.....	13
<i>I.3 Étude en simulation</i>	15
I.3.1 Simulation microscopique du trafic.....	16
I.3.2 Comparaison avec les résultats analytiques.....	16
I.3.3 Analyse de sensibilité locale.....	17
<i>I.4 Analyse de sensibilité globale</i>	20
<i>Conclusion</i>	23
Chapitre II	24
Evaluation macroscopique d'un boulevard multimodal urbain	24
<i>II.1 Introduction</i>	24
<i>II.2 Un modèle agrégé et simple d'un corridor urbain</i>	25
<i>II.3 Outils méthodologiques</i>	27
II.3.1 Théorie du MB.....	27
II.3.2 Liens entre MB et couloirs de bus dynamiques.....	29

II.3.3	MFD	32
II.4	Deux nouvelles méthodes	33
II.4.1	Méthode M1	34
II.4.2	Méthode M2	37
II.4.3	Synthèse	40
II.5	Principaux résultats	41
II.5.1	Comparaison des méthodes	41
II.5.2	Comparaison d'aménagements	47
II.6	Conclusion	55
Chapitre III	Simulation d'un cas réaliste	56
III.1	Mise en œuvre de la simulation	56
III.1.1	Réseau théorique	56
III.1.2	Outil de simulation et méthode d'estimation	57
III.1.3	Validation du modèle	58
III.2	Étude des respects des consignes	60
1.1.1	Prise en compte dans la simulation	61
1.2	Effets des respects des consignes	61
1.2.1	Analyse de sensibilité locale de diagrammes macroscopiques	61
1.2.2	Évaluations des vitesses moyennes	63
1.3	Conclusion	66
Conclusion		68
Bibliographie		70

Introduction

Ce livrable présente les différents travaux qui ont été menés dans la tâche 3 du projet ADViCe. L'objectif général de cette tâche est de construire un démonstrateur numérique des stratégies de couloirs de bus dynamiques. La structure diffère de celle annoncée dans le document projet. En effet, l'absence de données pour la validation du démonstrateur nous a poussé à travailler l'approche analytique plus en profondeur, les résultats obtenus servant alors de référence au démonstrateur. Le livrable s'articule autour de trois chapitres.

Le premier vise à étudier, de manière analytique et en simulation, la phase de déclenchement des couloirs de bus dynamiques. Cette phase est jugée comme cruciale car elle conditionne le fonctionnement du site équipé en aval. Les résultats montrent que, même si les couloirs de bus dynamiques sont dans un premier temps contre productif, des bénéfices peuvent être obtenus très rapidement, pourvu que le site équipé soit suffisamment long.

Le second chapitre a pour objectif l'évaluation d'un boulevard urbain multimodal. Un modèle simple et agrégé est proposé pour facilement analyser et comparer divers aménagements en faveur des bus. A l'aide d'un indicateur prenant en compte l'occupation en passagers des différents modes, un premier diagnostic peut être rendu concernant les domaines d'application optimaux des différentes stratégies envisagées. Une comparaison avec les résultats du démonstrateur est proposée.

Le troisième chapitre est consacré à une étude en simulation de cas réalistes. Le recours au démonstrateur numérique permet de s'affranchir d'un certain nombre d'hypothèse et de tester la sensibilité du fonctionnement du boulevard urbain à différents phénomènes physiques. En particulier, les effets du taux de respect des consignes par les usagers des véhicules particuliers sur la performance des couloirs de bus dynamiques.

Chapitre I

Étude du déclenchement des couloirs de bus dynamiques

I.1 Introduction

Cette première partie se consacre au déclenchement des couloirs 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 voie 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 des 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 d'un couloir de bus dynamique à l'aide de feux de circulation situés à l'entrée d'un boulevard urbain. Le principe est résumé par la Figure 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 gauche en amont du feu dès le prochain cycle. 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 dans la voie de droite, ne sont pas 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.

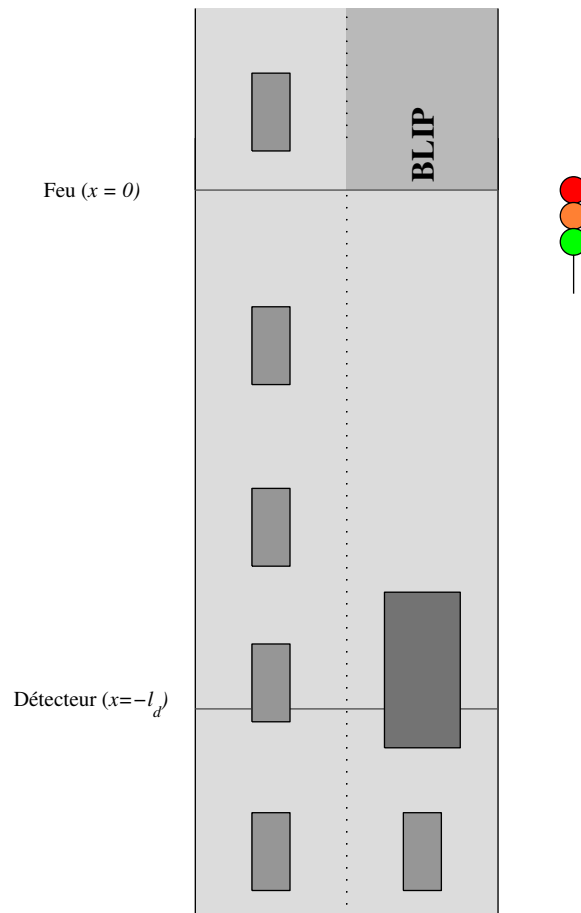


Figure 1 : Site théorique d'étude, déclenchement à l'aide d'un capteur et des feux de circulation

Par ailleurs, nous supposons qu'il n'existe pas d'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 réductions mobiles de capacité. 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 des 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 d'un couloir de bus dynamique peut mener à deux catégories de perturbations.

D'une part, la réduction de l'offre en aval génère une congestion pour des niveaux de 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 des couloirs de bus dynamiques.

La première partie de ce chapitre vise donc à évaluer analytiquement l'impact du déclenchement des 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 des couloirs de bus dynamiques. Une étude de sensibilité locale des différents paramètres de simulation sur les indicateurs de performance retenus est réalisée.

1.2 Étude analytique

Nous allons donc essayer d'évaluer analytiquement les perturbations générées par le déclenchement des 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 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. La capacité maximale d'une voie est donc donnée par q_C (veh/h) et la concentration critique par k_c (veh/km). Ces deux grandeurs sont facilement calculables à partir des trois précédentes : $q_C = uwk_x/(u+w)$ et $k_c = q_C/u$.

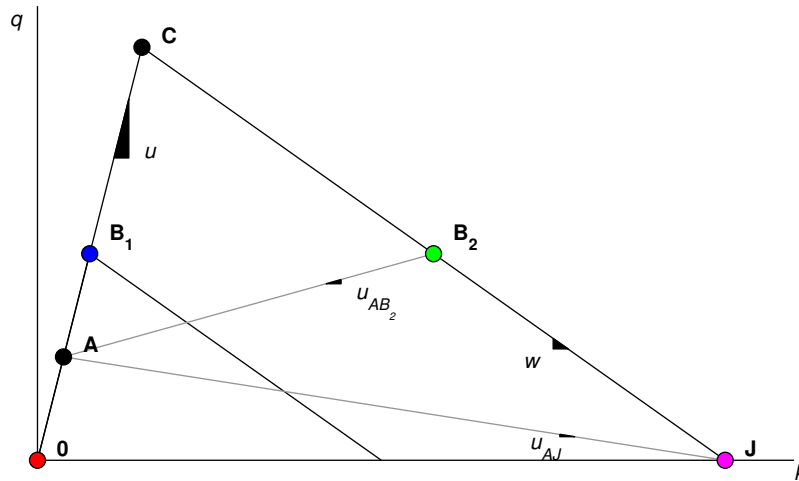


Figure 2 : Diagramme fondamental du site et principaux états d'équilibre

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 synthétise l'ensemble des états d'équilibre nécessaire 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 de deux voies) ; 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 .

1.2.1 Diagramme espace-temps

La Figure 3 présente le diagramme espace-temps dans le cas d'un feu avec des véhicules dont l'accélération est bornée. 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 : $u_{AJ} = (q_J - q_A) / (k_J - k_A)$. Lorsque le feu passe au vert, le premier véhicule

démarré 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 B_1 en aval du feu, i.e. deux voies de circulation, et l'état B_2 , en amont du feu, i.e. trois voies de circulation. Enfin, nous retrouvons l'état de demande A lorsque l'état B_2 s'est résorbé. La vitesse de l'onde de résorption u_{AB2} est donnée par le DF et la formule de Rankine-Hugoniot.

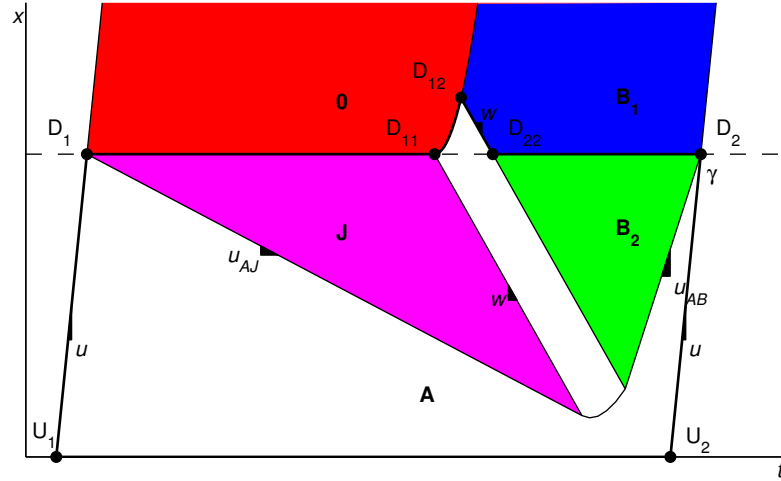


Figure 3 : Diagramme espace-temps analytique pour un cycle de feu

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 U_1-U_2 , situé à une distance L du feu, la variation de N doit être égale à la variation de N sur le chemin D_1-D_2 situé à $x=0$.

Sur le chemin U_1-U_2 , ΔN est égal à $q_A \gamma$, où γ est la date de disparition de la file d'attente.

Sur le chemin D_1-D_2 , la variation de N est un peu plus compliquée à calculer. Elle est la même que sur le chemin, $D_1-D_{11}-D_{12}-D_{22}-D_2$. De D_1 à D_{11} , la variation est nulle car le débit sortant est nul (feu rouge). De D_{11} à D_{12} , ΔN est aussi égal à 0 car aucun véhicule ne peut dépasser le premier. De D_{12} à D_{22} , ΔN est égal à wk_x selon (Leclercq et al., 2011). Enfin de D_{22} à D_2 , la variation de N est égal à $(\gamma-t_{22}) * q_B$ où t_{22} est égal à $t_{22} = u/a * (u/2w + 1) + r$.

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.

A partir de l'expression de γ et de la date de passage du bus au niveau du feu, nous pouvons déterminer sept cas d'étude différents. Les Figures 5, 6 et 7 proposent les diagrammes espace-temps associés aux différents cas. De la même manière, la capacité maximale peut donc être calculée en fonction de la demande et des arrivées des bus.

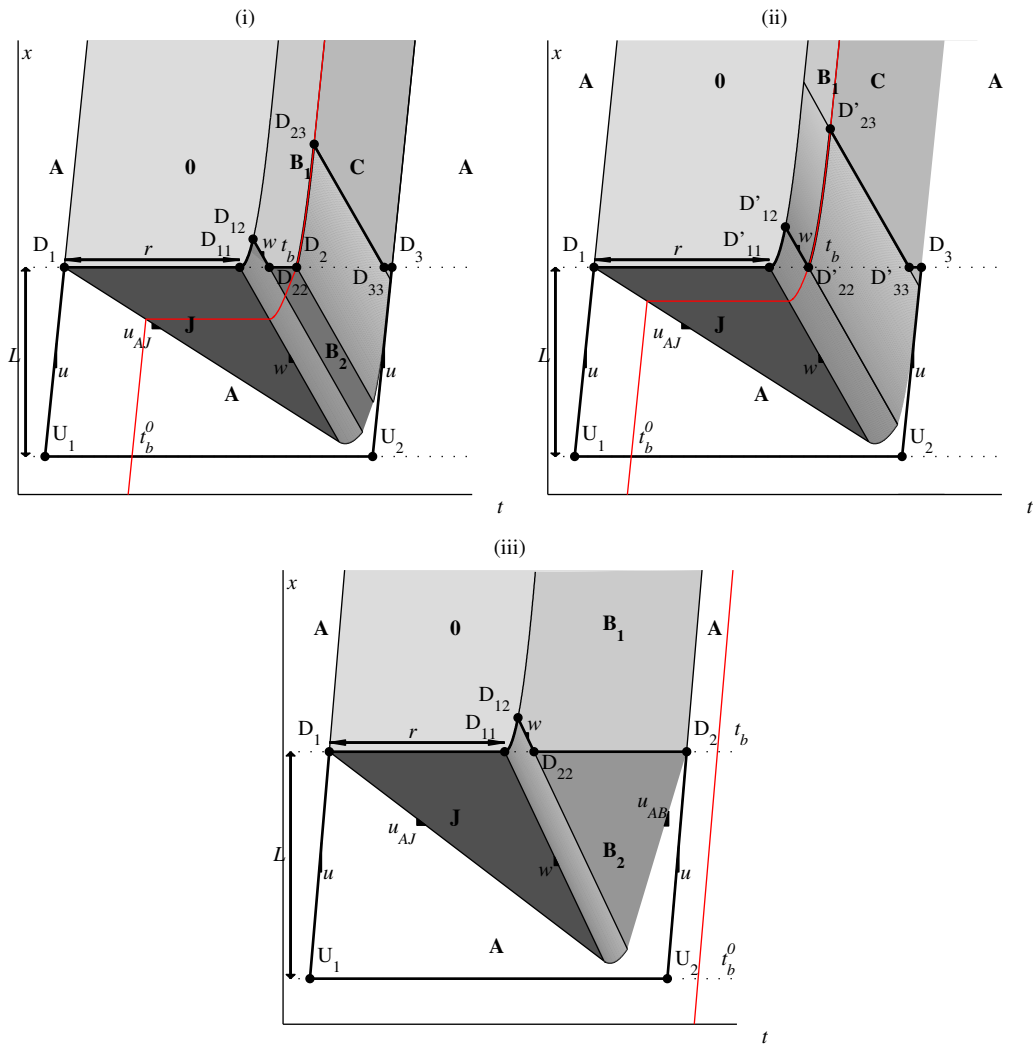


Figure 4 : Diagrammes espace-temps pour les cas (i), (ii) et (iii)

Les sept cas sont donc les suivant :

- 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 ;

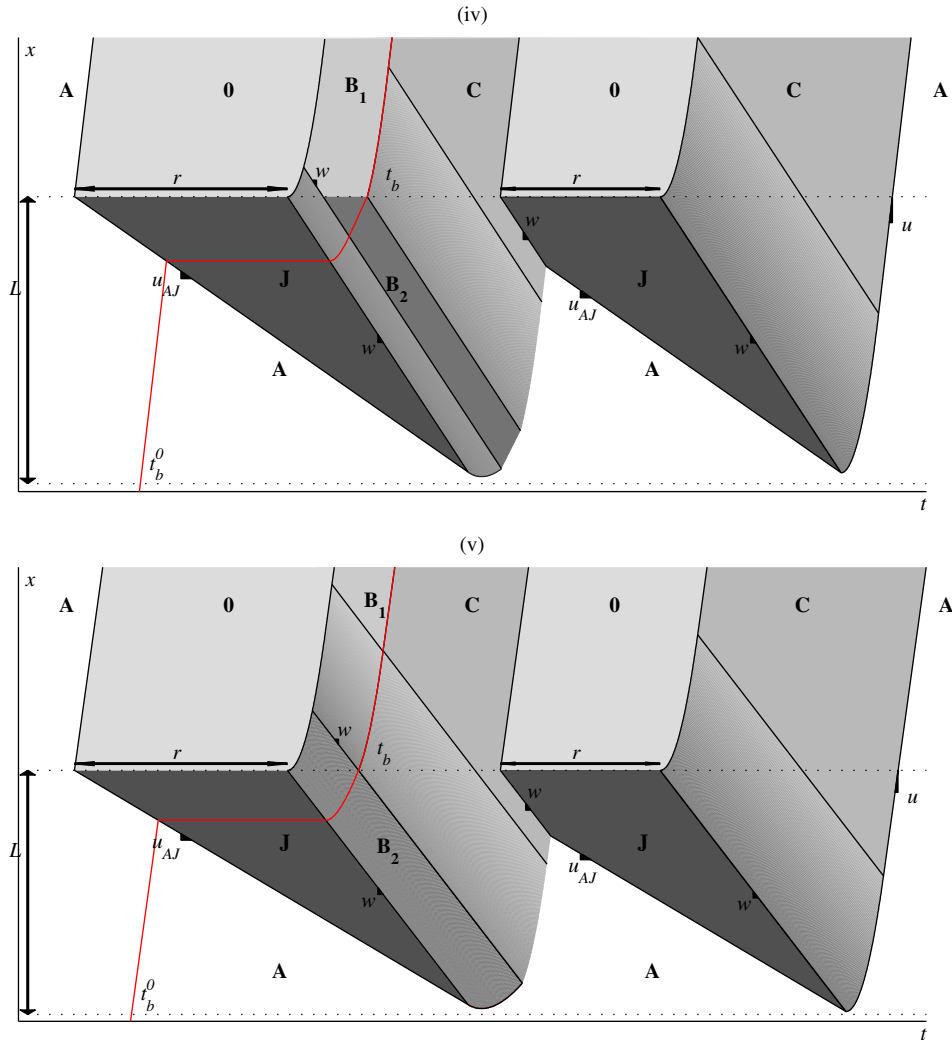


Figure 5 : Diagrammes espace-temps pour les cas (iv) et (v)

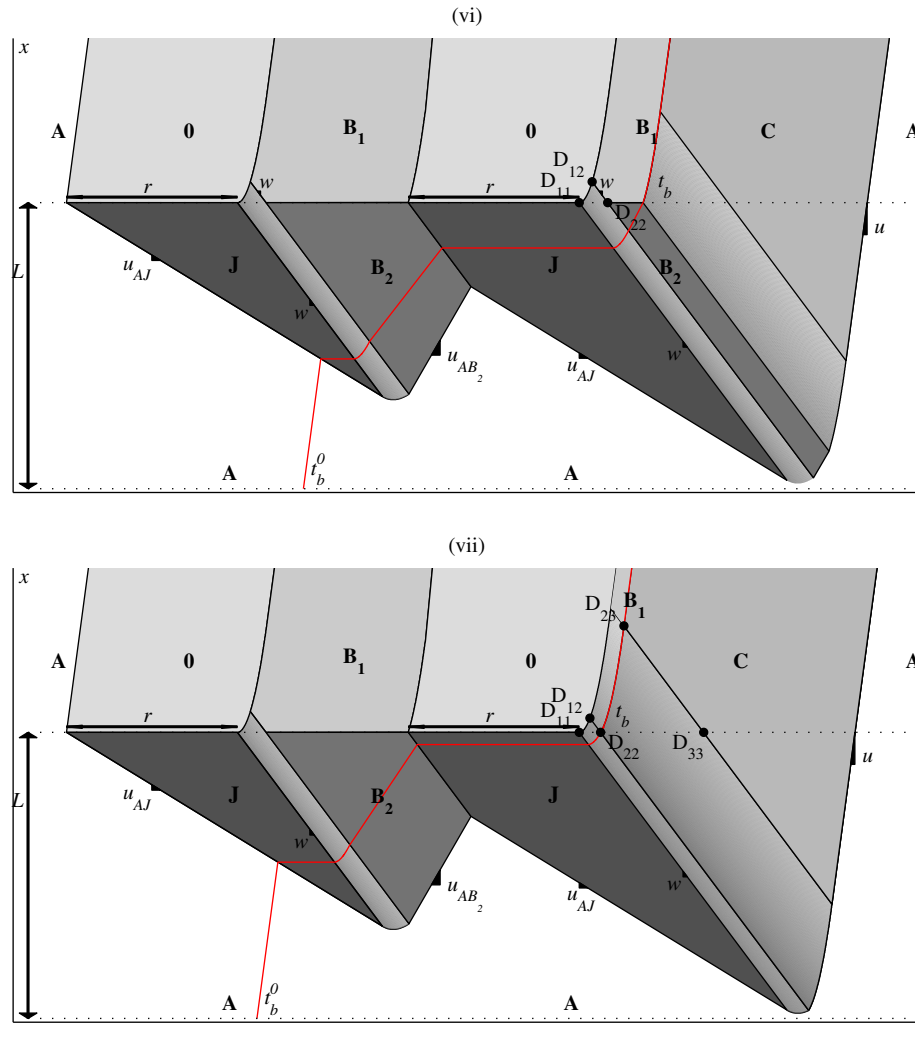


Figure 6 : Diagrammes espace-temps pour les cas (v) et (vi)

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 soit en situation fluide, soit en situation congestionnée. 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.

1.2.2 Modélisation de la chute de capacité

Dans un second temps, l'impact des insertions de véhicules devant changer de voies, 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 voies 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 : $d = 1 - Q/C$. 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 des 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.

1.2.3 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 à l'entrée du boulevard q_m et (ii) le temps de parcours moyen des bus entre le détecteur (situé à $x=-l_d$) et le feu τ . 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.

La Figure 7 représente l'évolution de τ en fonction de la demande. Sans surprise, nous remarquons que τ augmente avec q_a , le niveau de demande. Les différents choix de modélisation sont aussi proposés. Il est possible de remarquer que les temps de parcours du bus sont évidemment plus élevés lorsque la chute de capacité est prise en compte. De la même manière, il semble nécessaire de modéliser la dynamique de la congestion. Les courbes en trait plein 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.

L'évolution du débit observé en fonction de la demande est proposée sur la Figure 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.

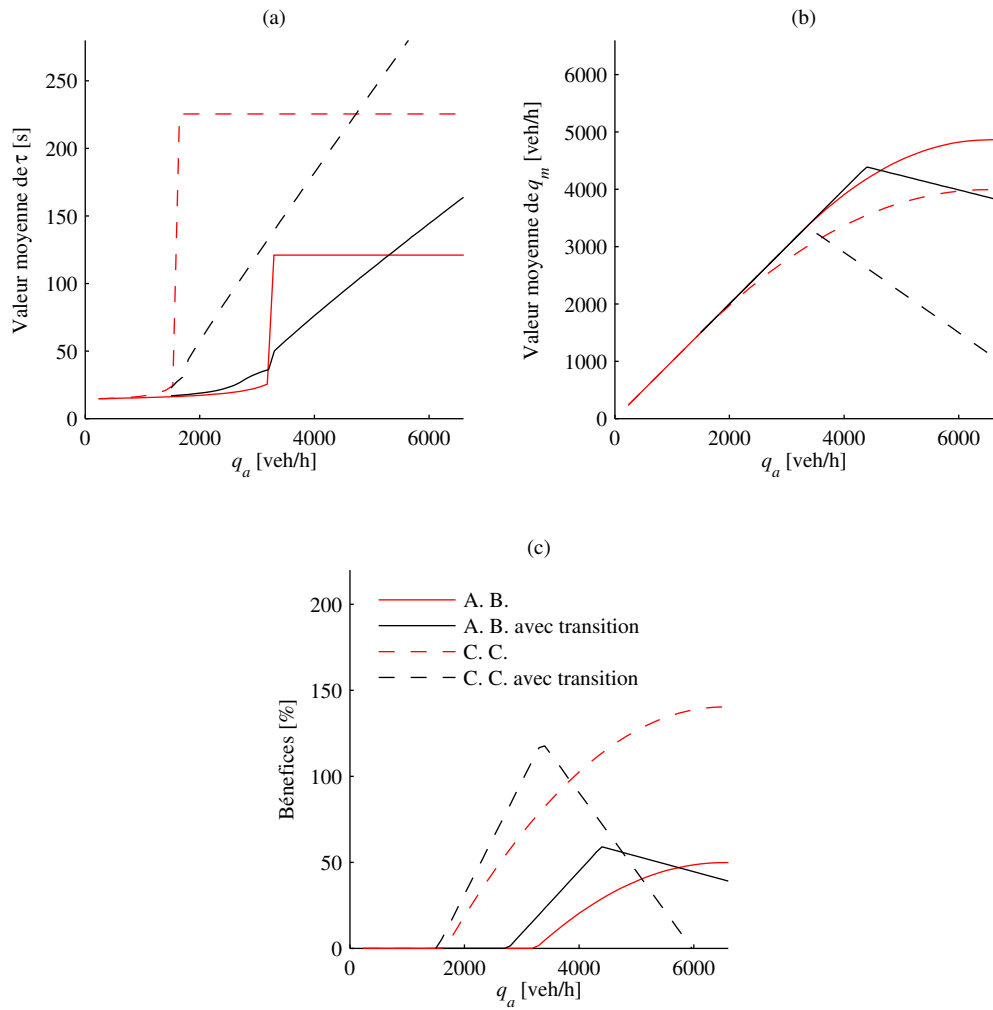


Figure 7 : (a) évolution des temps de parcours (b) analyse du débit observé et (c) bénéfice par rapport à une solution permanente

L'impact de l'activation 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. La Figure 8 illustre ce constat. 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.

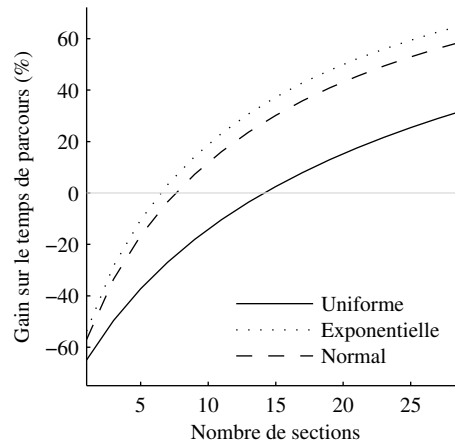


Figure 8 : Gain sur le temps de parcours du bus

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 long. Il est nécessaire d'approfondir ce point pour identifier clairement les sites potentiellement candidats.

I.3 Étude en simulation

Les résultats de l'étude analytique montre que le niveau de détails, dans la modélisation de l'écoulement du trafic, a un impact sur l'évaluation du déclenchement des 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, comme le respect des consignes par exemple. 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.

1.3.1 Simulation microscopique du trafic

L'étude en simulation est réalisée à l'aide de SymuVia, 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 al., 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 différencier les voies de circulation et donc le changement de voies (Laval et Daganzo, 2007 ; Laval et Leclercq, 2007). Concernant le changement de voie, le phénomène de relaxation, i.e. le fait d'accepter des espaces de changement de voies 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 maintenu par un véhicule changeant de voie pour retrouver un espacement de sécurité et le temps d'exécution d'un changement de voie λ . 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.

1.3.2 Comparaison avec les résultats analytiques

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 12s. En effet, plus ce paramètre est grand, plus la relaxation est rapide et plus le modèle retrouver un fonctionnement à l'équilibre.

Nous considérons donc l'évolution du débit moyen observé en fonction du niveau de demande (Q_{mob} vs q_A). La Figure 9 montre les résultats obtenus dans le cas d'un boulevard urbain à deux voies (cas i) et trois voies (cas ii). Il se trouve que lorsque la demande est bien plus faible que la capacité lors de l'activation 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 faible 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 conséquences directes de réduire la capacité. Cependant, la dynamique des deux approches est similaire. Cela permet donc de conclure que les résultats de simulations sont cohérents et pertinents avec les résultats de l'approche analytique.

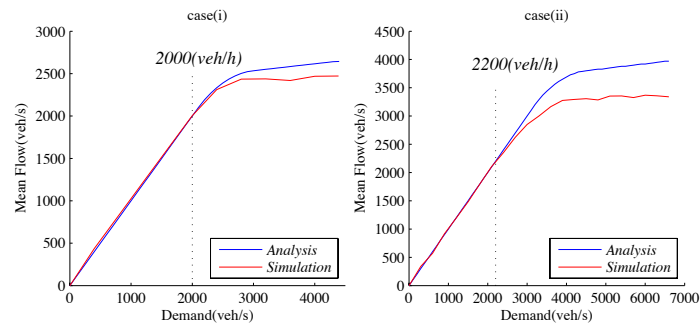


Figure 9 : Comparaison étude analytique et simulation

1.3.3 Analyse de sensibilité locale

Cette section s'intéresse désormais à l'étude de sensibilité des indicateurs d'évaluation aux différents paramètres de simulation. Une analyse complète et systématique est détaillée dans la dernière section de ce chapitre.

L'objectif est donc d'identifier les grandeurs les plus influentes sur le système. Chaque paramètre est testé successivement et séparément. Les indicateurs d'évaluation sont ensuite calculés pour trois niveaux de demande. Concernant les indicateurs, nous avons choisi le débit maximal observé Q_{mob} , le débit moyen C_{moy} et le temps de parcours moyen des véhicules TT .

Tout d'abord, l'étude de sensibilité est centrée sur l'influence de l'accélération des véhicules (Figure 10). Les premiers résultats montrent que plus les capacités d'accélération des véhicules sont élevées, plus le débit observé est fort. En effet, les véhicules s'insérant ont besoin de moins de temps pour atteindre la vitesse du flot de la voie. Concernant les temps de parcours des bus et des véhicules, ils sont évidemment réduits lorsque le paramètre d'accélération augmente. 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 forts niveaux de demande ont tendance à uniformiser les temps de parcours des bus et des véhicules.

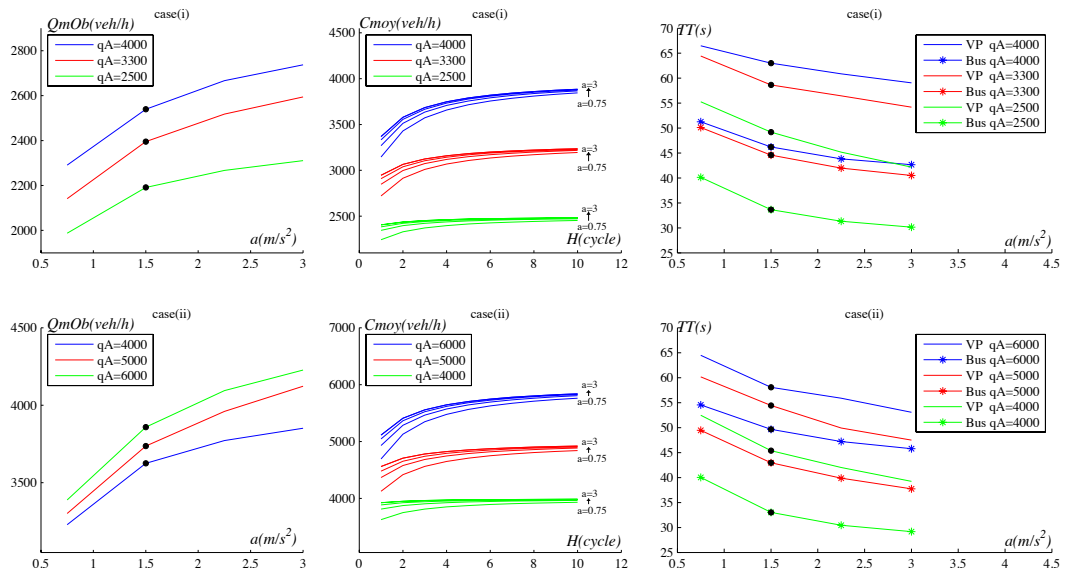


Figure 10 : Etude de sensibilité à l'accélération

Ensuite, l'impact de l'intervalle de temps entre le passage de deux bus successifs est analysé. 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 niveaux de demande élevée.

Nous nous concentrons maintenant sur le paramètre de relaxation ϵ . La Figure 11 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_{mOb} décroît plus rapidement pour de faibles valeurs de ϵ .

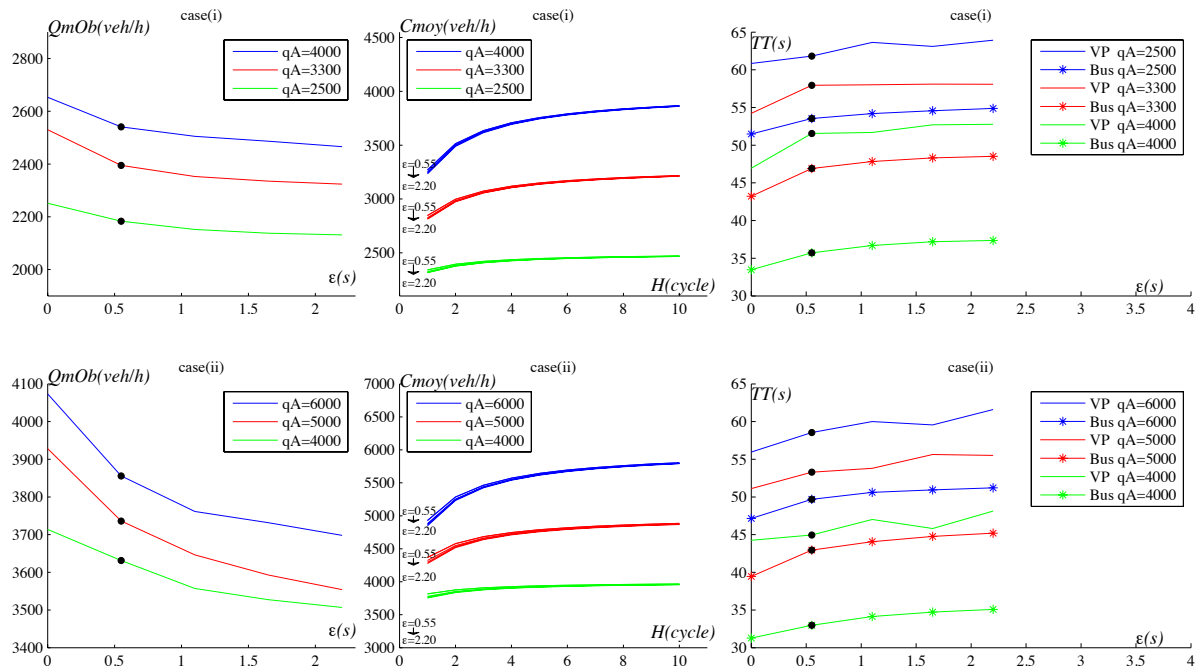


Figure 11 : Sensibilité à la relaxation

Pour continuer, nous nous intéressons désormais à l'impact de la longueur de détection des bus sur l'efficacité du système. Ainsi, le débit observé décroît rapidement lorsque l_d passe de 20 à 180 m (Figure 12). Il faut noter que la chute la plus importante est observée lorsque l_d atteint les 100m. En revanche, l_d n'a pas d'impact sur les temps de parcours que ce soit ceux du bus ou des véhicules.

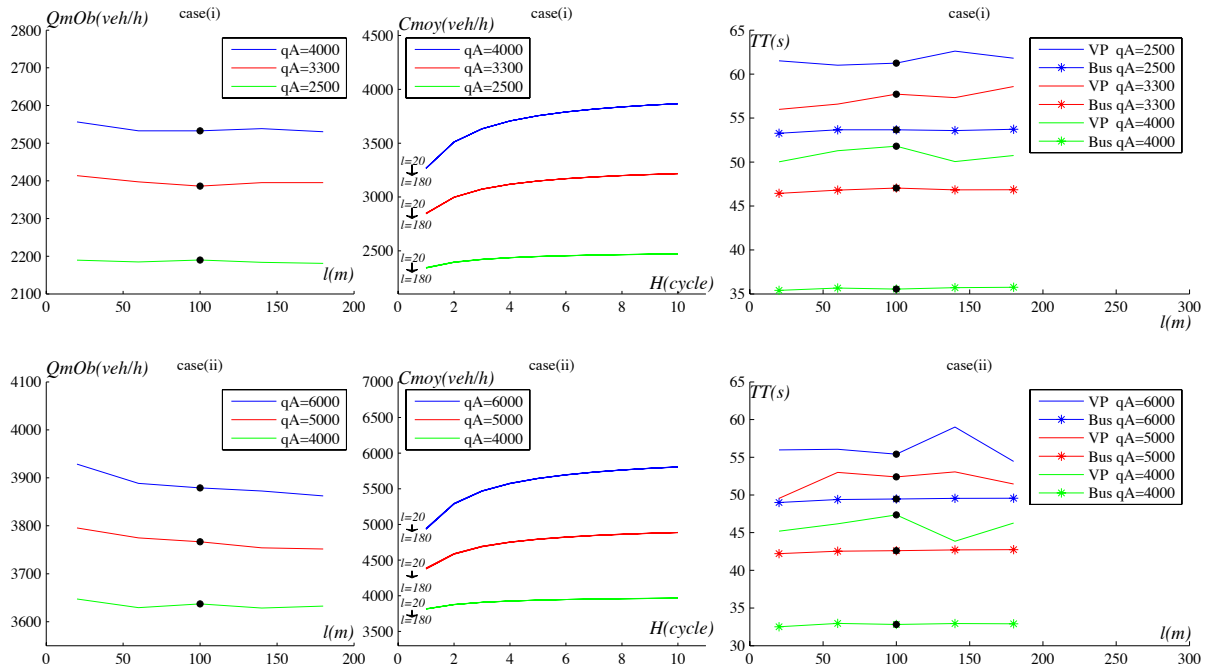


Figure 12 : Sensibilité à la longueur de détection

Finalement, le tableau Tableau 1 résume l'influence des différents paramètres sur le débit observé et les temps de parcours. L'accélération et le coefficient de relaxation sont les deux grandeurs les plus influentes. La longueur de détection n'a presque aucun impact sur le système. Enfin, le reste des paramètres, comme le temps de changement de voies, n'ont que peu d'influence lors du déclenchement des couloirs de bus dynamiques.

Indicateurs Paramètres		Step	$QmOb$	TT	$Cmoy$
Acceleration (a)		0.75 m/s^2	+++++	+++++	+
Coefficient de relaxation (ε)	Borne minimum	0.55 s	++	+++	+
	Borne maximum	3 s	+++	+++	+
Longueur de la voie d'insertion (l_d)		40 m	+	0	0
Temps de changement de voie (λ)		1 s	0	0	faible
Fréquence des bus (H)		1 cycle			++++

Tableau 1 : Synthèse de l'influence des différents paramètres

I.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 total. Le principe de la 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.

L'étude 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 centaines, 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 classes : 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.

Malheureusement, les techniques les plus sophistiquées et les plus récentes sont très peu utilisées (Saltelli et al., 2008). En effet, pour l'étude de sensibilité des modèles de la simulation du trafic, l'approche la plus couramment adoptée reste l'étude de sensibilité locale, surtout l'OAT qui est basée sur l'estimation des dérivées partielles et évalue comment l'incertitude d'un paramètre affecte la sortie du modèle en gardant les autres paramètres fixés à une valeur nominale. 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, il est

souvent choisi par les praticiens pour sa simplicité et sa parcimonie (Saltelli et Annoni, 2010). 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 entre les modèles de simulation et les méta-modèles associés par les techniques d'analyse de sensibilité basée sur la variance pour cinq modèles différents de la route (ayant préalablement été estimés avec 512 exécutions de simulation). 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-aléatoire (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.

Ainsi dans ce rapport, 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-aléatoire décrite précédemment (Sobol, 1976) et le méta-modèle basée sur les principes de Kriging (Kleijnen, 2008 ; Kleijnen, 2009) vont être utilisés pour l'évaluation des indices de sensibilités basées sur la variance. Le méta-modèle proposé sera validée par $R = 2^9$ simulations de SymuVia, et sa sensibilité sera évalué 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 d'insertion du déclenchement du couloir de bus dynamique en amont du premier feu (L_d), sera testé.

Conclusion

Ce second chapitre est donc dévolu à l'étude du déclenchement des couloirs de bus dynamique. 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 afin d'identifier les paramètres les plus influents. Une étude de sensibilité est ensuite réalisée et permet d'identifier la longueur d'insertion et les paramètres du DF comme les grandeurs les plus influentes.

Chapitre II

Evaluation macroscopique d'un boulevard multimodal urbain

II.1 Introduction

Après l'étude du déclenchement des couloirs de bus dynamiques, ce deuxième chapitre 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 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.

II.2 Un 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 en anglais pour 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, 2007). 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 appuyons sur la théorie du bouchon mobile (moving bottleneck, *MB*) introduite par Newell (1998), ainsi que sur ces différentes méthodes de discrétisation qui permettront (Laval, 2004) de faire le lien entre un bus dans le trafic et un couloir de bus dynamique. Nous serons alors 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 ces 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.

II.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 (moving bottleneck, 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.

II.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, 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 13). 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.

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 $q_D(t) = (n-1)/n.q_x$.

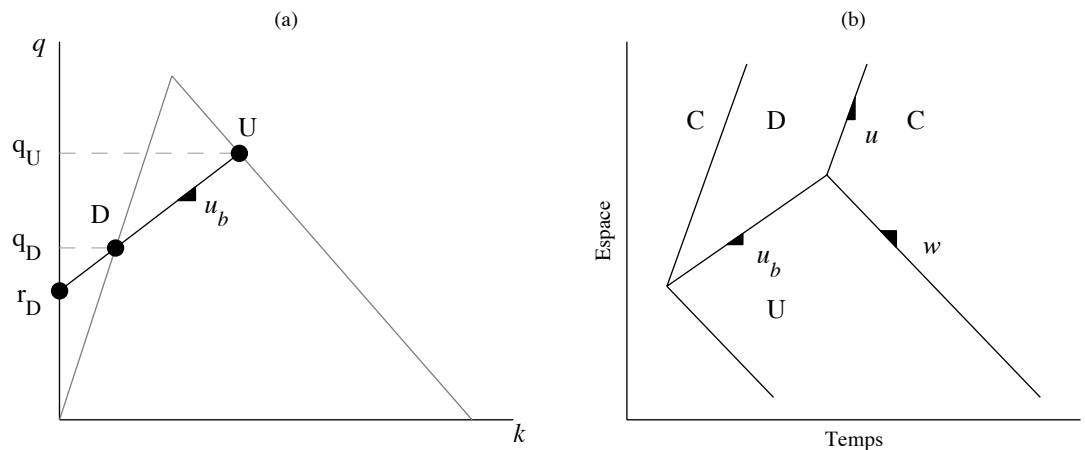


Figure 13 : (a) Représentation du MB sur un DF triangulaire (b) solution pour un cas simple dans le diagramme espace-temps

Afin de calculer les solutions du modèle KW 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 FD , 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 18, 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 congestionnée, 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 mais $r_A < r_D$. Dans ce cas, le MB n'est plus actif. Le bus n'influence pas 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. Dans ce cadre, Daganzo et Laval

(2005) ont donc proposé de remplacer la trajectoire continue du MB, $\mathbf{x}(t)$, par une fonction continue par morceaux, $\mathbf{x}_d(t)$, paramétrée par un espacement Δ_x (Figure 14). L'erreur introduite par cette approximation sur le nombre total de véhicules, i.e. les CVC calculées en sortie du site d'étude, reste bornée. Cette borne tend vers zéro lorsque le pas d'espacement Δ_x tend lui aussi vers zéro.

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' comment illustré sur la Figure 14.

Enfin, une méthode basée sur la théorie variationnelle a été récemment introduite par Daganzo (2005b, c). 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).

II.3.2 Liens entre MB et couloirs de bus dynamiques

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.

Comme expliqué précédemment, il s'agit d'approximer la trajectoire du MB par une fonction en escalier $\mathbf{x}_d(t)$ avec des pas d'espace de longueur Dx . Le long de cette fonction $\mathbf{x}_d(t)$ la capacité est réduite à celle du MB q_b (Laval, 2004). Cette discrétisation introduit une erreur sur le calcul de la solution. Cette erreur peut être calculée à l'aide de la théorie variationnelle. A 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.

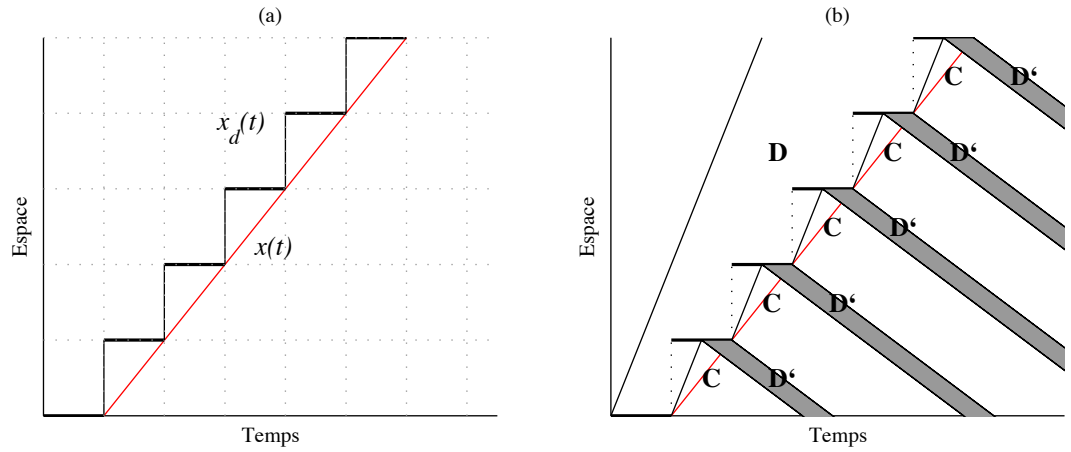


Figure 14 : (a) Approximation des trajectoires (b) calcul de la solution

Comme expliqué précédemment, cette 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 15 présente l'évolution du retard en fonction de D_{blip} .

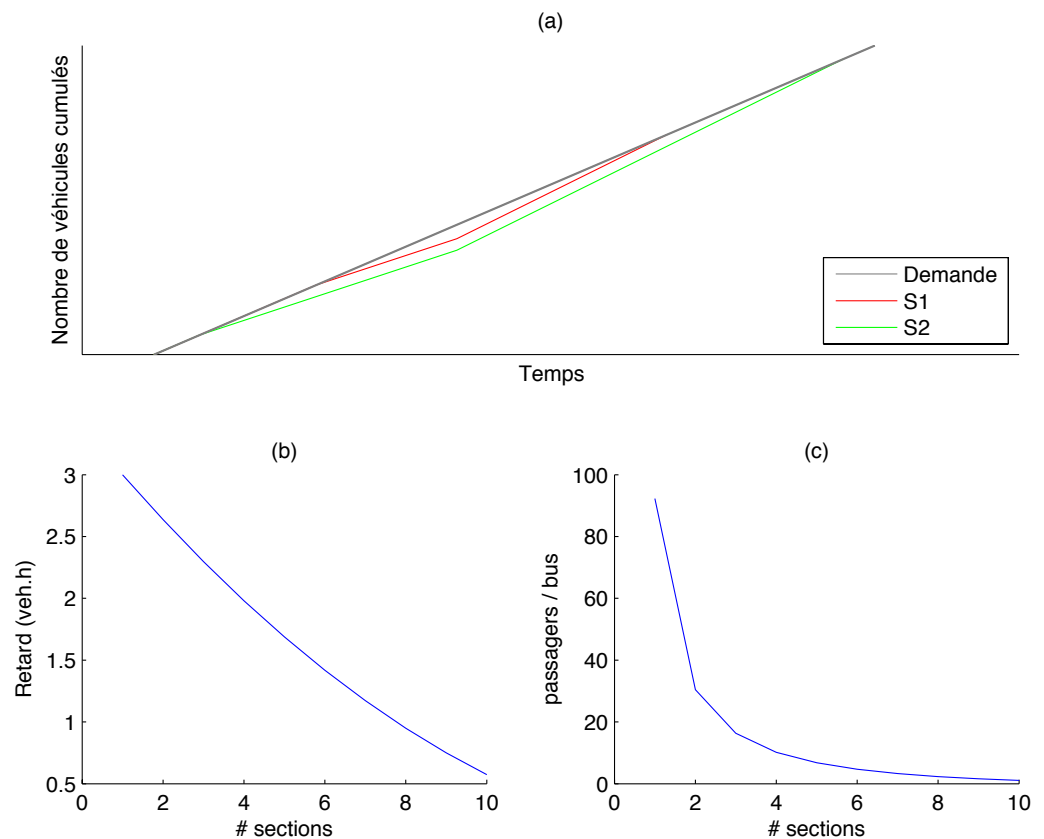


Figure 15 : (a) Solutions en courbes de véhicules cumulés (b) evolution du retard en fonction du nombre de sections réservées au couloir de bus dynamique (c) occupation du bus pour compenser le retard en fonction du nombre de section réservées au couloir de bus dynamique

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.

II.3.3 MFD

II.3.3.a Définition et concepts

Introduit 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 de la Figure 16, il est possible d'en estimer la valeur moyenne spatiale du débit et de la concentration. 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.

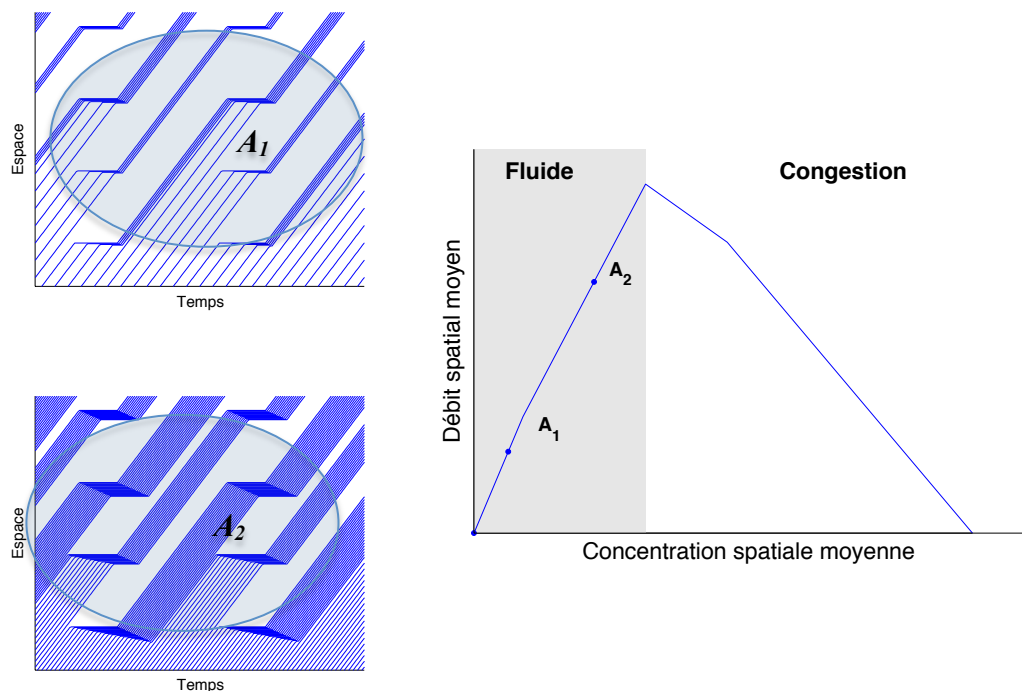


Figure 16 : Exemple de situations reproduites par le MFD

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 supérieur à la cyclicité des feux de circulation et à une échelle spatiale incorporant plusieurs tronçons. Le MFD alors estimé 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.

II.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,c). Ces bases vont être présentées et utilisées dans la suite du travail.

II.4 Deux nouvelles méthodes

A 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.

II.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, c ; 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) définie 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 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 . 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 certain 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 17 :

- a. Les arcs de type (a) correspondent exactement aux phases de rouge de l'ensemble des feux tricolores ;
- b. Les arcs de type (b) correspondent aux phases de vert de l'ensemble des feux tricolores ;
- c. 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).

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 17. La valeur de r_j peut alors être calculée en appliquant un algorithme classique de plus court chemin entre ces deux points. 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 $w\kappa$). 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 .

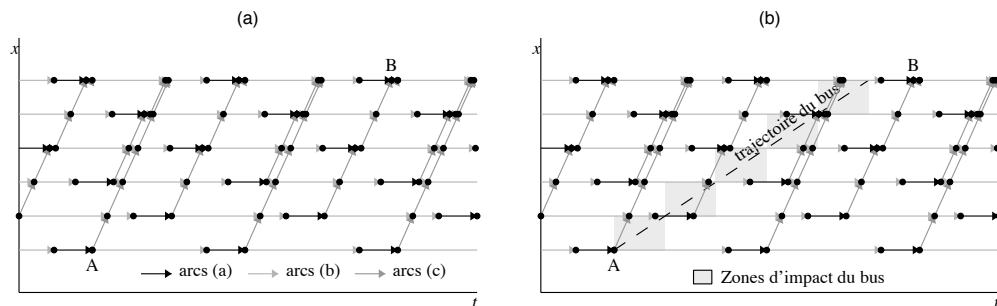


Figure 17 : Méthode direct d'estimation des MFD par la théorie variationnelle (a) sans bus (b) avec bus

L'extension proposée ici pour prendre en compte l'effet des bus est assez simple. En effet, comme nous l'avons déjà indiqué Newell (1999) 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 (2005) 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 lien 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 17. L'effet des bus peut directement être prise 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_c à la valeur $(m-1)/m \cdot q_c$ où m 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 $(m-1)/m$ 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 r_j .

II.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.

L'influence des bus sur le trafic dépend des conditions de circulation. Comme présenté en page 27, il est possible d'identifier cinq cas différents (Figure 18). Dans la suite de cette partie, nous considérons uniquement le cas 2 qui est le

plus simple à expliquer. Le détail des autres cas est présent dans les articles liés à cette partie.

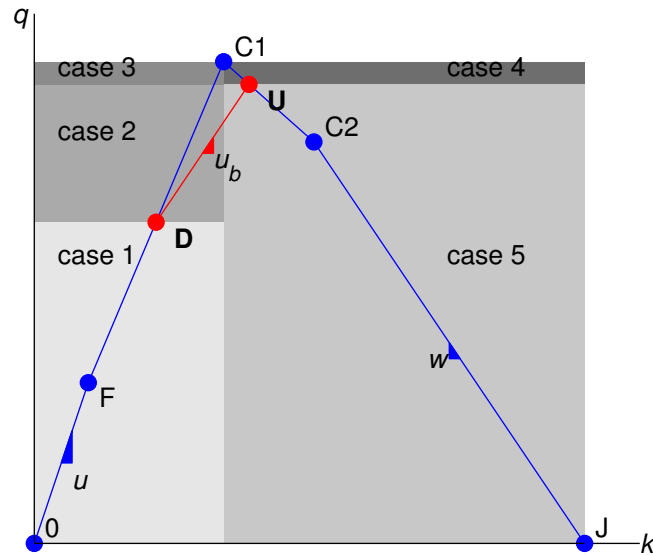


Figure 18 : Application de la théorie du MB sur le MFD

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. Nous observons donc un état A tout le long du site. L'entrée du bus sur le corridor va donc générer en aval l'état D correspondant au débit de deux voies (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 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 feux de circulation 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 correspondant à la capacité maximale est observé. Cet état remonte le boulevard à la vitesse w , 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 .

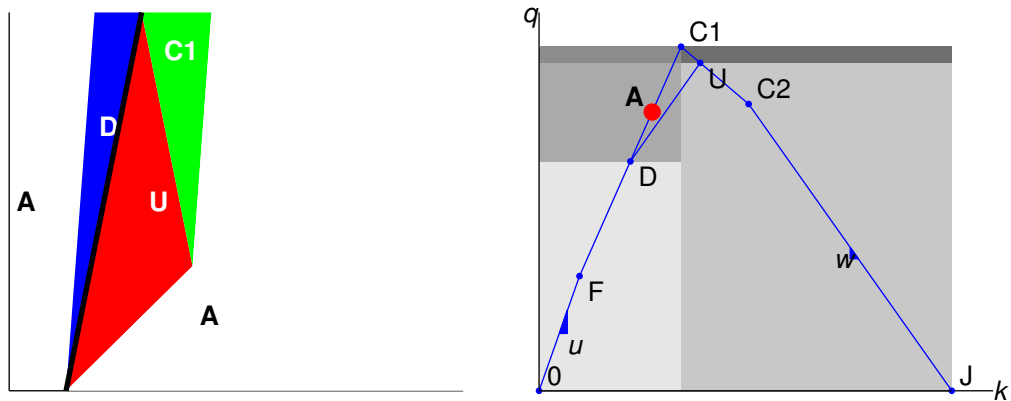


Figure 19 : (a) Diagramme espace temps (b) Point de fonctionnement

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.

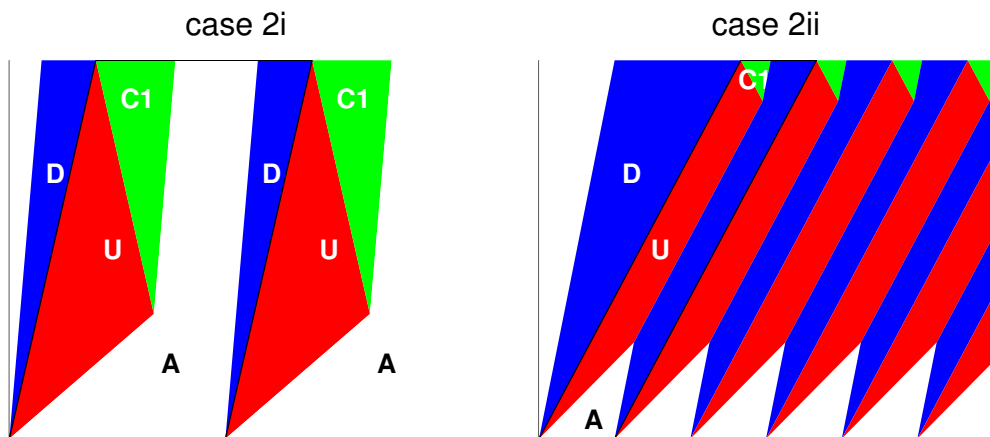


Figure 20 : Diagrammes espace-temps pour une succession de bus : (a) faible fréquence (b) forte fréquence

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.

Il est donc facile de calculer le débit moyen spatial et la concentration moyenne spatiale. 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.

II.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.

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 (Xie et al., 2013).

II.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.

II.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.

II.5.1.a Vitesses moyennes

La première étape consiste à calculer des vitesses moyennes des véhicules et 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_I^{veh} peut directement être calculée à partir des MFD estimés et de la relation fondamentale $q=k.v$. De ce fait, V_I^{veh} est égale à k/q . La vitesse moyenne du bus V_I^{bus} peut être calculée de la même manière. La seule différence est que la V_I^{veh} ne peut excéder la vitesse maximale du bus u_{bus} . La Figure 21a propose l'évolution de V_I^{veh} et V_I^{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_{bus} .

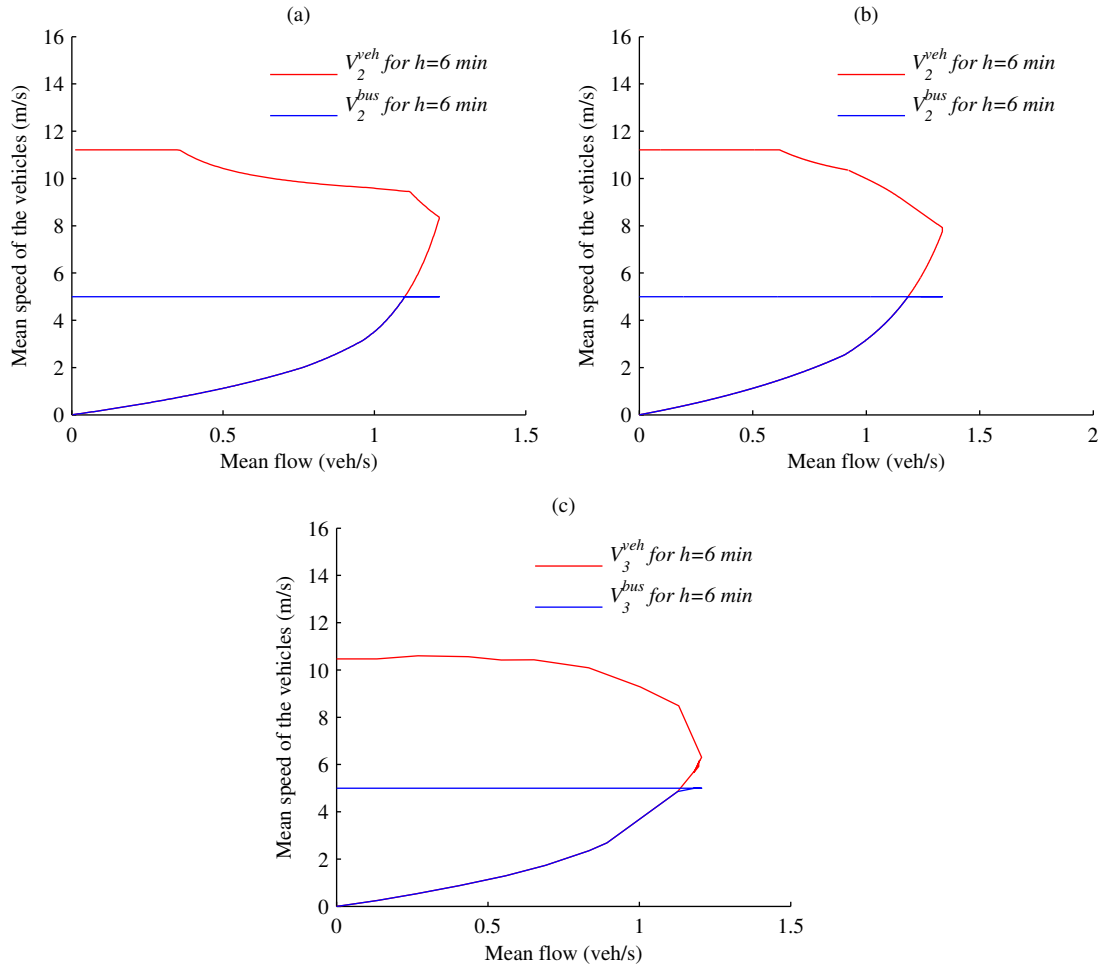


Figure 21 : Courbes débits vitesses pour les méthodes (a) M1 (b) M2 et (c) M3

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 Q et la concentration K moyenne spatiale comme :

$$Q = \frac{\sum A_i q_i}{\sum A_i}$$

$$K = \frac{\sum A_i k_i}{\sum A_i}$$

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_I^{veh} est calculée comme précédemment. La Figure 21b 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 . 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 21c illustre l'évolution de V_I^{veh} et V_I^{veh} pour les mêmes conditions de trafic que les méthodes M1 et M2.

Les résultats des méthodes peuvent maintenant être comparés. La figure 22a-d propose les valeurs moyennes des vitesses des véhicules et des bus pour chacune des méthodes, en fonction des conditions de trafic et de la période des bus. 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.

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.

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 voies 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 figures Figure 22a-d.

Quant à elle, la Figure 22e 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. 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.

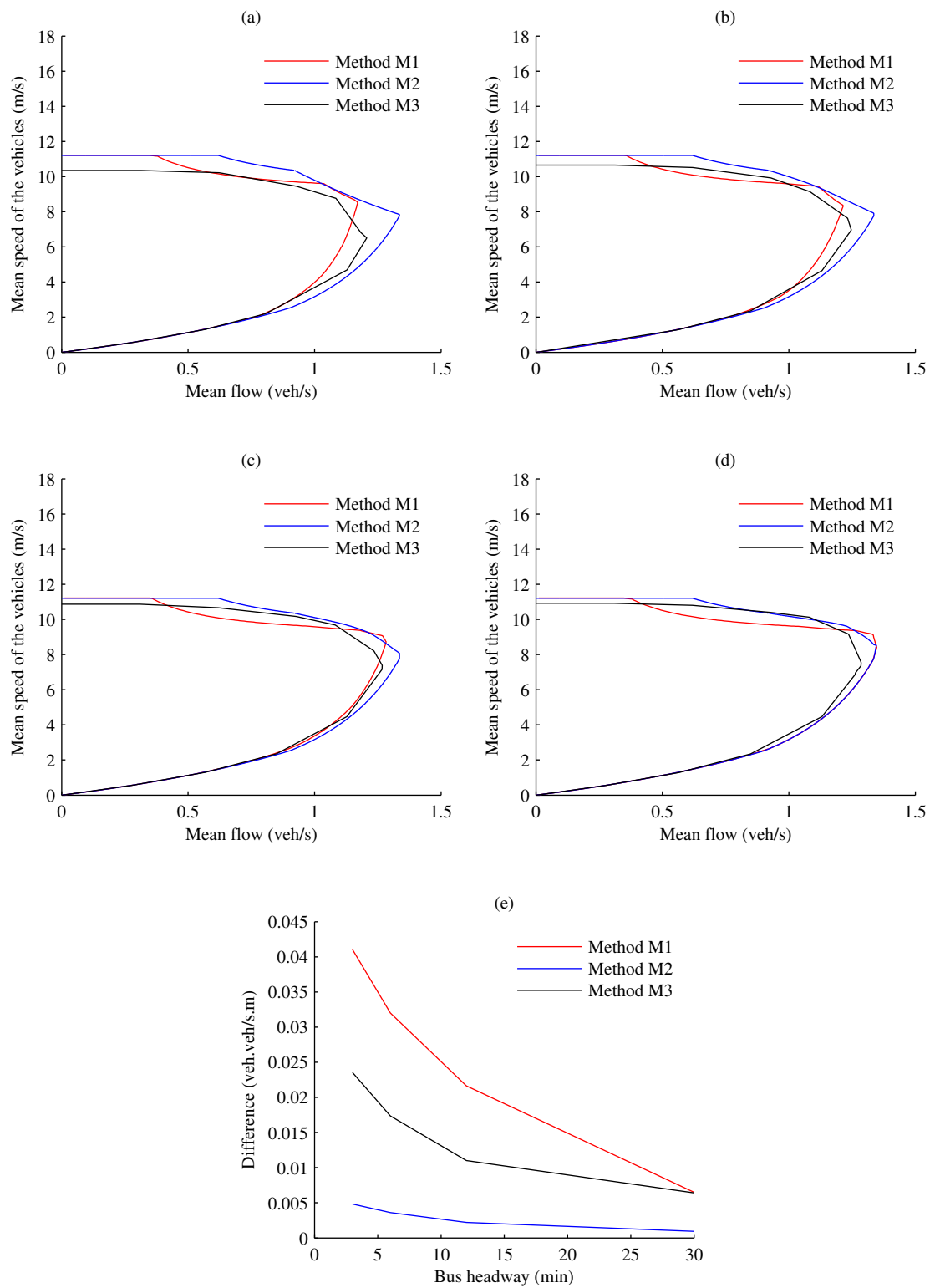


Figure 22 : Comparaison des différentes méthodes pour plusieurs fréquence : (a) 3 min (b) 6 min (c) 12 min et (d) 30 min

II.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).

Les courbes vitesses-débits sont donc déterminées pour notre cas d'étude (Figure 22a). 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 dans la gradation proposée par le HCM (Figure 22b). 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 correspondant est très faible comparé aux niveaux B, C et F. Des résultats similaires sont obtenus pour les méthodes M2 et M3.

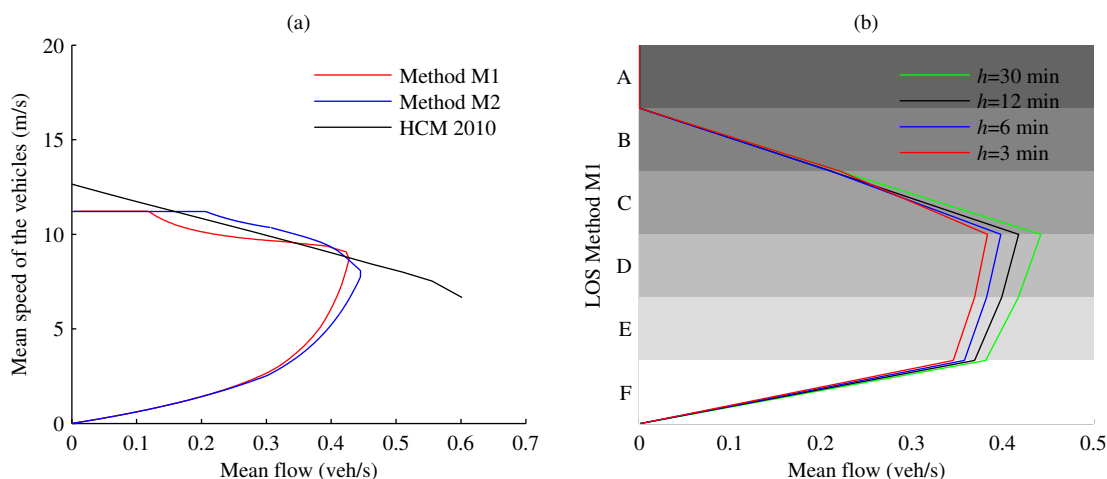


Figure 23 : Comparaison avec les abaques du HCM (a) courbe débit-vitesse (b) niveaux de service

II.5.2 Comparaison d'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.

II.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 passagers 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 : $\phi_c = \tau \cdot \phi$.

A l'instar de la notion de MFD, il s'agit de déterminer la fonction reliant ϕ à la concentration en passagers, notée δ , traduisant le 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 passagers δ la plus faible possible.

Par conséquent :

$$\delta = \min_{\tau} \left[\frac{\phi_c}{v_c} + \frac{\phi_t}{v_t} \right] \quad (1)$$

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 triangulaire 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.

II.5.2.a.i 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 (1). Il faut noter que la répartition τ par mode va donc varier en fonction de ϕ . La Figure 24 montre le p-MFD obtenu.

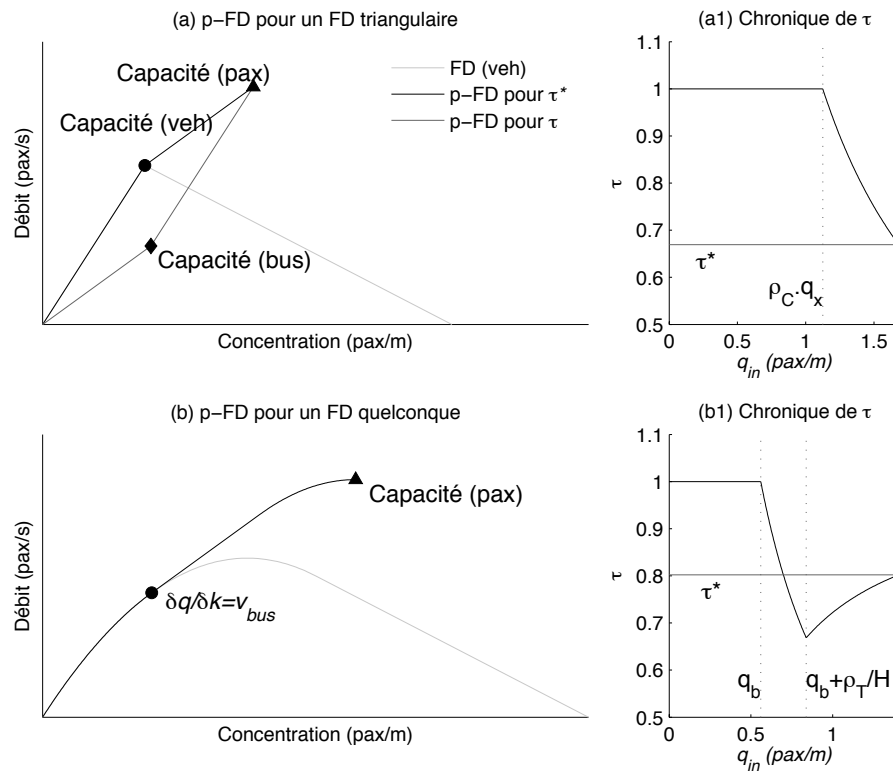


Figure 24 : p-MFD pour (a) un MFD triangulaire (b) un MFD quelconque

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 24a1 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.

Il est important de noter que le même travail peut être fait à partir d'une forme quelconque du MFD des véhicules (Figure 24b1). 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. A 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 28 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.

II.5.2.a.ii 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.

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 supposerons 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 : $n_{bus} = L/(H \cdot v_{bus})$. 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.

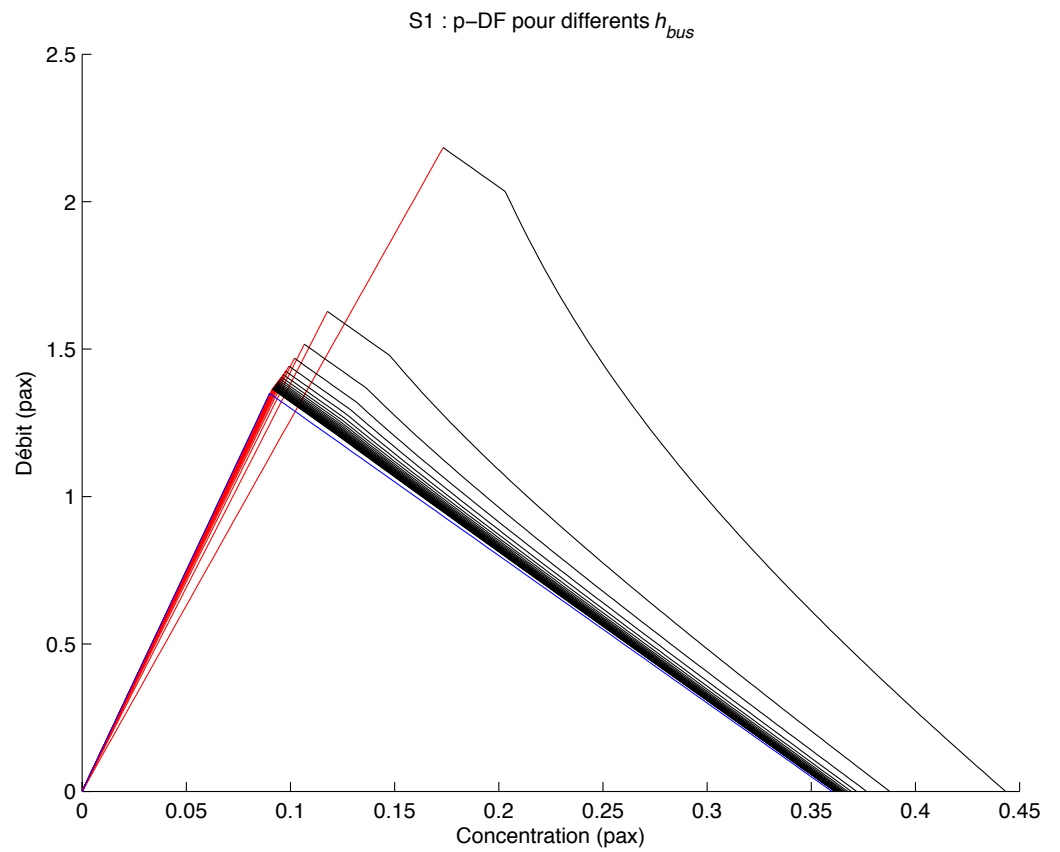


Figure 25 : p-MFD pour différentes valeurs de fréquence pour la solution S1

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 DF des véhicules particuliers pour obtenir le p-MFD complet.

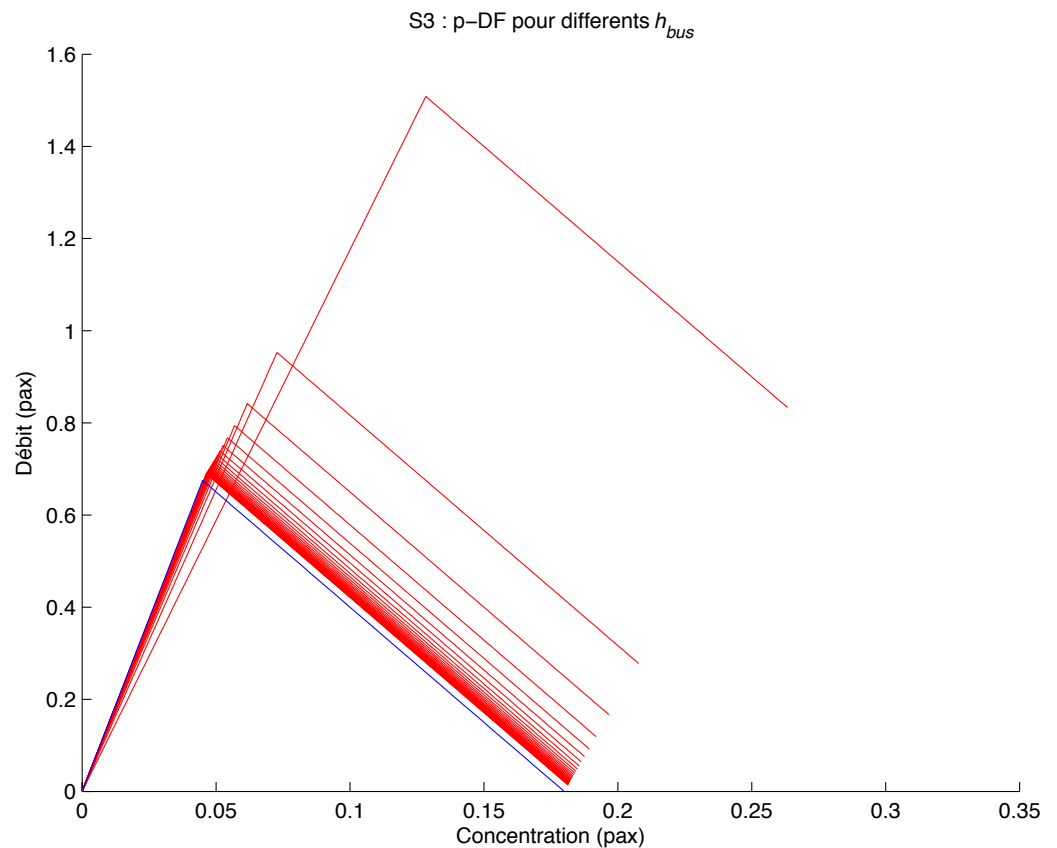


Figure 26 : p-MFD pour différentes valeurs de fréquence pour la solution S3

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.

II.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 scénarios sont étudiés : $h=3, 6, 9$ et 12 minutes. Les résultats sont présentés sur la Figure 27.

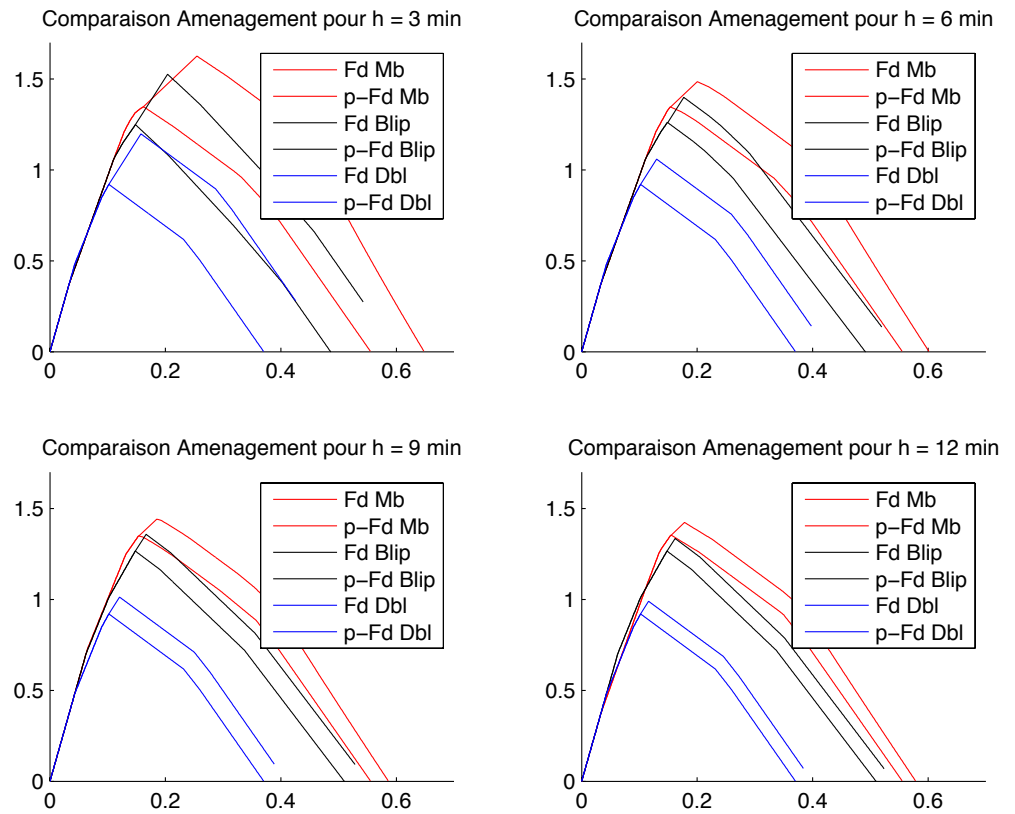


Figure 27 : Comparaisons des trois solutions pour différentes fréquences :

(a) $h = 3$ min (b) $h = 6$ min (c) $h = 9$ min (d) $h = 12$ min

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.

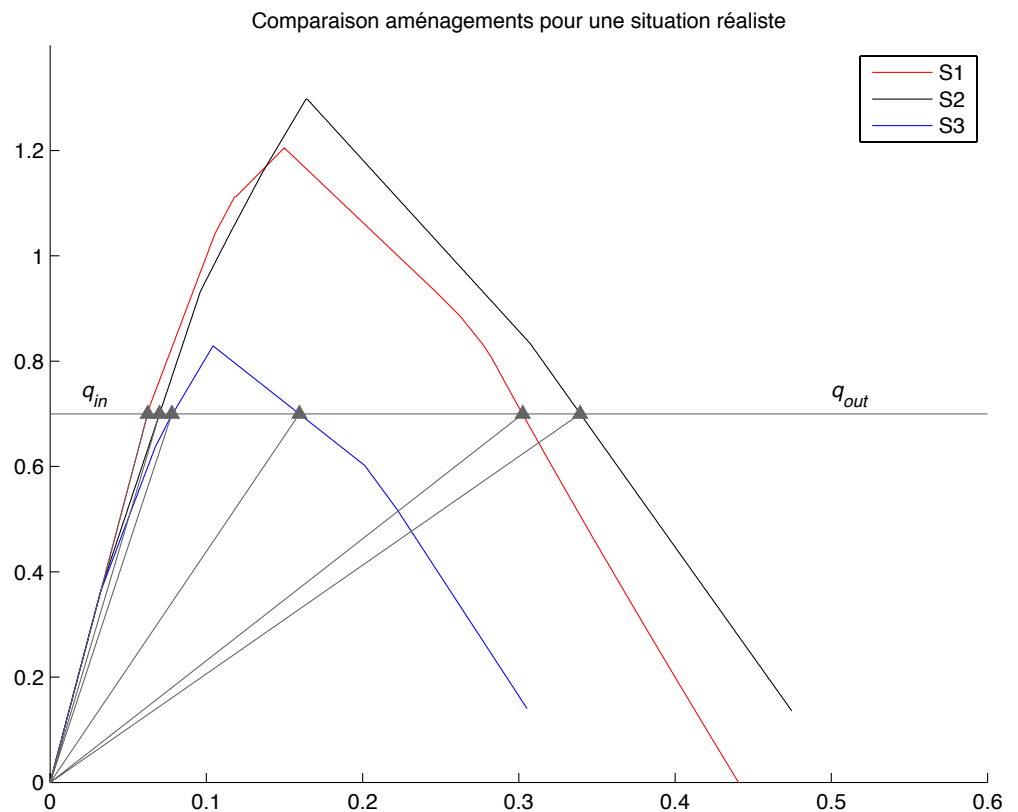


Figure 28 : Comparaison des trois solutions pour un cas plus réaliste

La Figure 28 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 5m/s et dans le cas S3 de 8m/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.

II.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 dynamique. Trois méthodes ont été proposées : une méthode analytique prenant en compte le bus et les couloirs de bus dynamique 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'entre 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 terme de capacité, est de laisser le bus libre dans le trafic. Cependant, avec des hypothèses plus réaliste, le couloir de bus dynamique s'avère être la solution à privilégier en régime très dense ou congestionné.

Chapitre III

Simulation d'un cas réaliste

L'objectif de ce dernier chapitre du livrable est d'utiliser les outils développés, et en particulier le simulateur, pour reproduire le fonctionnement de l'implémentation d'un couloir de bus dynamique sur un cas réaliste. De plus, le simulateur permet de relâcher une hypothèse : le respect total des consignes par les conducteurs des véhicules particuliers.

III.1 Mise en œuvre de la simulation

III.1.1 Réseau théorique

Dans cette étude, un réseau d'un boulevard urbain avec une dizaine de rues latérales est simulé. Le boulevard a trois voies identiques de la même direction de la circulation de trafic. Les rues latérales n'ont qu'une voie de même taille que la voie de boulevard. Les sens des rues latérales alternent de l'une à l'autre. Le boulevard réel est similaire à celui considéré dans les modèles analytiques, sauf que nous avons ajouté les carrefours à feux. Dans ce cas réel, nous combinons également le déclenchement et la propagation de couloirs de bus dynamiques.

Schéma

Figure 29 : Schéma du site étudié

La Figure 29 représente le schéma du site simulé. Le couloir de bus dynamique est activé pour 3 tronçons à la fois. Le nombre de carrefours à feux est égal au nombre de tronçons : n_s . Les bus roulent à la même vitesse libre que les autres véhicules particuliers $u_B = u = 15$ m/s. Le scénario de référence de ce site réel est défini dans le Tableau 2. Les paramètres du boulevard et du trafic sont aussi présentés.

Paramètres de du boulevard	Valeur (unité)	Paramètres du trafic (1voie)	Valeur (unité)
Longueur tronçon (l)	200 (m)	Vitesse libre (u)	15 (m/s)
Nombre de voie (n_l)	3 (voie)	Vitesse congestionnée (w)	5 (m/s)
Nombre du tronçon (n_s)	11 (tronçon)	Capacité (q_x)	0.6945
Cycle du feu (rue principale) (c)	90 (s)	Densité max (k_x)	0.1852 (veh/m)
Phase verte (rue principale) (g)	60 (s)	Vitesse libre de bus (u_B)	15 (m/s)
Phase rouge (rue principale) (r)	30 (s)	Temps inter-bus (h)	6 (mn)
Décalage (rue principale) (δ)	0 (s)	Temps sur l'arrêt de bus (t_s)	10 (s)
Cycle du feu (rues latérales) (c_i)	90 (s)	Longueur d'insertion du déclenchement du BLIP (l_d)	100 (m)
Phase verte (rues latérales) (g_i)	30 (s)	Longueur du déclenchement du BLIP (l_a)	3 (tronçon)
Phase rouge (rues latérales) (r_i)	60 (s)	Longueur 'preactivate' du BLIP (l_p)	1 (tronçon)
Décalage (rues latérales) (δ_i)	0 (s)		

Tableau 2: Paramètres de la simulation

III.1.2 Outil de simulation et méthode d'estimation

Nous allons recourir à un simulateur microscopique du trafic routier, SymuVia, qui prend en compte à la fois les bus mais aussi le système de couloirs de bus dynamiques. Cette plateforme de simulation correspond à une résolution lagrangienne du modèle LWR ce qui permet de reproduire les trajectoires des véhicules. SymuVia permet également de reproduire des phénomènes supplémentaires qu'on ne peut pas modéliser directement dans les approches analytiques. En effet, SymuVia incorpore les dernières extensions du modèle LWR comme le changement de voies, l'accélération bornée, les mouvements tournants et les respects des consignes.

Notre étude s'intéresse à une relation macroscopique du trafic sur le réseau : le MFD. Comme déjà présenté, il est possible d'estimer en simulation des MFD cohérents avec les relations calculées analytiquement. Dans notre étude, nous définissons une période suffisante longue avant de définir la fenêtre d'estimation de MFD pour assurer que la situation est stable. Pour chaque estimation, il faut prendre un multiple du temps inter-bus (h) comme la longueur de la fenêtre à estimer. En plus, tous les résultats de simulation sont moyennés par plusieurs répliques de simulation qui est définie par une plage de grain aléatoire de réplique. Cela définit la séquence des numéros aléatoires qui est utilisée pendant la simulation de trafic. Les différentes conditions de trafic (les conditions fluides et les conditions congestionnées) peuvent alors être reproduites, et le MFD

est estimé directement à partir des trajectoires de véhicules. Les détails de cette méthode sont présentés dans (Xie et al., 2013).

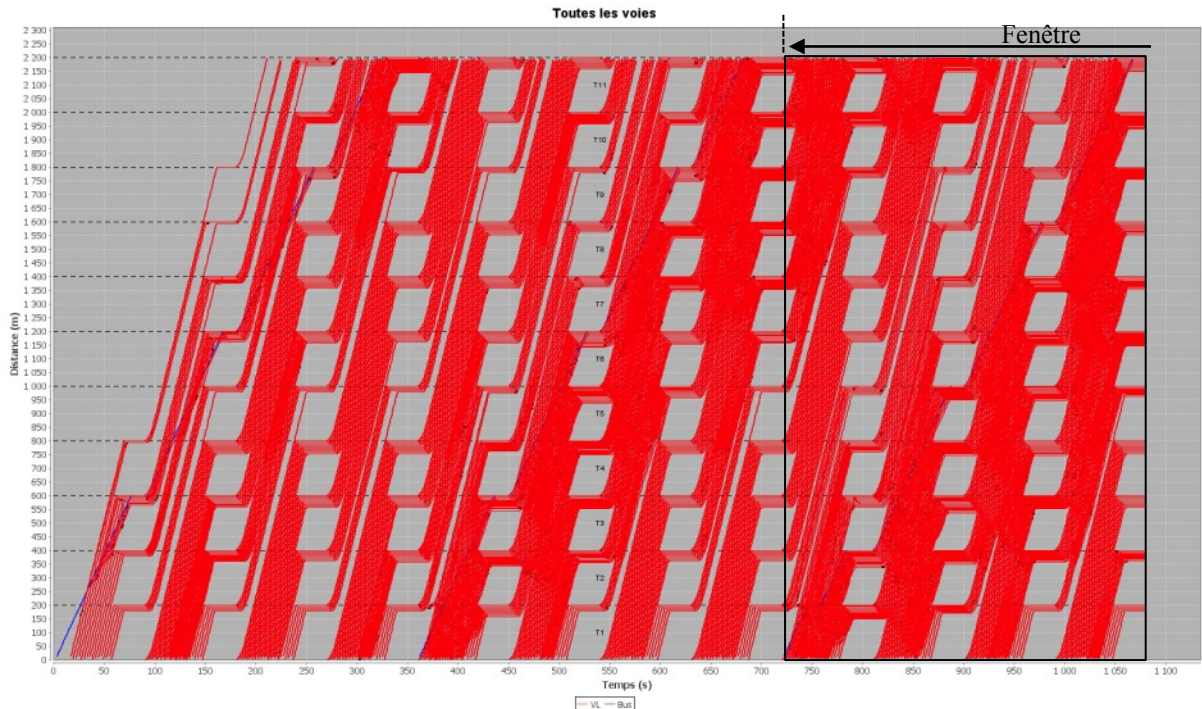


Figure 30 : Trajectoires des véhicules et fenêtre de l'estimation de MFD.

III.1.3 Validation du modèle

Le modèle de la simulation doit être robuste et cohérent avec les études analytiques précédentes. Pour cette raison, nous devons d'abord valider notre modèle avant de l'utiliser. En prenant le scénario de référence précédemment défini, nous allons comparer les résultats de ce réseau simulé avec les résultats analytiques. Nous avons estimé le débit moyen spatial (q), la densité moyenne spatiale (k) et les vitesses moyennes spatiales des véhicules particuliers et de bus (v_{PV} et v_B). Toutes les variables sont des variables spatiales, pour simplifier on omet le mot spatial(e). En outre, il est important de noter que la différence entre le débit d'entrée et le débit de sortie de chaque carrefour est nulle.

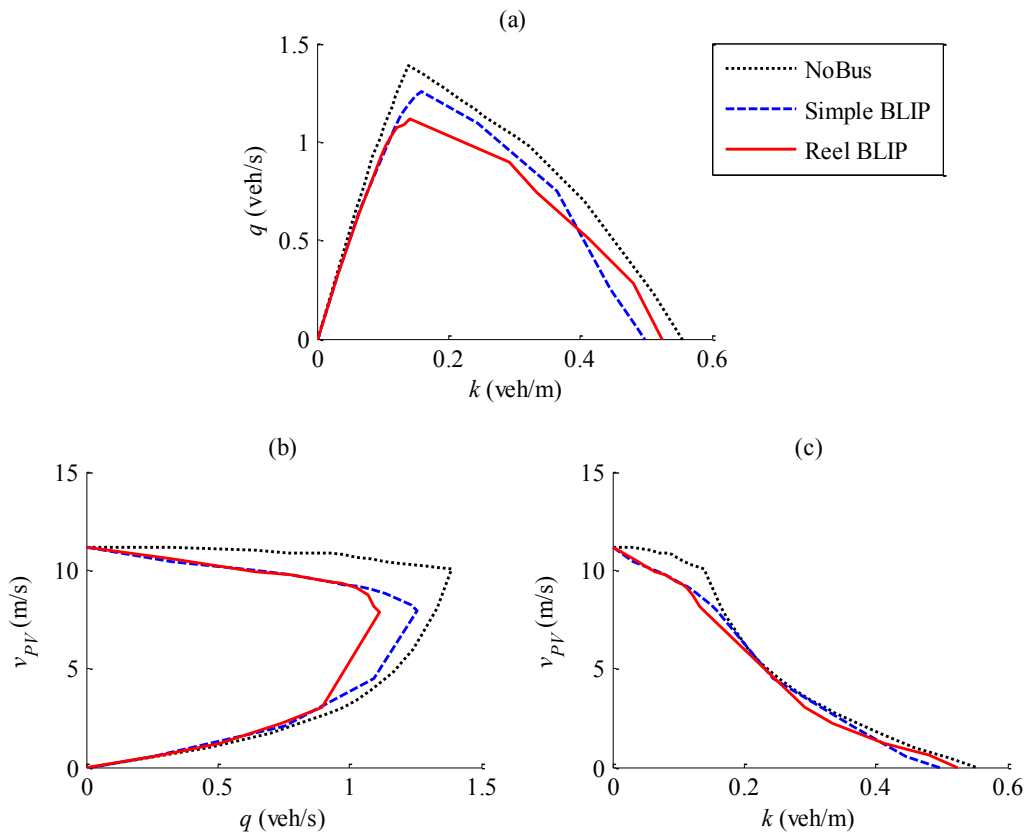


Figure 31 : Validation d'un système ADViCe réel : (a) le MFD, (b) la relation $(v_{pv}-q)$ et (c) la relation $(v_{pv}-k)$.

Pour la validation, le MFD du boulevard dans l'étude est utilisé. Les Figure 31a-c montrent les résultats d'un cas réel (la courbe solide rouge) et d'un cas simple (la courbe en tirets bleue) de système ADViCe sur un boulevard urbain. La courbe pointillée noire est le cas sans aucun bus. La Figure 31a introduit la relation entre le débit moyen et la densité moyenne (MFD : $q-k$). On peut constater que plus le modèle est sophistiqué, plus le MFD est modifié, surtout dans sa partie sommitale. La capacité du cas réel est plus petite que celle du cas simple. Dans la partie fluide, la courbe solide rouge et la courbe en tirets bleue sont superposées. Dans la partie congestionnée, la différence est grande. La densité moyenne maximale du cas réel est plus grande que celle du cas simple. Cela signifie que l'insertion des mouvements tournants a une influence importante dans la partie congestionnée.

Les Figure 31b-c présentent la vitesse moyenne des véhicules en fonction du débit moyen et de la densité moyenne pour toutes les conditions de trafic (la condition fluide et la condition congestionnée). La courbe solide rouge est située à l'intérieur de la courbe en tirets bleus, sauf pour une partie dans la congestion lorsque la densité moyenne est proche de la densité moyenne maximale. La

vitesse moyenne de véhicules est de plus en plus petite lorsque la densité augmente.

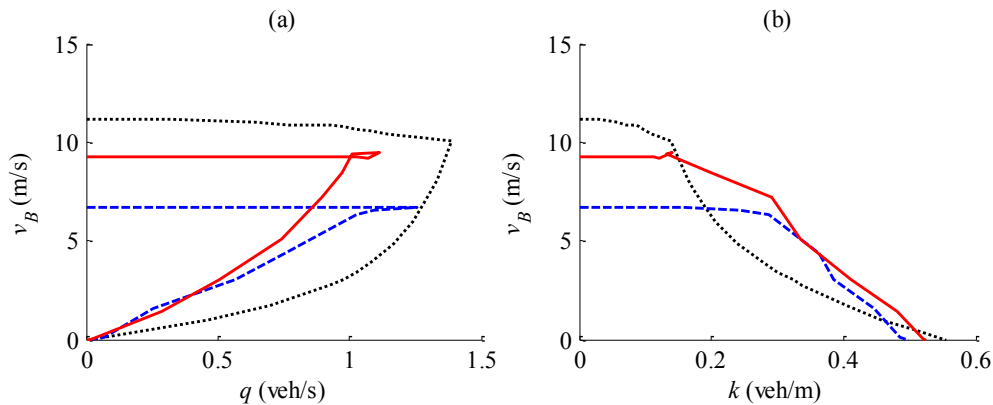


Figure 32 : Validation d'un système ADViCe réel : (a) la relation (v_B - q) et (b) la relation (v_B - k).

Au contraire, la vitesse moyenne de bus reste presque constante dans la partie fluide et plus grande que celle de véhicules particuliers dans la partie congestionnée, voir les Figure 32a-b. Cette constante est égale à la valeur de la vitesse moyenne libre de bus. Cela montre les avantages du système ADViCe pour les bus : les bus ne sont pas influencés par la congestion du trafic dans le système ADViCe. Les valeurs de la vitesse moyenne de bus du cas réel sont plus grandes que celle du cas simple.

Enfin, les constats précédents ne sont pas surprenant puisque le cas réel prend en compte le déclenchement du couloir de bus dynamique et plus de phénomènes de trafic, par exemple les mouvements tournants aux carrefours à feux et les arrêts de bus. Ces phénomènes ont pour conséquence directe de réduire la capacité. Cependant, la dynamique des deux cas est similaire. Cela permet donc de conclure que la simulation dans le cas réel est raisonnable.

III.2 Étude des respects des consignes

Cette dernière section consiste à différencier le comportement des véhicules particuliers à travers un taux de respect des consignes en simulation par le logiciel SymuVia. En effet, l'efficacité des couloirs de bus dynamiques repose sur la volonté des usagers à libérer la voie pour les bus. Cette section n'a pas vocation à aborder les différentes technologies et/ou la compréhension que les usagers en font. Ainsi, on ne se concentrera pas sur les raisons du non-respect des consignes mais sur les conséquences sur la dynamique du trafic.

Ce non-respect se traduit donc par la présence de véhicules particuliers sur la voie réservée aux bus. Les véhicules peuvent se retrouver dans cette situations par la violation de deux mouvements : (i) le fait de ne pas avoir changer de voie avant le couloir de bus et (ii) le fait de se rabattre dans le couloir devant le bus.

(i) Le premier mouvement encourage les véhicules particuliers à converger vers la voie autorisée (la voie de gauche) plus tôt qu'ils le feraient normalement et avant d'arriver à la fin du tronçon ou d'une file d'attente. Cette stratégie étend la convergence sur une longue distance. Elle peut réduire le nombre de conflits en raison de convergence forcée à cause de la compression entre les véhicules en file d'attente. Cependant, un problème est indiqué en cas de congestion. En effet, le système réduit d'environ 5% de la capacité, et donc augmente le temps de parcours à traverser la zone.

(ii) Au contraire, le second mouvement encourage les conducteurs à changer la voie avant d'arriver au carrefour à feux, en particulier pendant l'heure de pointe. Il augmente la capacité au cours de la congestion et réduit la longueur des files d'attente. De plus, la tentation est grande puisque la voie reste pratiquement vide.

1.1.1. Prise en compte dans la simulation

Les effets du non-respect des consignes pour ces deux mouvements sont donc testés. Le comportement des conducteurs est reproduit par une unique paramètre : le taux de respect des consignes par les véhicules particuliers τ_r . Ce paramètre représente la fraction de tous les véhicules particuliers qui respectent toutes les consignes. Il peut varier dans l'intervalle $[0, 1]$. Lorsque $\tau_r = 1$, tous les véhicules respectent les consignes ; lorsque $\tau_r = 0$, aucun véhicule respecte les consignes ; et lorsque $\tau_r = 0.2$, 20% des véhicules respectent les consignes.

Nous allons donc maintenant étudier l'impact de cet indicateur sur les diagrammes macroscopiques estimés.

1.2 Effets des respects des consignes

Les simulations réalisées sont basées sur le réseau de la Figure 29. Nous supposons que τ_r varie dans l'intervalle $[0, 1]$ en suivant une distribution uniforme est prise en compte. Le pas est $\Delta\tau_r = 0.2$.

1.2.1. Analyse de sensibilité locale de diagrammes macroscopiques

Les diagrammes macroscopiques du réseau en fonction de τ_r sont présentés dans cette sous-section. La Figure 33a affiche l'évolution du MFD en fonction de

τ_r . La courbe du MFD est de plus en plus intérieure, quand la valeur de τ_r augmente. Lorsque $\tau_r = 1$ (tous les véhicules respectent les consignes), la courbe est la plus intérieure. Et la capacité du réseau est la plus petite. Lorsque $\tau_r = 0$ (aucun véhicule ne respecte les consignes), la courbe est la plus extérieure. Et la capacité du réseau est la plus grande. C'est logique, parce que plus les véhicules particuliers respectent les consignes, plus les voies réservées au bus sont vides pour les bus. Par ailleurs, plus de changements de voie sont engendrés. La capacité est donc plus petite.

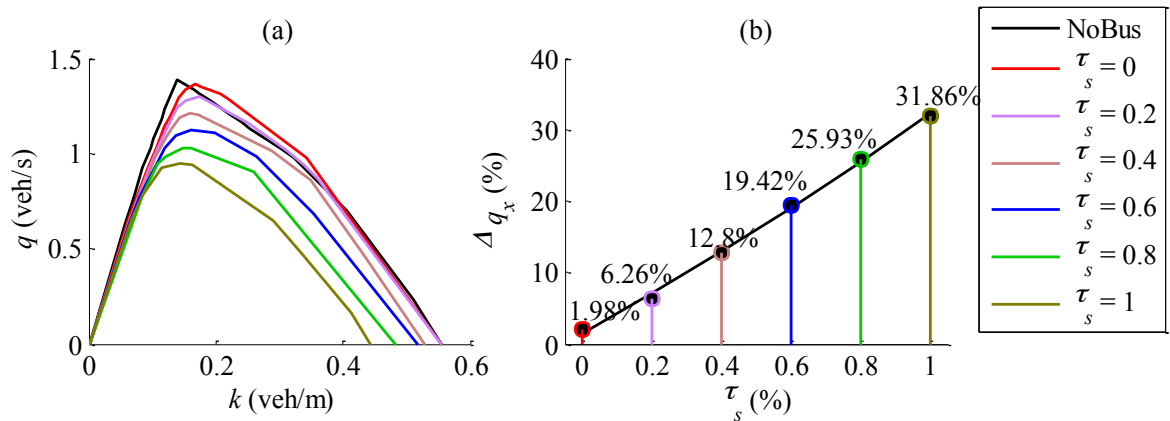


Figure 33 : Influence du taux de respects des consignes : (a) les MFD et (b) les Δq_x .

La Figure 33b présente la réduction de la capacité du réseau (Δq_x) en fonction de τ_r . On peut constater que la réduction de capacité par rapport à τ_r est presque linéaire. La réduction de capacité maximale causée par le non-respect des consignes est égale à 31.86% à $\tau_r = 1$, et le minimum est 1.98% à $\tau_r = 0$. La réduction de capacité (Δq_x) en fonction du taux de respect des consignes par les véhicules particuliers (τ_r) est alors :

$$\Delta q_x = 0.036\tau_r^2 + 0.2707\tau + 0.565, \text{ avec } r = 0.999.$$

Où r est le coefficient de corrélation. Les Figure 34a-d introduisent les influences du taux de respects des consignes sur les vitesses de véhicules (v_{PV}) et de bus (v_B). Les Figure 34a-b nous montrent que l'influence de τ_r sur v_{PV} sont assez régulières : les courbes ($v_{PV}-q$) et ($v_{PV}-k$) sont de plus en plus intérieures lorsque τ_r augmente. La forme de la vitesse de véhicules particuliers est proche des résultats obtenus dans le cas du MB lorsque $\tau_r = 0$. Ce résultat n'est pas surprenant parce qu'aucun véhicule ne respecte les consignes. Dans ce cas, le couloir de bus dynamique ne s'active jamais, et les bus agissent comme des MB. Le débit moyen spatial et la densité moyenne spatiale sont plus grands pour une valeur de τ_r faible lorsque v_{PV} est constante.

Au contraire, la vitesse de bus reste constante dans la partie fluide (Figure 34c-d). Cette valeur diminue de manière monotone lorsque τ_r augmente. En plus, le système ADViCe garde les avantages pour les bus dans la partie congestionnée lorsque la valeur de τ_r est plus grande que 0.4. Cela signifie que lorsqu'il y a 40% des véhicules qui ne respectent pas les consignes, le système ADViCe peut bien fonctionner.

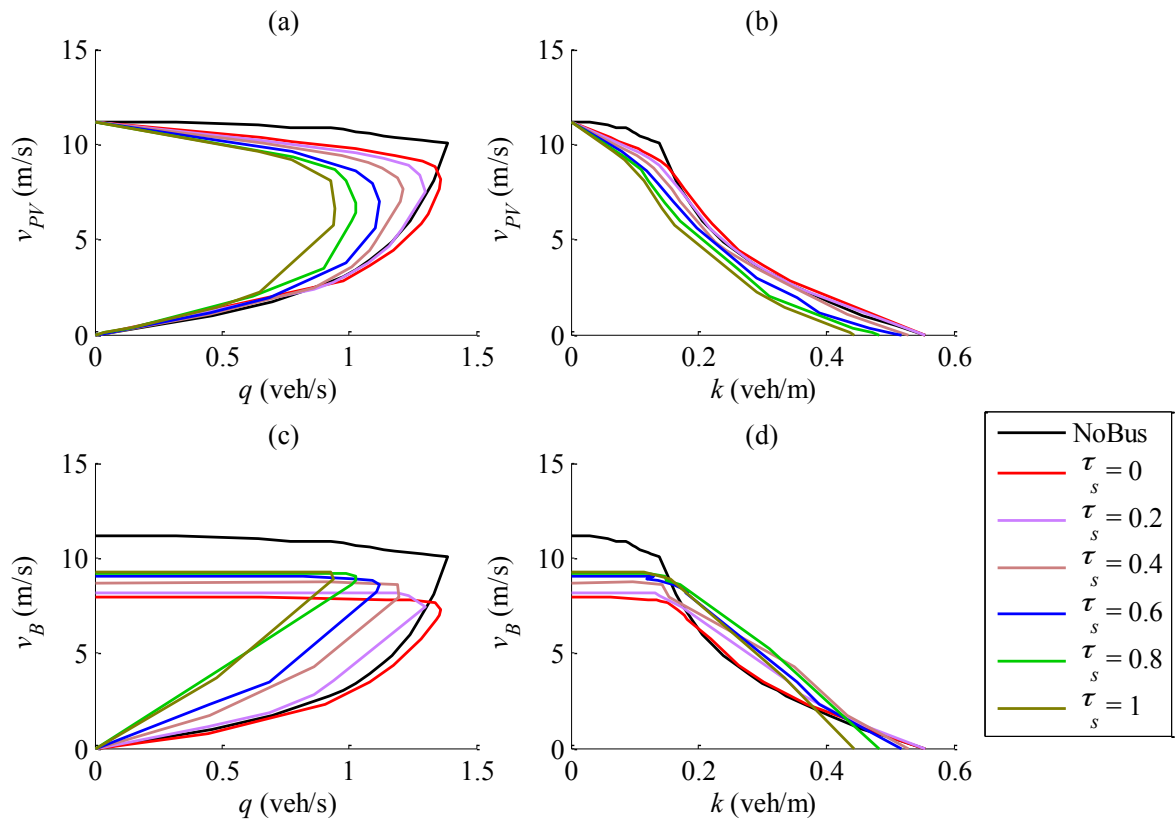


Figure 34 : Influence du taux de respects des consignes : (a) v_{PI} - q , (b) v_{PI} - k , (c) v_B - q et (d) v_B - k .

1.2.2. Évaluations des vitesses moyennes

Dans cette sous-section, les évolutions des vitesses de véhicules particuliers et de bus sont présentées. Nous avons retenus six scénarios de trafic différentes : trois demandes dans la partie fluide et trois niveaux de restriction dans la partie congestionnée.

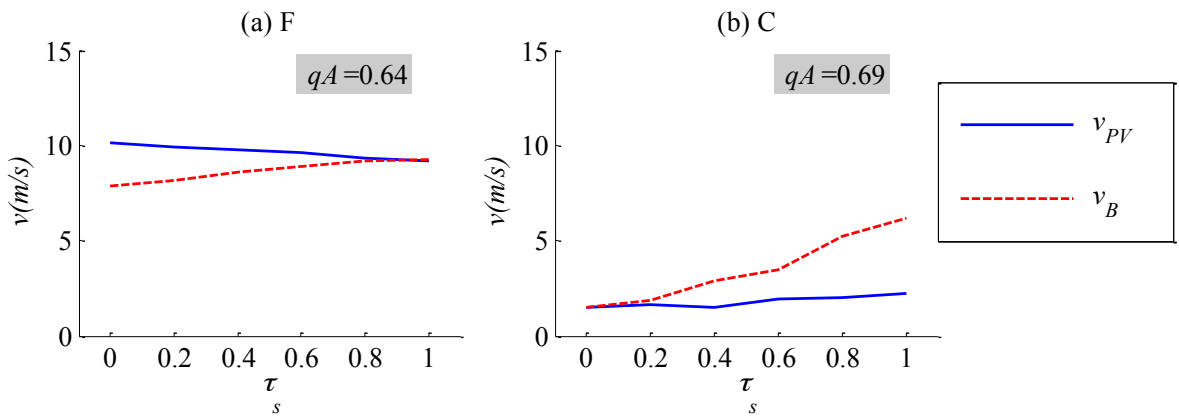


Figure 35 : Vitesses moyennes de véhicules/bus (v_{PV}/v_B) en fonction de τ_r : (a) partie fluide ($q_A = 0.64$ veh/s) et (b) partie congestionnée ($q_A = 0.69$ veh/s).

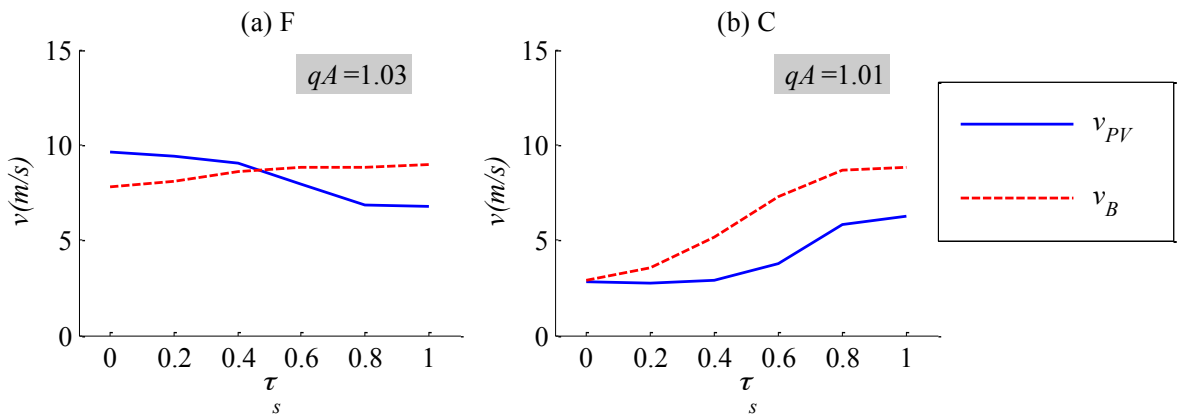


Figure 36 : Vitesses moyennes de véhicules/bus (v_{PV}/v_B) en fonction de τ_r : (a) partie fluide ($q_A = 1.03$ veh/s) et (b) partie congestionnée ($q_A = 1.01$ veh/s).

Pour les demandes faibles (plus petit que la capacité de MB), les vitesses moyennes de véhicules/bus (v_{PV}/v_B) en fonction de τ_r ont différentes tendances dans la partie fluide. v_{PV} diminue de manière monotone lorsque τ_r augmente, et v_B augmente de manière monotone (Figure 35a). À la fin, elles (v_{PV}/v_B) se croisent à la même vitesse moyenne. C'est normal, lorsque $\tau_r = 1$, tous les véhicules respectent les consignes, la situation se dégrade pour les véhicules particuliers, mais le fonctionnement de la ligne de bus est plus performant. Au contraire, elles (v_{PV}/v_B) ont la même tendance dans la partie congestionnée : elles augmentent de manière monotone lorsque τ_r augmente (Figure 35b). L'augmentation de la vitesse moyenne de bus est plus forte (de 1.5 veh/s à 6.2 veh/s pour v_B , et de 1.5 veh/s à 2.2 veh/s pour v_{PV}). En outre, elles commencent à la même vitesse lorsque $\tau_r = 0$.

Lorsque la demande (q_A) atteint une valeur entre la capacité de MB et la capacité restreinte de MB, le point de croisement de v_{PV} et v_B se déplace au milieu dans la partie fluide à $\tau_r = 0.5$ (Figure 36a). Dans la partie congestionnée (Figure 36b), elles (v_{PV}/v_B) gardent la même tendance que lorsque q_A est plus petit que la capacité de MB, sauf que les évolutions des vitesses (v_{PV}/v_B) sont beaucoup plus fortes (de 2.9 veh/s à 8.8 veh/s pour v_B , et de 2.9 veh/s à 6.3 veh/s pour v_{PV}).

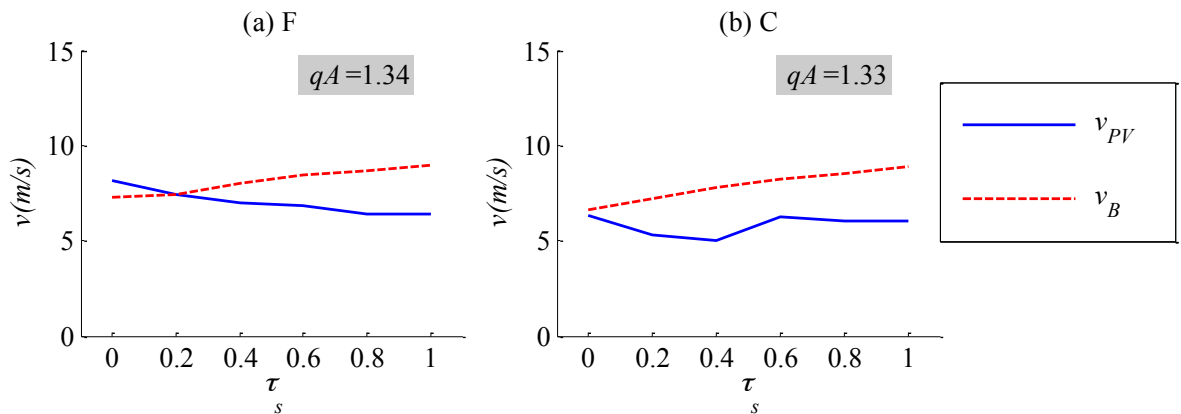


Figure 37 : Vitesses moyennes de véhicules/bus (v_{PV}/v_B) en fonction de τ_r : (a) partie fluide ($q_A = 1.34$ veh/s) et (b) partie congestionnée ($q_A = 1.33$ veh/s).

Ensuite, lorsque la demande (q_A) atteint une valeur entre la capacité restreinte de MB et la capacité du réseau, le point de croisement de v_{PV} et v_B se déplace en avant dans la partie fluide à $\tau_r = 0.2$ (Figure 37a). Dans la partie congestionnée, la vitesse moyenne de véhicules particuliers subit une petite perturbation entre $\tau_r = 0.1$ et $\tau_r = 0.7$, et la vitesse moyenne de bus augmente de $\tau_r = 0$ à $\tau_r = 1$ (Figure 37b). En outre, v_B est toujours plus grand que v_{PV} .

Enfin, les évolutions des vitesses moyennes des véhicules et des bus en fonction de τ_r sont proposées sur la Figure 38. La colonne de droite est la relation ($v_{PV}-\tau_r$) et la colonne de gauche est la relation ($v_B-\tau_r$). Les couleurs des courbes indiquent les demandes de l'entrée principale de boulevard (E). Ces estimations sont réalisées pour toutes les demandes entre 0 et la capacité du réseau dans la partie fluide et dans la partie congestionnée. La vitesse des véhicules varie peu pour des demandes fluides situées dans la plage [6,10] veh/s, et située dans [0,6] veh/s pour la partie congestionnée. La variation de v_{PV} n'est pas toujours monotone pour toutes les demandes. Au contraire, la variation de v_B est presque monotone pour toutes les demandes. Elle varie dans la plage [7, 9.5] veh/s dans la partie fluide, et [0, 9] veh/s dans la partie congestionnée. La plage de variation de v_B est plus petit que celle de v_{PV} dans la partie fluide, mais inverse dans la partie congestionnée.

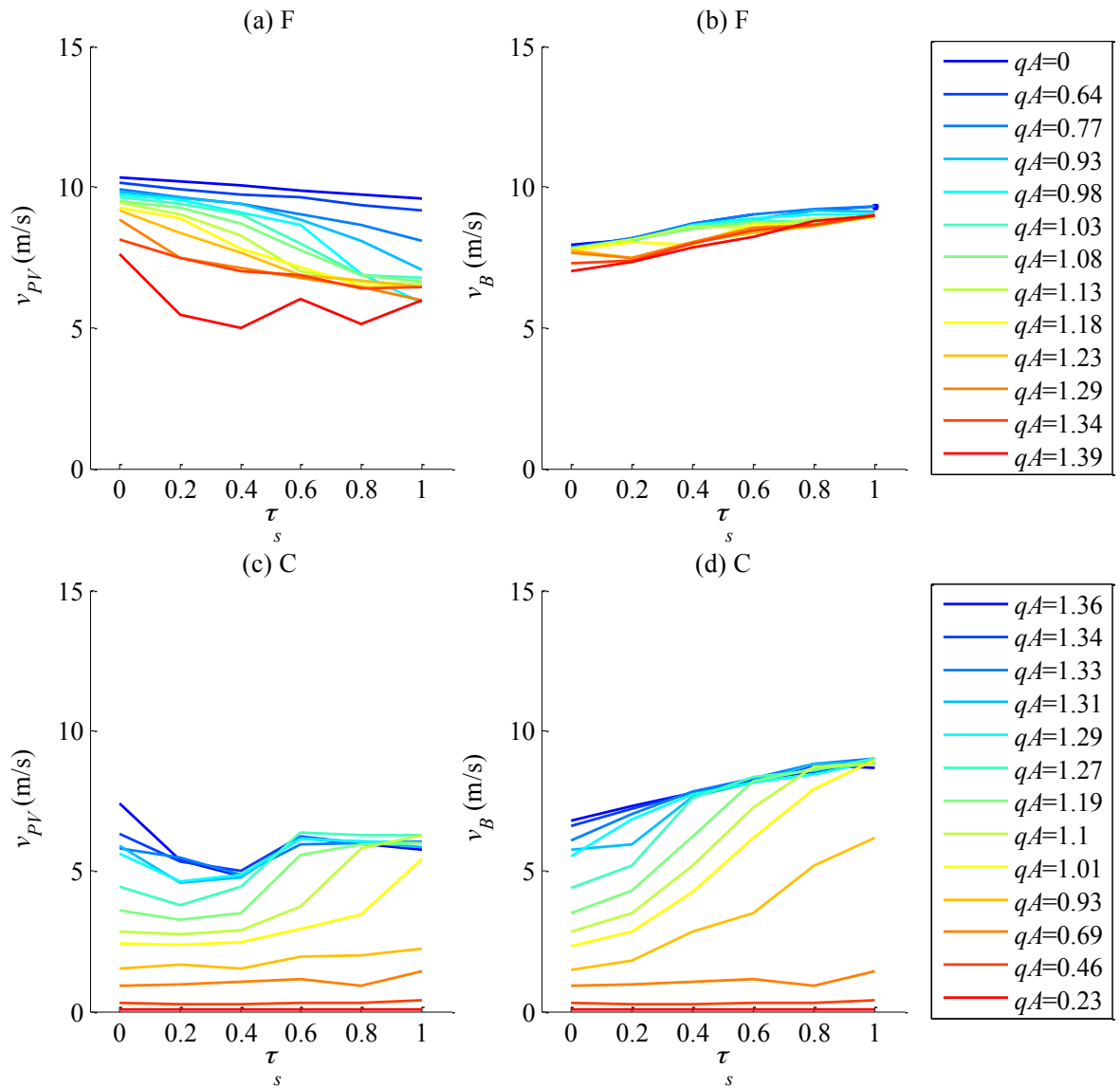


Figure 38 : Évolutions des vitesses moyennes des véhicules (v_{PV}) et des bus (v_B) en fonction de τ , dans la partie fluide : (a) ($v_{PV}-\tau_r$) et (b) ($v_B-\tau_r$), et dans la partie congestionnée : (c) ($v_{PV}-\tau_r$) et (d) ($v_B-\tau_r$).

1.3 Conclusion

Dans cette section, nous avons analysé les effets du non-respect des consignes par les véhicules particulier sur le fonctionnement des couloirs de bus dynamique. Cette étude a été réalisée en simulation. Les résultats nous montrent que l'efficacité des couloirs de bus dynamiques repose sur la volonté des usagers

à libérer la voie pour les bus. La courbe de MFD est de plus en plus intérieure, quand la valeur de τ_r augmente de 0 à 1. L'évolution de la réduction de capacité en fonction de τ_r est presque linéaire. Les diagrammes macroscopiques de vitesse de véhicules particuliers sont assez réguliers : les courbes $(v_{PV}-q)$ et $(v_{PV}-k)$ sont de plus en plus intérieurs lorsque τ_r augmente. Le système ADViCe garde ses avantages pour les bus dans la partie fluide et la partie congestionnée lorsque la valeur de τ_r est plus grande que 0.4. Enfin, il a été montré que lorsque la vitesse moyenne de véhicules particuliers n'est que très peu influencée par le non-respect des consignes contrairement à celle des bus. Le gain pour les véhicules particuliers est donc très faible.

Conclusion

Le travail réalisé dans la tâche 3 a donc permis d'anticiper le fonctionnement de couloirs de bus dynamiques et d'évaluer ex ante ce type de dispositif. Les verrous scientifiques étaient nombreux puisque la littérature ne fournissait aucun outil capable d'atteindre ces objectifs. Le travail s'est donc déroulé en trois étapes : l'étude du déclenchement, l'étude de la propagation et enfin la simulation d'un cas réel.

Concernant le déclenchement, plusieurs modèles génériques ont été proposés afin de déterminer les effets de la mise en œuvre du système ADViCe. Les résultats ont montré l'importance de reproduire finement l'écoulement du trafic afin de prendre en compte correctement les phénomènes mises en œuvre : accélération bornée, changement de voie, chute de capacité, etc. L'approche analytique a aussi permis d'éclairer sur la dynamique à suivre par le simulateur puisqu'aucune donnée n'est disponible pour vérifier sa validité opérationnelle. Enfin, les indicateurs calculés (débit maximal observé, vitesse moyenne des véhicules, etc.) ont montré que les systèmes ADViCe étaient dans un premier temps contre-productif. Cependant, une fois déclenchés, les gains obtenus aux intersections en aval compensent vite ces pertes initiales.

Le fonctionnement d'un boulevard urbain lors de la mise en œuvre d'un couloir de bus dynamique a ensuite été étudié. L'évaluation de la performance a été réalisée à une échelle agrégée à l'aide des MFD. Pour ce faire, il a été nécessaire de développer des méthodes d'estimation dédiées, capables de prendre compte les effets des bus, des systèmes ADViCe et des feux de circulation. Une fois les impacts sur la dynamique du trafic correctement reproduits, une nouvelle relation a été introduite : les passagers-MFD. Cette relation permet de combiner dans la même fonction le comportement des véhicules particuliers et le comportement du système de bus. Ces travaux ont alors permis de comparer deux aménagements différents, le couloir de bus dynamique et le couloir de bus permanent, à la situation où rien n'est fait en faveur des TC.

La dernière partie est consacrée à la simulation d'un cas plus réaliste. Les intersections ont été complexifiées par rapport à l'étude analytique. Le trafic n'est plus reproduit à une échelle agrégée mais les trajectoires individuelles des véhicules sont calculées. Néanmoins, le modèle de trafic mise en œuvre suit la même dynamique que les MFD utilisés pour l'échelle supérieure. Enfin, le recours

à la simulation microscopique a permis de tester la sensibilité de la performance des systèmes ADViCe au taux de respect des consignes par les véhicules particuliers. Cette a montré que le système est dépendant du respect des consignes. De plus, les résultats indiquent que le gain pour les individus contrevenant est très faible tandis que l'impact sur les bus est considérable.

Enfin, les résultats obtenus dans cette tâche vont être mis en relation avec les travaux des autres tâches afin d'identifier des premières préconisations pour une future expérimentation. Une attention particulière sera portée aux dispositifs technologiques pour le déclenchement des couloirs de bus dynamiques, cette phase étant cruciale. De même, des réflexions autour de l'acceptabilité du système et donc du respect des consignes seront menées.

Bibliographie

- (Balke, 1999) Balke, K. (1999). Development and laboratory testing of an intelligent bus priority approach. *In Presented at the meeting of the Transportation Research Board 1999 Mid-year TSP Committee Meeting.*
- (Balke et al., 2000) Balke, K., Urbanik, D. et Conrad, L. (2000). Development and evaluation of transit signal priority strategies. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1727, 12-19.
- (Chiabaut, N. et al., 2012) Chiabaut, N., Xie, X. et 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*, 2315, 182-190.
- (Chiabaut et Leclercq, 2011) Chiabaut, N. et Leclercq, L. (2011). Wave velocity estimation through automatic analysis of cumulative vehicle count curves. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2249, 1-6.
- (Courbon et Leclercq, 2011) Courbon, T. et Leclercq, L. (2011). Cross-comparison of macroscopic fundamental diagram estimation methods. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 20, 417-426.
- (Daganzo, 2005b). Daganzo, C. F. (2005b). A variational formulation of kinematic waves: basic theory and complex boundary conditions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 39, 187-196.
- (Daganzo, 2005c). Daganzo, C. F. (2005c). A variational formulation of kinematic waves: solution methods. *Transportation Research Part B: Methodological*, 39, 934--950.
- (Daganzo et Laval 2005) Daganzo, C.F. et Laval, J. A. (2005). On the numerical treatment of moving bottlenecks. *Transportation Research Part B*, 39, 31-46.
- (Daganzo et Menendez, 2005) Daganzo, C.F. et Menendez, M. (2005). A variational formulation of kinematic waves : bottleneck properties and examples. in *H.S. Mahmassani 16th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, Pergamon, Washington D.C., USA, 345-364.

- (Daganzo et Geroliminis, 2008) Daganzo, C. F. et Geroliminis, N. (2008). An analytical approximation for the macroscopic fundamental diagram of urban traffic. *Transportation Research Part B: Methodological*, 42, 771-781.
- (Edie, 1965) Edie, L.C. (1965). Discussion of traffic stream measurements and definitions. *Proceedings of the 2nd International Symposium on the theory of Road Traffic Flow*, OECD, Paris, 139-154.
- (Eichler et Daganzo, 2006) Eichler, M. et Daganzo, C.F. (2006). Bus lanes with intermittent priority: strategy formula and an evaluation. *Transportation Research Part B: Methodological*, 40(9): 731-744.
- (Gazis et Herman, 1992). Gazis, D.C. and Herman, R., (1992). The moving and "phantom" bottlenecks. *Transportation Science*, 26(3), 223-229.
- (Geroliminis et Daganzo, 2007) Geroliminis, Nikolas et Daganzo, Carlos F. (2007). Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings. *Transportation Research Part B: Methodological*, 42(9), 759—770.
- (Geroliminis et Daganzo, 2008) Geroliminis, N. et Daganzo, C. F. (2008). Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: some experimental findings. *Transportation Research Part B: Methodological*, 42(9), 759-770.
- (Geroliminis et Boyaci, 2012) Geroliminis, N. et Boyaci, B. (2012). The effect of variability of urban system characteristics in the network capacity. *Transportation Research Part B: Methodological*, 46(10), 1607-1623.
- (Herman et Prigogine, 1979) Herman, R. et Prigogine, I. (1979). A two-fluid approach to town traffic. *Science*, 204, 148-151.
- (Kleijnen, 2009) Kleijnen, J.P.C (2009). Kriging metamodeling in simulation: A review. *European Journal of Operational Research*, 192, 707-716.
- (Laval, 2004) Laval, J. A. (2004). Hybrid models of traffic flow : impacts of bounded vehicle accelerations. Thesis of doctor, University of California, Berkeley.
- (Laval et Leclercq, 2008) Laval, J. et Leclercq, L. (2008). Microscopic modeling of the relaxation phenomenon using a macroscopic lane-changing model. *Transportation Research Part B*, 42(6), 511-522.
- (Lebacque et al, 1998) Lebacque et al. (1998) Lebacque, L.P., Lesort, J.B. et Giogi, F. (1998). Introducing buses into first-order macroscopic traffic flow models. *Transportation Research Record*, 1664, 70-79.
- (Leclercq et al, 2004) Leclercq, L., Chanut, S. et Lesort, J.B. (2004). Moving bottlenecks in Lighthill-Whitham-Richards model : a unified theory.

- Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1883, 3-13.
- (Leclercq, 2007) Leclercq, L. (2007) Bounded acceleration close to fixed and moving bottlenecks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 41(3), 309–319.
- (Leclercq et al., 2007) Leclercq, L. Laval, J. A. et Chevallier, E. (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*, London, 735-753.
- (Leclercq et al., 2011) Leclercq, L., Laval, J. A. et Chiabaut, N. (2011). Capacity drops at merges: an endogenous model. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 17, 12–26.
- (Leclercq et Geroliminis, 2013). Leclercq, L., et Geroliminis, N. (2013). Estimating MFDs in simple networks with route choice. *Transportation Research Part B: Methodological*.
- (Lighthill et Whitham 1955) Lighthill, M. et Whitham, J. (1955). 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.
- (Mahmassani et al., 1984) Mahmassani, H. S., Williams, J. C. et 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.
- (Munoz et Daganzo, 2002) Munoz, J.C. et Daganzo, C.F. (2002). Moving bottlenecks: a theory grounded on experimental observation. In *15th International Symposium on Transportation and Traffic Theory (M.A.O. Taylor, ed.)*, Programon-Elsevier, Oxford, United Kingdom, 441-462.
- (Nakanishi, 1997) Nakanishi, Y. (1997). 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.
- (Newell, 1998) Newell, G. F. (1998). A moving bottleneck. *Transportation Research Part B: Methodological*, 32(8), 531 – 537.
- (Newell, 2002). Newell, G.F. (2002). A simplified car-following theory: a low-order model. *Transportation Research Part B*, 36, 195-205.
- (Richards, 1956) Richards, P.I. (1956). Shockwaves on the highway. *Operational Research*, 4, 42-51.

- (Todd et al., 2006) Todd, M. et Barth, M. et Eichler, M. et Daganzo, C. F. et Shaheen, S. A. (2006). Enhanced transit strategies: bus lanes with intermittent priority and ITS technology architectures for TOD enhancement. *Institute of Transportation Studies, University of California-Davis, California*.
- (Viegas, 1997) Viegas, J. (1997). Turn of the century, survival of the compact city, revival of public transport. *Transforming the Port and Transportation Business*, 51-63.
- (Viegas et Lu, 1999) Viegas, J. et Lu, B. (1999). Bus priority with intermittent bus lanes. *In: Proceeding of Seminar D, European Transportation Conference*, Cambridge, UK.
- (Viegas et Lu, 2001) Viegas, J. et Lu, B. (2001). Widening the scope for bus with priority with intermittent bus lanes. *Transportation Planning and Technology*, 24, 87-110.
- (Viegas et Lu, 2004) Viegas, J. et Lu, B. (2004). The intermittent bus lane signal settings within an area. *Transportation Research Part C*, 12, 453-469.
- (Viegas et al., 2007) Viegas, J. et Roque, R. et Lu, B. et Viera, J. (2007). Intermittent bus lane system: demonstration in Lisbon, Portugal. *Paper submitted to the Transportation Research Board Annual Meeting*.
- (Xie et al., 2013) Xie, X., Chiabaut, N. et Leclercq, L. (2013). Multimodal level of service for urban streets: cross-comparison of estimation methods. *The 92th meeting of the Transportation Research Board*.
- (Zyryanov et Mironchuk, 2012) Zyryanov, V. et Mironchuk, A. (2012) Simulation study of intermittent bus lane and bus signal priority strategy. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 48, 1464-1471.