



HAL
open science

Adaptation d'un système de préfeu dans le but de pérenniser les pistes cyclables temporaires. Comment pérenniser la mise en place des pistes cyclables temporaires tout en maintenant un réseau efficace et une congestion acceptable et contrôlée ?

Valentin Beauvoir

► **To cite this version:**

Valentin Beauvoir. Adaptation d'un système de préfeu dans le but de pérenniser les pistes cyclables temporaires. Comment pérenniser la mise en place des pistes cyclables temporaires tout en maintenant un réseau efficace et une congestion acceptable et contrôlée ?. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2020. dumas-03200748

HAL Id: dumas-03200748

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03200748>

Submitted on 16 Apr 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Copyright



Travail de fin d'études – Mémoire de Master :

pour le diplôme d'ingénieur de l'École nationale des travaux publics de l'État

Année 2019-2020

Ingénierie de la Mobilité

Mobilité dans les Mégacités

Soutenu le 3 Septembre 2020

Devant le jury composé de :

- Président du Jury : Ludovic Leclercq
- Maître de TFE : Nicolas Chiabaut
- Experte : Florian Bonet
- Rapporteur : Delphine Lejri

Par

Valentin BEAUVOIR

Adaptation d'un système de préfeu dans le but de pérenniser les pistes cyclables temporaires.

Organisme d'accueil :

Laboratoire d'Ingénierie Circulation et Transports



Travail de Fin d'Etudes – Mémoire de Master :

Pour le diplôme d'ingénieur de l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat

« Comment pérenniser la mise en place des pistes cyclables temporaires tout en maintenant un réseau efficace et une congestion acceptable et contrôlée ? »



Soutenu le 3 septembre 2020 devant le jury :

***Président* : Ludovic Leclercq**

***Expert* : Florian Bonet**

***Rapporteur* : Delphine Lejri**

***Tuteur* : Nicolas Chiabaut**

Valentin Beauvoir
Ingénierie de la Mobilité
Mobilité dans les Mégacités
Promotion 65

Notice Analytique

AUTEUR	
Nom	Valentin
Prénom	Beauvoir
ORGANISME D'ACCUEIL	
Nom de l'organisme et localité	Laboratoire Ingénierie Circulation Transports - LICIT, 3 Rue Maurice Audin, 69120 Vaulx-en-Velin
Nom du tuteur	Nicolas Chiabaut
ANALYSE DU TFE	
Titre	Adaptation d'un système de préfeu dans le but de pérennisation les pistes cyclables temporaires
Title	Adaptation of pre-signal system to make a success of temporary cycle lanes
Résumé	<p>Ce rapport étudie la possibilité de pérennisation des pistes cyclables temporaires qui ont été mises en place pendant le confinement lors de la crise sanitaire dû au Covid-19. La durabilité de ce genre d'infrastructure passe à la fois par une amélioration des conditions de circulation à vélo mais aussi par un maintien d'un niveau de service acceptable pour les voitures. Ce travail étudie donc l'optimum entre laisser de la place aux vélos tout et maintenir une offre acceptable pour les voitures.</p> <p>D'abord, le rapport décrit le contexte de l'apparition de ces pistes cyclables. Les causes qui ont poussé les pouvoirs publics à créer ces aménagements en faveur des cyclistes sont explicités. Cependant, le rapport présente les limites de ces aménagements face à une demande plus importante en voiture. Les pistes cyclables temporaires abaissent la qualité du réseau car elles suppriment une voie pour la circulation des voitures au niveau des intersections. Or la qualité et la performance d'un réseau dépend en grande partie de la gestion des intersections en zone urbaine.</p> <p>Ensuite, une adaptation du système de préfeu est introduite. Cette adaptation à la circulation à vélo en est faite pour proposer une alternative aux pistes cyclables temporaires au niveau des intersections. Cette alternative paraît être une solution pour mieux partager l'espace entre vélos et voitures. Cette utilisation du</p>

	<p>préfeu rentre dans le cadre du concept d'urbanisme tactique qui a pour but de mieux penser l'espace urbain pour rendre la ville plus durable.</p> <p>Enfin, les performances de trois modèles sont étudiées. Leurs performances sont étudiées à travers la sécurité qu'ils permettent aux cyclistes, mais aussi au retard cumulé et à l'évolution de la remontée de file d'attente. Un outil, un abaque, est ensuite créé à partir des paramètres d'entrée du système de préfeu, la demande en entrée du modèle, le ratio du préfeu et sa distance par rapport à l'intersection. Cet abaque est polyvalent puisqu'il peut être utilisé comme outil pour gérer dynamiquement le préfeu ou même prédire l'évolution de la congestion.</p> <p>Les résultats mènent à l'observation qu'un système de préfeu peut être la solution dans certains cas de figure, qu'il permet une meilleure sécurité pour les cyclistes et qu'il améliore le rendement et le débit saturant des intersections par rapport à une piste cyclable temporaire. Les limites et les pistes d'amélioration du travail sont ensuite présentées.</p>
Summary	<p>This study deals with the possibility to make a success of temporary cycle lanes which have been implemented during the lockdown due to Covid-19. The durability of this kind of infrastructure raises two main problems, the improvement of cycling conditions and the quality of the network for cars. This work studies the optimum of giving place to bicycles and keeping a high level of quality for cars.</p> <p>First, the implement of the temporary lanes is described. Authorities have been pushed to implement this cycle urban planning. These causes are explained. However, this work shows the drawbacks of this kind of urban planning. There is a diminution of capacity on intersections and it drives to a reduction of the network quality for cars. It could increase the risk of the congestion. What is more, the network quality depends on the management of intersections.</p> <p>Then, the system of pre-signal, already used for improving the traffic conditions for buses is described. An adaptation of this system is realised to the bicycle traffic. This adaptation appears like an alternative to the temporary cycle lanes. It can be a solution to better share the space between bikes and cars. This idea is</p>

	<p>part of the concept of tactical urban planning which aims the good conditions of lives and a durable city.</p> <p>After, the performance of the three models are tested. In order to help to quantify the performance of the different models, tools are introduced. The total delay and the level of congestions are these tools which help to understand what is going on, during simulations. Car demand are introduced in these three models. The study of the pre-signal parameters drives to the creation of a tool which links car demand, ratio of the pre-signal and the distance between the pre-signal and the traffic signal of the intersection. Several ways to use this tool are given. It could be a good help to foresee the evolution of congestion or to dynamically manage the intersection.</p> <p>Results show that the pre-signal could be a solution in several cases, it improves the bike security for a minimal delay for cars, compared to the temporary cycle lanes. The limits and the ideas to continue this work are presented.</p>		
Mots clés	Piste cyclable, durabilité, préfeu, performance, urbanisme tactique		
Key words	Cycle lanes, success, pre-signal, quality, tactical urban planning		
Termes géographiques			
COLLATION			
	Nb de pages	Nb d'annexes (nb de pages)	Nb de ref biblio.
	94	21	8

Remerciements

Les travaux présentés dans ce rapport ont presque été effectués au Laboratoire d'Ingénierie Circulation Transports (LICIT), unité mixte de recherche de l'ENTPE, à défaut ils ont été réalisés, en grande partie, en télétravail.

Je remercie mon encadrant durant mon stage de Travail de Fin d'Etudes et de Master, Nicolas Chiabaut, pour son expertise et ses connaissances dans le domaine du trafic routier. Je tiens également à le remercier pour ses précieux conseils d'usagers du vélo en ville qui m'ont été utiles au cours de mon travail.

J'adresse également mes remerciements à Monsieur Ludovic Leclercq, Madame Delphine Lejri et Monsieur Florian Bonet pour faire partie du jury qui évaluera mon travail.

Sommaire

Introduction	12
Partie 1 : De l'apparition à la pérennisation des pistes cyclables temporaires ?	13
1.1 Apparition des pistes cyclables temporaires :.....	13
1.1.1 Une alternative aux transports en commun :.....	13
1.1.2 Des métropoles adoptent les pistes cyclables temporaires	14
1.2 Limites des pistes cyclables temporaires :.....	17
1.2.1 Réduction de capacité pour les voitures :.....	17
1.2.2 Dangereux et mouvements incompatibles :.....	18
1.3 Perspectives de pérennisation et objectifs :.....	20
Partie 2 : Adaptation d'un système de préfeu et modélisation	22
2.1 Présentation du système de préfeu :.....	22
2.1.1 Amélioration de l'offre du réseau :.....	22
2.1.2 Amélioration de la progression d'un type de véhicule :.....	25
2.2 Adaptation du préfeu à la circulation à vélo :.....	28
2.3 Modélisation des trois scénarii :.....	31
2.3.1 Hypothèses :.....	31
2.3.2 Méthodologie utilisée :.....	33
2.3.3 Quelques Diagrammes Espace/Temps :.....	34
Partie 3 : Calculs et résultats	38
3.1 Définition des indices de performances :.....	38
3.1.1 Le retard cumulé :.....	38
3.1.2 La remontée de file d'attente :.....	39
3.2 Sensibilité de ces indices de performances :.....	40
3.2.1 Variation de la demande :.....	42
3.2.2 Variation des hypothèses spécifiques au système de préfeu :.....	46
3.2.2.1 Variation du ratio du préfeu :.....	46
3.2.2.2 Variation de la distance inter-feu :.....	51
3.3 Création d'un abaque :.....	53
Partie 4 : Etude de la progression des cyclistes et pistes d'aménagement dynamique	59

4.1 Introduction d'une demande vélo :	59
4.1.1 Demande qui suit une loi uniforme :	59
4.1.2 Demande loi de normale :	60
4.1.3 Demande loi exponentielle :	60
4.2 Impact du préfeu sur la progression des cyclistes :	61
4.2.1 Dans le cadre d'une demande uniforme :	62
4.2.2 Dans le cadre d'une demande normale :	63
4.2.3 Dans le cadre d'une demande exponentielle :	64
4.3 Vers un système dynamique :	66
4.4 Limites :	69
4.5 Pistes de réflexion et perspectives :	69
Bibliographie	73
Annexe	74
Annexe 1 : Photos de pistes cyclables temporaires à Lyon, Avenue de Saxe, Rue Garibaldi et Rue Duquesne.....	74
Annexe 2 : Y. Xuan, C.F. Daganzo et M.J. Cassidy. (2011). « Increasing the capacity of signalized intersections with separate left turn phases »	79
Annexe 3 : Graphiques de l'évolution des retards provoqués par le préfeu en fonction du ratio de celui-ci avec quatre demandes différentes,	93

Liste des illustrations

Listes des figures :

- Figure 1.1 : Schéma de la mise en place des Pistes Cyclables Temporaires
- Figure 1.2 : Cartographie d'un zoom d'un plan des pistes cyclables de la ville de Paris, Source : <https://velo-iledefrance.fr/accueil/cartecyclable/>
- Figure 1.3 : Cartographies sans et avec l'itinéraire des pistes cyclables temporaires déployées à Paris, Source : <https://app.developer.here.com/covid19-bike-lanes-uk-europe/?city=paris>
- Figure 1.4 : Graphique de l'évolution des débits voiture et vélo de la journée du 25 Juin 2020 sur le boulevard Voltaire – Paris, Source : Open Data, France Inter
- Figure 1.5 : Graphique de l'évolution du nombre de cyclistes empruntant, du 11 Juin au 17 Juin 2020, la rue Rivoli – Paris, Source : Open Data, France Inter
- Figure 1.6 : Photographie de la piste cyclable temporaire, Rue Duquesne – Lyon
- Figure 1.7 : Illustration du mouvement de tourne-à-droite des voitures
- Figure 1.8 : Illustration du mouvement de tourne-à-gauche des vélos
- Figure 1.9 : Illustration de la chronologie de la mise en place des pistes cyclables temporaires jusqu'au déconfinement sans restriction de déplacement

- Figure 2.1 : Schéma d'un système de préfeu pour améliorer le tourne-à-gauche, Source : [2.1] - « Increasing the capacity of signalized intersections with separate left turn phases »
- Figure 2.2 : Schéma de différents aménagements possibles des voies tandem de circulation, Source : [2.1] - « Increasing the capacity of signalized intersections with separate left turn phases »
- Figure 2.3 : Graphique d'un exemple d'abaques pour un même espace mais aménagé de manière différente ;
 - : 1 voie tandem en aval du préfeu
 - : 2 voies tandem en aval du préfeuSource : [2.1] - « Increasing the capacity of signalized intersections with separate left turn phases »
- Figure 2.4 : Schémas des deux aménagements donc l'abaque est montré dans la figure 2.3
- Figure 2.5 : Schéma d'un dispositif dynamique donnant la priorité aux Bus, Source : [2.3] – « Bus priority at signalized intersections with single-lane approaches : A novel pre-signal strategy »
- Figure 2.6 : Schéma de trois stratégies d'aménagement différentes, Source : [2.2] - « Adaptive Control Algorithm to Provide Bus Priority with a Pre-signal »
- Figure 2.7 : Schéma de l'adaptation d'un système de préfeu aux pistes cyclables temporaires
- Figure 2.8 : Schéma de l'adaptation d'un système de préfeu aux pistes cyclables temporaires, phase de vert pour les voitures
- Figure 2.9 : Schéma de l'adaptation d'un système de préfeu aux pistes cyclables temporaires, phase de vert pour les vélos
- Figure 2.10 : Schéma des trois modèles étudiés
- Figure 2.11 : Diagramme Fondamental – 1 et 2 voies
- Figure 2.12 : Schéma de la méthodologie appliquée
- Figure 2.13 : Diagramme Espace/Temps d'un exemple d'un pour une demande à capacité dans un scénario avec préfeu actif et deux voies tandem en aval du préfeu

- Figure 2.14 : Diagramme Espace/Temps d'un exemple pour une demande à capacité dans un scénario avec une voie dédiée aux vélos sur tout le tronçon
- Figure 2.15 : Diagramme Espace/Temps d'un exemple pour une demande de niveau A dans un scénario avec préfeu actif et deux voies tandem en aval du préfeu
- Figure 2.16 : Diagramme Espace/Temps d'un exemple pour une demande de niveau A dans un scénario avec une voie dédiée aux vélos sur tout le tronçon

- Figure 3.1 : Graphique montrant l'évolution des courbes de véhicules cumulés entrant et sortant, schématisant le retard cumulé
- Figure 3.2 : Graphique de l'évolution des courbes des courbes de véhicules cumulés entrant et sortant et évolution de la remontée de file
- Figure 3.3 : Schéma de la méthodologie appliquée
- Figure 3.4 : Schéma des différents types d'hypothèses
- Figure 3.5 : Graphique de l'évolution du retard cumulé en fonction des variations du niveau de demande, pour une simulation de 3 heures et 20 minutes - 100 périodes de 2 minutes
- Figure 3.6 : Graphique de l'évolution du retard cumulé en fonction des variations du niveau de demande, pour une simulation de 6 minutes - 3 périodes de 2 minutes
- Figure 3.7 : Graphique de l'évolution des Courbes de véhicules cumulés :
 - o En entrée du tronçon
 - o En sortie du tronçon dans un scénario avec deux voies voitures, « tout voiture »
 - o En sortie du tronçon dans un scénario avec utilisation d'un préfeu avec un ratio $R = 0,5$
 - o En sortie du tronçon dans un scénario avec une voie dédiée aux cyclistes sur la totalité du tronçon
- Figure 3.8 : Graphique de l'évolution des Courbes de véhicules cumulés :
 - o En entrée du tronçon
 - o En sortie du tronçon dans un scénario avec deux voies voitures (« tout voiture »)
 - o En sortie du tronçon dans un scénario avec utilisation d'un préfeu avec un ratio $R = 0,6$
 - o En sortie du tronçon dans un scénario avec une voie dédiée aux cyclistes sur la totalité du tronçon
- Figure 3.9 : Graphique de l'évolution des Courbes de véhicules cumulés :
 - o En entrée du tronçon
 - o En sortie du tronçon dans un scénario avec deux voies voitures (« tout voiture »)
 - o En sortie du tronçon dans un scénario avec utilisation d'un préfeu avec un ratio $R = 0,7$
 - o En sortie du tronçon dans un scénario avec une voie dédiée aux cyclistes sur la totalité du tronçon
- Figure 3.10 : Graphique de l'évolution du retard provoqué par le préfeu en fonction du ratio du préfeu pour plusieurs niveaux de demande sur une simulation de 3 heures et 20 minutes - 100 périodes de 2 minutes
- Figure 3.11 : Graphique de l'évolution du retard provoqué par le préfeu en fonction de la distance inter-feu sur une simulation de 3 heures et 20 minutes – 100 périodes de 2 minutes
- Figure 3.12 : Graphique de l'évolution du retard provoqué par le préfeu en fonction de la distance inter-feu sur une simulation de 6 minutes – 3 périodes de 2 minutes
- Figure 3.13 : Abaque des couples distance inter-feu/ratio pour lesquels la congestion atteint le début de tronçon pour un niveau de demande donné, simulation sur une durée de 20 minutes - 10 périodes de 2 minutes
- Figure 3.14 : Abaque des couples distance inter-feu/ratio pour lesquels la congestion atteint le début de tronçon pour un niveau de demande donné, simulation sur une durée de 1 heure - 30 périodes de 2 minutes

- Figure 3.15 : Abaque des couples distance inter-feu/ratio pour lesquels la congestion atteint le début de tronçon pour un niveau de demande donné, simulation sur une durée de 1 heure et 40 minutes - 50 périodes de 2 minutes
- Figure 3.16 : Abaque distance-inter feu/ratio sur lequel sont introduites les zones d'incompatibilité vélo dans le cadre d'une circulation limitée à 30 et à 50 km/h
- Figure 3.17 : Abaque explicitant les couples distance inter-feu/ratio pour lesquels la congestion atteint le début de tronçon pour un niveau de demande donné sur lequel sont introduites les zones d'incompatibilité vélo dans le cadre d'une circulation limitée à 30 et à 50 km/h, simulation sur une durée de 20 minutes - 10 périodes de 2 minutes

- Figure 4.1 : Graphique de la courbe de vélos cumulés pour une demande vélo qui suit une loi uniforme
- Figure 4.2 : Graphique des courbes de vélos cumulés et de demande vélo qui suit une loi normale
- Figure 4.3 : Graphique des courbes de véhicules cumulés et de demandes vélo qui suit une loi exponentielle, pour 1 et 3 motifs
- Figure 4.4 : Graphique de l'évolution des courbes de vélos cumulés pour une demande qui suit une loi uniforme
- Figure 4.5 : Graphique de l'évolution du retard provoqué en fonction du Ratio R face à une demande qui suit une loi uniforme
- Figure 4.6 : Graphique de l'évolution des courbes de vélos cumulés pour une demande qui suit une loi normale
- Figure 4.7 : Graphique de l'évolution du retard provoqué en fonction du Ratio R face à une demande qui suit une loi normale
- Figure 4.8 : Graphique de l'évolution des courbes de vélos cumulés pour une demande qui suit une loi exponentielle
- Figure 4.9 : Graphique de l'évolution du retard provoqué en fonction du Ratio R face à une demande qui suit une loi exponentielle
- Figure 4.10 : Graphique de l'évolution du retard provoqué en fonction du Ratio R face aux trois demandes étudiées
- Figure 4.11 : Présentation du panneau M12 et de ses variantes

Listes des tableaux :

- Tableau 2.1 : Tableau des cas présentés par la figure 2.2
- Tableau 2.2 : Tableau des hypothèses utiles à la définition de la modélisation
- Tableau 2.3 : Tableau des entrées et des scénarii utilisés pour les exemples qui suivent
- Tableau 3.1 : Tableau des cas étudiés sur le graphique de la figure 3.5
- Tableau 3.2 : Tableau des cas étudiés sur le graphique de la figure 3.6

Introduction

Au cours du confinement, imposé par le gouvernement lors de la crise sanitaire provoquée par le Covid-19, les pouvoirs publics ont dû chercher des solutions pour préparer le déconfinement. Ils avaient pour objectif le respect des règles sanitaires. Une des principales inquiétudes des pouvoirs publics était le regroupement de personnes dans un espace clos. Les transports en commun ont logiquement été pointés du doigt car ils peuvent se retrouver rapidement face à une forte densité de personnes dans des espaces confinés. Afin de contrecarrer cet effet, les autorités ont cherché des alternatives à se déplacer en transport en commun et ont procédé à l'amélioration des conditions de ces modes de transport alternatifs. Le but étant au maximum de venir concurrencer l'offre des transports en commun. La circulation à vélo a rapidement été prônée par les pouvoirs publics. Pour favoriser ce mode de déplacement, des pistes cyclables temporaires ont été aménagées sur le territoire afin d'offrir plus d'espace aux cyclistes. Ces pistes cyclables temporaires ont été mises en place pour répondre à un besoin de déplacement tout en respectant les consignes sanitaires et notamment celle de la distance entre les usagers. Ce type de mesure s'inscrit dans une volonté plus globale des villes, qui cherchent notamment à optimiser leur espace urbain pour le rendre plus agréable. En effet, ces mesures ne sont pas dans l'optique d'améliorer les conditions de circulation en voiture, qui était au goût du jour auparavant mais disparaît peu à peu avec le temps. Elles vont dans le sens du partage de l'espace et d'un équilibre plus juste entre les différents modes de transport, notamment en mettant en valeur les modes actifs. C'est-à-dire la diminution de l'espace réservé aux voitures au profit de l'augmentation de celui réservé pour les modes plus respectueux de l'environnement.

Cependant cela mène à plusieurs interrogations, puisqu'avec le déploiement des pistes cyclables temporaires, la place de la voiture a été réduite. En effet, avec moins de capacité, le trafic tend à être plus vite congestionné. En zone urbaine, ce sont les intersections qui conditionnent le débit de saturation. Un réseau efficace est donc un réseau qui offre un maximum de voies aux véhicules s'engageant dans l'intersection. La gestion de ces zones d'intersection est donc un point clefs de l'efficacité du réseau. Il est important de conserver un niveau de service satisfaisant et acceptable pour les voitures afin ne pas engorger et congestionner la totalité du réseau.

Ainsi, ces enjeux conduisent à réfléchir sur l'optimum à trouver entre l'amélioration des conditions de circulation à vélo et une maîtrise de la congestion des voitures. L'amélioration des conditions de circulation à vélo induit à la fois une meilleure sécurité des déplacements des cyclistes et une diminution des temps de parcours de ces derniers. L'optimum se trouve donc entre laisser le plus de place possible au vélo, afin de tendre vers un équilibre entre les modes de transport, et maintenir un niveau de service satisfaisant pour les voitures afin ne pas tomber dans un scénario de congestion globale. C'est pourquoi une problématique autour de la durabilité et de la pérennité de ces pistes se dégage : « Comment pérenniser la mise en place des pistes cyclables temporaires tout en maintenant un réseau efficace et une congestion acceptable et contrôlée ? »

Afin de répondre à cette problématique, le rapport se décompose en plusieurs parties dont la première est dédiée à la mise en contexte de l'apparition des pistes cyclables sur le territoire. La deuxième partie expose une adaptation d'un système de préfeu afin d'apporter une alternative au modèle des pistes cyclables temporaires. La troisième partie est consacrée aux calculs et aux résultats permettant de tester la pertinence de cette adaptation. Et enfin la quatrième partie permet de s'intéresser plus en détails à la circulation des cyclistes dans chaque modèle et évoque des manières de rendre dynamique l'infrastructure.

Partie 1 :

De l'apparition à la pérennisation des pistes cyclables temporaires ?

1.1 Apparition des pistes cyclables temporaires :

1.1.1 Une alternative aux transports en commun :

Lors du confinement qui a été décrété du 17 Mars au 11 Mai, les pouvoirs publics ont dû trouver des solutions pour préparer le déconfinement. Une des principales problématiques de ces derniers était d'offrir des conditions de transport qui respectaient les mesures sanitaires et notamment la mesure de distance entre les usagers. Pour préparer au mieux le déconfinement, le raisonnement des pouvoirs publics s'est effectué par étape. Le premier objectif a donc été de réduire significativement les risques de formation d'une trop grande densité de personnes dans un espace confiné. Les transports en commun ont donc été logiquement pointés du doigt puisqu'il s'agit d'espaces souvent clos dans lesquels la distance entre les usagers n'est pas respectée. En temps normal, lors des périodes de forte demande, il y a facilement apparition d'une forte densité de personnes dans un espace clos : ce qui est à proscrire lors du déconfinement. Pour contrer ce problème les pouvoirs publics ont décidé d'offrir des solutions alternatives aux transports en commun en améliorant les conditions de circulation des autres moyens de transport. Leur second objectif est d'améliorer ces solutions alternatives pour qu'elles deviennent plus concurrentielles aux transports en commun. Les personnes doivent avoir le choix entre plusieurs modes de transport efficaces pour qu'elles soient dissuadées de prendre les transports en communs, qui sont susceptibles d'être engorgés. Le vélo est apparu comme une alternative viable pouvant facilement se mettre en concurrence avec les transports en commun. C'est pourquoi la circulation à vélo a donc été mise en avant par les autorités locales et encouragée pendant la période de déconfinement. Cependant, une trop forte demande de circulation à vélo aurait pu également mener à des formations de groupes de personnes à forte densité, ce qui aurait été contraire au but recherché. En effet, la place réservée aux cyclistes sur la voirie est souvent faible et une trop forte demande entraînerait l'apparition de pelotons de cyclistes. Ce qui réduirait considérablement les distances entre usagers et serait contraire au respect des règles sanitaires.

Ainsi, pour à la fois promouvoir et améliorer la circulation à vélo, tout en évitant l'infraction des règles de distance entre les cyclistes, les pouvoirs publics ont décidé de mettre en place des pistes cyclables temporaires : ils ont procédé à l'élargissement de bandes cyclables déjà existantes ou à la création de pistes sur un site dépourvu auparavant d'un aménagement cyclable. Cette mesure remplit les différents objectifs. Les pistes cyclables temporaires profitent de l'espace urbain, non utilisé par les voitures. En effet, les voitures sont en moins grand nombre car la population est fortement restreinte au niveau de ses déplacements. Ces aménagements rentrent dans le cadre de l'urbanisme tactique. Il s'agit d'un concept qui permet de mieux penser et de mieux utiliser l'espace offert dans les zones urbaines pour rendre l'espace plus convivial et la ville plus durable. Ces pistes cyclables temporaires apparaissent sur des boulevards urbains où plusieurs voies de circulation sont habituellement réservées aux voitures. Une des voies voitures est alors supprimée au profit de la création d'une voie réservée aux vélos. Cette voie est également souvent réservée aux bus. Les cyclistes et les bus cohabitent dorénavant sur une seule et même voie de largeur au moins égale à la largeur d'une voie voiture classique et même souvent égale à la largeur d'une voie voiture classique plus celle d'une bande cyclable. Cela permet de respecter la distance réglementaire entre les usagers qui empruntent la piste, d'améliorer les conditions de circulation des cyclistes et donc de désengorger les transports en commun. Le schéma suivant montre la situation avant et celle après la mise en place de la mesure

sur un boulevard urbain qui comptait à la base deux voies réservées pour les voitures et une bande cyclable dans le même sens de circulation.

Mise en place des Pistes Cyclables Temporaires

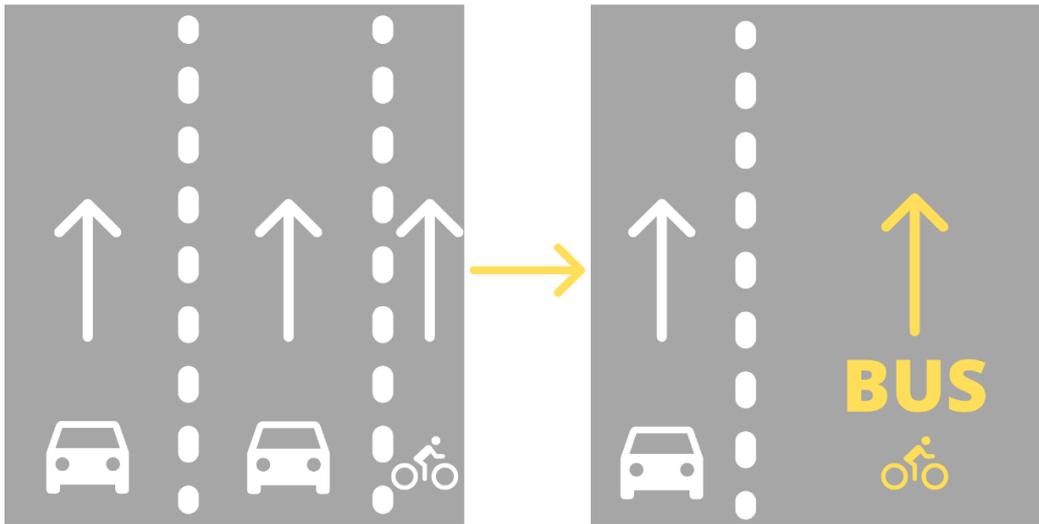


Figure 1.1 : Schéma de la mise en place des Pistes Cyclables Temporaires

Les vélos et les bus cohabitent sur l'espace créé. Cette infrastructure utilise ainsi la baisse de demande voiture pour réduire l'espace réservé pour celles-ci et répartir cet espace entre les vélos et les bus. Des photographies de pistes cyclables temporaires sont présentes en annexe (Annexe 1). Il s'agit de photographies prises à Lyon, avenue de Saxe, rue Duquesne et rue Garibaldi.

1.1.2 Des métropoles adoptent les pistes cyclables temporaires

Beaucoup de villes sensibles à l'urbanisme tactique et soucieuses des conditions de circulation à vélo, adoptent ces mesures durant le confinement et déploient ces nouvelles pistes cyclables sur leur territoire. A l'image de ce déploiement, les pouvoirs publics décident également de la piétonnisation temporaire de la voirie de certaines zones bien précises. Ces piétonnisations visent à permettre aux cafés et restaurants d'agrandir la surface de leurs terrasses pour ainsi respecter les règles sanitaires, tout en maintenant leurs niveaux de service habituels. Cela a pour but d'aider financièrement les commerçants durant la crise qu'ils traversent, puisqu'ils peuvent se rapprocher du nombre de couverts servis avant la crise sanitaire. La voirie leur est ainsi réservée sur des plages horaires en soirée, ce qui ne pénalise que très peu les automobilistes, la demande voiture étant très faible durant les périodes de piétonnisation. L'idée est donc vraiment d'optimiser l'espace urbain pour maximiser son utilisation et rendre plus agréable la ville. La demande voiture en journée est importante, il n'y a pas piétonnisation, en soirée elle est très faible, il y a alors piétonnisation pour agrandir la surface des terrasses des cafés et restaurants. De la même manière, en suivant le concept d'urbanisme tactique, les villes de Paris, Lyon, Toulouse, Montpellier font partie de ces villes qui véhiculent l'alternative de la circulation à vélo aux habitants devant se déplacer à la fin du confinement. Ces métropoles complètent alors leur réseau de pistes cyclables déjà existantes par l'aménagement de ces nouvelles pistes. Ces dernières sont implantées sur des grands boulevards où la place est assez conséquente pour y introduire cet aménagement. Elles sont également mises en place sur des itinéraires fréquentés par les cyclistes ou de manière à boucler le maillage des pistes cyclables.

La carte suivante montre les différents types de pistes cyclables de la ville de Paris. Les pistes cyclables temporaires sont placées de façon à lier le réseau cyclable déjà existant et créer un maillage

plus fin. Il a notamment été remarqué, que les nouvelles pistes permettaient de relier le réseau qui est au nord de la Seine et le réseau qui est au Sud.

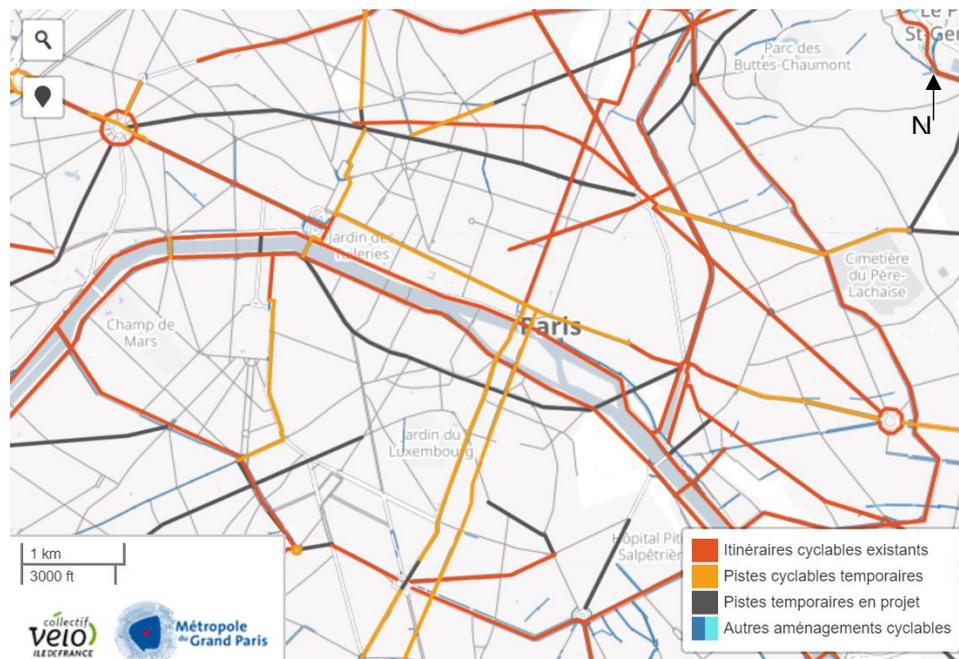


Figure 1.2 : Cartographie d'un zoom d'un plan des pistes cyclables de la ville de Paris,

Source : <https://velo-iledefrance.fr/accueil/cartcyclable/>

En complément de cette carte, la figure suivante montre l'apparition des pistes cyclables temporaires dans la ville de Paris. En effet, elle décrit la situation avant et la situation après la mise en place de ces pistes temporaires.

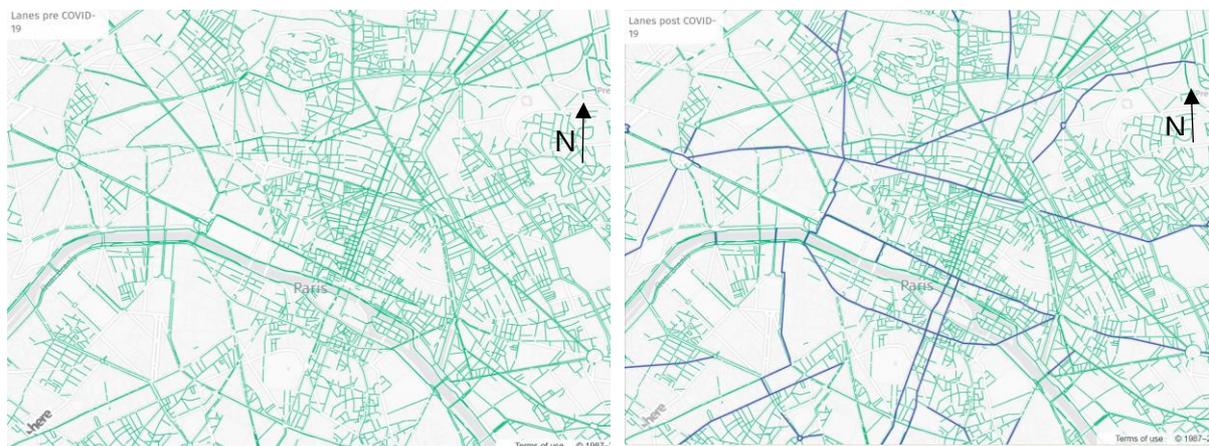


Figure 1.3 : Cartographies sans et avec l'itinéraire des pistes cyclables temporaires déployées à Paris,

Source : <https://app.developer.here.com/covid19-bike-lanes-uk-europe/?city=paris>

Le déploiement de ces pistes permet de créer un maillage plus fin de la zone, ce qui accroît l'attractivité de ce mode de déplacement. Ce qui est exactement la volonté de la ville de Paris qui veut montrer aux habitants qu'une alternative est bien possible à vélo. Le site fournit également la distance totale de ces aménagements cyclables, qui avoisine 70 kilomètres. C'est la ville, en Europe, qui a le plus aménager de voies cyclables pendant le confinement. Dans les autres grandes villes d'Europe, comme Berlin, Londres ou Milan, ces distances sont plutôt de l'ordre de 15 à 25 kilomètres. Cela

montre l'envie des pouvoirs publics parisiens de démocratiser cette pratique et d'utiliser cette période pour la rendre durable et pérenne.

De plus, les chiffres mis en ligne par la ville de Paris, disponibles en open data, montrent la réponse des habitants face à la création de ces pistes cyclables temporaires et plus largement la réelle alternative que peut apporter la circulation à vélo. En effet, les données montrent que le flux vélo atteint des valeurs de trente unités par minute à certains moments de la journée. Ce qui prouve que la population a bien compris l'appel du pieds des pouvoirs publics. La circulation à vélo, à Paris, a atteint des sommets lors du déconfinement. Le graphique suivant montre l'évolution des débits voiture et vélo sur le boulevard Voltaire. Ce boulevard relie Nation à l'est et République à l'ouest. D'après la *figure 1.2*, un aménagement cyclable était déjà présent sur ce site avant le confinement. Le graphique suivant confirme que pendant les plages horaires de 8h à 9h et de 17h à 20h, le débit vélo est supérieur au débit voiture.

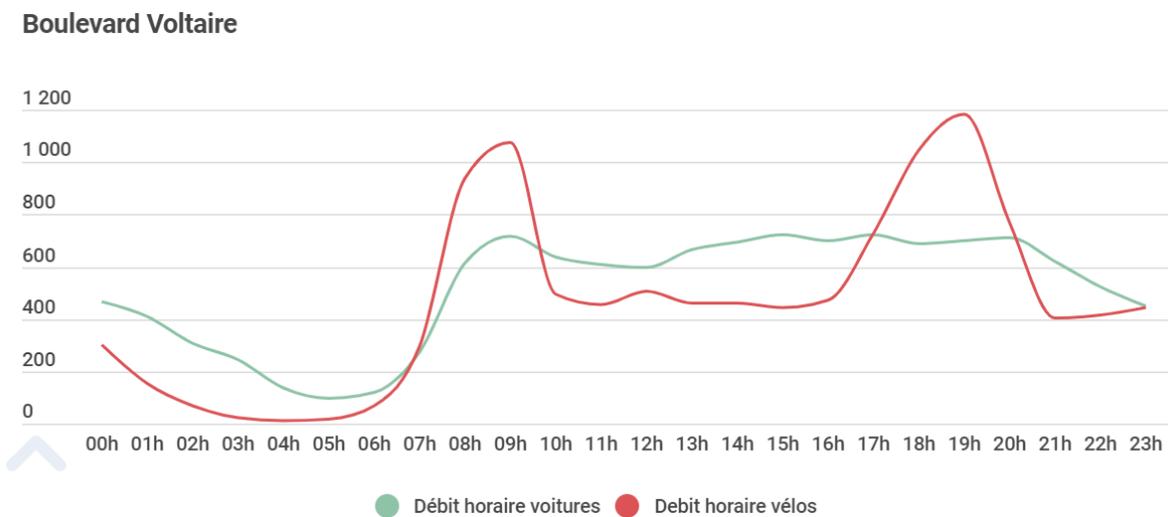


Figure 1.4 : Graphique de l'évolution des débits voiture et vélo de la journée du 25 Juin 2020 sur le boulevard Voltaire – Paris, Source : Open Data, France Inter

Un autre exemple, vraiment très frappant, est l'évolution du nombre de cyclistes par jour sur la rue Rivoli. Une piste cyclable temporaire a été déployée sur cette rue qui s'étend de Bastille à l'est jusqu'au jardin des tuileries à l'ouest, qui peut être remarquée sur la *figure 1.4*. Cette rue longe la Seine juste au Nord. Le nombre de cyclistes par jour empruntant cet itinéraire est vraiment très impressionnant puisqu'il dépasse les 14 000 unités, le mardi 16 et le mercredi 17 Juin. Ce débit est équivalent à un débit de 20 unités par minute de 8h le matin à 20h le soir.



Figure 1.5 : Graphique de l'évolution du nombre de cyclistes empruntant, du 11 Juin au 17 Juin 2020, la rue Rivoli – Paris, Source : Open Data, France Inter

De même, la métropole de Lyon a mis en place, lors du confinement, des pistes cyclables temporaires. Pour comparaison, la ville a au total aménagé 10 kilomètres de voies cyclables, Paris en a aménagé sept fois plus. A Lyon, une de ces principales pistes permet d'accéder au tunnel mode doux, situé en dessous de Croix-Rousse, du côté est. En effet, la rue Duquesne est un itinéraire très fréquenté par les cyclistes empruntant le tunnel. De plus cette rue est composée de deux voies dans chaque sens de circulation. Ce sont donc les raisons pour lesquelles, il s'agit d'une très bonne opération de la part de la métropole d'avoir mis en place une piste cyclable temporaire sur cette rue. La photographie suivante montre la piste cyclable temporaire déployée rue Duquesne à Lyon. Il s'agit d'un passage de deux à une voie de circulation pour les voitures, comme le montre le schéma de la *figure 1.1*. L'aménagement a été réalisé dans les deux sens de circulation.



Figure 1.6 : Photographie de la piste cyclable temporaire, Rue Duquesne – Lyon

Les autres pistes récemment implantées se trouvent sur avenue de Saxe, rue Garibaldi, avenue Jean Jaurès, quai Charles de Gaulle, etc.

1.2 Limites des pistes cyclables temporaires :

Peu à peu, le déconfinement s'est assoupli, laissant les citoyens se déplacer avec de moins en moins de restrictions. Du fait de ce déconfinement, les déplacements ont augmenté. Les demandes voiture et vélo se sont amplifiées et cela a donc exposé les limites que pouvaient avoir les pistes cyclables temporaires. Or, si les pistes cyclables temporaires veulent être pérennisées, elles doivent concilier un niveau de service satisfaisant pour les voitures tout en assurant de bonnes conditions de circulation à vélo. C'est l'enjeu principal afin de mettre en place de tels aménagements en faveur de la circulation à vélo et de les voir se pérenniser.

1.2.1 Réduction de capacité pour les voitures :

La mise en place des pistes cyclables temporaires a provoqué la diminution de l'espace réservé aux voitures. Cette diminution est visible sur la *figure 1.1* et la *figure 1.6*, où le nombre de voies est passé de deux à une unique. L'instauration de ces mesures entraîne ainsi une perte d'espace de stockage des véhicules. De plus, cette réduction du nombre de voies a des conséquences sur le débit de saturation. Les intersections sont les éléments qui limitent le plus le débit en zone urbaine. Ainsi le fait de réduire le nombre de voies disponibles aux véhicules au niveau des intersections provoquent la réduction du débit saturation. La saturation du réseau est proportionnelle aux nombres de voies

disponibles pour les voitures à ce niveau. Donc réduire ce nombre de voies provoque une chute du débit pour lequel il y a saturation. Dans la littérature, il est expliqué que le nombre et la position de chaque feu du réseau doivent être connus pour obtenir le MFD du réseau. Ces données, qui sont relatives aux feux doivent donc être présentes dans les entrées des modèles, afin d'obtenir le MFD [1.1]. Cela montre que les feux et les intersections conditionnent le trafic en ville. Le réseau est donc moins performant pour les voitures dans un système avec piste cyclable temporaire, qui se retrouvent sur un nombre de voie inférieur. Le débit de saturation est ainsi plus vite atteint avec la présence de ces pistes cyclables, ce qui provoque une congestion plus fréquente.

De plus, l'implantation des pistes cyclables temporaires provoque un découpage de l'espace public de manière statique. Il s'agit donc d'un système qui ne s'adapte pas à la demande. Or, cette demande est évolutive et présente des variations au cours de la journée. Les heures de pointe des demandes voiture et vélo ne coïncident pas exactement au cours de la journée. Un découpage dynamique de l'espace au niveau des intersections permet d'adapter l'offre à la demande. Ainsi la capacité offerte à chaque moyen de transport pourrait varier en fonction de la demande de ce moyen de transport.

1.2.2 Dangers et mouvements incompatibles :

La performance des conditions de circulation à vélo s'évalue à la fois en prenant en compte le temps de parcours des cyclistes mais aussi la sécurité des cyclistes. Or, face à l'augmentation de la demande, le trafic s'est densifié au cours des semaines après le déconfinement et les pistes cyclables temporaires n'échappent pas à cette densification. Cela provoque une hausse des situations de conflit entre les vélos et les voitures. Une situation de conflit est une situation dans laquelle deux usagers ne peuvent pas réaliser leurs chemins sans croiser ou entrer en collision avec l'autre. De plus dans la littérature, il apparaît qu'en Chine, par exemple, les causes principales des accidents entre voiture et vélo sont dues à un manquement de la priorité de la part des vélos, à l'imprudence des véhicules, mais aussi au changement soudain de direction des vélos [1.2]. D'autant plus que ces changements de direction soudains sont parfois très mal communiqués par les cyclistes qui ne font pas les efforts nécessaires à la bonne compréhension de leurs intentions. Il apparaît également qu'en Belgique, un grand nombre des accidents des vélos arrivent sur des pistes cyclables [1.3]. Cela montre que réserver un espace pour la circulation des vélos n'exclut en aucun cas les accidents et ne provoque pas la disparition de la dangerosité. Sur ce genre d'infrastructures où les cyclistes bénéficient d'un espace réservé, les pertes d'attention sont parfois plus fréquentes chez les cyclistes car ils se sentent en sécurité. Et c'est justement ce sentiment de sécurité qui est dangereux car il perturbe fortement leur attention. Les travaux d'Estelle Chevalier traitent des conflits d'insertion et notamment dans les ronds-points. Elle montre que les modèles habituels, comme le modèle LWR, ne permet pas la résolution de ces derniers. Elle déduit donc un modèle, en utilisant des études probabilistes [1.4]. Ceci montre que les conflits sont des événements assez particuliers du trafic, qui ne peuvent pas être résolus par des modèles courants. Ici, dans le cas des pistes cyclables temporaires, les situations de conflit sont nombreuses et les mouvements incompatibles se retrouvent au niveau des intersections, au moment où l'attention est souvent soumise à rude épreuve. Deux situations de mouvements incompatibles sont présentées par les illustrations suivantes.

Le tourne-à-droite des voitures

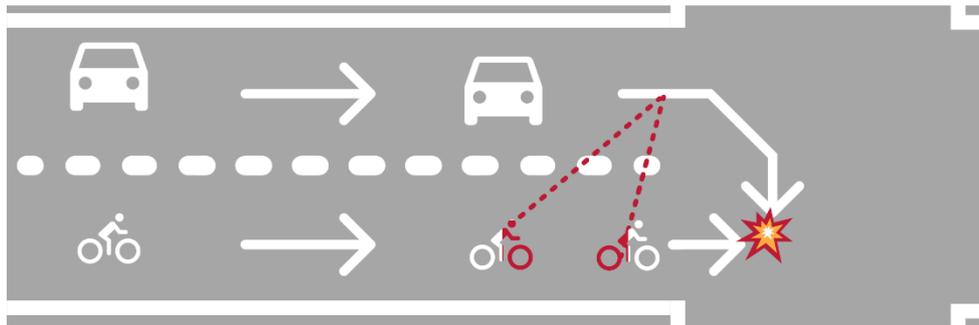


Figure 1.7 : Illustration du mouvement de tourne-à-droite des voitures

La figure 1.7 présente la situation d'un tourne-à-droite des voitures tandis que le flux de vélo continue dans le sens de la circulation. Les deux mouvements sont incompatibles et mènent à un conflit. De plus cette situation est particulièrement dangereuse puisque les vélos se situent dans l'angle mort de l'automobiliste, matérialisé par un champ de vision rouge sur l'illustration. Ce dernier souhaite tourner à droite. Il est très fréquent que le contrôle des angles morts par les automobilistes se fasse de manière très rapide et assez peu minutieuse. Il ne découvre qu'au dernier moment la présence ou l'absence de vélos sur la voie de droite et est dans l'incapacité d'anticiper leurs mouvements. C'est pourquoi cette situation de tourne-à-droite des voitures est vraiment propices aux accidents.

Le tourne-à-gauche des vélos

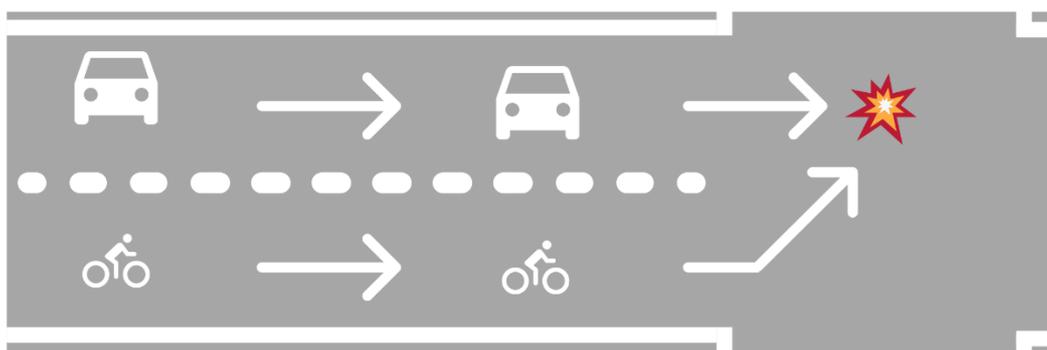


Figure 1.8 : Illustration du mouvement de tourne-à-gauche des vélos

La figure 1.8 présente le tourne-à-gauche des vélos. De la même manière que précédemment, la situation mène à un conflit où les deux véhicules ne peuvent pas effectuer leurs mouvements

indépendamment. Cette situation paraît moins dangereuse que la précédente car le vélo n'est pas situé dans la zone de l'angle mort des automobilistes, donc il semble être plus visible.

1.3 Perspectives de pérennisation et objectifs :

La mise en place de ces pistes cyclables temporaires, par les pouvoirs publics, semble être un réel pas en avant vers l'équilibre des modes de transport et du partage de la voirie pour chacun des modes. Le confinement et le déconfinement progressif apparaissent comme des étapes de rodage, avec peu de demande. Le déconfinement sans restriction semble être l'étape test à échelle réelle avec des demandes de taille réelle. La chronologie de cette implantation est reprise dans la frise suivante qui présente toutes les étapes importantes par lesquelles est passée la mesure.

Vers une opportunité de pérennisation ?

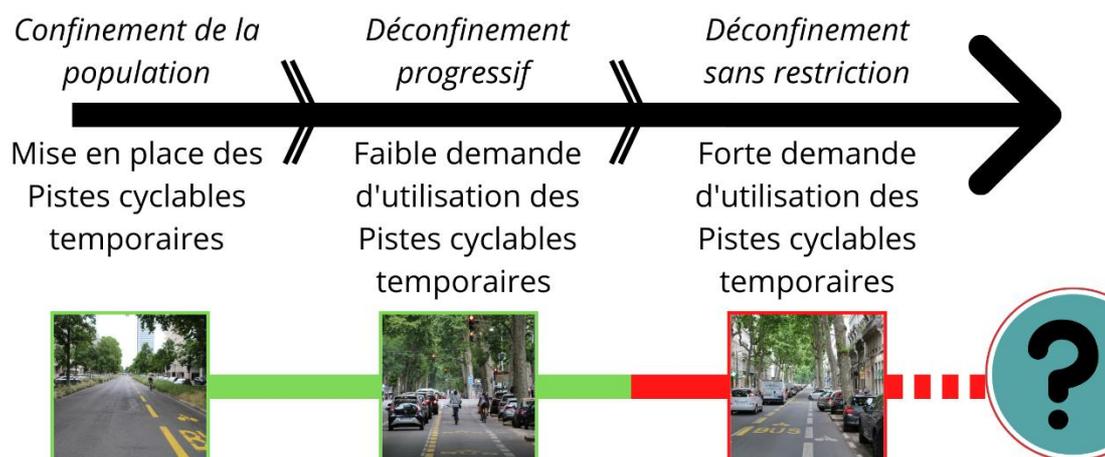


Figure 1.9 : Illustration de la chronologie de la mise en place des pistes cyclables temporaires jusqu'au déconfinement sans restriction de déplacement

Même si le système paraît être une réelle solution quand la demande n'est pas très importante, elle semble avoir des limites quand la demande revient à son niveau initial, d'avant confinement. La dangerosité, un débit de saturation limité par la diminution du nombre de voies pour les voitures et l'absence de prise en compte de la demande sont les points négatifs de cette mesure. Par conséquent, certaines métropoles ont procédé à la suppression de quelques-unes de ces pistes et ont donc entrepris une marche arrière.

L'objectif est donc de saisir l'opportunité qui a été créée en sortie de confinement. En effet, les pouvoirs publics ont fait un grand pas vers l'avant en ce qui concerne l'équilibre et le partage de l'espace urbain entre les modes de transport. Le vélo s'est imposé comme un mode de transport plus résilient que les transports en commun pendant la crise et il est important de maintenir cette dynamique et donc de promouvoir la circulation à vélo comme une alternative aux transports en commun. Le but est de proposer un système qui permet de conserver l'équilibre entre les modes de transport, c'est-à-dire conserver un espace dédié aux vélos pour que les cyclistes puissent bénéficier de conditions de circulation performantes. Une circulation performante pour les vélos s'évalue en fonction de deux indices principaux qui sont la progression des cyclistes sur le réseau mais aussi au danger qu'ils encourent en traversant le site. De plus, le système doit également être capable de répondre à une demande voiture conséquente pour éviter toute congestion déraisonnable qui

conduirait à un réseau complètement congestionné. Il doit être pensé pour maintenir un service correct pour les voitures. Cet enjeu doit tout particulièrement être traité dans les intersections, puisqu'il s'agit des aménagements qui conditionnent le plus le trafic en ville. Une optimisation de l'utilisation de l'espace public est donc requise pour pouvoir utiliser au mieux chaque partie de la voirie et ainsi répondre à chaque objectif. Tout ce raisonnement implique d'utiliser ce qui a été effectué avec la mise en place des pistes cyclables temporaires : conserver l'idée d'équilibre et de partage de l'espace tout en maintenant un niveau de service correct pour les voitures.

Partie 2 :

Adaptation d'un système de préfeu et modélisation

Cette partie est consacrée à l'étude, l'adaptation et la modélisation d'un système de préfeu. D'abord, ce système va être défini et plusieurs exemples d'utilisation vont être exposés. Dans un second temps, une adaptation de ce système pour répondre à la problématique va être apportée et enfin la modélisation de cette adaptation va être présentée.

2.1 Présentation du système de préfeu :

Un système de préfeu consiste à placer un feu tricolore supplémentaire en amont d'une intersection, régie elle-même par un système de feux, pour améliorer les conditions de circulation au sein de l'intersection. Les buts de ce dispositif peuvent être multiples. En effet, certaines utilisations servent à augmenter la capacité et le débit de saturation de l'intersection, tandis que d'autres permettent à un mode de transport, souvent aux transports en commun, de mieux circuler dans l'intersection. C'est-à-dire qu'ils peuvent bénéficier d'une priorité dynamique pour ne pas être pris dans la congestion de l'intersection : leur progression à l'intérieur de l'intersection est alors facilitée.

2.1.1 Amélioration de l'offre du réseau :

Pour améliorer le rendement d'une intersection et augmenter le débit de saturation de celle-ci, il est nécessaire de s'intéresser aux différents mouvements possibles en son sein. Il apparaît ensuite que certains mouvements sont incompatibles avec les autres. Chaque incompatibilité provoque l'apparition d'une phase dédiée aux mouvements qui peuvent se réaliser au même moment. C'est-à-dire que tous les mouvements compatibles sont regroupés au sein d'une même phase. Après étude, il s'avère que le tourne-à-gauche est un mouvement qui pose souvent un problème d'incompatibilité lorsque que la circulation s'effectue à droite de la route. C'est-à-dire qu'il est souvent nécessaire de consacrer une phase au tourne-à-gauche de chaque origine, ce qui est loin d'être optimal. Une application de préfeu peut être utilisée pour réduire l'impact négatif du tourne-à-gauche sur le rendement de l'intersection. Le schéma suivant présente le principe de cette application.

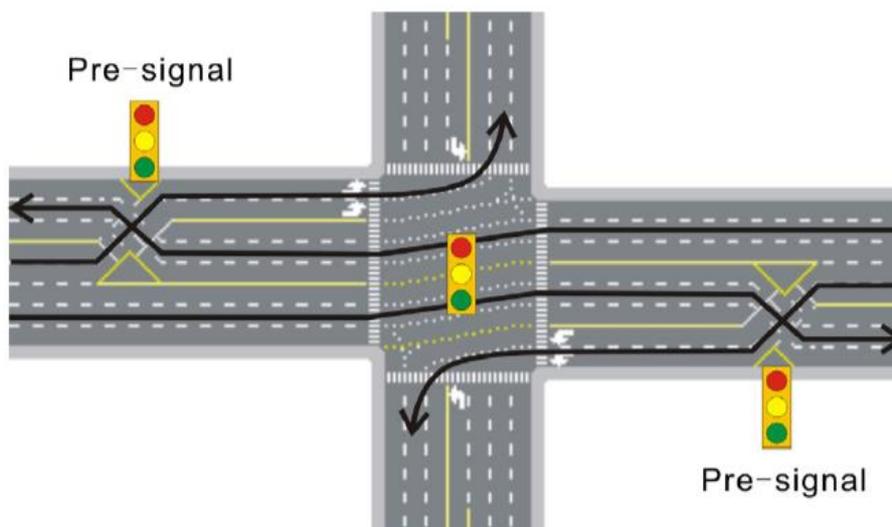


Figure 2.1 : Schéma d'un système de préfeu pour améliorer le tourne-à-gauche,
Source : [2.1] - « Increasing the capacity of signalized intersections with separate left turn phases »

En effet, le schéma montre que l'élément problématique du mouvement de tourne-à-gauche avec une circulation à droite de la route est le flux qui provient d'en face. L'article et le schéma montrent que l'utilisation d'un préfeu peut aider à mieux gérer l'intersection et garantir un débit de saturation plus important. De plus, l'article prône l'importance de l'utilisation de tout l'espace disponible. Le schéma suivant, également tiré de l'article, montre différents modes d'aménagement de la voirie avec un préfeu et introduit le concept de voie tandem. Une voie tandem est une voie qui est réservée au cours d'une période à plusieurs types de véhicules ou à différents modes de déplacement. Les types de véhicules sont souvent différenciés par leurs destinations. Comme par exemple ici, la voie tandem est une voie qui est tantôt réservée aux voitures souhaitant aller tout droit et tantôt réservée à ceux souhaitant tourner à gauche.

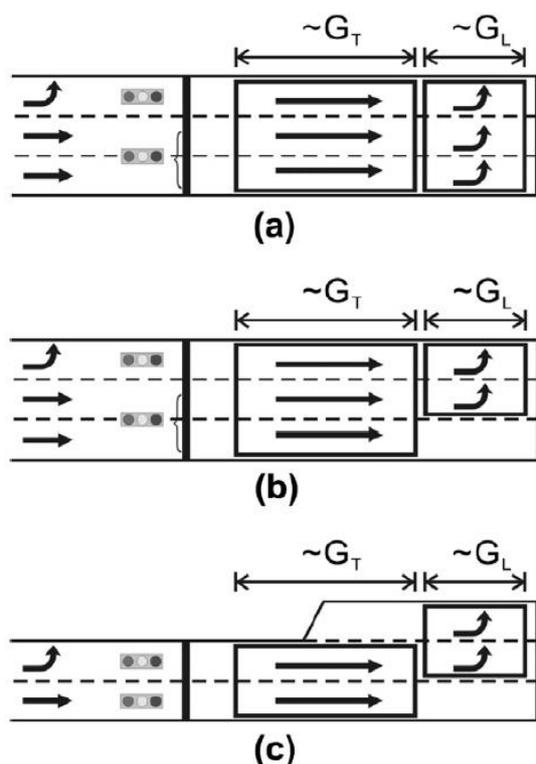


Figure 2.2 : Schéma de différents aménagements possibles des voies tandem de circulation,
Source : [2.1] - « Increasing the capacity of signalized intersections with separate left turn phases »

Le schéma montre trois cas différents. Chaque cas correspond à un nombre de voies tandem particulier. Les rectangles comprenant des flèches matérialisent les files de voitures qui se forment par destination. Ces véhicules sont donc regroupés par destination et cela permet une meilleure gestion de l'intersection. Le préfeu, qui est placé en amont de l'intersection, permet ce regroupement de véhicules puisqu'il laisse passer, à tour de rôle, les véhicules suivant leur destination. Lors d'une phase, le préfeu permet aux voitures souhaitant tourner à gauche, de se présenter à l'intersection, les voies en aval du préfeu sont alors réservées au tourne-à-gauche. Lors de la phase suivante, les véhicules souhaitant tourner à gauche sont bloqués par le préfeu qui est au rouge pour eux et les véhicules voulant aller tout droit peuvent passer le préfeu et se présenter devant l'intersection. Les voies sont alors réservées au mouvement tout-droit.

Cas \ Caractéristiques	Nombre de voies disponibles pour le tourne-à-gauche	Nombre de voies disponibles pour le tout-droit	Nombre de voies tandem
Cas (a)	3	3	3
Cas (b)	2	3	2
Cas (c)	2	2	1

Tableau 2.1 : Tableau des cas présentés par la figure 2.2

Ce tableau montre pour chaque cas, le nombre de voies tandem présentes sur le site et le nombre de voies disponibles pour chaque mouvement. Cet article montre bien l'importance d'utiliser tout l'espace offert par l'infrastructure et que laisser temporairement la priorité aux véhicules selon leurs destinations est bénéfique pour le rendement de l'intersection. Une partie de l'article est consacrée à l'étude analytique de la capacité des différents aménagements. Cette partie démontre qu'un système avec des voies tandem possède une capacité plus importante qu'un système sans voie tandem. Ainsi plus l'intersection comporte de voies tandem, plus le débit de saturation est important.

Les résultats de l'article sont accompagnés par des abaques où les abscisses correspondent au rapport des véhicules voulant tourner à gauche sur tous les véhicules et les ordonnées correspondent au ratio de vert à l'intersection pour l'origine étudiée. Ces abaques montrent l'évolution de la capacité de l'infrastructure en fonction de ces deux paramètres. De plus, elles sont réalisées à plusieurs reprises avec des aménagements d'espace différents. Ces différences résident dans le nombre de voies dédiées à chaque destination et au nombre de voies tandem. Ces abaques montrent que pour le même nombre de voies statiques, c'est-à-dire pour le même espace, la même superficie, la capacité est supérieure dans un système qui comporte un nombre de voies tandem supérieur. La figure suivante montre l'exemple de deux de ces abaques.

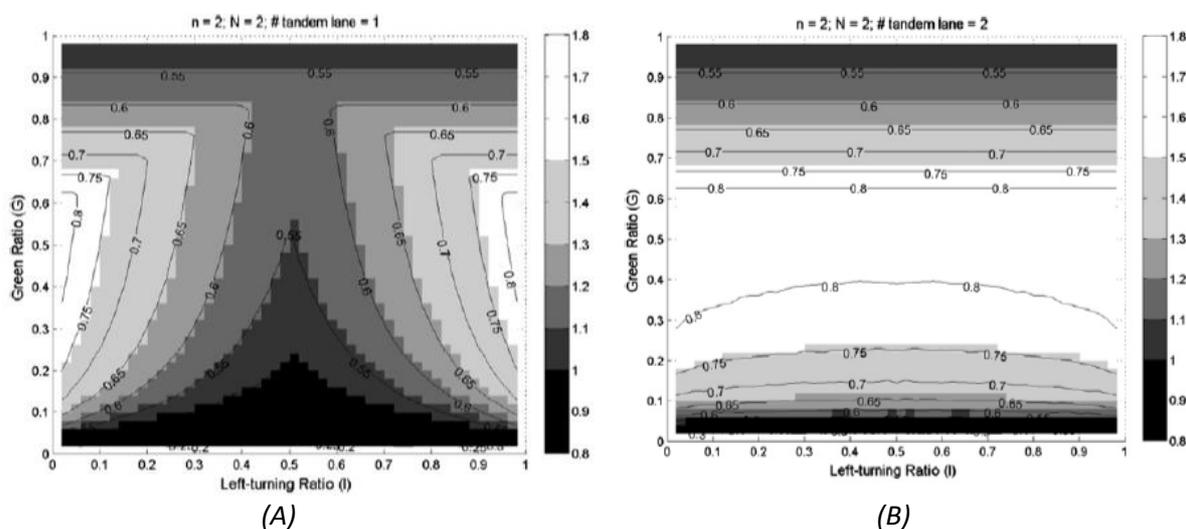


Figure 2.3 : Graphique d'un exemple d'abaques pour un même espace mais aménagé de manière différente ;

(A) : 1 voie tandem en aval du préfeu

(B) : 2 voies tandem en aval du préfeu

Source : [2.1] - « Increasing the capacity of signalized intersections with separate left turn phases »

Ces deux exemples montrent l'abaque du même espace, c'est-à-dire d'un site avec deux voies de circulation dans le même sens de circulation. Cependant, l'espace n'est pas aménagé de la même manière. Dans les deux exemples, 2 voies sont disponibles en amont du préfeu, la différence entre les deux provient des voies en aval de celui-ci. Dans l'exemple (A), une seule voie est tandem, c'est-à-dire qu'il n'y a qu'une seule voie qui peut accueillir successivement des véhicules qui tournent à gauche et

des véhicules qui effectuent le mouvement tout-droit. La réservation de la voie restante est statique : elle est systématiquement réservée aux véhicules effectuant le mouvement tout droit. Alors que l'aménagement de l'exemple (B) contient deux voies tandem en aval du préfeu. Les deux voies sont alors empruntées successivement par des véhicules voulant aller à gauche et voulant aller tout droit. Les deux aménagements sont présentés par les deux schémas qui suivent.

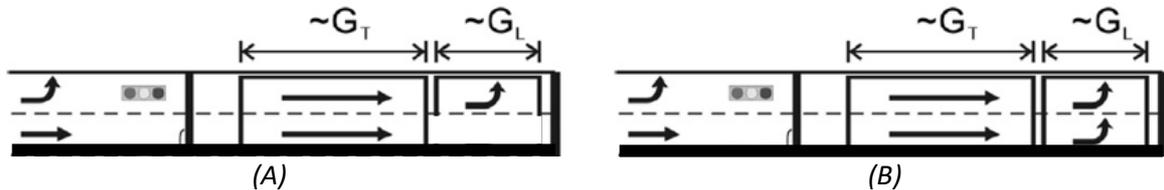


Figure 2.4 : Schémas des deux aménagements donc l'abaque est montré dans la figure 2.3

L'abaque des deux aménagements montre que la capacité de l'aménagement (B), celui comportant les deux voies tandem est plus importante que la capacité de l'aménagement (A) avec une seule voie tandem. En effet, la moyenne de la capacité de l'abaque (B) semble être supérieure à celle de l'abaque (A) et les zones à forte capacité sont plus grandes pour l'exemple (B) que pour l'exemple (A). L'utilisation de l'espace est plus importante avec deux voies tandem et l'article le montre. Les autres exemples d'aménagements et les autres abaques rendant compte de capacité sont présents dans l'article cité, en annexe (Annexe 2).

2.1.2 Amélioration de la progression d'un type de véhicule :

Le système de préfeu peut également être utilisé pour améliorer les temps de parcours et la progression de certains modes de transport. En effet, les modes de transport qui sont le plus privilégiés par ce genre d'installation sont logiquement les transports en commun, et donc les bus. Cela leur permet de ne pas être affectés par la congestion et de conserver des temps de parcours équivalents au cours de la journée et cela indépendamment des conditions de circulation. Dans la littérature, beaucoup d'exemples d'utilisation de préfeu sont exposés pour donner la priorité aux bus et ainsi pour leur éviter d'être pris dans la congestion. Le schéma suivant est tiré d'un article, qui montre une méthode d'utilisation du préfeu [2.3]. Cette méthode est basée sur le principe de priorité dynamique puisque c'est la détection du bus en amont de l'intersection qui actionne le préfeu et permet au bus de profiter de la voie à contre-sens pour doubler la file d'attente au niveau du feu de l'intersection. Le passage sur la file à contre-sens est sécurisé par le préfeu qui interdit l'accès aux véhicules venant du sens opposé. Le mécanisme est bien dynamique puisque la priorité est donnée aux bus que lorsqu'ils sont présents sur le tronçon. Il s'agit là d'un bon moyen pour favoriser la progression des transports en commun sur l'intersection, sans pour autant nuire considérablement au trafic des autres modes, puisque la priorité est ponctuelle. Les bus n'ont pas les effets négatifs de la congestion à l'intersection et profitent de la priorité. Ce qui leur évite à la fois de voir leurs temps de parcours augmenter fortement lors des périodes de forte demande mais leur apporte également plus de sécurité et moins de dangerosité pendant la traversée de l'intersection.

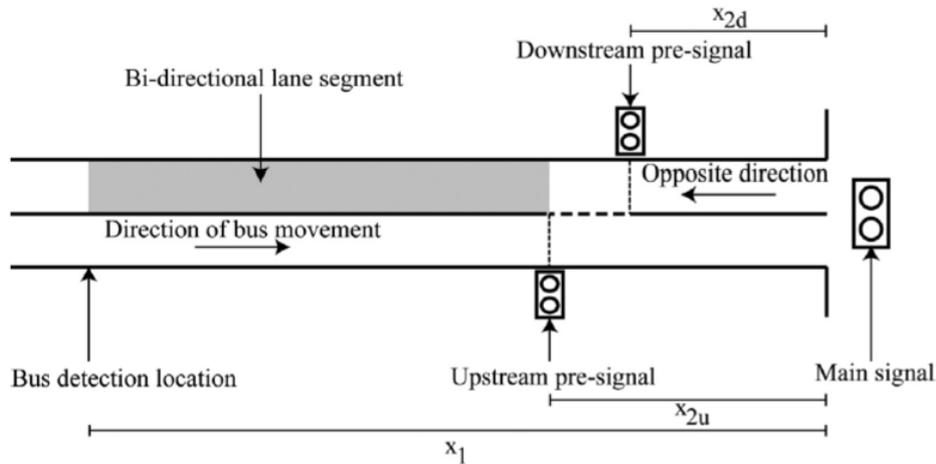


Figure 2.5 : Schéma d'un dispositif dynamique donnant la priorité aux Bus,
 Source : [2.3] – « Bus priority at signalized intersections with single-lane approaches : A novel pre-signal strategy »

Sur le schéma, l'infrastructure est présentée avec une voie dans chaque sens de circulation, mais d'autres systèmes de préfeu sont possibles lorsque plusieurs voies sont disponibles dans le même sens de circulation. D'ailleurs, un autre aménagement d'un système de préfeu est présenté par l'article. Le schéma suivant montre l'exemple d'un autre système de préfeu sur un boulevard urbain comportant deux voies de circulation dans le sens étudié.

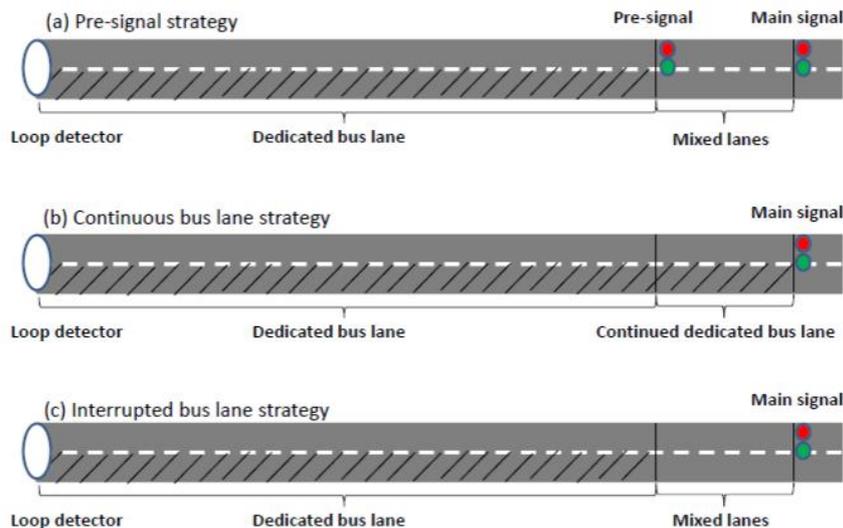


Figure 2.6 : Schéma de trois stratégies d'aménagement différentes,
 Source : [2.2] - « Adaptive Control Algorithm to Provide Bus Priority with a Pre-signal »

Ce schéma présente le système de préfeu qui est mis en place, il s'agit du schéma (a). Il fait le lien entre deux systèmes : un système qui possède une voie dédiée pour les bus tout le long du tronçon, schéma (b) et un système qui possède une voie dédiée que sur la première partie du tronçon, puis deux voies mixtes sur la deuxième partie, schéma (c).

Dans le schéma (a), le rôle du préfeu est de contrôler l'accès des usagers à la partie aval du tronçon, en direction de l'intersection. En effet, là encore, le bus va bénéficier d'une priorité dynamique : sa présence est détectée à l'entrée du tronçon. Le préfeu va donc se mettre au vert pour

le bus lorsque ce dernier va arriver à sa hauteur et par conséquent il va être rouge pour les autres véhicules. Ainsi, sur la partie aval du tronçon, le bus va bénéficier de l'espace, les deux voies complètes, pour lui seul. Il pourra ainsi se déporter sur la voie de gauche aisément et sans danger s'il veut aller vers la gauche à l'intersection. Le but étant qu'il puisse être libre de se déplacer seul et en toute sécurité et qu'il puisse être en première ligne sur une des deux voies si jamais le feu de l'intersection est au rouge. Cela a pour but deux objectifs principaux, cela évite aux bus de gêner le trafic en se déportant sur la voie de gauche mais également à ce dernier d'être prioritaire et de ne pas subir les effets de la congestion, puisqu'il sera au pire en première ligne du feu de l'intersection si celui est au rouge. Il ne sera jamais derrière un autre véhicule sur les voies en aval du préfeu.

Le système du schéma (b) prévoit lui une voie dédiée aux bus sur la totalité du tronçon. Ce système permet les mêmes avantages que le système avec préfeu car, les bus ne sont pas pris dans la congestion des véhicules. Cependant, cette voie dédiée n'est utilisée que lorsque les bus n'entrent sur le tronçon. Le reste du temps, elle n'est pas utilisée. De plus cette voie s'étend du début du tronçon jusqu'à l'intersection. Ce qui veut dire que les voitures ne profitent que d'une seule voie au niveau de l'intersection. Or, la partie précédente montre l'importance du nombre de voies disponibles, au niveau de l'intersection, pour les voitures sur la performance du réseau. D'autant plus quand la voie dédiée pour les bus n'est pas utilisée, puisqu'elle l'est que lorsqu'un bus est présent sur le tronçon. L'utilisation de cette voie dépend de la fréquence du passage des bus et du nombre de lignes qui empruntent cet itinéraire. Néanmoins, la capacité pour les voitures est réduite, puisqu'elles ne peuvent profiter que d'une seule voie au niveau de l'intersection, pour le plus souvent, aucune contrepartie. C'est-à-dire qu'il y a restriction d'espace au niveau de l'intersection pour ne finalement pas l'utiliser à plein temps. De plus, il est important de noter que lorsque les bus doivent effectuer un mouvement de tourne-à-gauche à l'intersection, le mouvement est incompatible avec celui des voitures voulant aller tout droit et il en résulte souvent une perturbation du trafic. De même, le mouvement de tourne-à-droite des voitures est incompatible avec celui des bus. Par une analogie avec la circulation à vélo, cet aménagement avec voie dédiée, correspond au même aménagement que les pistes cyclables temporaires : voie réservée sur tout le long du tronçon. C'est pourquoi il est normal de retrouver les mêmes problèmes d'incompatibilités de mouvement au niveau des intersections, comme le schématisent la *figure 1.7* et la *figure 1.8*.

Le système du schéma (c) prévoit lui le même système de voies que le système avec préfeu : une première partie de tronçon avec une voie dédiée pour les bus et une voie pour les voitures pour ensuite être, en aval du tronçon sur deux voies mixtes. Cependant dans le schéma (c), il y a absence de préfeu. La frontière entre l'amont et l'aval du tronçon est matérialisée par un panneau indiquant la fin de voie dédiée pour les bus. Ce système permet une meilleure utilisation de l'espace au niveau de l'intersection puisqu'il ne restreint pas les voitures à n'utiliser que la voie de gauche. D'autre part, ce système ne permet pas une totale liberté pour les bus se présentant sur le tronçon et entrant dans la zone mixte. En effet, une fois dans la zone mixte, les bus se retrouvent mêlés au reste du trafic et il est plus difficile pour eux de manœuvrer et de se déporter sur la voie de gauche par exemple. De plus, ils perdent également leur privilège d'être en première ligne au niveau du feu de l'intersection, ce qui peut augmenter leurs temps de parcours. Contrairement au cas du schéma (a), les bus peuvent se retrouver, et le sont très régulièrement, derrière d'autres véhicules aux abords de l'intersection.

La méthodologie de cet article est très intéressante car elle étudie en détail le schéma (a) et (c). En effet, l'article étudie la réponse de ces deux modèles face à des demandes différentes. Les demandes varient en quantité, la demande est alors de niveau plus ou moins fort, mais aussi en qualité, le ratio entre les bus et les voitures est également modifié au cours des expérimentations. La résilience de chaque modèle est aussi testée face à des perturbations occasionnelles du trafic.

Les différences entre ces systèmes résident dans la favorisation des conditions de circulation des transports en commun et dans l'utilisation de l'espace. Les conditions de circulation des bus sont

bien meilleures dans le schéma (a) et (b) que dans le schéma (c) avec tout de même une dangerosité moins élevée dans le schéma (a) que dans le schéma (b) pour le mouvement de tourne-à-gauche. L'article montre que c'est effectivement le schéma (c) qui provoque le plus de retard pour les bus. De plus, le système avec le préfeu est plus résilient face à une perturbation que le schéma (a), selon l'article. Cela vient du fait qu'il optimise l'espace utilisé aux abords de l'intersection, ce qui lui permet de bénéficier d'un débit de saturation plus élevé que celui du schéma (b). Ainsi, le système avec préfeu et priorité dynamique est le système qui se rapproche le plus de l'optimum entre bonnes conditions de trafic des bus et utilisation de l'espace et donc performance du service. C'est donc en adaptant ce système à la circulation à vélo qu'une alternative aux pistes cyclables temporaires va être proposée.

2.2 Adaptation du préfeu à la circulation à vélo :

La partie précédente a montré qu'un système avec préfeu et une priorité dynamique est un bon moyen pour à la fois favoriser un type de transport et conserver une qualité d'offre suffisante. D'autre part, la problématique a soulevé la pérennisation et l'opportunité actuelle de pérenniser les pistes cyclables temporaires. C'est pourquoi l'adaptation d'un système de préfeu aux pistes cyclables temporaires semble être un bon moyen pour étudier la possibilité de durabilité et de pérennisation de ces aménagements.

En effet, les pistes cyclables temporaires se rapprochent du schéma (b) précédent, celui d'une voie dédiée pour les bus sur tout le long du tronçon. Ce dispositif provoque des problèmes de capacité, puisque le système la diminue drastiquement, d'utilisation de l'espace et de sécurité. C'est pourquoi, une adaptation du système de préfeu, qui est tournée vers l'optimisation de l'utilisation de l'espace, comme présenté dans le paragraphe précédent pour favoriser le trafic des bus, est intéressante pour les pistes cyclables temporaires. C'est donc une adaptation du schéma (a) avec utilisation d'un préfeu qui pourrait présenter les meilleurs avantages.

Ce système avec préfeu permet d'augmenter la sécurité des vélos qui évoluent sur la piste cyclable temporaire. Dans un tel système, les cyclistes peuvent bénéficier d'une liberté pour circuler aux abords de l'intersection, une fois le préfeu dépassé. Les incompatibilités de tourne-à-gauche des cyclistes et de tourne-à-droite des cyclistes ne seraient plus présentes, puisque les vélos, à l'image des bus dans le paragraphe précédent, sont en première ligne et ne sont pas dépassés par les voitures. Ces problèmes d'incompatibilité et de dangerosité précisés dans la partie précédente peuvent être ainsi résolus.

De plus, ce système optimise l'espace utilisé. Les voitures peuvent bénéficier d'une voie supplémentaire pour circuler après le préfeu et aux abords de l'intersection, quand ces voies leurs sont réservées. En effet, lorsque le préfeu indique le vert pour les voitures, celles-ci bénéficient de la totalité des voies en aval de celui-ci. La capacité est alors augmentée et ainsi le débit de saturation de l'intersection est augmenté également. L'offre de l'infrastructure est améliorée pour les voitures.

Enfin, la possibilité de gérer l'infrastructure de façon dynamique est séduisante. En effet, les exemples sur les bus, présentés précédemment, utilisent la détection de ces derniers pour activer le système de préfeu. La priorité dynamique est basée sur le fait de changer les paramètres de l'infrastructure de façon à s'adapter au mieux à la demande. C'est-à-dire de modifier les paramètres de l'offre qui peuvent être facilement changés pour qu'elle corresponde plus précisément à la demande. Dans cette adaptation, le paramètre flexible de l'infrastructure, qui peut être changé, est le cycle du préfeu : le temps de vert pour chaque mode de transport, vélo et voiture. C'est ce cycle qui peut être modifié en fonction de la demande, c'est-à-dire que si la demande vélo est forte, le préfeu va donner davantage de vert pour les cyclistes alors qu'à contrario, si cette demande est plus faible, le préfeu va réduire ce temps de vert pour les cyclistes et par conséquent augmenter celui des voitures.

Les schémas, qui suivent, montrent l'adaptation d'un système de préfeu aux pistes cyclables temporaires.

Adaptation d'un système de préfeu aux pistes cyclables temporaires

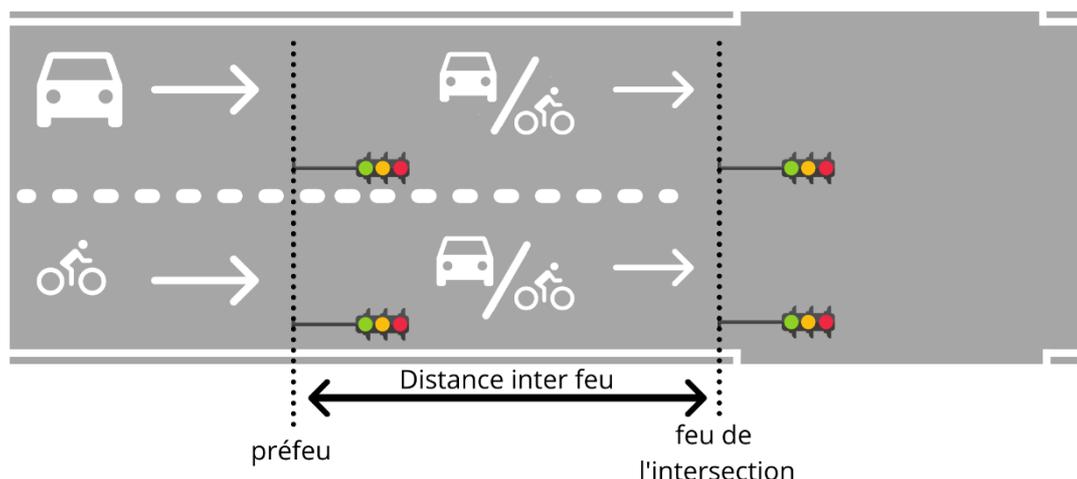


Figure 2.7 : Schéma de l'adaptation d'un système de préfeu aux pistes cyclables temporaires

Le schéma présente le dispositif et l'adaptation de ce qui a été vu dans le paragraphe précédent avec les bus. Sur la première partie du tronçon, une voie est réservée aux vélos tandis qu'une autre est réservée aux voitures. Dans la seconde partie, les deux voies sont mixtes, il s'agit de voies tandem, durant une phase elles sont réservées aux voitures alors que dans l'autre phase elles sont réservées aux vélos. Ces deux parties du tronçon sont séparées par le préfeu, qui est tout le temps vert soit pour les voitures, soit pour les vélos. Cela permet à chaque mode de transport de profiter, une fois le préfeu passé, sans prêter attention à l'autre mode, des deux voies à l'approche de l'intersection. La dangerosité pour les cyclistes est diminuée, alors que la capacité pour les voitures, par rapport au système de pistes cyclables temporaires, qui banalise une voie sur tout le long du tronçon, est augmentée.

Les deux schémas suivants montrent les deux phases possibles du préfeu. Dans le premier, il s'agit de la position vert voiture, dans le second, il s'agit du vert pour les vélos.

Adaptation d'un système de préfeu aux pistes cyclables temporaires - Vert voiture

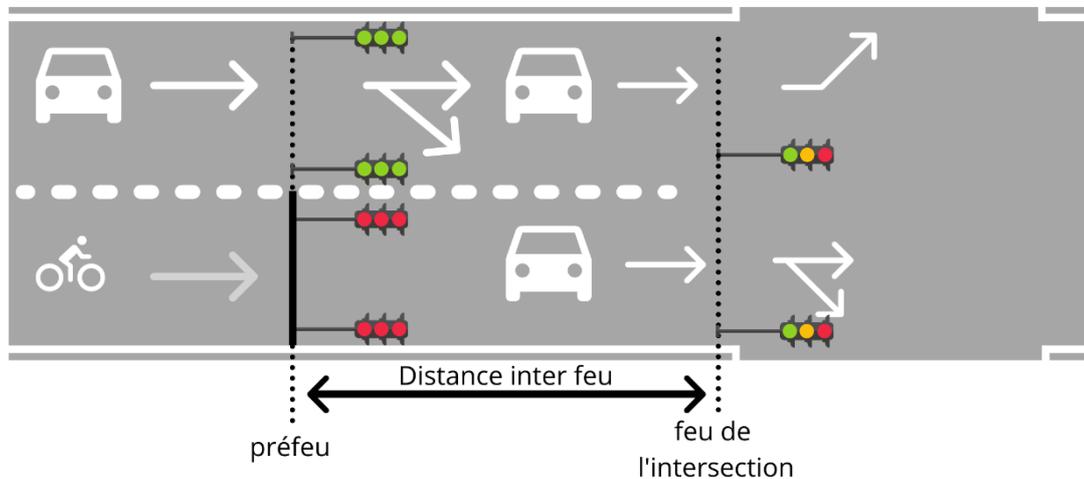


Figure 2.8 : Schéma de l'adaptation d'un système de préfeu aux pistes cyclables temporaires, phase de vert pour les voitures

Le schéma présente la position vert voiture du préfeu. Les voitures peuvent traverser le préfeu et s'approcher de l'intersection sur les deux voies tandem disponibles. Tandis que les vélos sont eux arrêtés au préfeu. Même si le feu de l'intersection est au rouge, les deux voies disponibles pour les voitures vont monter en charge et les premières lignes vont être composées uniquement de voiture. La répartition entre les voies s'effectue selon la destination des voitures. Il est possible d'imaginer que les véhicules voulant aller tout droit et à droite se trouvent sur la droite de la route alors que ceux qui souhaitent se diriger vers la gauche se trouvent sur la voie de gauche.

Adaptation d'un système de préfeu aux pistes cyclables temporaires - Vert vélo

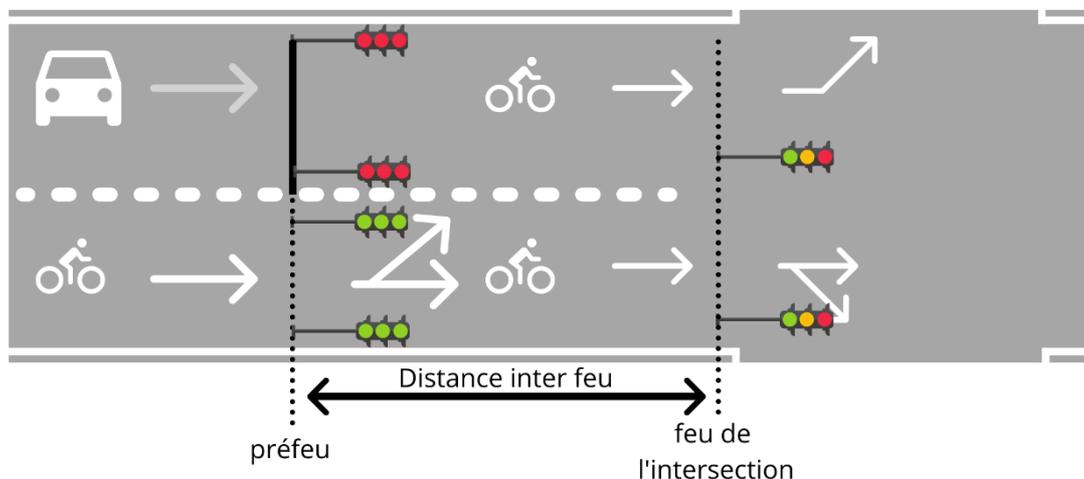


Figure 2.9 : Schéma de l'adaptation d'un système de préfeu aux pistes cyclables temporaires, phase de vert pour les vélos

Ce schéma présente la situation lorsque le préfeu est au vert pour les vélos. Les voitures sont bloquées par le préfeu alors que les vélos peuvent bénéficier des deux voies tandem pour eux seuls. Ils peuvent profiter de cette liberté pour se déporter, sans danger, sur la gauche de la route pour ensuite se diriger à gauche à l'intersection. Cela leur permet d'évoluer sans présence de voiture et en toute sécurité. Ce système laisse également penser que si les vélos sont au rouge pendant la phase de vert pour les voitures, alors, lors du vert pour les cyclistes, un groupe de cyclistes est présent au niveau du préfeu. L'attente au rouge du préfeu condense la demande vélo et pourrait mener à l'apparition de grappe de cyclistes. C'est donc en peloton que les cyclistes vont aborder l'intersection, ce qui contribue également plus à la sécurité des cyclistes. Cela dépend fortement de la demande vélo et sera abordé en quatrième partie.

2.3 Modélisation des trois scénarii :

Il est maintenant nécessaire de modéliser le système qui vient d'être introduit. Pour cela il est important d'expliquer les hypothèses utiles à l'élaboration et la compréhension du modèle.

2.3.1 Hypothèses :

Afin d'étudier au mieux ce dispositif et de juger les impacts que provoque la mise en place d'un système de préfeu, plusieurs scénarii vont être étudiés sur un boulevard urbain de 300 mètres de long. Ce boulevard comporte deux voies de circulation dans le sens étudié. Les trois scénarii sont :

- Un scénario avec une voie complètement dédiée à la circulation des vélos, du début du tronçon jusqu'à l'intersection. Il s'agit du scénario qui modélise les pistes cyclables temporaires.
- Un scénario qui modélise l'adaptation d'un système de préfeu. Une voie en amont du préfeu est réservée à la circulation des vélos, l'autre est réservée à la circulation des voitures. En aval du préfeu, les deux voies sont des voies tandem, le mode privilégié est régi par le préfeu, comme expliqué dans le paragraphe précédent.
- Un scénario avec deux voies de circulation réservées aux voitures, il n'y pas de place réservée pour les vélos dans ce scénario. Il s'agit du cas de référence, qui permet de savoir avec précision, quel impact aura la mise en place d'un aménagement cyclable sur l'offre et la capacité du tronçon.

Ces trois aménagements de la voirie sont illustrés sur le schéma suivant.

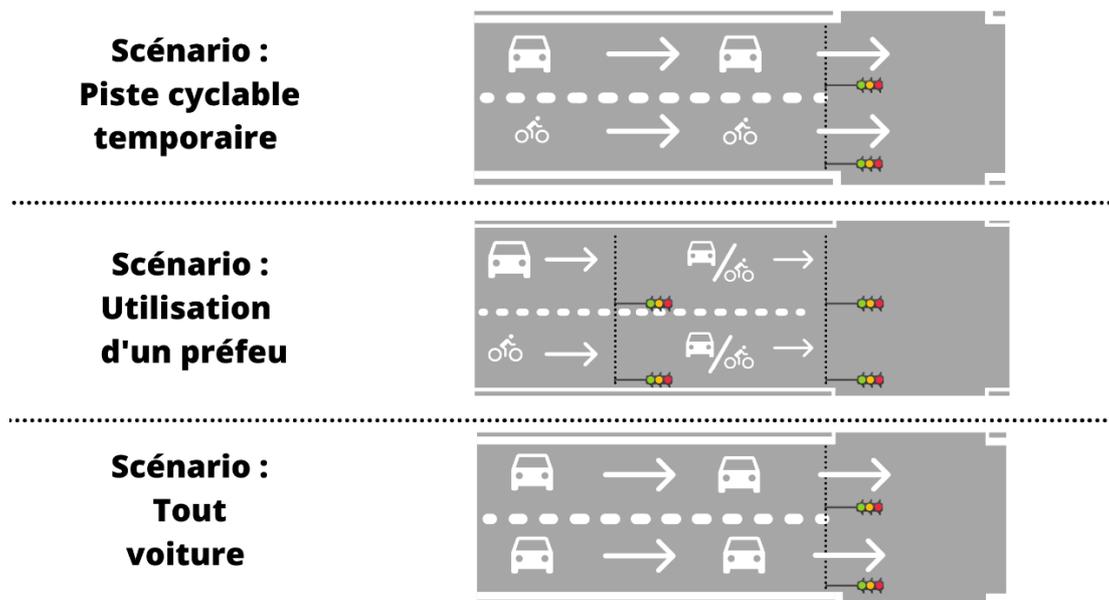


Figure 2.10 : Schéma des trois modèles étudiés

A l'image de l'article [2.2], plusieurs tests vont être menés sur chacun des scénarii pour comprendre quels effets sont provoqués sur les conditions de circulation des vélos et sur la performance et la qualité du réseau pour les voitures. L'objectif est de trouver un optimum entre aménager un espace sécurisant et offrant de bonnes conditions de circulation aux vélos et maintenir une offre et une performance du réseau suffisante et acceptable pour les voitures.

Pour réaliser les scénarii expliqués, différentes hypothèses ont été utilisées. Elles sont répertoriées dans le tableau suivant :

Caractéristiques	Valeurs
Vitesse libre des voitures	$U = 3$
Concentration maximum par voie	$K_{max} = 0,4$
Débit maximum par voie	$Q_{max} = 0,4$
Vitesse de remontée de file	$W = 3/2$
Temps d'une période	$T = 120$ secondes
Ratio vert à l'intersection pour l'origine étudiée	$G = 0,4$

Tableau 2.2 : Tableau des hypothèses utiles à la définition de la modélisation

En utilisant ces hypothèses, il est possible de tracer le diagramme fondamental suivant. Il permet de mieux décrire le trafic au sein du tronçon et permet également d'obtenir des diagrammes espace/temps.

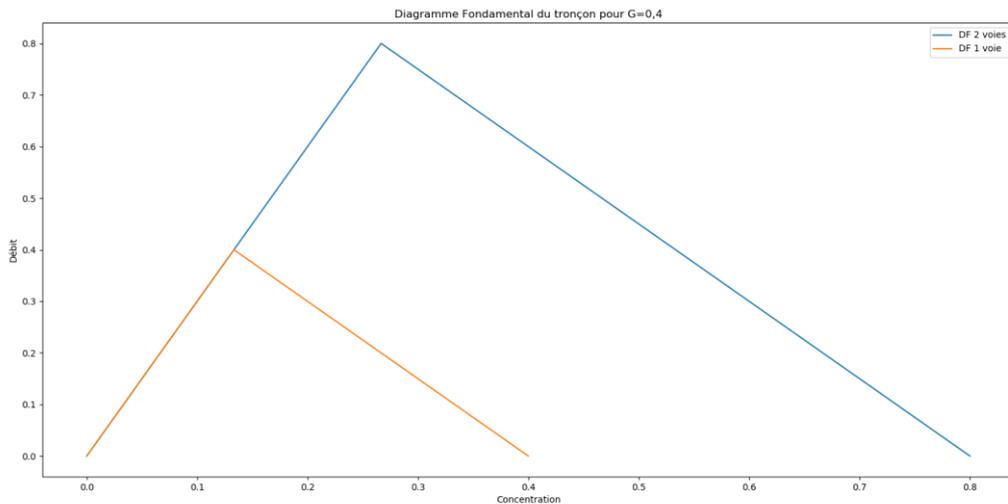


Figure 2.11 : Diagramme Fondamental – 1 et 2 voies

2.3.2 Méthodologie utilisée :

Les entrées du modèle réalisé reprennent quelques hypothèses du tableau précédent et sont accompagnées également de trois variables qui sont la demande en entrée de tronçon, la distance entre le feu de l'intersection et le préfeu et le ratio du préfeu entre le vert donné aux voitures et la durée totale de la période. Ces trois dernières données sont intéressantes car le ratio du préfeu et la distance inter feu sont des données spécifiques au système du préfeu et peuvent être changées indépendamment l'une de l'autre pour obtenir la meilleure performance du système. La demande est aussi une donnée intéressante car, elle peut varier au cours de la journée, il est nécessaire qu'elle puisse être en entrée du modèle pour pouvoir la faire varier facilement et ainsi tester les différents scénarii face à des demandes différentes. Le schéma suivant présente la méthodologie qui va être appliquée pour mesurer les effets de chaque scénario sur leurs performances.

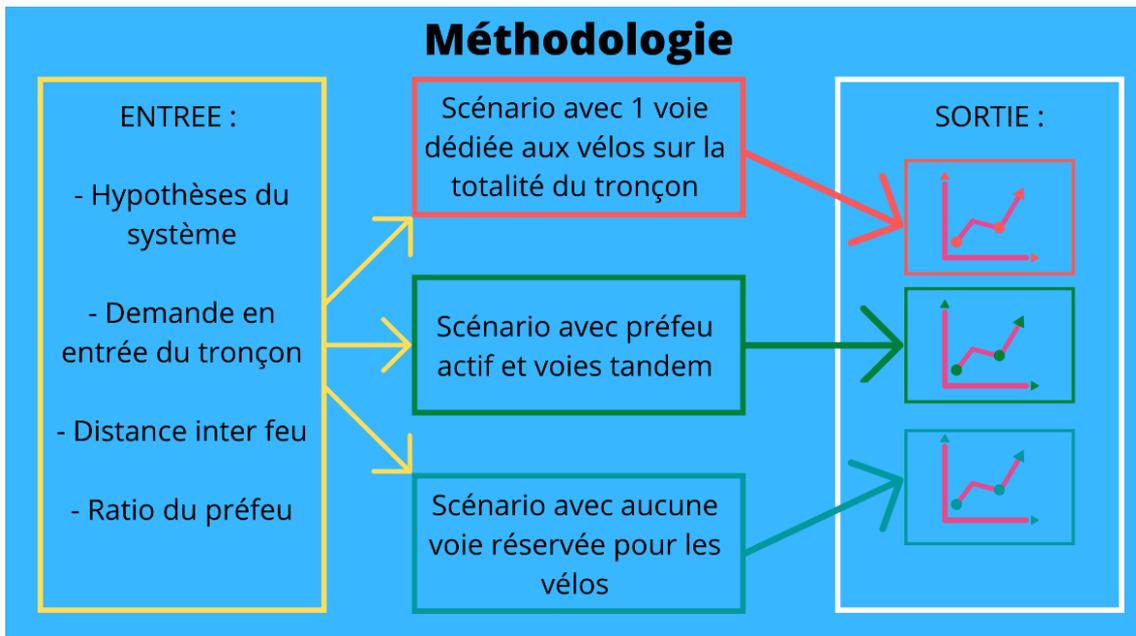


Figure 2.12 : Schéma de la méthodologie appliquée

Le but de la méthode est d'abord d'observer ce que les mêmes variables d'entrée provoquent en sortie sur les trois scénarii différents. Cela permet de comprendre comment réagissent les systèmes

qui sont mis en place et quel système est le meilleur pour les variables d'entrée utilisées. Ensuite, il est intéressant de comprendre quels impacts ont les hypothèses d'entrée sur les scénarii. Donc des tests vont être effectués en faisant varier les données d'entrée, tandis que les sorties seront étudiées. Il faut également noter que les entrées concernant le système de préfeu, le ratio de celui-ci et la distance entre le préfeu et le feu de l'intersection, sont propres à ce système. Toutes les autres entrées sont communes à tous les scénarii.

2.3.3 Quelques Diagrammes Espace/Temps :

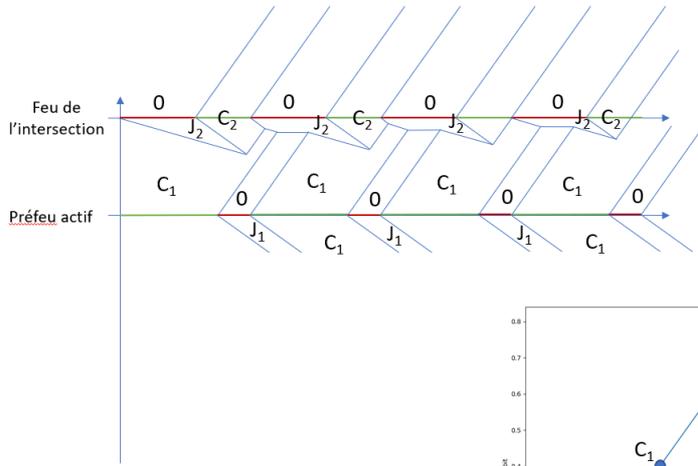
Une fois le modèle réalisé, quelques exemples d'utilisation en faisant varier les scénarii et les paramètres d'entrée sont effectués. Ces exemples ont pour but de montrer comment fonctionne le système avec préfeu, des diagrammes espace/temps sont donc présentés pour exposer les comportements du système. Ces diagrammes sont accompagnés des diagrammes fondamentaux qui ont aidé à les construire.

Les quatre exemples sont répertoriés dans le tableau suivant. Ce tableau précise les différences entre les données d'entrée des exemples, mais aussi sur le scénario utilisé. Les différences entre les données d'entrée ne portent que sur le niveau de la demande, elle est soit à capacité, soit d'un niveau intermédiaire A, qui est à retrouver sur les diagrammes fondamentaux. Les deux scénarii utilisés dans cette partie sont le scénario avec le préfeu actif avec deux voies tandem en aval de celui-ci et le scénario qui prévoit de dédier une voie aux vélos sur tout le tronçon étudié.

Caractéristiques des Exemples	Niveau de demande		Scénario appliqué	
	Niveau de demande à capacité (C)	Niveau de demande intermédiaire (A)	Préfeu actif avec deux voies tandem en aval	Une voie dédiée aux vélos tout le long du tronçon
<i>Exemple 1</i>	X		X	
<i>Exemple 2</i>	X			X
<i>Exemple 3</i>		X	X	
<i>Exemple 4</i>		X		X

Tableau 2.3 : Tableau expliquant les entrées et les scénarii utilisés pour les exemples qui suivent

Exemple 1 :



Demande à capacité
 $T = 120$ secondes
 $G = 0,4$
 Ratio $r = 0,75$

Système : Tandem avec préfeu actif

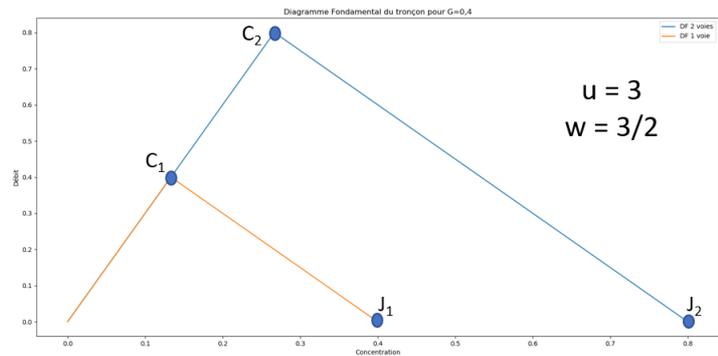
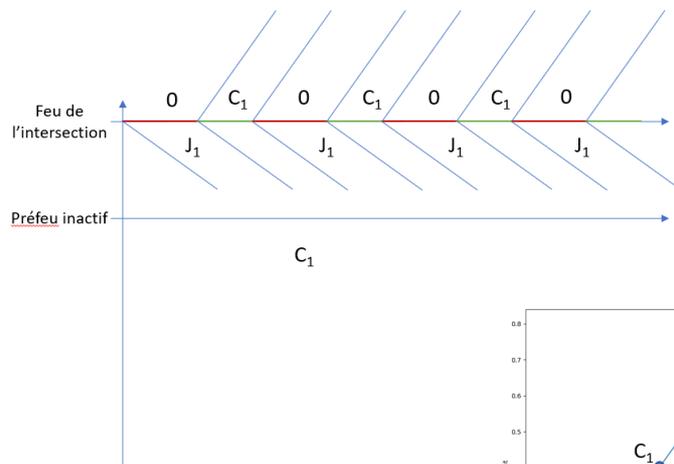


Figure 2.13 : Diagramme Espace/Temps d'un exemple pour une demande à capacité dans un scénario avec préfeu actif et deux voies tandem en aval du préfeu

L'exemple 1 montre la réponse d'un système avec préfeu face à une demande à capacité. La deuxième voie disponible pour les voitures en aval du préfeu permet d'augmenter la capacité de stockage et provoque la dissipation de la file d'attente sur chaque période.

Exemple 2 :



Demande à capacité
 $T = 120$ secondes
 $G = 0,4$

Système : 1 voie dédiée pour les vélos sur la totalité du tronçon, préfeu inactif

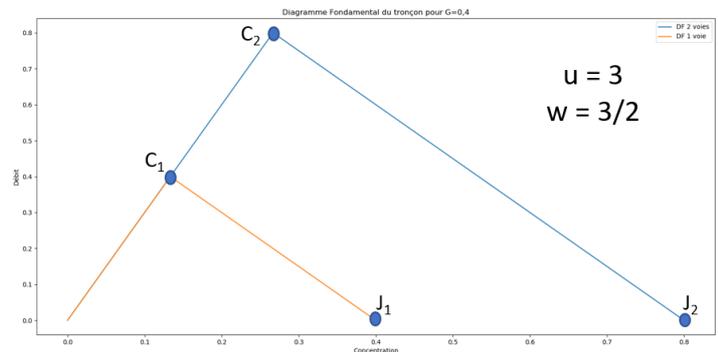


Figure 2.14 : Diagramme Espace/Temps d'un exemple pour une demande à capacité dans un scénario avec une voie dédiée aux vélos sur tout le tronçon

L'exemple 2 montre la réponse d'un système avec une voie dédiée sur tout le long du tronçon face à une demande à capacité. La file d'attente dans cet exemple remonte et atteint le début du tronçon. L'absence de seconde voie pour les voitures provoque cette remontée de congestion.

Exemple 3 :

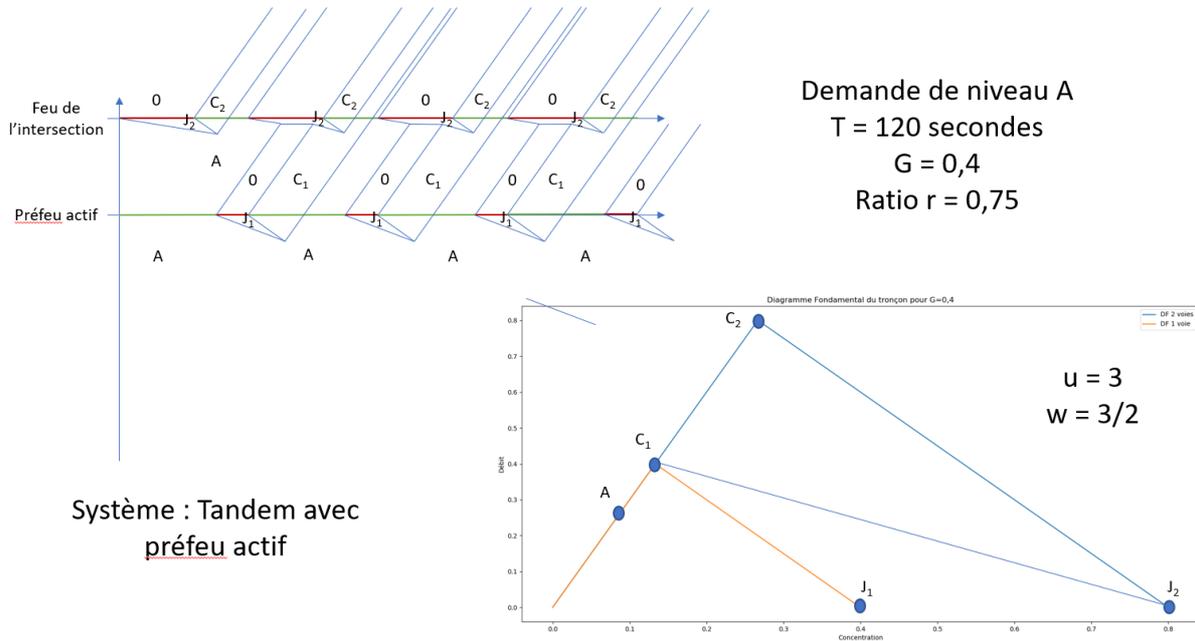


Figure 2.15 : Diagramme Espace/Temps pour une demande de niveau A dans un scénario avec préfeu actif et deux voies tandem en aval du préfeu

L'exemple 3 montre la réponse d'un système avec préfeu face à une demande de niveau intermédiaire. La file ne remonte pas dans l'exemple 1 avec une demande à capacité, c'est logiquement la même chose avec une demande de niveau inférieure.

Exemple 4 :

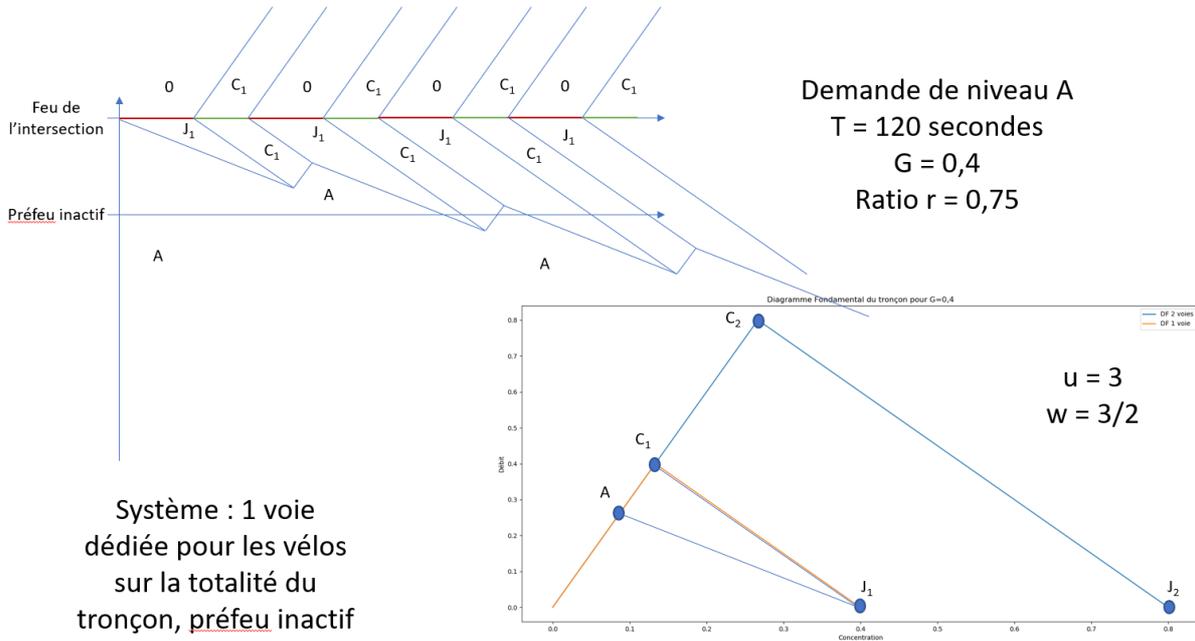


Figure 2.16 : Diagramme Espace/Temps pour une demande de niveau A dans un scénario avec une voie dédiée aux vélos sur tout le tronçon

L'exemple 4 montre la réponse d'un système avec une voie dédiée sur tout le long du tronçon face à une demande de niveau intermédiaire. La file d'attente remonte dans l'exemple 2 face à une demande à capacité, c'est le cas aussi face à cette demande de niveau intermédiaire. La diminution de demande n'est pas assez conséquente pour réussir à inverser la tendance et annuler la remontée de congestion.

L'adaptation d'un dispositif de préfeu pour la circulation à vélo a été introduite et expliquée. Le modèle utilisé a également été présenté, ainsi que la méthodologie appliquée. L'étude va maintenant porter sur les trois différents scénarii exposés précédemment et leurs performances. Les performances vont à la fois être évaluées sur les conditions de circulation des vélos au sein du système mais également sur le niveau de service du réseau. C'est sous le prisme de ces performances que les scénarii vont être jugés et comparés entre eux afin de connaître le dispositif qui semble être le plus performant à remplir les deux critères majeurs, de bonnes conditions de circulation à vélo et un maintien d'une offre acceptable pour les voitures.

Partie 3 :

Calculs et résultats

Dans cette partie, l'étude des différents scénarii va être réalisée en observant les résultats de chacun des scénarii face aux mêmes hypothèses d'entrée et ensuite en variant les hypothèses de départ. Cette étude sera présentée en plusieurs parties, la première permet d'expliquer les outils qui vont être mis en place pour comparer la performance des scénarii et les évaluer, la deuxième montre les sensibilités de ces scénarii aux hypothèses et aux entrées du système et enfin la troisième est consacrée à l'introduction d'un outil, proche du côté opérationnel du système de préfeu et qui peut s'avérer utile à l'aménagement et à l'utilisation d'un tel système.

3.1 Définition des indices de performances :

Dans un premier temps, pour évaluer de façon quantitative les différents scénarii présentés, il est nécessaire de s'appuyer sur des indices de performance. Des indices qui peuvent traduire si un scénario est plus performant qu'un autre. Pour choisir au mieux ces indices de performances, il est essentiel de se rappeler du but de ce travail. L'objectif principal est de savoir si une pérennisation des pistes cyclables temporaires à travers une adaptation d'un préfeu peut permettre à la fois de sécuriser la progression des cyclistes sur le tronçon mais également de maintenir un niveau de service suffisant pour les voitures. Les indices doivent donc à la fois se focaliser sur la qualité de la circulation des cyclistes mais aussi du niveau de service offert par les scénarii pour les voitures.

L'étude des conditions de circulation des cyclistes est basée sur deux piliers. L'un est la sécurité de ces derniers à emprunter l'aménagement. L'autre est basé sur les temps de parcours de ces cyclistes. Ces deux aspects seront traités dans la partie suivante. Cette partie ne traite quantitativement que des performances des scénarii pour les voitures.

L'étude de la qualité de l'offre pour les voitures peut se quantifier de plusieurs façons et beaucoup de critères peuvent être utilisés pour montrer la performance et la pertinence d'un modèle. Cependant ici, dans le cas d'étude, ce qui est intéressant de regarder et d'évaluer, ce sont les effets des aménagements cyclables sur l'offre et le service pour les voitures. L'objectif est de savoir comment et en quelle proportion est impacté le trafic des voitures. Les deux indices étudiés, pour quantifier cela, vont donc être : le retard des véhicules en fonction des scénarii et la remontée de file d'attente. En effet le retard cumulé des véhicules donne une idée globale de la situation : s'il y a congestion, le retard cumulé va augmenter. Tandis qu'étudier la remontée de file d'attente permet à la fois de savoir quand la situation devient critique et quand la congestion remonte jusqu'au début du tronçon, mais son étude permet également de pouvoir prédire ces moments. C'est-à-dire qu'il sera possible de prévoir la vitesse de remontée de file d'attente et donc le temps nécessaire pour qu'elle atteigne des points particuliers de l'environnement étudié, le feu ou l'intersection en amont par exemple du tronçon étudié.

3.1.1 Le retard cumulé :

Le retard cumulé est obtenu sur les courbes de véhicules cumulés. Il est calculé en mesurant l'aire de la surface qui sépare la courbe de véhicules cumulés entrant dans le tronçon et la courbe de véhicules cumulés sortant du tronçon. Cela permet d'obtenir le retard cumulé de tous les véhicules, à partir duquel, le retard moyen de chaque véhicule peut être calculé. La figure suivante montre l'évolution des courbes de véhicules cumulés entrant et sortant d'un feu de circulation simple. La

demande est constante, alors que la sortie est ponctuée par les phases de rouge et de vert du feu tricolore.

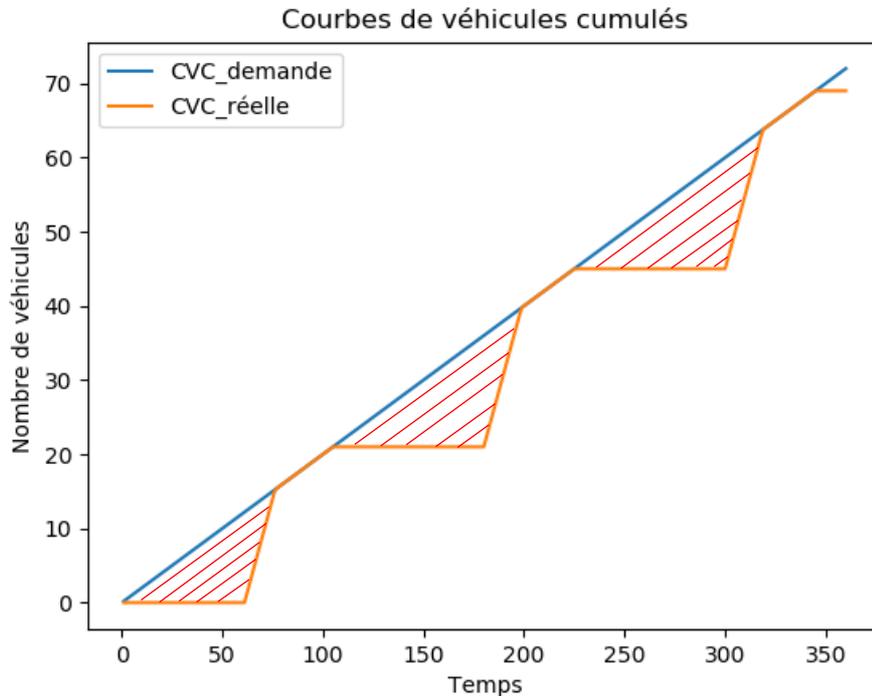


Figure 3.1 : Graphique de l'évolution des courbes de véhicules cumulés entrant et sortant, schématisant le retard cumulé

L'aire de la surface qui se trouve entre les courbes de demande et de sortie correspond au retard cumulé. Il s'agit de la zone du graphe qui est hachurée en rouge. Cet indicateur donne réellement l'impact que possède l'aménagement sur les temps de parcours. En injectant différents niveaux de demande en début de tronçon, sur chaque scénario, l'évolution du retard cumulé permet de comparer les situations et de déterminer la situation qui provoque le moins de retard cumulé.

3.1.2 La remontée de file d'attente :

La remontée de file d'attente est obtenue à partir des diagrammes espaces/temps, présentés dans la partie précédente. Cette remontée de file est tout à fait pertinente dans le cas d'étude puisque c'est cet indicateur, qui va permettre de dire qu'un scénario tombe dans un phénomène de congestion globale. En effet, le but du travail est de donner de la place et de la liberté aux cyclistes tout en maîtrisant ce qui se passe du côté des voitures. C'est donc cet indicateur qui va permettre de savoir si la congestion remonte jusqu'au début de tronçon ou non. Un réseau d'une offre satisfaisante est un réseau qui permet d'évacuer sa file d'attente assez rapidement pour éviter qu'elle ne remonte sur des événements en amont tels que des feux ou des intersections. De plus, l'étude de la remontée de file d'attente peut permettre de savoir combien de temps est nécessaire pour qu'elle atteigne un point précis du tronçon, sous un niveau de demande donné. Ainsi, il est possible de prédire les conséquences en termes de congestion, en connaissant le niveau de demande en entrée du site. Cette étude possède donc des avantages vis-à-vis de l'approche dynamique qui sera effectuée dans la partie suivante.

L'évolution de la remontée de file au cours du temps d'un feu tricolore classique est exposée sur le graphique suivant.

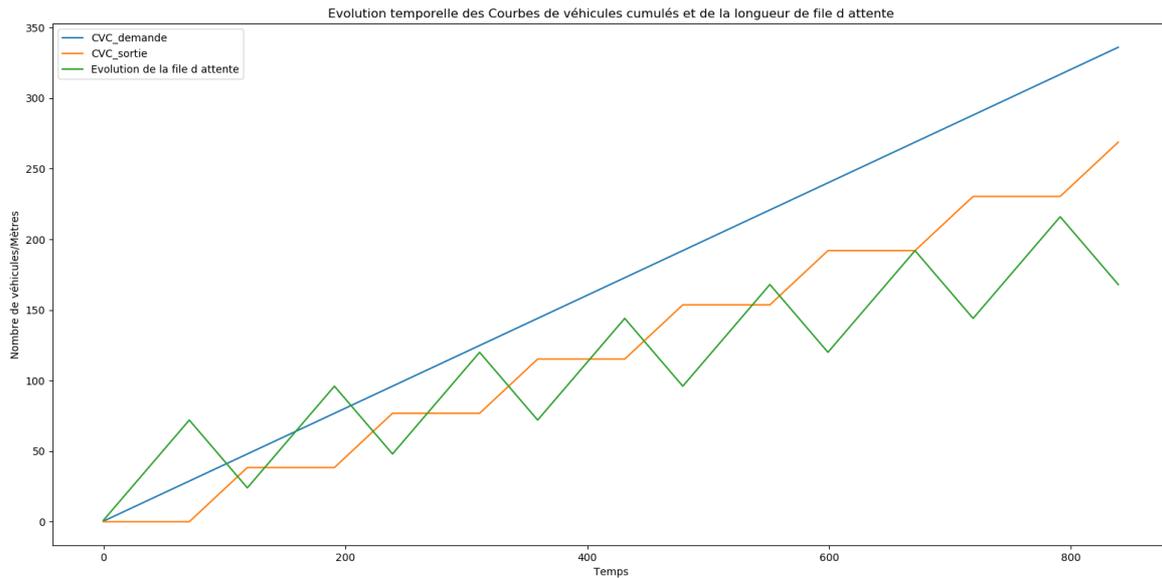


Figure 3.2 : Graphique de l'évolution des courbes des courbes de véhicules cumulés entrant et sortant et évolution de la remontée de file

La courbe, correspondant à la remontée de file est croissante quand le feu est au rouge. Le feu est rouge quand la courbe de véhicules cumulés de sortie est monotone. Il y a alors stockage des véhicules dans la file. Lors de la phase du feu vert, la courbe de véhicules cumulés de sortie est de nouveau croissante, les véhicules sont libérés et la courbe de la remontée de file est décroissante. Dans ce cas précis, une phase de vert n'est pas suffisante pour désengorger et dissiper la totalité de la file d'attente qui s'est créée pendant la phase de rouge. La situation n'est pas stable et tend vers une congestion totale, puisque sous ce niveau de demande, la longueur de remontée de file croît de phase en phase. Il y a congestion totale lorsque la file d'attente atteint le début du tronçon, et donc possiblement sur un événement antérieur comme une intersection ou un feu en amont du tronçon étudié.

Ces deux indices de performance vont être testés dans chacun des cas présentés dans la partie précédente, à savoir :

- Dans un système avec une voie réservée aux cyclistes sur la totalité du tronçon, c'est le système qui modélise les pistes cyclables temporaires, qui ont été mises en place sur le territoire lors du confinement.
- Dans un système à préfeu actif qui possède en amont une voie réservée pour les cyclistes et deux voies tandem en aval de celui-ci, c'est l'adaptation d'un système de préfeu pour les cyclistes.
- Dans un système avec deux voies réservées aux voitures sans aménagement cyclable.

3.2 Sensibilité de ces indices de performances :

Les indices de performance étant définis, les scénarii présentés, il est important maintenant de choisir les différents paramètres d'entrée à faire varier pour étudier les variations de résultats obtenus. La méthodologie est présentée par le schéma suivant.

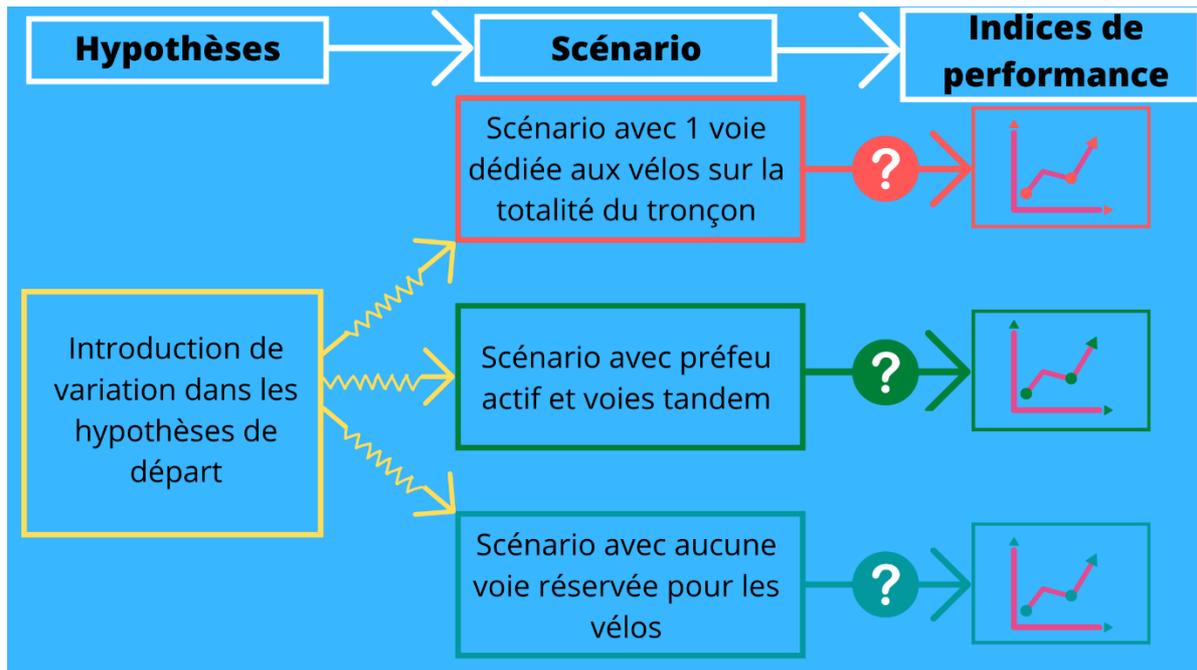


Figure 3.3 : Schéma de la méthodologie appliquée

Les paramètres d'entrée vont donc être modifiés au cours des tests suivants, dans les trois systèmes présentés. Les indices de performances vont être ensuite étudiés pour permettre de savoir les conditions de circulation dans chacun des cas. C'est la sensibilité de ces indices de performance aux hypothèses de départ qui va être mises en valeur.

Dans cette étude, les hypothèses de départ sont de différents types, il y a celles du système, la demande en entrée du tronçon et celles spécifiques du préfeu.

Les hypothèses du système comprennent les éléments de la modélisation et du trafic. Les hypothèses de la modélisation sont entre autres le nombre de voies du tronçon étudié et sa longueur. Les hypothèses du trafic sont les valeurs de la vitesse libre des véhicules, la vitesse de remontée de congestion, la concentration maximale par voie, etc. Ce sont celles utiles pour décrire et tracer le trafic et pour réaliser le digramme fondamental, présenté sur la *figure 2.11*.

Ensuite, la demande est une hypothèse importante, c'est celle qui contrôle ce qui rentre dans le tronçon. Cette hypothèse permet de quantifier le niveau de demande en entrée. C'est un élément important de la modélisation.

Et enfin, les deux hypothèses spécifiques du scénario avec l'utilisation du préfeu sont le ratio du préfeu et la distance inter-feu. Le ratio du préfeu correspond au ratio du temps de vert réservé aux voitures sur le temps total de vert du préfeu, c'est-à-dire au temps total d'une période puisque le préfeu est soit en position de vert pour les voitures, soit en position de vert pour les cyclistes. Ce ratio est donc compris entre 0 et 1. Il se rapproche de 1 quand le temps de vert augmente pour les voitures et inversement, il diminue et se rapproche de 0 quand le temps de vert augmente pour les cyclistes. La distance inter-feu correspond à la distance entre les deux feux présents sur le tronçon, celui de l'intersection et le préfeu. Cette distance est positive et elle est inférieure à la longueur du tronçon.

Les trois types d'hypothèses sont représentées sur le schéma suivant.

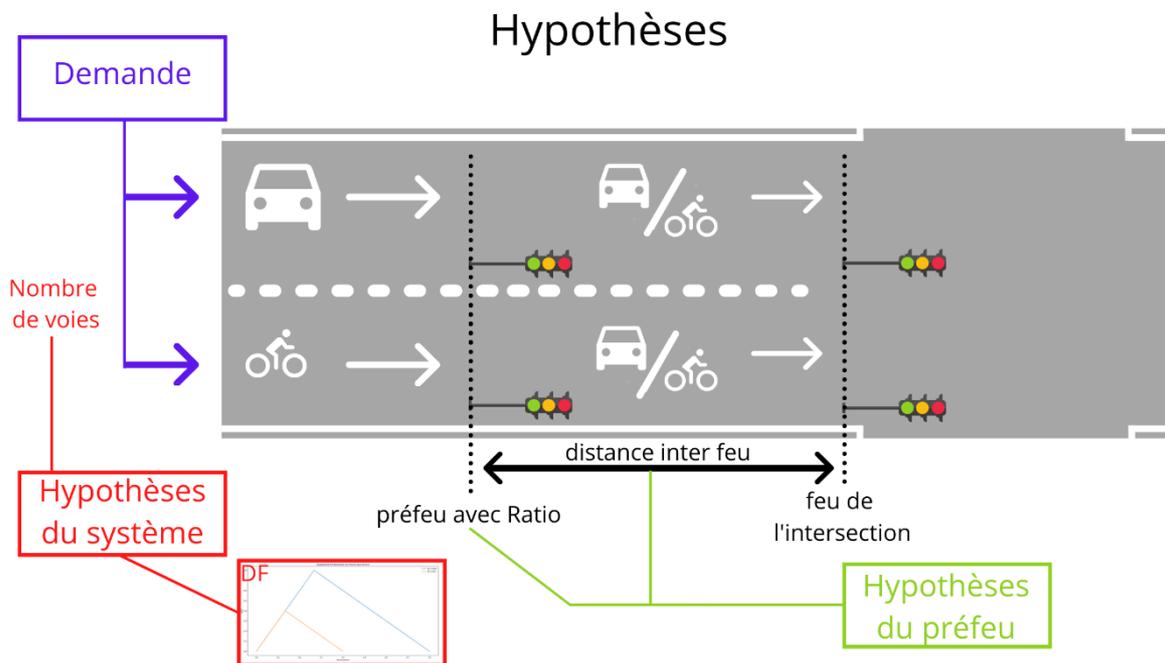


Figure 3.4 : Schéma des différents types d'hypothèses

Dans cette partie, les hypothèses de niveau de demande et les hypothèses spécifiques au système de préfeu vont être étudiées à travers l'évolution des indices de performance, comme le montre la *figure 3.3*. Une variation des hypothèses va être introduite dans les différents scénarii, et les variations sur les indices de performance seront étudiées.

3.2.1 Variation de la demande :

Il est intéressant de faire varier le niveau de demande au cours des tests car au long d'une journée, cette demande varie en fonction des plages horaires. La demande voiture et vélo varient au cours d'une journée, comme le montrent les figures de la partie 1 issues de données en open source (*figure 1.4* et *figure 1.5*). Il est donc pertinent de savoir quel est le système à adopter en fonction du niveau de demande et donc en fonction du moment de la journée. Le graphe suivant montre l'évolution du retard en fonction de la variation du débit entrant sur le tronçon. La simulation s'étale sur 100 périodes de 2 minutes, soit un total de 3 heures et 20 minutes de simulation. Plusieurs cas sont testés sur cette simulation, ces tests sont récapitulés dans le tableau qui suit le graphique.

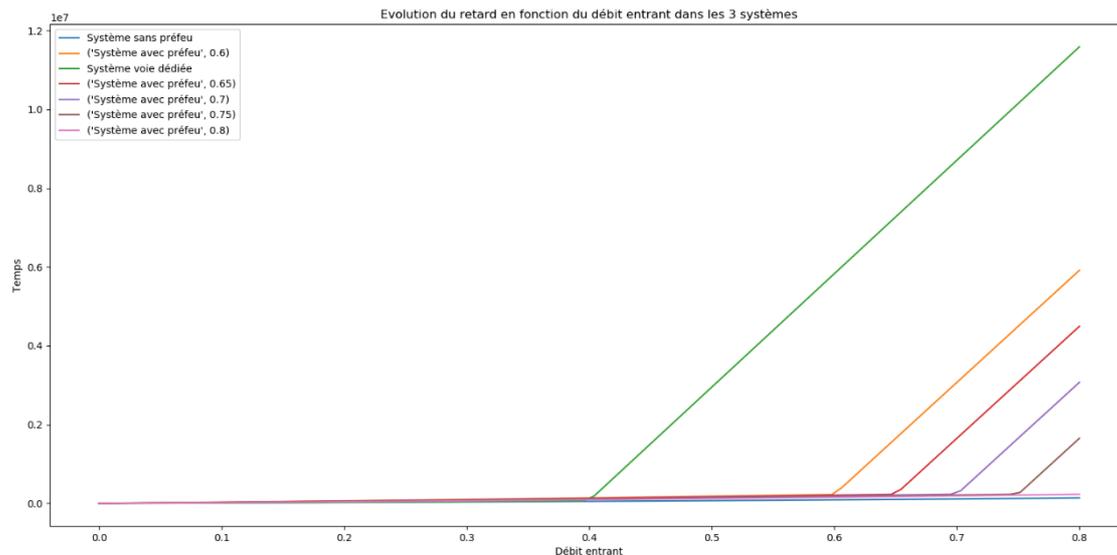


Figure 3.5 : Graphique de l'évolution du retard cumulé en fonction des variations du niveau de demande
Pour une simulation de 3 heures et 20 minutes - 100 périodes de 2 minutes

Légende	Système utilisé	Valeur du ratio
« Système sans préfeu »	Système avec deux voies pour les voitures	/
« Système avec préfeu, 0,6 »	Système avec utilisation du préfeu	R = 0,60
« Système voie dédié »	Système une voie vélo sur tout le tronçon	/
« Système avec préfeu, 0,65 »	Système avec utilisation du préfeu	R = 0,65
« Système avec préfeu, 0,7 »	Système avec utilisation du préfeu	R = 0,70
« Système avec préfeu, 0,75 »	Système avec utilisation du préfeu	R = 0,75
« Système avec préfeu, 0,8 »	Système avec utilisation du préfeu	R = 0,80

Tableau 3.1 : Tableau des cas étudiés sur le graphique de la figure 3.5

Le tableau montre que plusieurs entrées sont testées au regard du retard cumulé. En effet, les trois scénarii sont présents, le système tout voiture qui est composé de deux voies pour les voitures sans aménagement pour les vélos, le système avec utilisation du préfeu et le système avec réservation d'une voie pour les cyclistes sur tout le long du tronçon. De plus, plusieurs valeurs de ratio, R, de préfeu sont testées. Tous les autres paramètres sont figés, notamment la distance inter-feu qui est constante et égale à 200 mètres. Cette distance est bien inférieure à la longueur du tronçon de 300 mètres. Les tests utilisent les valeurs de ratio R suivantes : 0,60 / 0,65 / 0,70 / 0,75 / 0,80.

Dans un premier temps, seulement les trois premiers tests vont être étudiés. Chaque test correspond à un aménagement différent. Il est important de noter deux zones dans le graphique. La première zone est celle de gauche, où le débit entrant parcourt les valeurs de 0 à 0,4. La deuxième zone est celle de droite, où le débit entrant parcourt les valeurs de 0,4 à 0,8. Le diagramme fondamental par voie, donné en figure 2.11, donne des informations essentielles à la compréhension de ce qui se passe pendant cette simulation. En effet, le diagramme fondamental donne les valeurs de débit maximal par voie. Ce débit maximal par voie est 0,4. Il est donc normal de voir dans cette première zone, située à gauche, que les retards cumulés ne varient pas beaucoup d'un test à l'autre. Pour ces niveaux de demande, les trois systèmes sont quasiment équivalents. Un zoom sera réalisé ensuite pour noter les petites différences qui identifient chaque scénario. En revanche, c'est sur la zone de droite, qu'interviennent les différences. C'est le scénario qui prévoit la banalisation d'une voie pour les cyclistes sur tout le long du tronçon qui voit son retard cumulé exploser à partir de la valeur

0,4. Cela est normal et prévisible puisque la valeur de débit maximal par voie est 0,4. C'est à partir de ce niveau de demande, 0,4, que la situation tombe dans une congestion globale. Les véhicules ne peuvent plus rentrer sur le tronçon et le retard cumulé explose. Cette situation se répète pour le système avec préfeu, de ratio $R=0,6$, pour un débit entrant d'environ 0,6. Seul le système qui ne prévoit aucun aménagement pour les vélos possède un retard cumulé global quasiment constant jusqu'à la valeur de débit entrant 0,8. Cela permet de dire que le scénario qui ne prévoit aucun aménagement pour les cyclistes, possédant deux voies pour les voitures, possède un débit de saturation plus important que le système avec préfeu, de ratio $R=0,6$, et que le système avec voie dédiée aux vélos. De plus le système avec préfeu, de ratio $R=0,6$ possède un débit de saturation plus élevé que le système avec voie dédiée.

L'étude des systèmes avec préfeu de valeurs de ratio différentes est également intéressant pour plusieurs choses. Il est dans un premier temps important pour connaître la sensibilité du retard cumulé sur cette valeur du ratio.

En effet, les courbes des tests du scénario avec utilisation du préfeu indiquent que plus le ratio est élevé, c'est-à-dire plus le vert des voitures est important devant le vert des cyclistes, plus le système possède un débit de saturation élevé. Ceci est normal et prévisible, puisque plus le ratio est important, plus la place pour les voitures est grande et donc le débit de saturation élevé. Il faut noter que le débit de saturation d'une voie avec un feu tricolore est équivalent au débit maximal de la voie multiplié par le temps de vert consacré par le feu tricolore à la voie étudiée. Ces courbes montrent également qu'un ratio supérieur à 0,8 permet d'empêcher une croissance des retards. Il est même très important de souligner que les courbes entre le scénario ne prévoyant aucun aménagement pour les cyclistes et celle du scénario avec utilisation d'un préfeu, de ratio $R=0,8$ sont très proches l'une de l'autre. Cela signifie que le retard cumulé n'est pas beaucoup supérieur pour le scénario avec préfeu que pour celui sans aménagement pour les cyclistes. Cette faible différence du retard cumulé est à mettre en parallèle de l'aménagement qui est fait pour les cyclistes dans le scénario avec préfeu. C'est-à-dire que la perte de capacité pour les voitures dans un scénario avec préfeu engendre un léger sursaut du retard cumulé pour les voitures qui paraît bien minime face à la place qui est aménagée pour les cyclistes dans le scénario avec préfeu. Cette place assure davantage de sécurité aux cyclistes, ce qui est le but même de l'étude. Cela implique que les voitures voient en quelque sorte leurs conditions de circulation légèrement se dégrader puisque le retard cumulé augmente légèrement au profit d'une nette amélioration de la sécurité des vélos qui possède une voie en amont du préfeu pour eux tout seul et de deux voies en aval de celui, une partie du temps.

Il est également intéressant de voir sur ces courbes, que plus le ratio est faible, plus la courbe se rapproche de celle du scénario avec voie dédiée. A contrario, plus le ratio se rapproche de 1, plus la courbe du test avec préfeu se rapproche de celle du test ne prévoyant aucun aménagement pour les cyclistes. Ceci est également une preuve de cohérence des résultats. Comme les modes de circulation se rapprochent au sein des scénarii, les courbes de retard cumulé se rapprochent également.

Maintenant qu'une étude assez grossière a été réalisée, puisque la simulation précédente couvre une période de plus de 3 heures, il est important de réaliser une simulation de plus courte durée pour comprendre le comportement de tous les systèmes face à une variation de demande. La figure suivante montre donc un zoom de l'évolution du retard cumulé en fonction du débit entrant. Ce zoom est basé sur une simulation d'une durée de 3 périodes de 2 minutes, soit une durée de 6 minutes au total. Les cas traités sont répertoriés dans le tableau suivant la *figure 3.6*

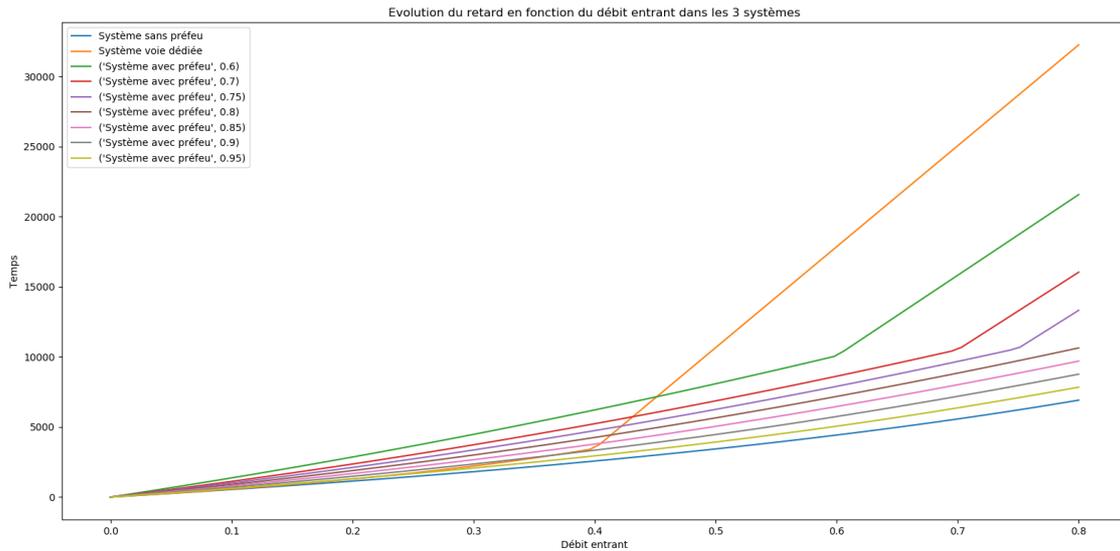


Figure 3.6 : Graphique de l'évolution du retard cumulé en fonction des variations du niveau de demande
Pour une simulation de 6 minutes - 3 périodes de 2 minutes

Légende	Système utilisé	Valeur du ratio
« Système sans préfeu »	Système avec deux voies pour les voitures	/
« Système voie dédié »	Système une voie vélo sur tout le tronçon	/
« Système avec préfeu, 0,6 »	Système avec utilisation du préfeu	R = 0,60
« Système avec préfeu, 0,65 »	Système avec utilisation du préfeu	R = 0,65
« Système avec préfeu, 0,7 »	Système avec utilisation du préfeu	R = 0,70
« Système avec préfeu, 0,75 »	Système avec utilisation du préfeu	R = 0,75
« Système avec préfeu, 0,8 »	Système avec utilisation du préfeu	R = 0,80
« Système avec préfeu, 0,8 »	Système avec utilisation du préfeu	R = 0,85
« Système avec préfeu, 0,8 »	Système avec utilisation du préfeu	R = 0,90
« Système avec préfeu, 0,8 »	Système avec utilisation du préfeu	R = 0,95

Tableau 3.2 : Tableau des cas étudiés sur le graphique de la figure 3.6

Malgré l'analyse précédente, ce graphique permet de mettre en valeur que pour les valeurs de débit entrant de moins de 0,4, un système avec une voie dédiée pour les vélos tout le long du tronçon provoque un retard cumulé qui est moins important que celui provoqué par les systèmes utilisant un préfeu avec un ratio R inférieur à 0,85. Ceci étant, lorsque le débit entrant croît et atteint des valeurs supérieures à 0,4, l'analyse de ce graphe mène aux mêmes conclusions que le graphique précédent : le système avec utilisation d'un préfeu possède un débit de saturation supérieur à celui du scénario avec une voie dédiée sur la totalité du tronçon. Autrement, les conclusions de cette simulation sont les mêmes que celles du graphique de la figure 3.5.

Il faut noter tout de même que les courbes du retard cumulé pour les scénarii avec préfeu d'une valeur de ratio supérieure ou égale à 0,8 sont très proches de celle du scénario « tout voiture », qui ne prévoit aucun aménagement pour les cyclistes. En effet, leurs tendances sont identiques, il n'apparaît pas de forte croissance des retards pour les scénarii avec préfeu. Une information importante est également présente, puisque le préfeu avec un ratio de 0,8 n'accuse pas de rupture de pente avec explosion des retards sur le graphique de la figure 3.6, alors qu'une rupture de pente est bien présente sur le graphique de la figure 3.5. Cela signifie qu'un temps total de simulation plus court permet dans un cas de ne pas provoquer l'explosion des retards. Alors que dans l'autre simulation d'une durée plus longue, il y a présence de cette explosion du retard. Le système est donc stable pour

une durée assez courte mais lorsque cette durée s'allonge, cela peut provoquer son instabilité et l'explosion du retard cumulé.

3.2.2 Variation des hypothèses spécifiques au système de préfeu :

Dans cette partie, l'étude ne se fera que sur les hypothèses spécifiques au système de préfeu, donc sur le ratio des phases de vert du préfeu et sur la distance entre le préfeu et le feu de l'intersection. Cependant les deux autres scénarii, la réservation d'une voie pour les cyclistes tout le long du tronçon et les deux voies pour les voitures, seront également présents pour servir de référence aux variations des hypothèses du préfeu. Le but est d'obtenir le système de préfeu le plus optimal et ayant les meilleures performances en fonction de ses spécificités, qui sont son ratio et la distance à laquelle positionner le préfeu de l'intersection. D'abord, le ratio du préfeu va être étudié, puis la distance inter-feu.

3.2.2.1 Variation du ratio du préfeu :

Le ratio va être abordé de deux manières différentes. La première manière va être de voir quel impact a le ratio sur les courbes de véhicules cumulés en sortie de tronçon. La deuxième manière va être d'étudier les différences entre ces courbes de véhicules cumulés de sortie, c'est-à-dire que l'objectif sera d'étudier les variations du retard cumulé des différents système de préfeu. Le retard cumulé est obtenu en calculant l'aire de la surface entre les courbes de véhicules cumulés d'entrée et de sortie.

Les trois graphiques qui suivent, représentent les courbes de véhicules cumulés en entrée de tronçon et en sortie de tronçon pour les trois scénarii différents, celui qui ne prévoit aucun aménagement pour les cyclistes, le « tout voiture », celui qui utilise un préfeu et celui qui dédit une voie aux cyclistes sur la totalité du tronçon. Ces quatre courbes sont à chaque fois représentées sur le graphique. La différence entre ces graphiques réside dans la valeur du ratio du préfeu. Le premier graphique est le support du scénario avec utilisation du préfeu avec une valeur de ratio 0,5. Le deuxième est le support du scénario avec utilisation du préfeu avec une valeur de ratio 0,6. Le troisième est le support du scénario avec utilisation du préfeu avec une valeur de ratio de 0,7. Cette étude est intéressante puisque les différences entre le comportement des scénarii est bien explicite. Toutes les entrées du système restent inchangées au cours des simulations qui mènent aux trois graphiques qui suivent.

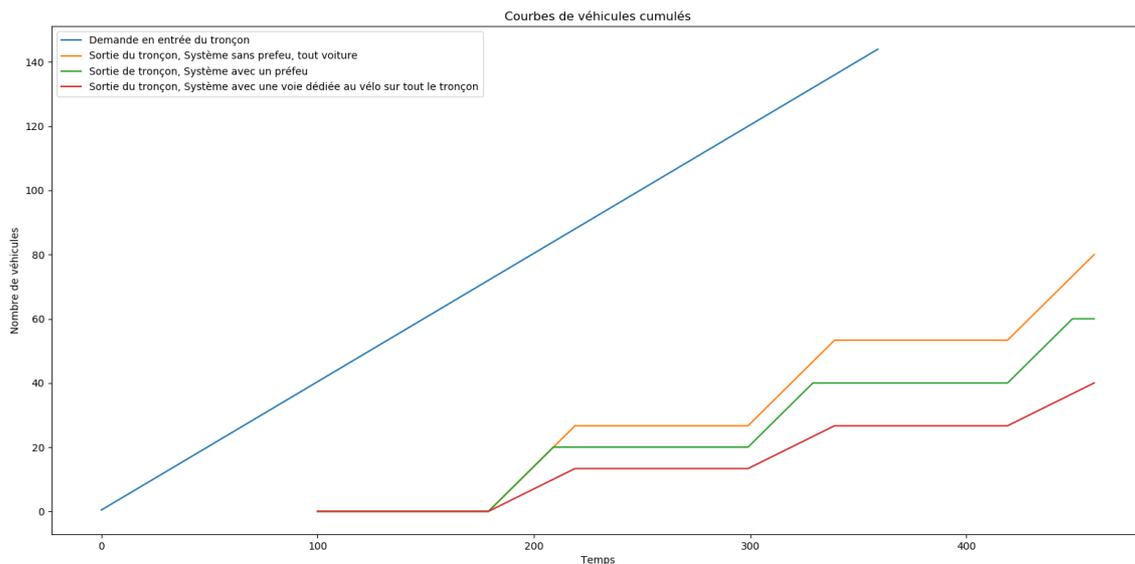


Figure 3.7 : Graphique de l'évolution des Courbes de véhicules cumulés :

- En entrée du tronçon
- En sortie du tronçon dans un scénario avec deux voies voitures, « tout voiture »
- En sortie du tronçon dans un scénario avec utilisation d'un préfeu avec un ratio $R = 0,5$
- En sortie du tronçon dans un scénario avec une voie dédiée aux cyclistes sur la totalité du tronçon

Ce premier graphique montre l'évolution des courbes de véhicules cumulés en entrée et en sortie pour les trois scénarii étudiés. Et plus précisément, le graphique contient celle en sortie du scénario avec utilisation d'un préfeu de ratio $R = 0,5$. Cette valeur de ratio signifie qu'autant de temps est réservé pour le vert des voitures, que pour le vert des cyclistes. La courbe de véhicules cumulés du scénario qui prévoit une voie dédiée pour les cyclistes sur tout le tronçon est reconnaissable puisque c'est la courbe de sortie qui possède le plus faible coefficient directeur lorsqu'une période de vert est observée. En effet, cela traduit le fait qu'une et une seule voie, au niveau de l'intersection est réservée pour les cyclistes, il est donc impossible pour les véhicules de circuler sur la deuxième voie du site. Cela se solde donc par un nombre de véhicules sortis plus faible sur ce scénario que sur les deux autres. D'ailleurs ce nombre de véhicules sortis correspond à la moitié de celui de sortie du cas de référence « tout voiture ». Le débit étant proportionnel au nombre de voies disponibles. Il est important aussi de noter la surface entre la courbe du scénario « tout voiture » et celle du scénario avec préfeu. Elle semble être légèrement inférieure à celle entre le scénario avec préfeu et le scénario de la voie complètement dédiée aux vélos. Cela signifie que le retard cumulé engendré par le scénario du préfeu se situe approximativement à entre les retards provoqués par les deux autres scénarii. Les vélos bénéficient alors d'une très belle offre puisque le ratio du préfeu est de $0,5$, ils sont autant privilégiés que les voitures alors que ces dernières voient leur retard cumulé diminué par rapport à un scénario qui prévoit une piste cyclable tout le long du tronçon. Cela montre les progrès possibles d'un aménagement qui prévoit la réservation d'une voie sur tout le long du tracé. Les progrès sont à la fois dirigés vers les voitures, puisque dans le cas d'un système d'un préfeu, l'offre et la capacité pour les voitures est bien meilleure. La réduction du retard cumulé pour les voitures est visible sur le graphique. Cependant, ces progrès sont également en faveur des cyclistes, qui bénéficient de meilleures conditions de circulation avec notamment une sécurité accrue sur le tronçon.

Il est également intéressant de noter que la phase de rouge du système avec préfeu est plus importante que dans les autres scénarii. C'est cette phase de rouge plus longue qui se traduit par une courbe de véhicules cumulés monotone qui est la cause de la différence entre le scénario avec préfeu

et le scénario « tout voiture ». Cette phase de rouge est plus longue pour les voitures puisque le préfeu contraint les voitures à rester plus longtemps à l'arrêt et ainsi provoque cet accroissement du retard cumulé entre le scénario avec préfeu et le scénario « tout voiture ».

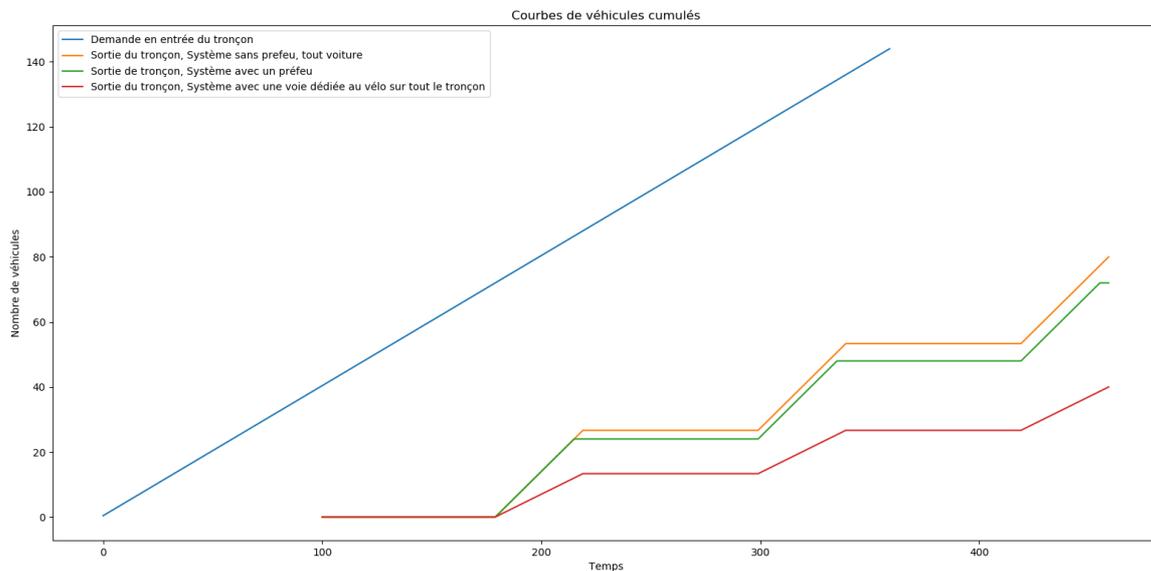


Figure 3.8 : Graphique de l'évolution des Courbes de véhicules cumulés :

- En entrée du tronçon
- En sortie du tronçon dans un scénario avec deux voies voitures (« tout voiture »)
- En sortie du tronçon dans un scénario avec utilisation d'un préfeu avec un ratio $R = 0,6$
- En sortie du tronçon dans un scénario avec une voie dédiée aux cyclistes sur la totalité du tronçon

Ce deuxième graphique est le support du scénario avec utilisation du préfeu avec un ratio de 0,6. En comparant avec le premier graphique, celui de la *figure 3.7*, il apparaît que la courbe de véhicules cumulés du scénario avec préfeu se rapproche du scénario « tout voiture ». En effet, le passage d'un ratio de 0,5 à un ratio de 0,6 permet de favoriser les conditions de circulation des voitures et donc de diminuer le retard provoqué par le préfeu. Le passage d'une valeur de ratio de 0,5 à 0,6 permet une diminution de la phase de rouge pour les véhicules, ce qui provoque le rapprochement des deux courbes.

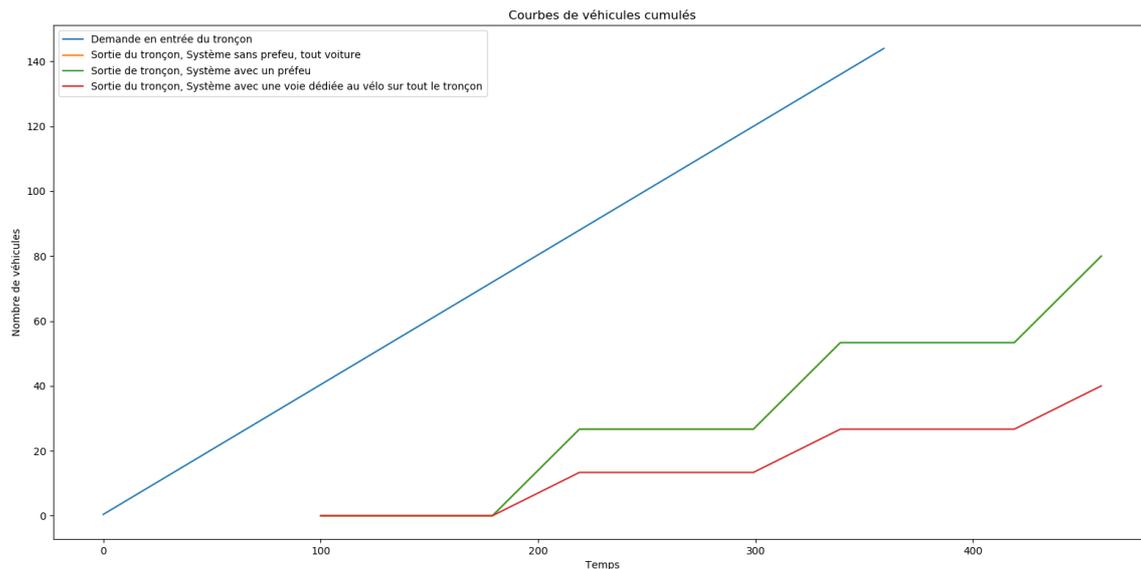


Figure 3.9 : Graphique de l'évolution des Courbes de véhicules cumulés :

- En entrée du tronçon
- En sortie du tronçon dans un scénario avec deux voies voitures (« tout voiture »)
- En sortie du tronçon dans un scénario avec utilisation d'un préfeu avec un ratio $R = 0,7$
- En sortie du tronçon dans un scénario avec une voie dédiée aux cyclistes sur la totalité du tronçon

Ce troisième graphique est le support du scénario avec utilisation du préfeu avec un ratio de 0,7. De même que précédemment, il apparaît sur ce graphique que la courbe de véhicules cumulés du scénario fait plus que se rapprocher puisqu'elle est maintenant confondue avec la courbe de véhicules cumulés du scénario « tout voiture ». Le passage d'un ratio de 0,6 à 0,7 permet au préfeu de ne pas engendrer de retard supplémentaire par rapport à un système « tout voiture ». C'est-à-dire que la capacité laissée aux voitures dans ce cas de préfeu avec un ratio de 0,7 est suffisante pour être aussi performante que deux voies de circulation classique pour les voitures. Or dans le cas du scénario du préfeu, il s'avère qu'une place est tout de même réservée aux cyclistes, puisqu'ils peuvent bénéficier d'une phase où ils peuvent être seuls sur la deuxième partie du tronçon, en aval du préfeu, tout en conservant leur voie dédiée en amont du préfeu. Il faut bien noter que cela est valable dans cette étude car la demande en entrée du tronçon est équivalente au niveau de débit maximal pour une voie. Si le niveau de demande est augmenté, alors le ratio du préfeu devra être augmenté également pour obtenir la même valeur de retard dans les deux scénarii, « tout voiture » et avec préfeu. La place réservée aux cyclistes serait alors diminuée.

Il est maintenant intéressant d'étudier en détails cet écart entre les courbes de véhicules cumulés, pour savoir comment il évolue en fonction du ratio. Cet écart correspond au retard cumulé puisqu'il s'agit de l'aire de la surface entre les courbes de véhicules cumulés. Le graphique suivant montre l'évolution du retard provoqué par le préfeu en fonction de son ratio. Ce retard provoqué est calculé comme l'aire présente entre la courbe de véhicules cumulés du scénario « tout voiture » et la courbe de véhicules cumulés du scénario avec préfeu.

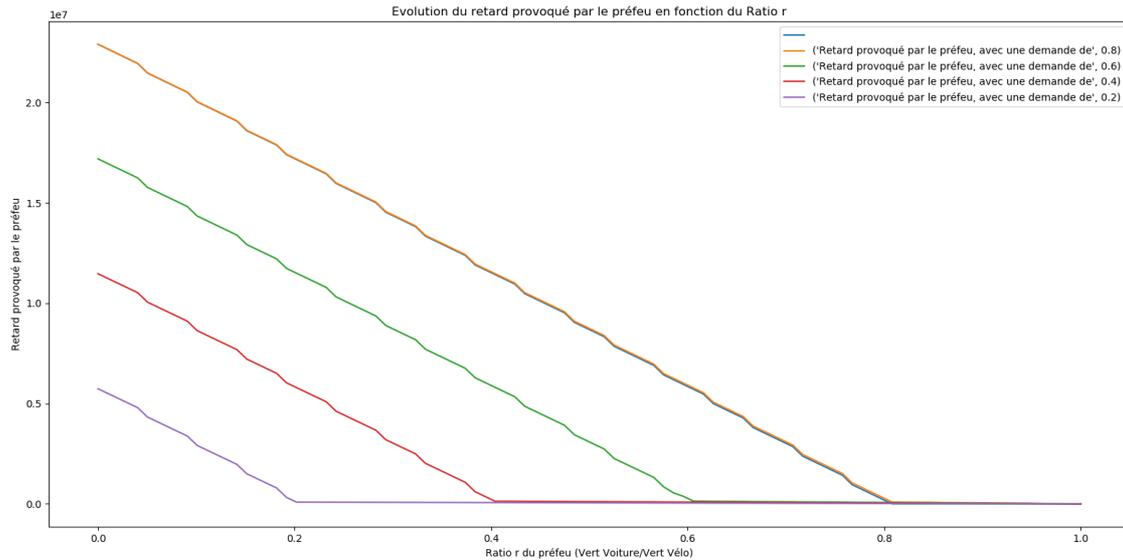


Figure 3.10 : Graphique de l'évolution du retard provoqué par le préfeu en fonction du ratio du préfeu pour plusieurs niveaux de demande sur une simulation de 3 heures et 20 minutes - 100 périodes de 2 minutes

Ce graphique permet d'étudier l'évolution du retard provoqué par le préfeu dans plusieurs cas différents, puisque chaque courbe correspond à une valeur de niveau de demande différente. Les quatre niveaux de demande suivants sont étudiés :

- Niveau de demande 0,2
- Niveau de demande 0,4, il s'agit du débit maximal pour 1 voie
- Niveau de demande 0,6
- Niveau de demande 0,8, il s'agit du débit maximal pour 2 voies

Il ressort, comme pressenti, que plus le niveau de demande est bas, moins le retard provoqué par le préfeu est important. Il apparaît également qu'une fois passée une valeur particulière de ratio, le retard provoqué par celui-ci devient nul. Par exemple, pour le niveau de demande de 0,2, à partir d'une valeur de ratio d'environ 0,2, le retard provoqué par celui-ci est nul par rapport à un scénario « tout voiture ». Cela a déjà été présenté dans le paragraphe précédent sur l'étude des courbes de véhicules cumulés, mais ici la preuve est exposée sur le graphique. Il existe bien un ratio de préfeu pour lequel celui-ci ne provoque plus de retard par rapport à un scénario « tout voiture ». Ce ratio dépend du niveau de demande, puisque sur ce graphique, chaque courbe de niveau de demande différent possède cette valeur de ratio « seuil ». Le graphique montre, même si cela est intuitif, que ce ratio augmente quand la demande augmente. Il est logique que plus le niveau de demande est élevé, plus le ratio du préfeu doit être en faveur de la voiture, pour ne pas provoquer de retard sur le scénario de référence avec deux voies voitures, sans aménagement cyclable. Il est maintenant intéressant de mettre ce constat en relief vis-à-vis de la problématique et de la circulation à vélo. Cela apporte en effet qu'il ne faut pas nécessairement chercher à augmenter à tout prix la valeur du ratio, puisqu'à partir d'une certaine valeur de ratio, il n'y plus d'amélioration des conditions de circulation des voitures ni diminution du retard cumulé. C'est-à-dire, qu'une fois passée cette valeur « seuil », seules les conditions de circulation à vélo sont dégradées pour un profit nul. Il faut donc être conscient de cette valeur « seuil » pour ne pas augmenter la valeur du ratio et donc diminuer la place des vélos pour en finalité ne même pas récolter d'amélioration de circulation pour les voitures.

De plus, il paraît étrange de ne pas voir le retard provoqué par le préfeu tendre vers l'infini quand le ratio de celui-ci tend vers 0. Une valeur de ratio de 0 signifie que la totalité de la période est dédiée au vert des cyclistes, ce qui induirait effectivement l'explosion du retard provoqué par le préfeu

et des droites tendant vers l'infini en 0. Cependant ce retard est construit par un calcul géométrique, qui mesure l'aire de la surface entre la courbe de véhicules cumulés de sortie du scénario « tout voiture », présente sur les graphiques des *figures 3.7, 3.8, 3.9* et la courbe de véhicules cumulés de sortie du scénario avec utilisation préfeu. Même si aucun véhicule ne sort du tronçon dans le scénario avec utilisation du préfeu, c'est le cas avec un préfeu de ratio 0, la courbe des véhicules cumulés de sortie serait une droite qui en tout point serait égale à 0. Ainsi l'aire entre cette droite monotone et égale à 0 et celle des véhicules cumulés de sortie du scénario « tout voiture » serait finie et donc le retard provoqué resterait une valeur finie.

Les courbes, pour chaque niveau de demande (0,2 / 0,4 / 0,6 / 0,8), sont à retrouver en annexe (Annexe 3). Sur ces courbes, chaque scénario est représenté : scénario de référence « tout voiture », scénario avec utilisation du préfeu, scénario qui prévoit une voie dédiée sur tout le long du tronçon. Il apparaît, par exemple, que c'est pour un niveau de demande supérieur à 0,4, qui est le niveau de débit maximal pour une voie, que le retard du système avec voie dédiée n'est plus égal au retard du scénario « tout voiture » et devient supérieur à ce dernier pour des niveaux de demande supérieurs à 0,4.

Enfin, cette partie permet de savoir qu'un aménagement avec un préfeu de ratio au niveau de demande en entrée du tronçon permet de ne pas provoquer de retard supplémentaire qu'un aménagement avec deux voies voitures. Cela contribue à la réponse de la problématique explicitée puisqu'il est possible d'aménager de la place aux cyclistes, une voie dédiée en amont du préfeu et une phase où ils peuvent bénéficier de la totalité des voies en aval du préfeu tout en maintenant le même niveau de service qu'un aménagement sans considération pour les cyclistes.

3.2.2.2 Variation de la distance inter-feu :

Dans cette partie, l'étude des effets de la distance entre le feu de l'intersection et le préfeu sur le retard provoqué par le préfeu va être effectuée. Le retard provoqué par le système de préfeu est calculé de la même manière que précédemment. La distance inter-feu, celle qui sépare le feu de l'intersection et le préfeu, varie d'une valeur de 0 mètre à une valeur de 300 mètres qui correspond à la valeur de la longueur du tronçon. Lorsque que la distance se rapproche de 0 mètre, cela signifie que le système se rapproche d'une superposition de feu, où les véhicules ne peuvent traverser l'intersection uniquement si les feux affichent en même temps un vert pour le mode étudié. Lorsque la distance inter-feu se rapproche de 300 mètres, cela signifie que le préfeu se rapproche du début du tronçon.

Le graphique suivant montre l'évolution du retard supplémentaire provoqué par le préfeu par rapport au scénario de référence, « tout voiture ». Plusieurs valeurs de ratio sont également testées. Les courbes correspondant à un système avec préfeu de ratio 0,6 / 0,7 / 0,8 / 0,9 sont représentées.

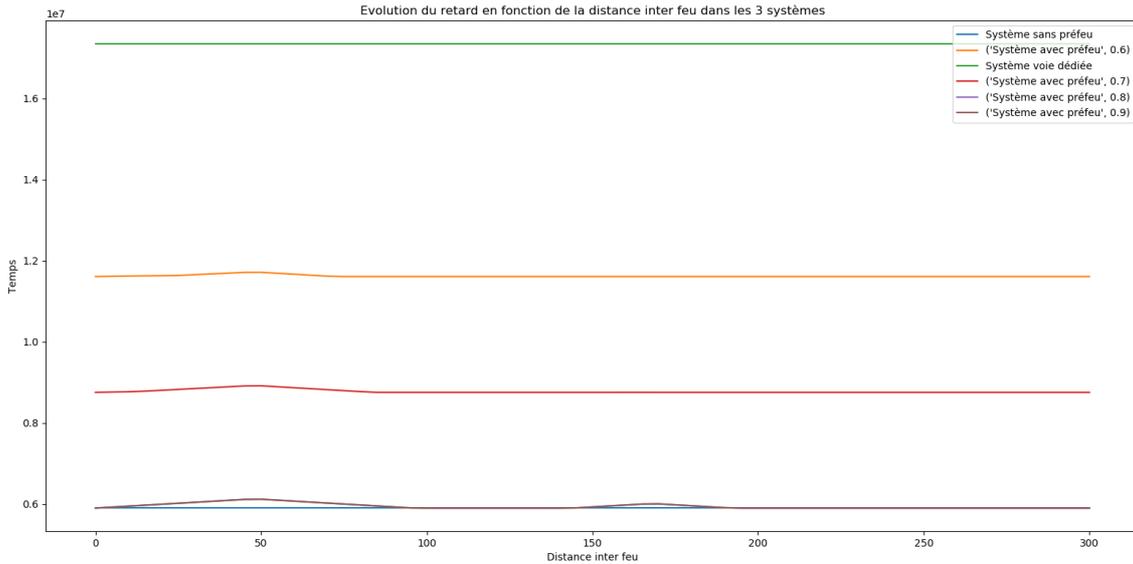


Figure 3.11 : Graphique de l'évolution du retard provoqué par le préfeu en fonction de la distance inter-feu sur une simulation de 3 heures et 20 minutes – 100 périodes de 2 minutes

Le premier constat concerne les variations de retard entre les différents scénarii avec préfeu. Plus la valeur du ratio du préfeu augmente, plus le retard provoqué par celui-ci diminue. De plus il apparait, que l'influence de la distance inter-feu est faible sur le retard provoqué. En effet, une légère hausse du retard provoqué par le préfeu est notable aux alentours de 50 mètres, qui se répète en moins prononcée aux alentours de 160 mètres pour un ratio de préfeu de 0,8 uniquement. Ce graphique étudie le retard provoqué sur une simulation qui dure plus de 3 heures. Elle semble peu apporter à la compréhension du phénomène c'est pourquoi une deuxième simulation sur une durée plus courte est réalisée. Le graphique suivant est le support de cette simulation.

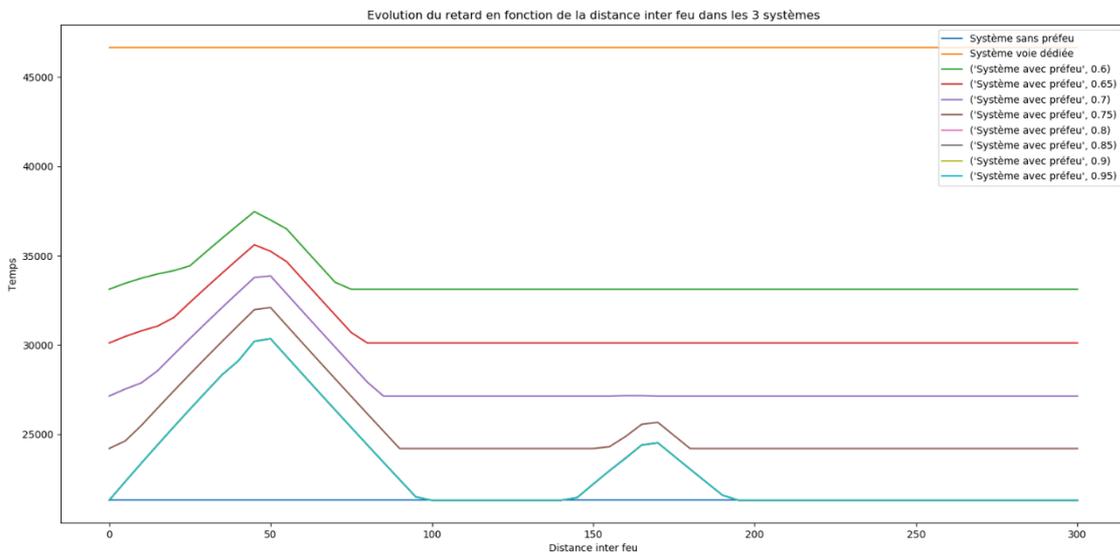


Figure 3.12 : Graphique de l'évolution du retard provoqué par le préfeu en fonction de la distance inter-feu sur une simulation de 6 minutes – 3 périodes de 2 minutes

Ce graphique montre l'évolution du retard provoqué par le préfeu sur une durée plus courte que le graphique de la figure 3.11, puisque cette simulation ne dure que 6 minutes. De même que sur le précédent, plusieurs scénarii avec préfeu sont représentés avec des valeurs de ratio différentes. Il y

en a légèrement plus que pour le graphique précédent. Sur ce graphique, une nette hausse du retard est observable aux alentours de 50 mètres et autour de 160 mètres pour les valeurs de ratio les plus hautes. Cela signifie donc qu'une distance inter-feu dans ces zones, autour de 50 mètres et autour de 160 mètres, serait plus pénalisante pour les voitures puisqu'elle augmenterait le retard provoqué par le préfeu. Cependant aucune réelle explication de ce phénomène apparaît et il est difficile de connaître l'explication physique de cette augmentation du retard.

Cela donne une brève idée sur l'influence que possède la distance inter-feu sur le retard provoqué. Cependant, l'influence penne à avoir de réels fondements et il se pourrait que cette différence de retard puisse être une erreur de code plutôt que la retranscription véridique de la réalité. Il est difficile de relier cette évolution, avec deux pics comme ceux présentés par les graphiques, à la réalité.

3.3 Création d'un abaque :

Les deux paramètres spécifiques au système de préfeu étant étudié par les parties précédentes indépendamment l'un de l'autre, il est maintenant intéressant de les étudier de manière conjointe. De plus, pour plus se rapprocher du côté opérationnel de l'aménagement de la voirie, il est également pertinent de voir que ce système de préfeu peut être applicable à plusieurs sortes de sites.

En effet, pour l'instant, l'étude ne porte effectivement que sur un site d'une longueur de 300 mètres comportant deux voies de circulation dans le sens étudié. Ce travail véhicule, jusqu'à présent, l'idée que cette adaptation de l'utilisation du préfeu ne peut se faire que sur ce genre de sites. Or, ce n'est pas le cas. C'est pourquoi il est important d'aborder ces deux paramètres de manière conjointe. De cette façon, si un site n'a pas une distance de 300 mètres, une adaptation de préfeu peut y être installée tout de même, mais en y ajustant la valeur du ratio de son préfeu. C'est dans cet optique qu'ont été réalisées les abaques qui relient à la fois le ratio du préfeu, la distance inter-feu mais aussi le niveau de demande pour lequel la congestion atteint le début du tronçon. De plus, ces abaques se rapprochent fortement du côté opérationnel de l'aménagement de la voirie puisqu'ils peuvent être tout à fait utilisés par les autorités locales pour aménager au mieux leur site. Et même de façon dynamique, puisque le niveau de demande intervient dans l'abaque réalisé. C'est-à-dire, que lorsque le tronçon est soumis à une hausse de la demande voiture, il est intéressant d'utiliser cet abaque pour mieux régler le ratio du préfeu et ainsi éviter toute remontée de congestion au début du tronçon.

C'est donc un outil qui s'avère utile pour plusieurs raisons, à la fois pour montrer que le système de préfeu peut s'adapter à tout type de site en ajustant ses caractéristiques en fonction des spécificités de l'environnement, ratio et distance inter-feu, mais aussi à gérer de façon dynamique le ratio du préfeu en fonction de la demande pour éviter de tomber dans une situation de congestion globale.

L'abaque réalisé, se lit de la manière suivante : les valeurs du ratio du préfeu, qui sont comprises entre 0 et 1 sont à retrouver en ordonnées, la distance inter-feu qui s'étale de 0 à 300 mètres sont à retrouver en abscisses et les courbes correspondent à plusieurs niveaux de demande. Ces niveaux de demande sont légendés de manière que la légende corresponde au coefficient par lequel on a multiplié le niveau maximal de demande pour 2 voies. C'est-à-dire que la courbe matérialisant le niveau de demain et légendée « 0,2 » correspond à un niveau de demande cinq fois plus petit que le niveau de débit maximal. De la même manière, la courbe légendée « 1 » correspond au niveau de débit maximal.

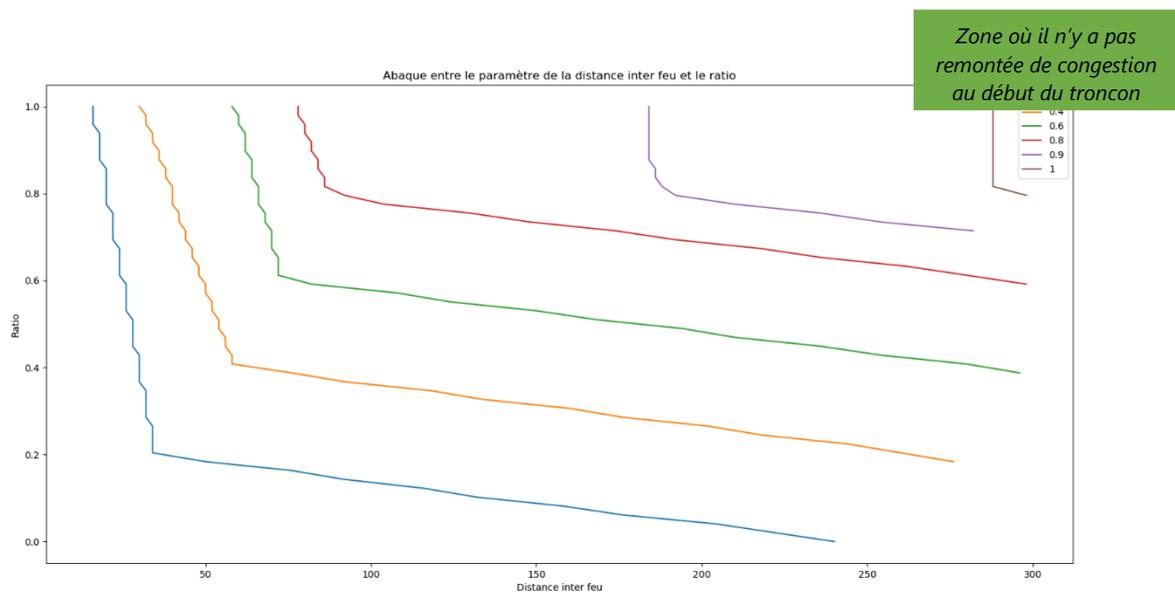
Les courbes représentent la remontée de congestion au début du tronçon. Pour chaque niveau de demande étudié, ces courbes matérialisent la frontière entre les couples distance inter-feu/ratio

pour lesquels il y a remontée de congestion au début du tronçon et pour lesquels il n'y a pas remontée de congestion au début du tronçon. La partie de l'abaque qui correspond aux couples distance inter-feu/ratio pour lesquels il y a remontée de congestion au début du tronçon se situe en bas à gauche du graphique, matérialisée par la vignette de couleur rouge, alors que la partie des couples qui ne provoquent pas la remontée de congestion au début du tronçon se situe en haut à droite du graphique, matérialisée par la vignette de couleur verte. Cela est assez intuitif, puisque les valeurs de ratio proches de 1 vont être ceux qui vont éviter au plus la remontée de file, puisque beaucoup de temps est réservé pour les voitures. A contrario, les faibles valeurs de ratio vont avoir plus tendance à provoquer la remontée de file. De même, il apparaît que plus le niveau de demande augmente, plus le domaine des couples distance inter-feu/ratio ne provoquant pas la remontée de file au début du tronçon est petit. Ce qui est prévisible puisque plus la demande est importante, plus vite la remontée de congestion s'opérera et aura des chances d'atteindre le début du tronçon.

Les trois graphiques suivants montrent ces abaques mais pour des durées différentes :

- La *figure 3.13* correspond à une simulation de 20 minutes – 10 périodes de 2 minutes
- La *figure 3.14* correspond à une simulation de 60 minutes – 30 périodes de 2 minutes
- La *figure 3.15* correspond à une simulation de 1 heure et 40 minutes – 50 périodes de 2 minutes

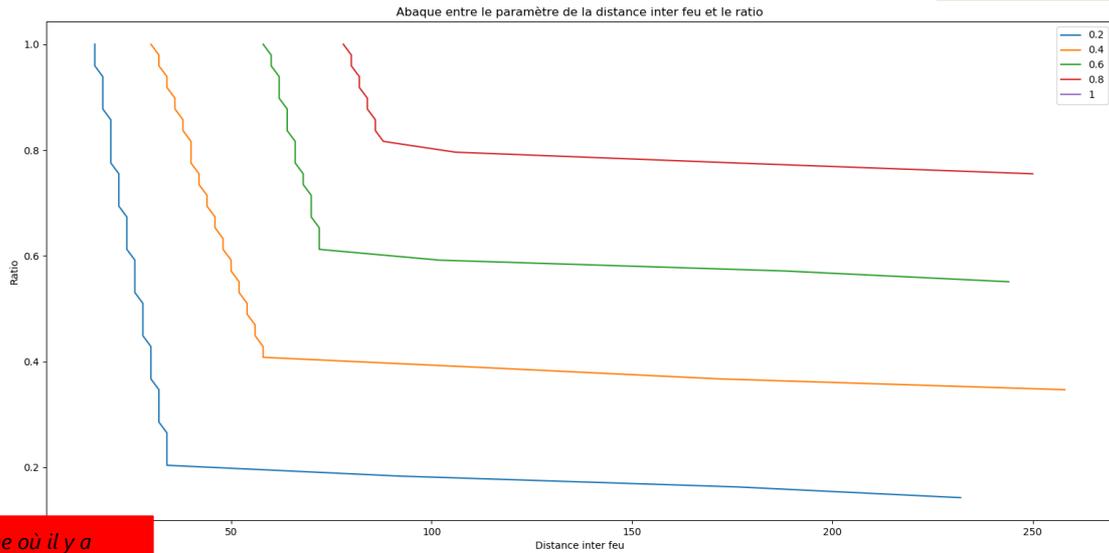
Cela permet de voir les différences quand la durée de simulation augmente.



Zone où il y a remontée de congestion au début

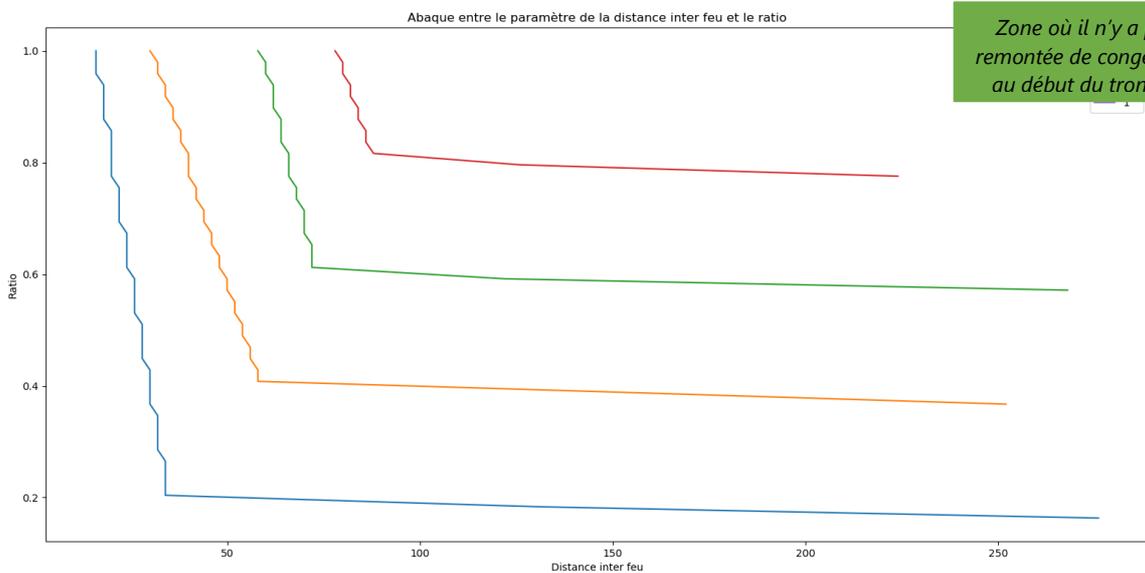
*Figure 3.13 : Abaque des couples distance inter-feu/ratio pour lesquels la congestion atteint le début de tronçon pour un niveau de demande donné
Simulation sur une durée de 20 minutes - 10 périodes de 2 minutes*

Zone où il n'y a pas remontée de congestion au début du tronçon



Zone où il y a remontée de congestion au début

Figure 3.14 : Abaque des couples distance inter-feu/ratio pour lesquels la congestion atteint le début de tronçon pour un niveau de demande donné
Simulation sur une durée de 1 heure - 30 périodes de 2 minutes



Zone où il n'y a pas remontée de congestion au début du tronçon

Zone où il y a remontée de congestion au début

Figure 3.15 : Abaque des couples distance inter-feu/ratio pour lesquels la congestion atteint le début de tronçon pour un niveau de demande donné
Simulation sur une durée de 1 heure et 40 minutes - 50 périodes de 2 minutes

L'évolution de ces abaques montre bien l'influence de la durée de la simulation sur les couples distance inter-feu/ratio qui provoquent une remontée de congestion au début du tronçon. En effet,

cette évolution montre que les zones des couples distance inter-feu/ratio qui provoquent la remontée de file jusqu'au niveau du début du tronçon augmentent, alors que dans le même temps les zones de ceux qui empêchent cette remontée de file d'atteindre le début du tronçon diminuent. D'ailleurs, la courbe qui correspond au niveau de demande le plus haut, disparaît dès le deuxième graphique. Il n'est plus présent, car pour tout couple distance inter-feu/ratio, après 1 heure de simulation, il y aura toujours remontée de file d'attente jusqu'au niveau du début du tronçon. Cela signifie que pour ce niveau de demande, la situation n'est pas stable et qu'une phase de vert ne permet pas d'évacuer toute la file d'attente qui s'est créée pendant la phase de rouge. Cependant cette courbe apparaît bien dans le premier graphique car la durée de simulation n'est pas suffisamment longue pour que la file atteigne le début du tronçon.

Ces abaques sont très intéressants car ils permettent de donner des informations sur les aménagements possibles de ce système de préfeu mais aussi d'un point de vue dynamique puisqu'ils peuvent être l'outil qui permet de bien adapter le ratio du préfeu face à la demande qui se présente en entrée du tronçon. C'est également un très bon outil pour prédire en quelque sorte le temps que va mettre le système pour tomber dans une congestion globale face à une demande donnée. Cela fait partie du contrôle de la congestion puisqu'avec cet outil, il est maintenant possible de connaître l'évolution de cette remontée de file pour la maîtriser. Il est possible de dire que pour un certain couple de distance-inter/ratio et face à un niveau de demande donné, la congestion ne remontera au cours des 20 premières minutes jusqu'au début du tronçon mais que lors des 20 minutes d'après, la congestion risque fortement d'atteindre ce point si aucune action n'est effectuée sur le ratio du préfeu. C'est une manière d'utiliser cet abaque.

Cependant, il est essentiel d'adapter cet outil, à la circulation des voitures avec présence de cyclistes. En effet, il ne faut pas oublier l'objectif principal de la mise en place et de l'adaptation de ce système de préfeu. Son but est de pouvoir libérer une place suffisante aux cyclistes pour qu'ils puissent bénéficier de meilleures conditions de circulation, c'est-à-dire d'obtenir un meilleur temps de parcours et de profiter d'une meilleure sécurité. Cette augmentation de sécurité, comme déjà mentionnée dans les parties précédentes, se base sur une réservation des voies en aval du préfeu pour les cyclistes pendant une phase du préfeu. Afin de pouvoir être en toute liberté sur ces deux en aval du préfeu, des conditions sur le préfeu doivent être respectées. En effet, un lien au sein du couple distance inter-feu/ratio doit être respecté. La distance inter-feu doit être assez courte pour que les vélos puissent traverser la partie restante du tronçon et atteindre le feu de l'intersection pendant le temps de vert des cyclistes. Ainsi, les cyclistes bénéficieraient de la priorité à l'intersection et seraient en première ligne. Cela empêcherait également les vélos et les voitures de cohabiter sur ces deux voies en aval du préfeu et donc permettrait l'absence de conflits sur ces deux voies. La période de vert pour les vélos doit être assez grande, c'est-à-dire que la valeur du ratio doit être assez petite pour que les vélos puissent traverser le tronçon en toute sécurité.

Il est apparu pertinent de monter ce lien, qui débouche sur des incompatibilités de couples distance inter-feu/ratio pour les vélos, et de le matérialiser sur l'abaque. Ces zones d'incompatibilité apparaissent sur les couples distance inter-feu/ratio qui regroupent des valeurs de ratio proches de 1, et des distances inter-feu assez importantes et proches de 300 mètres. La situation extrême est un ratio proche de 1 et une distance proche de 300 mètres, ainsi il est possible de déjà déduire la position de cette zone d'incompatibilité, qui se retrouverait en haut à droite de l'abaque. La figure suivante montre un abaque vierge de toute courbe matérialisant les remontées de congestion sur le début du tronçon mais avec deux zones d'incompatibilité :

- Une zone d'incompatibilité dans le cadre d'une circulation limitée à 50 km/h pour les voitures sur la deuxième partie du tronçon ; cette zone est matérialisée en bleu
- Une zone d'incompatibilité dans le cadre d'une circulation limitée à 30 km/h pour les voitures sur la deuxième partie du tronçon ; cette zone est matérialisée en rouge

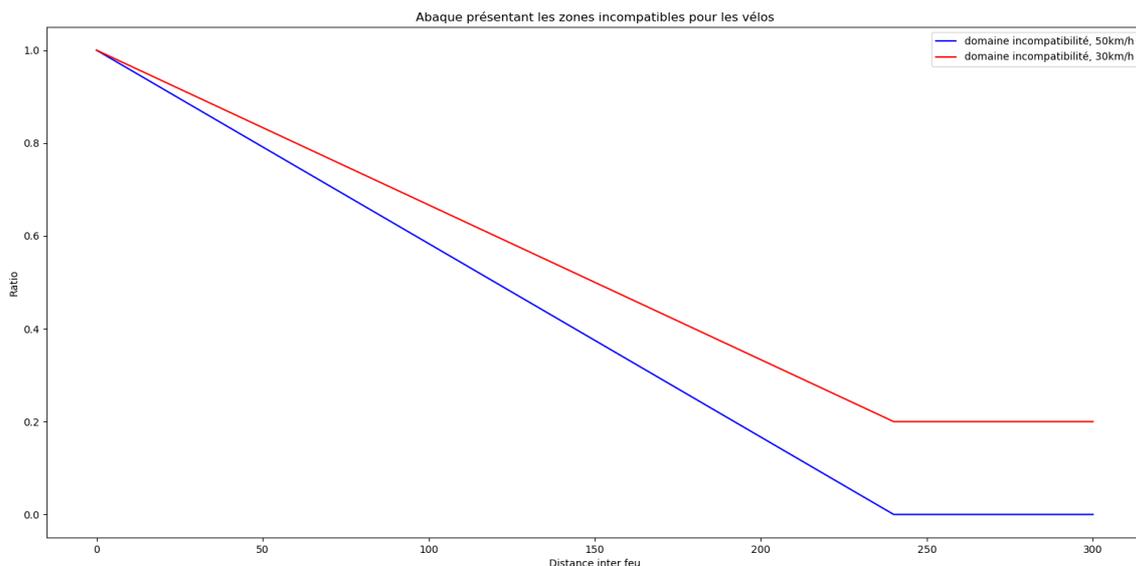


Figure 3.16 : Abaque distance-inter feu/ratio sur lequel sont introduites les zones d'incompatibilité vélo dans le cadre d'une circulation limitée à 30 et à 50 km/h

La limitation de vitesse des véhicules est un paramètre de la création de la zone d'incompatibilité des vélos puisque cette zone est garant de l'impossibilité pour les véhicules de dépasser les cyclistes sur la deuxième partie du tronçon. Il apparaît également que plus la limitation de vitesse est stricte, moins la zone d'incompatibilité est importante. D'ailleurs, si les véhicules étaient limités à la vitesse des vélos, cette zone d'incompatibilité serait nulle et tous les couples distance inter-feu/ratio seraient acceptés.

Le graphe suivant montre ces deux zones d'incompatibilité sur un abaque avec courbes matérialisant la remontée de file au début du tronçon. Il s'agit d'une simulation sur une durée de 20 minutes, d'où la présence de la courbe correspondant à la demande maximale.

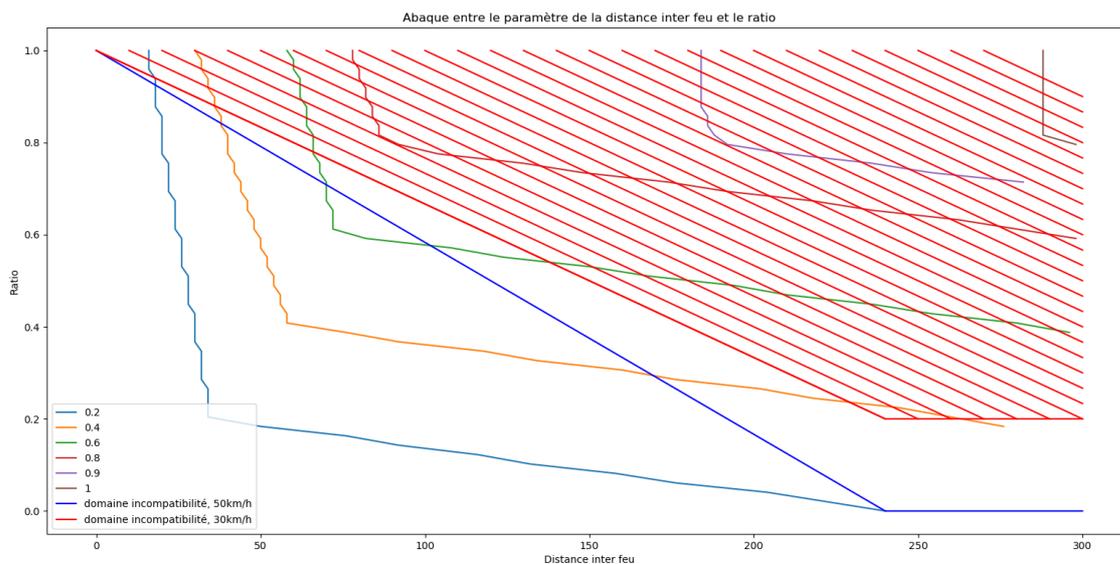


Figure 3.17 : Abaque des couples distance inter-feu/ratio pour lesquels la congestion atteint le début de tronçon pour un niveau de demande donné sur lequel sont introduites les zones d'incompatibilité vélo dans le cadre d'une circulation limitée à 30 et à 50 km/h Simulation sur une durée de 20 minutes - 10 périodes de 2 minutes

Il apparaît avec ce graphique que les zones respectant à la fois le critère d'incompatibilité pour les vélos et la remontée de congestion jusqu'au début du tronçon ne couvre pas beaucoup de demande. Il s'avère donc que ce critère est très pénalisant et qu'il faudrait limiter encore la vitesse des voitures sur la deuxième partie du tronçon pour voir ce critère disparaître ou instaurer l'interdiction de dépasser les vélos sur le tronçon en question.

En conclusion, il ressort que c'est abaque est un très bon outil, proche du côté opérationnel de l'aménagement de la voirie. Il apparaît qu'il peut être utilisé à des fins de prévision d'évolution de la congestion. L'abaque peut estimer le temps nécessaire à la congestion afin d'atteindre le début du tronçon, ce qui peut s'avérer utile pour une équipe chargée de la gestion de l'aménagement. Il peut également être un outil d'aide à la gestion du système de préfeu, puisqu'il peut donner le ratio adéquat pour une distance et une demande données. Il s'agit donc d'un outil à des fins diverses et variées.

Cette partie montre la pertinence de l'adaptation et de l'utilisation d'un système de préfeu pour améliorer la circulation des cyclistes. En effet, elle démontre même que mettre en place ce genre d'aménagements est un gain important dans la revalorisation de la circulation à vélo. Elle expose aussi que cela peut être fait sans contrepartie vis-à-vis des voitures puisque certains aménagements avec un bon réglage des paramètres du préfeu n'augmente pas le retard cumulé des voitures, par rapport à un aménagement sans considération pour les cyclistes. L'aménagement de ce système permet de gagner en sécurité pour les cyclistes tout en assurant une offre de qualité pour les voitures, voire la même que celle offerte par un système « tout voiture ».

Partie 4 :

Etude de la progression des cyclistes et pistes d'aménagement dynamique

Cette partie est dédiée à l'étude de la demande vélo. Elle va s'intéresser à la progression des cyclistes sur le tronçon étudié. Cette progression possède deux points majeurs qui sont le temps de parcours des cyclistes mais aussi la dangerosité à laquelle ils font face en empruntant cet itinéraire. Les temps de parcours seront traités à travers le retard cumulé des cyclistes. Ce retard cumulé rend compte des effets sur le temps de parcours des cyclistes. Il sera calculé comme celui des voitures dans la partie précédente. Cependant, du côté de la dangerosité, aucun indicateur n'est utilisé pour rendre compte de la sécurité. En effet, il est difficile de quantifier avec un indicateur la dangerosité à laquelle font face les cyclistes lors de leurs passages sur le tronçon. Une étude qualitative, comme celle déjà réalisée en partie 2, sur les conflits potentiels est cependant possible. Certaines situations semblent être plus ou moins dangereuses par rapport à d'autres mais il est impossible de mettre des valeurs chiffrées sur ces différences de dangerosité. Il a été montré, précédemment, que les situations de conflit au sein des trois aménagements étaient moins nombreuses dans le système avec préfeu que dans le système de piste cyclable temporaire. Les situations dangereuses dans un système qui prévoit la réservation d'une voie, sur toute la longueur du tronçon sont le tourne-à-gauche des vélos et le tourne-à-droite des vélos, comme le montrent les *figure 1.7* et *figure 1.8*.

Dans un premier temps, la demande vélo va être étudiée et plusieurs propositions de demandes vont être présentées.

4.1 Introduction d'une demande vélo :

La demande vélo est assez particulière, puisqu'elle peut être de différentes formes. En effet, à l'instar de la demande voiture, elle évolue au cours de la journée. D'ailleurs, les données présentées dans la partie 1, sur quelques sites de la ville de Paris, montrent bien l'évolution de cette demande au cours d'une journée. Cette évolution suit des hausses de demande qui sont lues le matin et le soir. Il est également important de noter, qu'à contrario de la circulation en voiture, la circulation à vélo peut s'effectuer en peloton et avec plusieurs cyclistes de front, surtout sur une voie d'une largeur de plus d'environ 3 mètres. C'est pourquoi la demande peut s'avérer être très forte sur une petite période, puis redescendre à un niveau bas, très peu de temps après. Il y a donc volonté de modéliser au mieux ces différences de demande au cours de la journée et c'est pourquoi trois types de demande vélos ont été testés et introduits dans le modèle. Ces trois types comprennent une loi uniforme, une loi normale et une loi exponentielle.

4.1.1 Demande qui suit une loi uniforme :

Pour commencer, il s'agit d'une loi uniforme, de pente constante, la même qui a été utilisée pour la demande voiture. Le graphique suivant présente la courbe de vélos cumulés de demande en entrée du tronçon.

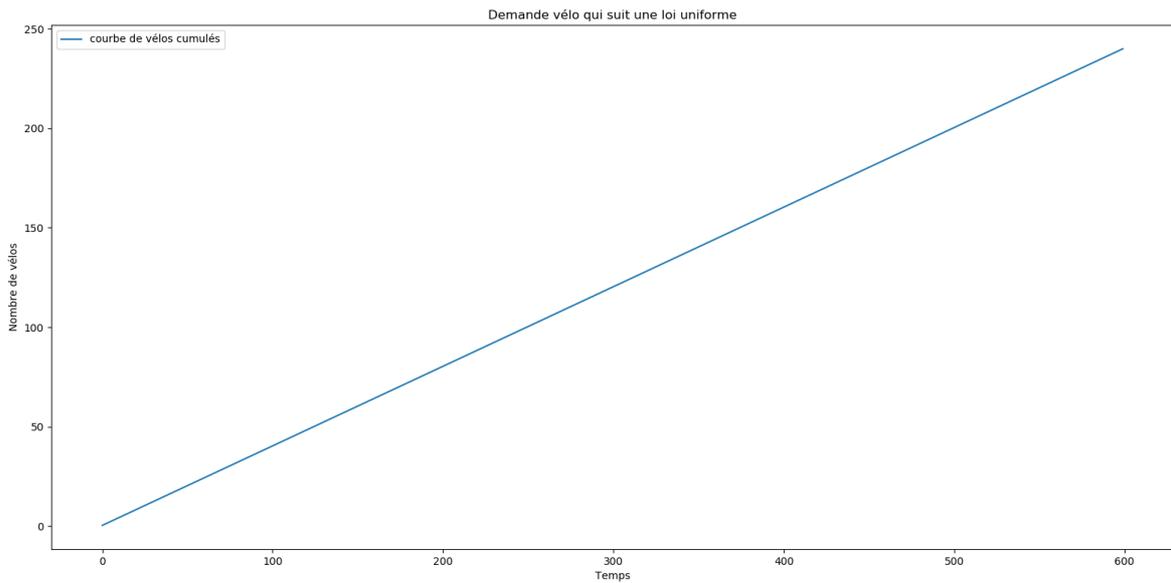


Figure 4.1 : Graphique de la courbe de vélos cumulés pour une demande vélo qui suit une loi uniforme

4.1.2 Demande loi de normale :

L'exemple suivant montre l'évolution d'une demande qui suit une loi normale. Il s'agit typiquement d'une forte demande qui dure très peu de temps. Cela modélise un important peloton de cyclistes qui entre dans le tronçon. Sur le graphique suivant, la demande en entrée du tronçon et la courbe de vélos cumulés sont représentées.

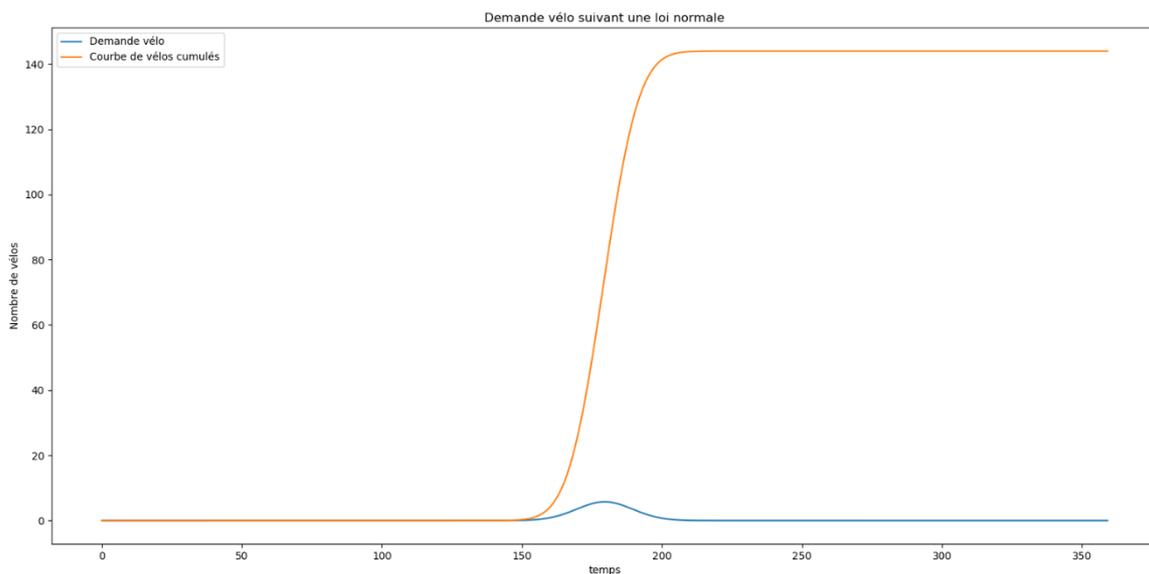


Figure 4.2 : Graphique des courbes de vélos cumulés et de demande vélo qui suit une loi normale

4.1.3 Demande loi exponentielle :

Le troisième exemple de demande est une demande qui suit une loi exponentielle. Cela modélise une montée en charge du réseau cycliste. Avec les exemples donnés en partie 1, sur différents sites de la ville de Paris, il apparaît que certains pics de demande surviennent avec ce genre

de demande. De plus, le programme utilisé pour créer cette demande exponentielle donne la possibilité de choisir le nombre de motifs souhaités. Cela permet donc d'obtenir et de modéliser quelques brefs sursauts de demande pouvant également modéliser des pelotons de cyclistes, comme dans le cas précédent. Le graphique suivant montre l'évolution de la courbe de vélos cumulés et de demande pour deux exemples différents, l'un avec un unique motif, le second avec 3 motifs.

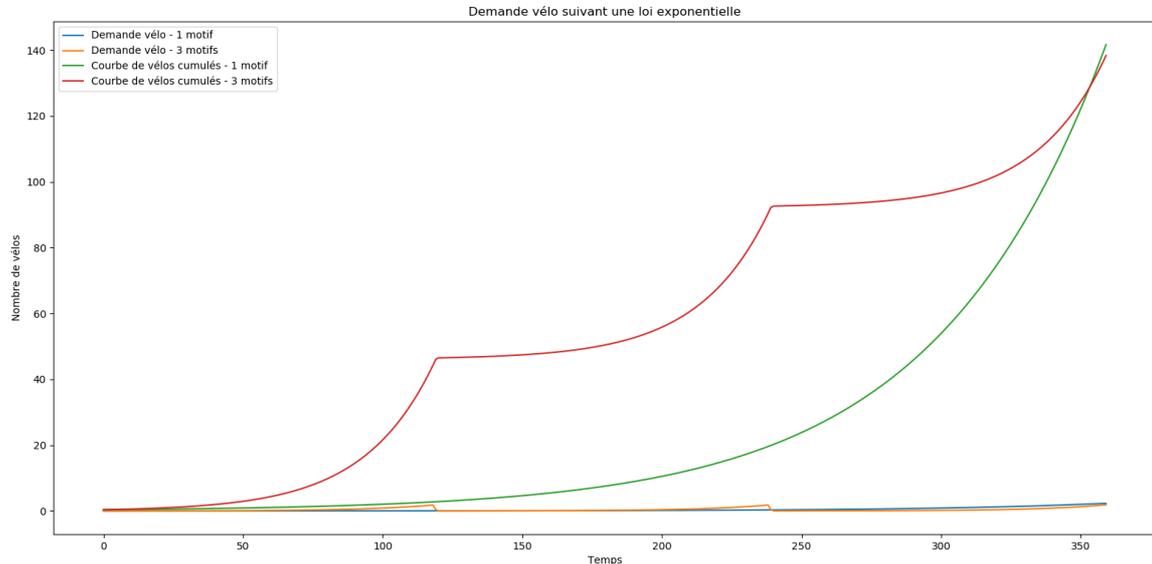


Figure 4.3 : Graphique des courbes de véhicules cumulés et de demandes vélo qui suit une loi exponentielle, pour 1 et 3 motifs

Ces différentes formes de demandes vélo servent à modéliser plusieurs moments de la journée et plusieurs cas différents, puisque cela peut modéliser la simple file indienne au groupement de vélos. Cela ne peut pas être vu dans le cas des voitures mais est assez courant pour les vélos. De plus, cela est souvent plus sécuritaire de progresser en peloton de cyclistes que tout seul. Cela permet d'être plus imposant et plus visible. Cela contribue au changement du rapport de force qu'il peut exister entre un seul cycliste et une voiture et qui n'existe plus entre un peloton de cyclistes et une voiture. Ainsi il est important de s'intéresser à des formes de demande de ce type.

4.2 Impact du préfeu sur la progression des cyclistes :

Maintenant que différentes formes de demande vélo ont été introduites. Elles vont être utilisées en entrée des modèles, pour ainsi étudier les performances qu'ont ces derniers. Le but de cette partie va être de quantifier le retard cumulé pour les vélos provoqué par la mise en place d'un système de préfeu. Chaque demande va être introduite dans le modèle d'une piste cyclable temporaire et dans le modèle d'utilisation du préfeu. Ensuite, l'accès à la différence des retards entre les deux modèles permettra de quantifier l'impact qu'a le préfeu sur la progression des cyclistes sur le tronçon. De la même manière que la partie précédente, les trois types de demande vont être étudiés de manière séparée.

Le niveau de demande de chacun des tests ne sera pas modifié au cours des simulations. Ce niveau de demande sera pris équivalent au niveau de demande maximale en voiture pour deux voies. Il apparaît, sur la *figure 1.4*, que les niveaux de demandes voiture et vélo sont équivalents au cours de la période de récupération des données. D'autant plus que le retard provoqué par la congestion des vélos doit être faible devant le retard provoqué par le préfeu. Les cyclistes bénéficient d'au moins à une voie, de largeur classique, ce qui leur permet de bien se condenser lors de file d'attente. Enfin, l'étude des abaques dans la partie précédente montre que la zone de compatibilité vélo est plus

importante dans les basses distance inter-feu, c'est pourquoi, cette distance sera abaissée à 50 mètres pour les simulations suivantes. Le domaine de variation des valeurs de ratio sera alors plus important que pour une distance inter-feu plus élevée. Les graphiques de cette partie seront basés sur des simulations de 10 minutes, qui correspondent à 5 périodes de 2 minutes.

4.2.1 Dans le cadre d'une demande uniforme :

Le premier cas s'intéresse à la demande qui suit une loi uniforme. Le graphique suivant montre l'évolution des courbes de vélos cumulés en entrée de tronçon, en sortie de tronçon pour un système qui modélise une piste cyclable temporaire et les sorties de tronçon pour un système avec préfeu en variant la valeur du ratio de celui-ci. Les valeurs de ratio sont décrites dans la légende du graphique.

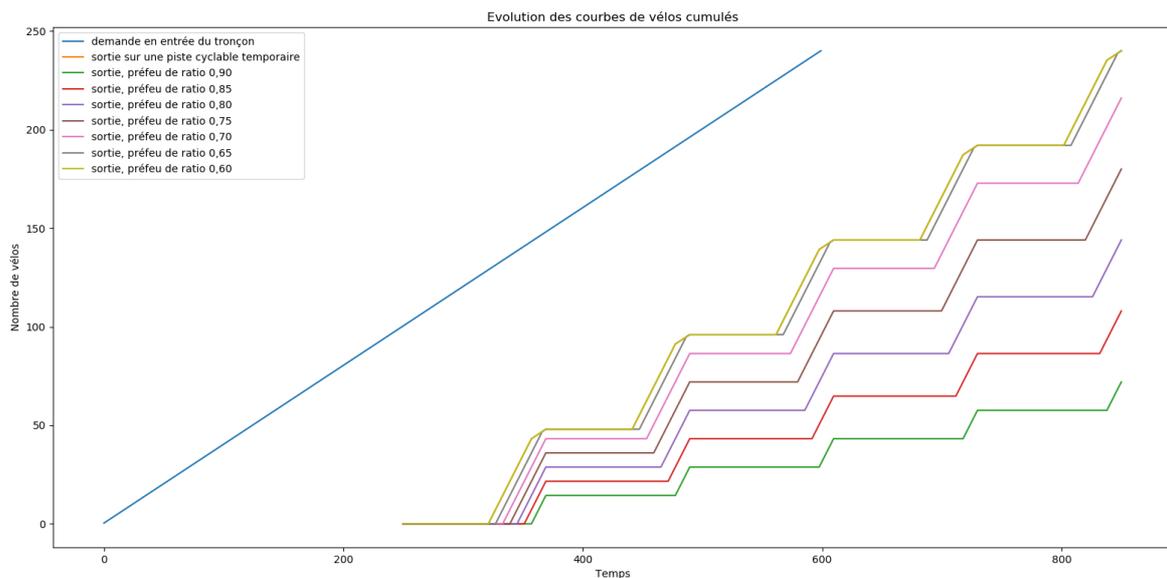


Figure 4.4 : Graphique de l'évolution des courbes de vélos cumulés pour une demande qui suit une loi uniforme

Il apparaît logiquement sur le graphique, que plus la valeur du ratio s'approche de 0,6, plus la courbe de vélos cumulés de sortie de système de préfeu se rapproche de celle de sortie de la piste cyclable temporaire. D'ailleurs la courbe de vélos cumulés de sortie pour le système avec préfeu n'est pas représentée pour la valeur de ratio 0,55, car à partir de cette valeur, les courbes de sortie des deux systèmes sont confondues. Cela s'explique par le fait que le feu de l'intersection devient plus contraignant que le préfeu pour les cyclistes qui proviennent de l'origine étudiée. Ce graphique montre que l'écart est très faible entre les courbes de vélos cumulés pour des valeurs de ratio inférieures à 0,75. Cet écart entre les courbes de véhicules cumulés matérialise le retard cumulé et est représenté sur la graphique suivant.

Le graphique suivant montre l'évolution du retard cumulé provoqué par le préfeu par rapport à un aménagement prévoyant une piste cyclable temporaire, en fonction de l'évolution de la valeur du ratio R.

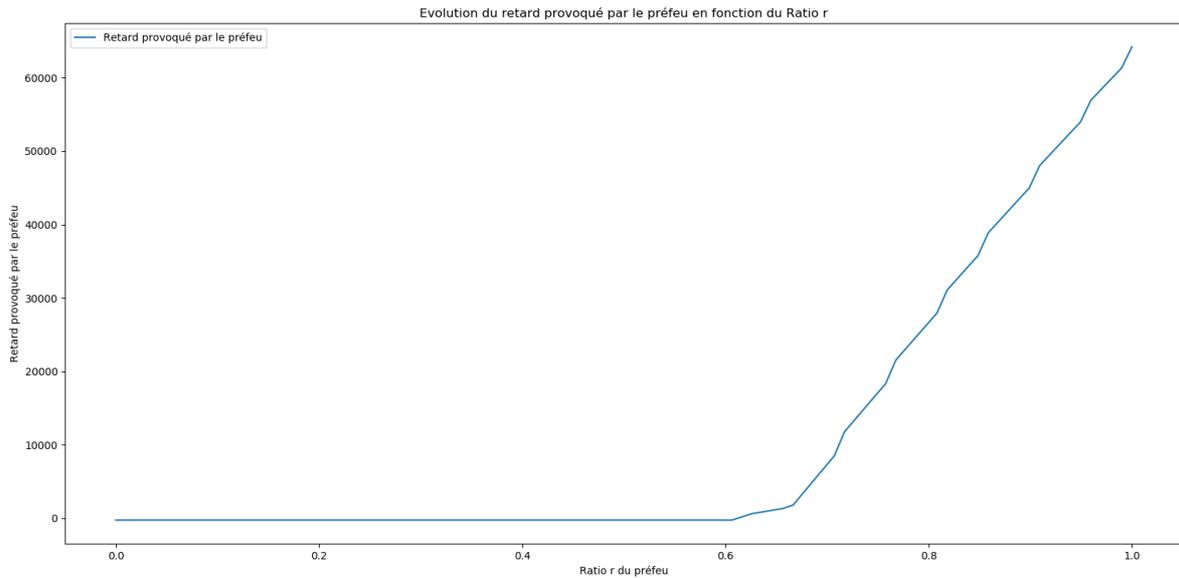


Figure 4.5 : Graphique de l'évolution du retard provoqué en fonction du Ratio R face à une demande qui suit une loi uniforme

Les conclusions du graphique précédent peuvent y être retrouvées puisque pour des valeurs de ratio inférieures à 0,6, le retard provoqué par le préfeu est nul. Cela veut dire que pour une valeur de ratio de 0,6, les cyclistes bénéficient dans un système avec préfeu des mêmes temps de parcours que dans un système avec piste cyclable temporaires. Le système offre en plus, une meilleure sécurité pour les cyclistes qui peuvent profiter des deux voies en aval du préfeu pour eux tout seul. Cela montre les réels avantages du dispositif avec préfeu devant celui des pistes cyclables temporaires.

4.2.2 Dans le cadre d'une demande normale :

L'étude d'une demande qui suit une loi normale est maintenant effectuée. De la même manière que précédemment, les courbes de vélos cumulés sont représentées sur le graphique suivant.

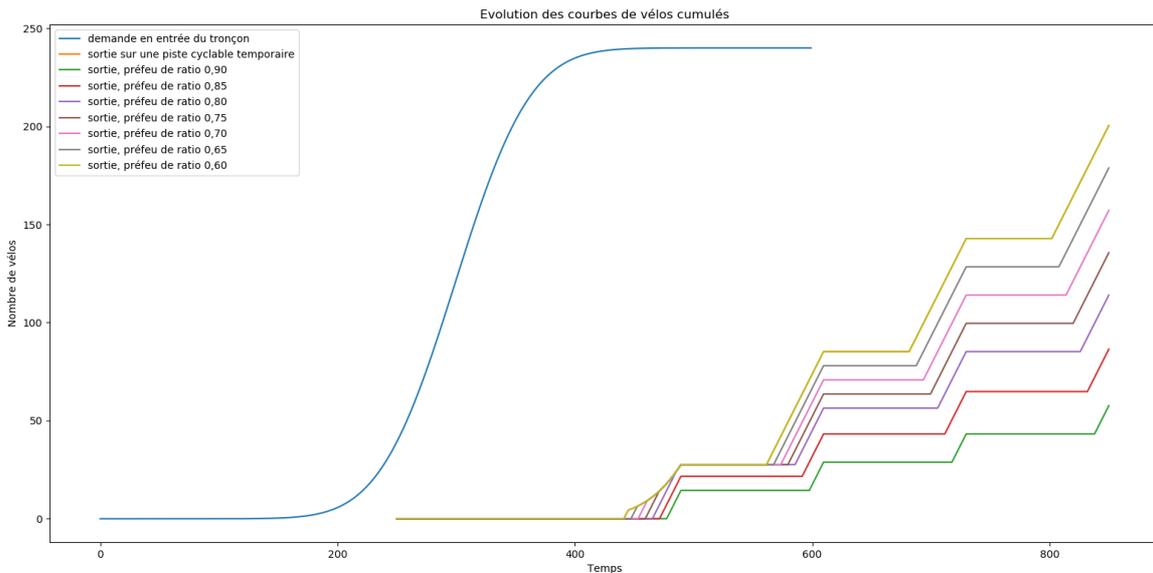


Figure 4.6 : Graphique de l'évolution des courbes de vélos cumulés pour une demande qui suit une loi normale

Là encore, pour des valeurs de ratio inférieures à 0,6, le préfeu n'engendre pas de retard supplémentaire pour les cyclistes. Le ratio du feu de l'intersection devient une nouvelle fois plus contraignant que le préfeu.

Le graphique suivant montre l'évolution du retard cumulé provoqué par le préfeu. Sans surprise, il apparaît que le retard est nul pour des valeurs inférieures à 0,6. De plus, avec ce type de demande, qui suit une loi normale, le retard cumulé ne croît pas autant que le retard cumulé provoqué par une demande qui suit une loi uniforme. Cela indique qu'un système de préfeu serait plus performant, il provoquerait moins de retard, face à une demande sous forme de pelotons plutôt qu'à une demande monotone et uniforme. Il aurait fallu réaliser cette simulation en décalant le pic de demande et plusieurs fois en regardant l'effet que cela engendrait sur le retard cumulé, pour en avoir la certitude. Cela aurait sans doute montré, que le temps auquel arrive le pic de demande, s'il arrive sur une période de vert ou de rouge du préfeu, affecte grandement le retard cumulé.

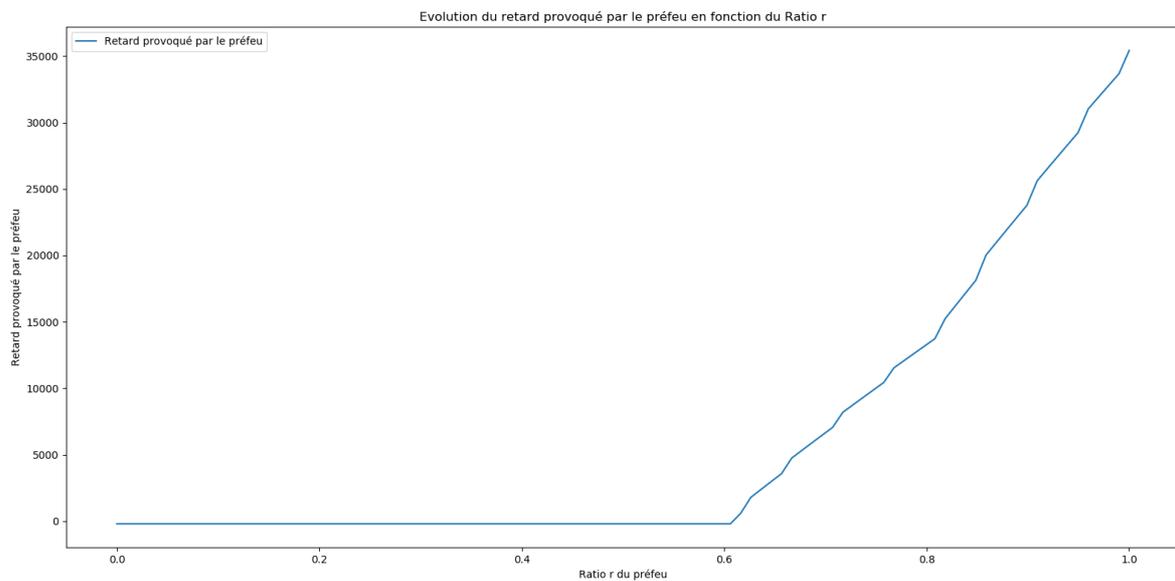


Figure 4.7 : Graphique de l'évolution du retard provoqué en fonction du Ratio R face à une demande qui suit une loi normale

4.2.3 Dans le cadre d'une demande exponentielle :

La demande qui suit une loi exponentielle est maintenant étudiée. Les deux graphiques suivent la même méthode que précédemment. Le premier étudie les courbes de véhicules cumulés tandis que le second étudie plus en détail l'écart entre ces courbes de véhicules cumulés et rend compte du retard cumulé.

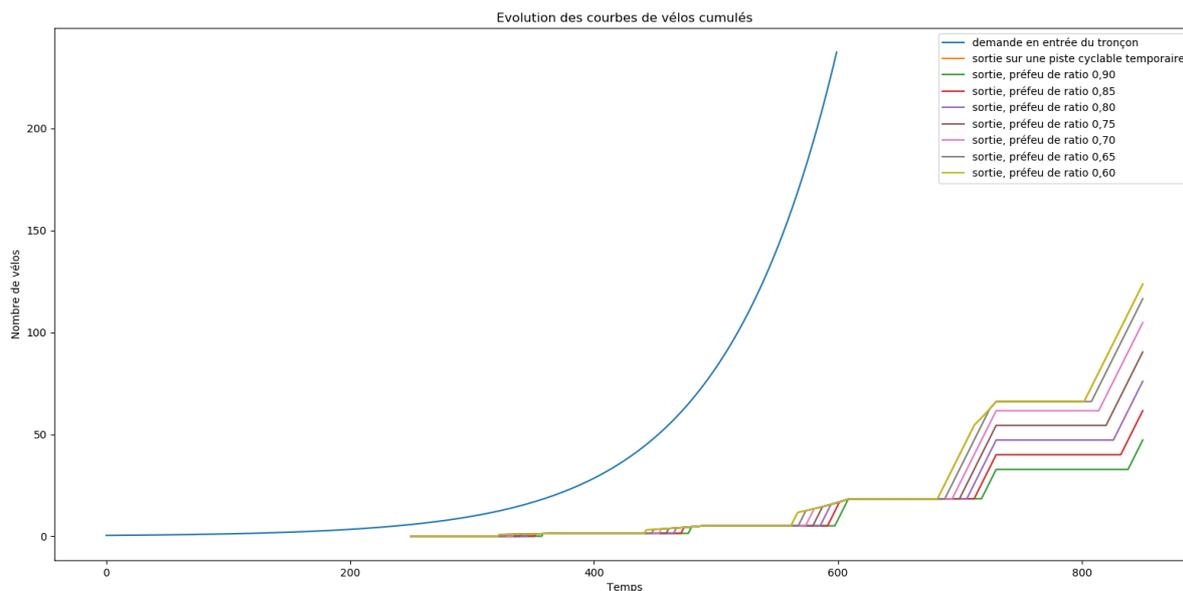


Figure 4.8 : Graphique de l'évolution des courbes de vélos cumulés pour une demande qui suit une loi exponentielle

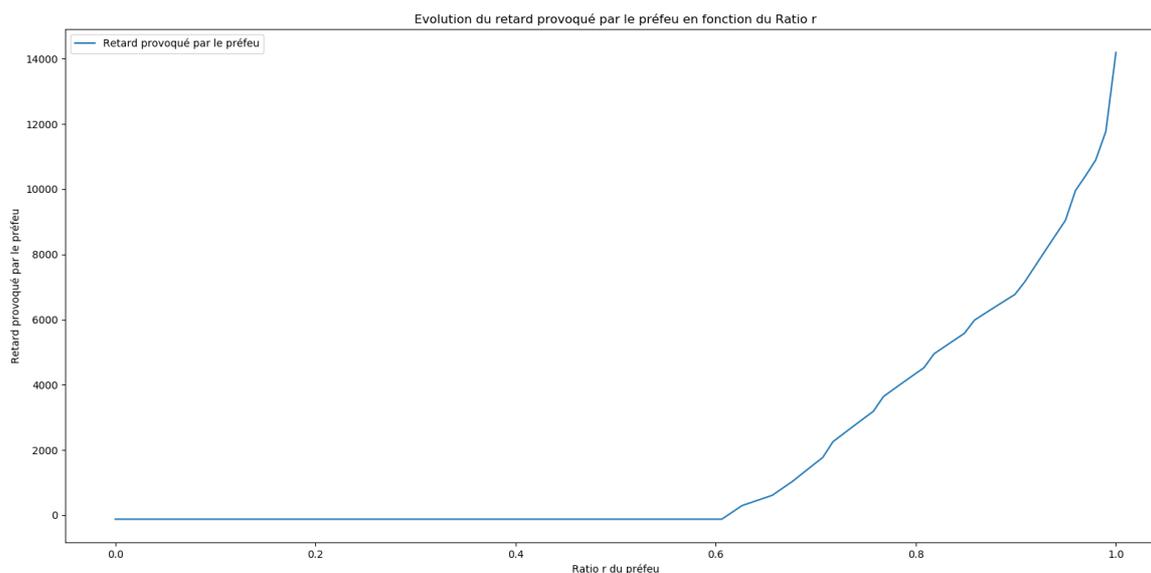


Figure 4.9 : Graphique de l'évolution du retard provoqué en fonction du Ratio R face à une demande qui suit une loi exponentielle

Une nouvelle fois, il apparaît que pour des valeurs de ratio inférieures à 0,6, le retard provoqué par le préfeu est nul. Il ressort également que le retard cumulé pour une demande exponentielle n'atteint pas le retard maximal. D'ailleurs le graphique suivant compile le retard cumulé des trois types de demande en fonction des variations de la valeur du ratio. Cela permet de se rendre mieux compte des différences que provoquent la demande sur le modèle de préfeu et ce qu'il engendre en retard cumulé.

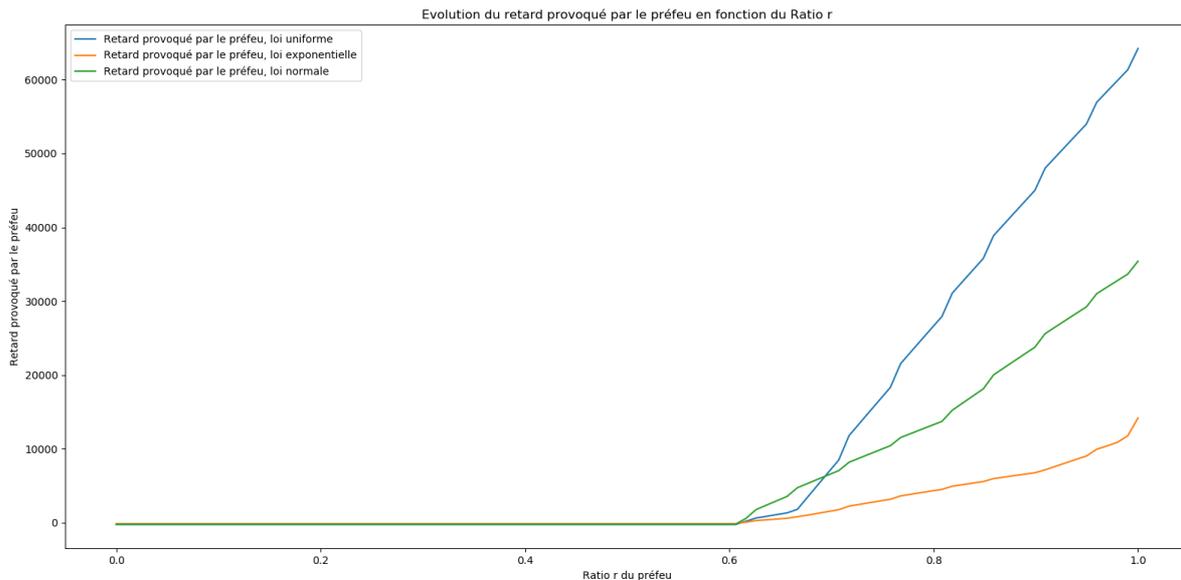


Figure 4.10 : Graphique de l'évolution du retard provoqué en fonction du Ratio R face aux trois demandes étudiées

Les demandes qui suivent une loi exponentielle et une loi normale sont basées sur la modélisation d'un peloton de cyclistes. Le temps auquel arrive le peloton de cyclistes affecte de façon importante la valeur du retard cumulé. Il aurait donc fallu recommencer cette simulation plusieurs fois en faisant varier le temps auquel arrivait le peloton pour pouvoir dégager une tendance et pouvoir dire qu'un système est plus apte et performant à favoriser la progression de pelotons. Dans ce cas, il n'est pas possible d'affirmer quelque chose.

Cependant il apparaît avec ces différents graphiques qu'il est très intéressant pour les cyclistes de progresser sur un site doté d'un dispositif de préfeu. Même avec des valeurs de ratio entre 0,6 et 0,8, le retard cumulé provoqué par le préfeu semble acceptable pour les cyclistes pour pouvoir profiter d'une infrastructure plus sécurisée. Quand cette valeur de ratio s'approche de 0,6, le retard diminue également et devient nul. Le dispositif de préfeu provoque alors aucun retard supplémentaire alors qu'il procure beaucoup plus de sécurité pour les cyclistes qu'une piste cyclable temporaire.

4.3 Vers un système dynamique :

Dans le but de trouver l'optimum entre la place donnée aux vélos et la performance du réseau pour les voitures, il est intéressant de penser à rendre dynamique le système de préfeu. Le fait de rendre dynamique l'infrastructure permet de rapprocher l'offre de la demande en temps réel. C'est-à-dire, que le site aurait besoin de capteurs et d'outils pour recevoir la demande en entrée du tronçon, que ce soit la demande voiture ou vélo. Ces informations seraient utiles à l'infrastructure pour adapter ses caractéristiques et répondre à la demande à laquelle elle fait face en temps réel. Cela permettrait de changer l'offre du préfeu et de l'infrastructure pour qu'elle corresponde au mieux à la demande qui lui fait face. Les caractéristiques variables d'un système avec préfeu se cantonnent uniquement à la valeur du ratio du préfeu et à l'activation du préfeu. En effet, une possibilité d'aménagement dynamique de l'infrastructure pourrait uniquement se reposer sur l'activation ou non du préfeu. Une option éventuelle pourrait être de n'utiliser le préfeu qu'en cas de forte demande voiture. En dehors de ces périodes de fortes, une voie serait dédiée à la circulation à vélo. Du côté de la valeur du ratio, il serait intéressant de la faire varier en fonction de l'information reçue par l'infrastructure. Cette valeur pourrait évoluer de deux façons différentes.

En effet, une option envisageable et possible à réaliser est que le préfeu donne beaucoup de priorité aux vélos, c'est donc d'opter pour une valeur de ratio faible. L'infrastructure serait capable de quantifier la demande voiture. Avec l'information de cette demande voiture, l'objectif de l'infrastructure serait de faire varier sa valeur de ratio juste assez pour ne pas provoquer une remontée de file qui atteigne le début du tronçon. C'est-à-dire que le ratio serait augmenté légèrement à chaque hausse de demande voiture, juste assez pour ne pas tomber dans un scénario de congestion globale. Ce type de gestion ne paraît pas viable pour les périodes de forte demande voiture mais pour des plages horaires en dehors de ces périodes. Les cyclistes bénéficieraient de très bonnes conditions de circulation. Cependant, en dehors des périodes de forte demande voiture, cela pourrait être l'option par défaut des décideurs locaux. Pour réaliser ce type de gestion, un outil comme l'abaque présenté dans la partie 3 serait une très bonne chose, puisqu'il permet de savoir avec une demande donnée le temps nécessaire pour que la congestion atteigne le début du tronçon. C'est une option qui favorise la circulation à vélo, ces derniers ne seraient pas beaucoup ralentis lors de leurs passages dans le tronçon, alors que les voitures seraient très souvent ralenties au cours de leurs passages au sein du tronçon. Il est possible de généraliser cette option sur les sites qui ne présentent pas beaucoup d'influence en termes de voitures.

Une deuxième option envisageable est que le préfeu donne beaucoup la priorité aux voitures lors de leurs passages sur le site et qu'il donne ponctuellement la priorité aux vélos. La valeur du ratio serait assez forte et proche de 1. L'infrastructure aurait pour but de capter la demande vélo en entrée du tronçon et l'idée serait qu'à partir d'un certain nombre d'usagers ou d'un temps critique, que le préfeu passe en position verte pour les cyclistes. Cela semble plus pénaliser la progression des vélos, car ils seraient presque dans tous les cas obligés de s'arrêter au préfeu. Cependant, ce système s'inspire de ce qui est actuellement le cas pour le passage des piétons sur un axe routier. Les piétons doivent attendre avant de traverser un axe routier important. Le délai attendu peut être diminué sur quelques sites où l'on peut appuyer sur un bouton pour signaler sa présence. Le temps est alors pondéré. Cela mène à la formation de groupe de personnes qui se déplacent en peloton et qui traversent l'axe routier au même moment. Cette option conduirait également à la formation de pelotons chez les cyclistes. Cette option peut être utile dans les zones à forte demande voiture où l'insécurité pour les vélos serait importante. Ainsi cela serait avantageux pour les cyclistes d'attendre plus longtemps pour s'assurer deux voies sécurisées en aval du préfeu pour traverser le tronçon. Cette option serait à utiliser avec parcimonie puisque trop de sites instaurés avec cette option pourrait nuire globalement à l'attractivité de la circulation à vélo et pourrait engendrer une baisse des déplacements à vélo. Ce qui n'est pas du tout le but recherché. Cependant, sur certains sites qui semblent dangereux à emprunter pour les cyclistes, il serait pertinent de déployer cette option. L'idée est alors d'augmenter les temps de parcours pour pouvoir profiter d'une traversée moins dangereuse : ce qui est perdu en temps de parcours, est gagné en sécurité.

Ces deux options de gestion dynamique sont intéressantes à promouvoir, elles semblent complémentaires et ne s'adressent pas aux mêmes sites. L'option qui favorise la circulation à vélo avec une valeur de ratio faible s'adresse plus aux axes qui présentent une faible demande voiture. Alors que l'option qui pénalise en quelque sorte le temps de parcours des vélos au profit d'un accroissement de leur sécurité avec une valeur haute de ratio s'adresse plus aux axes qui sont soumis à une forte demande en voiture qui présentent une certaine insécurité pour les cyclistes.

La période d'attente que doivent respecter les cyclistes devant le préfeu, fait surgir d'autres problématiques de trafic actuelles. En effet, récemment, les autorités locales ont pris conscience de la part importante de trajets qui s'effectuaient à vélo et du peu de considération que l'infrastructure leur apportait. Depuis quelques temps, un travail a été réalisé sur le territoire pour analyser les différents mouvements au sein des agglomérations, sur des intersections particulières pour fluidifier le trafic à vélo et l'intégrer au sein des phases de feu des intersections. Cette démarche prouve l'intérêt qu'ont les décideurs à améliorer et intégrer la circulation à vélo au sein de leurs villes. La fleuraison d'un bon

nombre de panneaux de la circulation à l'attention des vélos est également le témoin de cette prise de conscience des autorités locales. A l'image de Lyon, les carrefours à feux de nombreuses villes ont été dotés de panneaux de signalisation M12. C'est près d'un carrefour à feux sur trois dans la ville de Lyon qui est concerné [4.1]. Ce panneau M12 autorise les cyclistes à franchir un feu rouge, dans la direction indiquée par le panneau, en donnant la priorité aux véhicules qui sont au vert. La figure suivante montre l'exemple de ce panneau et ses variantes.

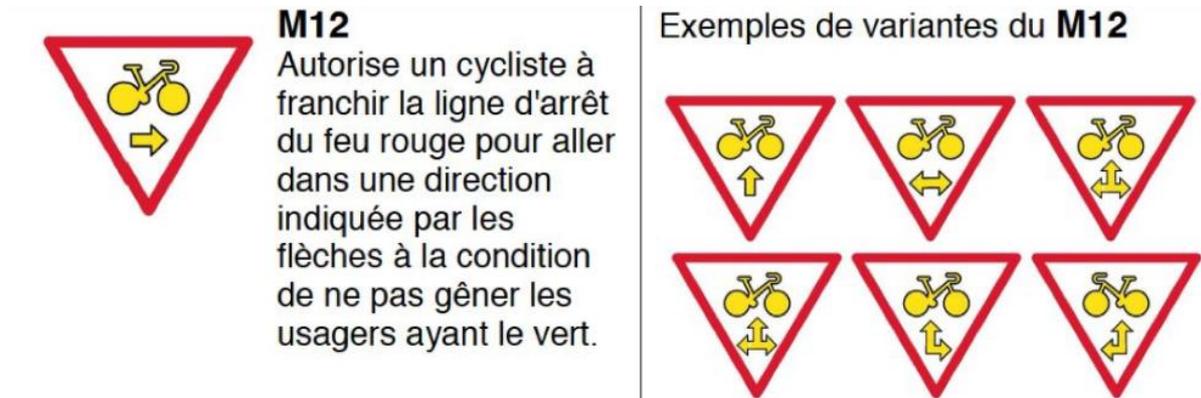


Figure 4.11 : Présentation du panneau M12 et de ses variantes

Ainsi il permet de fluidifier le trafic des cyclistes au sein des carrefours à feu, en leur permettant de passer au feu rouge et de ne pas respecter un temps d'arrêt. Cela possède l'avantage d'améliorer considérablement les temps de parcours des cyclistes sans prendre trop de risques. Cette mesure rentre dans le cadre d'une idée plus globale qui est appelée « vert gratuit ». Il s'agit d'un concept qui est basé sur l'étude des mouvements des cyclistes au sein d'une intersection pour connaître les incompatibilités et les compatibilités de mouvement des différents modes de transport interagissant dans l'intersection. Le but est de ne pas bloquer les cyclistes à un feu alors qu'ils peuvent en réalité franchir et passer l'intersection en toute sécurité, c'est donc de s'intéresser aux mouvements des vélos pour pouvoir leur donner le plus de phase verte possible. Un très bel exemple de ce concept et de la présence de panneaux M12, est le cours Lafayette à Lyon. Il a été doté de nombreux panneaux M12 et de feux tricolores pour les cyclistes qui peuvent bénéficier de très bonnes conditions de circulation, que ce soit en termes de temps de parcours, les feux tricolores pour vélos sont souvent au vert et beaucoup de panneaux M12 sont présents, ou que ce soit en termes de sécurité.

Il existe une possibilité de combiner la mise en place de panneau M12 dans un système de préfeu. Les panneaux se trouveraient sur le préfeu et autoriseraient les cyclistes à le franchir quand le préfeu est en phase de vert pour les voitures. Cela permettrait aux vélos de ne jamais s'arrêter sur le tronçon, aucun retard ne serait alors perçu par ces derniers. Cependant, la sécurité des cyclistes serait alors moins bonne, car il y aurait cohabitation avec les autres modes de transport au sein des deux voies en aval du préfeu. Cela peut être réservé aux cyclistes les plus aguerris.

Tout cela montre l'intéressement de plus en plus croissant des décideurs locaux à la circulation à vélo, qui est de plus en plus améliorée au sein des villes. Dans ce contexte, il serait vraiment intéressant de véhiculer la volonté de pérenniser les aménagements cyclables au sein des villes, même si cela passe par une adaptation et une modification des pistes cyclables temporaires.

4.4 Limites :

Des limites sont présentes dans cette étude. Dans un premier temps, certaines hypothèses sont assez restrictives et ne suivent pas forcément la réalité. Le domaine étudié est assez complexe et le rapport se base sur des hypothèses simples et des modélisations basiques pour répondre à des phénomènes assez pointus et complexes. Les réponses apportées sont construites à partir des résultats de modélisation d'un tronçon aménagé de trois façons différentes. La méthodologie appliquée semble bonne mais le niveau de technicité n'est sans doute pas assez pointu pour affirmer qu'un aménagement est plus performant qu'un autre. Il est seulement possible d'affirmer que dans les conditions dans lesquelles ils sont testés, sur des simulations de durée donnée, l'un paraît avoir de meilleures performances que l'autre. La sensibilité de certaines de ces hypothèses n'a également pas été effectuée, comme par exemple le temps de vert du feu de l'intersection donné à l'origine étudiée. Ce temps de vert est assez important dans l'étude puisqu'en fonction de sa valeur et donc de la contrainte qu'impose ce feu tricolore à l'origine étudiée, le préfeu peut devenir plus ou moins contraignant face à lui, donc le retard qu'il provoque varie également. Il aurait été intéressant de pouvoir tester un plus large nombre d'hypothèses, afin de connaître leurs effets sur les performances des modèles et mêmes afin de vérifier la véracité des codes et des calculs.

De plus, les programmes possèdent également leurs limites. La réalisation des abaques a également été freinée par les performances de l'ordinateur. Les abaques pour une durée de simulation importante ont été impossible à sortir.

Enfin, comme déjà explicité dans le travail, il est difficile de quantifier la sécurité d'un aménagement par rapport à un autre. Il est efficace d'étudier les différentes situations qui créent des conflits dans un aménagement et donc de comparer ces situations avec celles d'un autre aménagement. Cependant cela reste du qualitatif et ne débouche pas sur un indice chiffré qui rend compte réellement de la sécurité des cyclistes à traverser le tronçon étudié.

4.5 Pistes de réflexion et perspectives :

Les perspectives de poursuite du travail sont assez nombreuses puisque que la partie sur l'aménagement dynamique ouvre de nombreuses possibilités d'étude. Les deux options présentées de gestion dynamique sont intéressantes à étudier et à détailler. Il est même intéressant de pouvoir tester ces deux options face à de réelles demandes et des variations de demande. Cela ouvre également des possibilités sur le travail à réaliser sur les variations du ratio du préfeu face aux variations de demande. De plus, l'idée de doter les préfeu de panneau M12 est intéressante et mériterait d'être approfondie pour obtenir un aménagement encore plus performant pour les cyclistes empruntant cet itinéraire.

Cependant d'autres points sont également intéressants à poursuivre. Le travail n'étudie pas le décalage entre le préfeu et le feu de l'intersection, ce qui pourrait améliorer ou diminuer considérablement les délais et les conséquences sur la performance globale du système. En effet, les retards des voitures et des vélos pourraient être modifiés et amplifiés pour certains.

De plus, à l'heure actuelle où l'assistance électrique, les données de géolocalisation sont en plein essor dans le milieu du vélo, il serait intéressant de se rapprocher des vélos connectés. En effet, à l'image de ce qui est fait pour les bus, il serait pertinent de pouvoir connecter les vélos et la position des vélos à l'infrastructure. Cela permettrait sans doute de fluidifier le trafic de ces derniers. Plusieurs points seraient possibles à réaliser comme essayer dans un premier temps, de former des pelotons de cyclistes en regroupant des individualités. Il serait ensuite plus facile, dans un second temps, de favoriser un groupe plutôt qu'une somme d'individualités. D'où l'intérêt de former des pelotons de

cyclistes, outre le fait que ce soit moins dangereux d'évoluer en peloton qu'en autonomie. En effet, l'infrastructure pourrait localiser les pelotons en entrée de tronçon et leur donner plus facilement la priorité. De plus, comme explicité précédemment, les pelotons de vélos sont plus commodes à la circulation à vélo, puisqu'ils permettent à la fois d'être plus en sécurité vis-à-vis des voitures, car les vélos sont en plus grand nombre et plus visibles, mais cela est également commode d'un point de vue de la dépense énergétique et de l'aspiration, comme c'est le cas aussi pour la création de peloton pour les camions. Plusieurs études montrent que la formation de pelotons de transporteurs routiers sur autoroute permet la réduction de consommation et donc des émissions de gaz à effet de serre. Et enfin, la circulation en peloton est plus agréable car plus sympathique pour les cyclistes qui peuvent échanger entre eux.

Conclusion

La population est de plus en plus sensible aux mesures qui sont prises en faveur de l'environnement et de la durabilité de l'aménagement du territoire. En effet, les personnes sont de plus en plus enclines à adopter des habitudes de vie plus respectueuses de l'environnement, cela s'est notamment traduit par l'élection de nombreux maires issus des listes écologistes aux dernières élections municipales. La crise sanitaire à laquelle fait face la population peut être vue comme une occasion et une opportunité pour changer ses habitudes de vie et notamment ses habitudes de déplacements au sein des villes.

L'objet du questionnaire est le caractère temporaire des pistes cyclables qui ont été déployées sur le territoire urbain. Les autorités ont dû trouver des solutions pour répondre aux règles sanitaires lors du déconfinement et ont créé ce genre d'aménagements dans les villes pour concurrencer l'offre des transports publics et ainsi éviter tout regroupement de personnes dans un espace clos. Les usagers ont répondu très favorablement à cette initiative car une nette augmentation des trajets à vélo a été observée dans beaucoup de villes lors du déconfinement. Le but de l'étude a été de savoir s'il est possible qu'un aménagement de ce type puisse se pérenniser et attirer de plus en plus d'usagers. Cette pérennisation se base sur deux principes : l'amélioration des conditions de circulation à vélo mais aussi au maintien d'une offre acceptable pour les voitures.

Les pistes cyclables temporaires sont basées sur la réservation d'une voie complète pour les cyclistes, ce qui réduit considérablement la place de la voiture au sein de la ville. Cela conduit à une forte baisse des performances du réseau et de l'offre pour les voitures et donc à la favorisation de la congestion en ville. C'est pourquoi, une adaptation d'un système de préfeu à l'utilisation cycliste a été introduite au cours du travail pour essayer de partager au mieux l'espace entre l'utilisation du vélo dans de bonnes conditions et l'utilisation de la voiture pour limiter la congestion au sein du réseau. L'objectif a donc été de favoriser les conditions de circulation à vélo tout en maintenant une offre acceptable pour les voitures. Cela est nécessaire de lier les deux objectifs car il s'agit du garant de la durabilité de l'aménagement. En effet, un espace qui est réalisé en ne prêtant pas attention aux cyclistes ne sera pas emprunté par ces derniers et aura une faible attractivité. Un espace qui n'est pas conscient de ses performances d'offre pour les voitures prend le risque de trop favoriser la congestion en ville qui est sujette à l'accroissement des accidents et à la hausse des émissions de gaz à effet de serre et des nuisances sonores.

La modélisation de trois aménagements différents, celui avec une voie dédiée pour les vélos, celui avec l'utilisation d'un préfeu et enfin celui ne comportant aucun aménagement pour les vélos a été réalisée. Ces trois modèles ont ensuite été testés face à des demandes différentes en étudiant plusieurs indices de performance. Les résultats montrent qu'il est possible d'opter pour un modèle avec utilisation d'un préfeu, en ajustant correctement ses paramètres, puisqu'il permet à la fois de plus sécuriser les cyclistes que les pistes cyclables temporaires mais aussi de concurrencer le modèle ne prévoyant aucun aménagement pour les cyclistes en termes de retard cumulé et en termes de débit de saturation. Ceci mène à penser qu'il est possible de réaliser des aménagements de ce type dans nos villes pour aider à pérenniser l'alternative de la circulation à vélo. Il serait donc pertinent de ne pas pérenniser les pistes cyclables temporaires telles qu'elles le sont actuellement dans nos villes, il serait plutôt intéressant de les adapter et de les doter d'un dispositif de préfeu pour qu'elles puissent être plus efficaces pour les voitures tout en garantissant de très bonnes conditions de circulation pour les cyclistes. Cela ouvre également beaucoup de possibilités quant à la gestion dynamique du système, ce qui est un atout pour adapter l'offre à la demande et utiliser au mieux l'espace urbain.

L'époque actuelle semble être une belle opportunité pour véhiculer ce mode de déplacement, les achats de vélos neufs ou d'occasion n'ont jamais été aussi hauts. C'est pourquoi il serait pertinent de saisir l'opportunité qui s'offre aux autorités pour déployer de nouveaux aménagements de ce type, en faveur de la circulation à vélo afin que ce mode de déplacement rentre définitivement comme une habitude, un réel mode de déplacement et non comme un loisir.

Bibliographie

- [1.1] : M. Paipuri, L. Leclercq, J. Krug. (2019). Validation of MFD-based models with microscopic simulations on real networks : Importance of production hysteresis and trip lengths estimation.
- [1.2] : X. Liu, L.D. Shen and J. Huang. (1995). Analysis of Bicycle Accidents and Recommended Countermeasures in Beijing, China.
- [1.3] : B. de Geusa, G. Vandenbulcke, L.I. Panisc, I. Thomas, B. Degraeuwec, E. Cumps, J. Aertsens, R. Torfs et R. Meeusen. (2011). Accident Analysis and Prevention, A prospective cohort on minor accidents involving commuter cyclists in Belgium.
- [1.4] : E. Chevallier. (2008). Modélisation dynamique du trafic et du bruit au niveau des carrefours giratoires.
- [2.1] : Y. Xuan, C.F. Daganzo et M.J. Cassidy. (2011). Increasing the capacity of signalized intersections with separate left turn phases.
- [2.2] : H. He, S. Ilgin Guler et M. Menendez. (2016). Adaptive Control Algorithm to Provide Bus Priority with a Pre-signal.
- [2.3] : S. Ilgin Guler, V. Gayah et M. Menendez. (2016). Bus priority at signalized intersections with single-lane approaches : A novel pre-signal strategy.
- [4.1] : Lyon Capitale : 11 décembre 2019 (<https://www.lyoncapitale.fr/actualite/lyon-que-signifie-le-panneau-sous-les-feux-rouges-avec-velo-et-fleches/>)

Annexe

Annexe 1 : Photos de pistes cyclables temporaires à Lyon, Avenue de Saxe, Rue Garibaldi et Rue Duquesne.



Annexe 1.1 : Photographie de la piste cyclable temporaire de l'Avenue de Saxe - Lyon



Annexe 1.2 : Photographie de la piste cyclable temporaire de l'Avenue de Saxe - Lyon



Annexe 1.3 : Photographie de la piste cyclable temporaire de l'Avenue de Saxe - Lyon



Annexe 1.4 : Photographie de la piste cyclable temporaire de l'Avenue de Saxe - Lyon



Annexe 1.5 : Photographie de la piste cyclable temporaire de la Rue Duquesne - Lyon



Annexe 1.6 : Photographie de la piste cyclable temporaire de la Rue Duquesne - Lyon



Annexe 1.7 : Photographie de la piste cyclable temporaire de la Rue Garibaldi - Lyon



Annexe 1.8 : Photographie de la piste cyclable temporaire de la Rue Garibaldi - Lyon

Annexe 2 : Y. Xuan, C.F. Daganzo et M.J. Cassidy. (2011). « Increasing the capacity of signalized intersections with separate left turn phases »



Increasing the capacity of signalized intersections with separate left turn phases

Yiguang Xuan, Carlos F. Daganzo*, Michael J. Cassidy

Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, CA 94720, United States

ARTICLE INFO

Article history:

Received 8 July 2010

Received in revised form 7 February 2011

Accepted 8 February 2011

Keywords:

Traffic signal capacity

Pre-signals

Left turn phases

ABSTRACT

A separate turn phase is often used on the approach leg to an intersections with heavy left turns. This wastes capacity on the approach because some of its lanes cannot discharge during its green phases. The paper shows that the problem can be eliminated by reorganizing traffic on all the lanes upstream of an intersection using a mid-block pre-signal. If drivers behave deterministically, the capacity that can be achieved is the same as if there were no left turns. However, if the reorganization is too drastic, it may be counterintuitive to drivers. This can be remedied by reorganizing traffic on just some of the available lanes. It is shown that such partial reorganization still increases capacity significantly, even if drivers behave randomly and only one lane is reorganized. The paper shows how to optimize the design of a pre-signal system for a generic intersection. It also identifies both, the potential benefits of the proposed system for a broad class of intersections, and the domain of application where the benefits are most significant.

© 2011 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Left turns can be a significant hindrance to the smooth flow of traffic in networks involving at-grade intersections. If left turns are sufficient in number, separate left turn phases are typically introduced at signalized intersections to handle the flow (Newell, 1989). The problem with left turns is also indirectly addressed by generic optimization methods devised to determine the duration of signal phases (e.g., Webster, 1958; Allsop, 1972), which were later generalized to include the grouping of streams into phases (e.g., Improta and Cantarella, 1984; Gallivan and Heydecker, 1988; Silcock, 1997), and more recently to determine the number of lanes that should be made available to the streams (Wong and Wong, 2003).

The above-cited works are concerned with the reduction of vehicle delays when the intersection approach is undersaturated; i.e., when it has sufficient capacity to serve the demand. Vehicle-actuated (VA) signal control is often used to further reduce this delay by dynamically allocating green times to accommodate cyclic fluctuations in demand. Although VA control can reduce delay on undersaturated approaches (Greenough and Kelman, 1999; Peck et al., 1999; Sussman et al., 2000), it is well known that VA signals can do little to increase the capacity of oversaturated approaches (Newell, 1989; Lo and Chow, 2004). The effects of oversaturation can only be eliminated by reducing demand or increasing capacity. If nothing is done, oversaturation can cause gridlock at the network level (Daganzo, 2007).

Left turns in large numbers contribute to the oversaturation, because they require separate green phase allocations and these sub-phases reduce intersection capacity.¹ These capacity problems are often avoided in practice by banning and re-routing the offending left-turns. This can be done in different ways; e.g., with median U-turns, jughandles, superstreets, paired intersections, quadrant roadways, and bowties (see e.g. ATTAP, 2006; Rodegerdts et al., 2004). These strategies are good

* Corresponding author.

E-mail address: daganzo@ce.berkeley.edu (C.F. Daganzo).

¹ Clearly, only part of the intersection cross section is used to discharge vehicles during each of these green sub-phases.

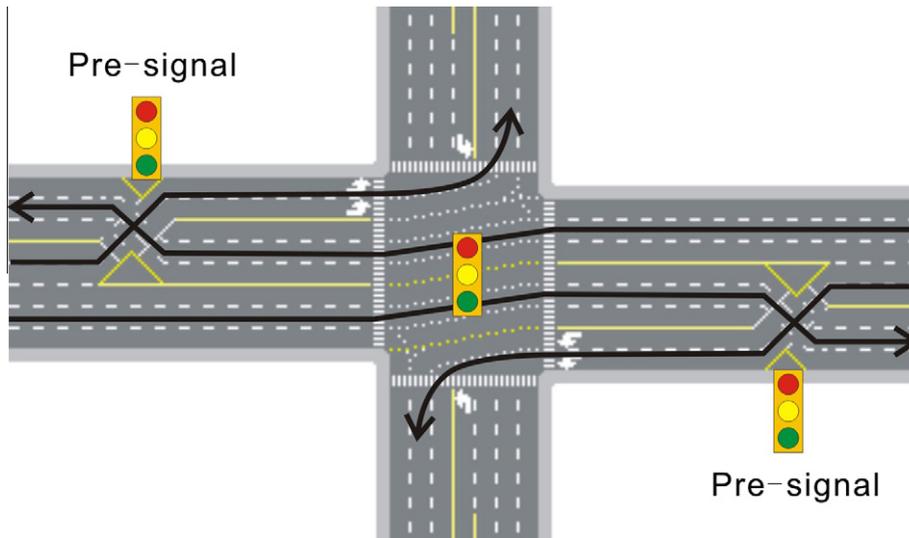


Fig. 1. Continuous flow intersection. Arrows show the movements allowed during the intersection's green phase for the horizontal directions.

because they eliminate both, the left turns and the need for left turn phases, thereby increasing the intersection capacity. But the strategies also force left-turning vehicles to go through the intersection multiple times, increasing demand there. This offsets some of the benefit. In addition, most re-routing designs involve construction and require substantial space, which may not be available.

In view of this, this paper proposes a way of increasing capacity without banning left turns or modifying the intersection in a way that requires major construction. The focus of the analysis is a generic approach leg to a 4-way intersection controlled by a pre-timed traffic signal. The approach receives two green sub-phases: one for left turns only, and the other for the exclusive use of through and right-turn movements.

Currently, intersections of this type do not operate efficiently because during the protected left-turn sub-phase, only the lanes devoted to left turns discharge. Conversely, during the through sub-phase only the through (and right turn) lanes discharge. This is inefficient because many lanes go unused during the green phases. The problem is compounded when lanes are shared by through and left-turn vehicles, which cannot fully discharge during either sub-phase due to blocking. Imagine how much more capacity could be gained if all lanes could be made to fully discharge during both sub-phases. The paper will show how this objective can be realized by dynamically re-organizing traffic upstream of the intersection with a pre-signal.

The idea of pre-signals is not new. They have been used in Europe to give buses priority for a long time (Oakes et al., 1994). Pre-signal systems for both, buses and bicycles have been studied in Wu and Hounsell (1998) and Xuan et al. (2009), respectively. Pre-signals have also been used in connection with left turns; see Fig. 1, which illustrates the “continuous flow intersection (CFI)” concept (Al-Salman and Salter, 1974; Goldblatt et al., 1994). This concept resolves the left-turn vs. opposing-through conflict at the pre-signals, as shown in the figure. Since the left-turn vehicles and opposing-through vehicles are reorganized to avoid conflicts at the intersection, they can be served in a single green phase, and this increases capacity. Interesting as it is, the CFI concept still has some drawbacks, however: (a) it requires permanent changes in layout, which cannot be turned on and off as needed; (b) it wastes lane resources unless the demands for left and through vehicles happen to be in the same balance as the lanes are marked; (c) it cannot be surgically deployed on a single approach of a 4-way intersection—at least 2 approaches need to be involved; and (d) it precludes bus stops from being located on the far side of the intersection.

The proposed design is similar in spirit but overcomes these problems. Since it can be deployed on a single approach leg, a single approach will be the object of analysis. Section 2 describes the concept; Section 3 the optimum signal settings and capacity formulae; and Section 4 discusses the results, including the spatial requirements of the system.

2. The concept

The basic idea is depicted in Fig. 2a. Flow is left to right. Note the pre-signal and its (dark) stop line. Upstream of the pre-signal, lanes are marked by movement. These markings segregate left-turning vehicles (LVs) and through/right-turning vehicles (TVs) onto separate sets of lanes.² The figure does not show right turns for simplicity of exposition; but the system performs just the same if they are included.

² We assume that drivers can maneuver into their desired lanes as they approach the pre-signal, just as we would ordinarily assume that drivers can maneuver into their desired lanes as they approach a conventional signalized intersection.

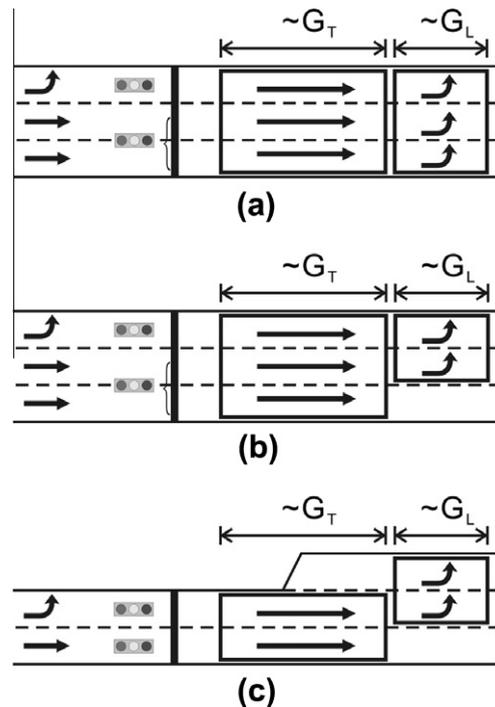


Fig. 2. The tandem intersection concept: (a) full tandem; (b) partial tandem; (c) general case. Rectangles indicate the size of the LV and TV queues in each lane, and their order; they do not always indicate the actual extent of these queues.

The pre-signal runs on the same cycle as the intersection signal and alternates giving green time to the two sets of lanes. Downstream of the pre-signal, variable message signs (VMSs) instruct drivers of both vehicle types which lanes to use – possibly all of them as shown in Fig. 2a. It may be desirable to change these instructions as traffic conditions change. Therefore, VMSs are preferred to lane markings because the former can be changed with time. The area between the pre-signal and the signal will be called the “sorting area”. This area is intended to contain those transient queues created by the different offsets and phases of the signal and the pre-signal. The sorting area should be long enough to ensure that these queues do not spill back to the pre-signal.

Here is how the system of Fig. 2a would operate for one cycle if at the intersection the LV-sub-phase leads the TV-sub-phase. The pre-signal starts its cycle by giving the green to the LVs while the intersection signal is red. These LVs advance into the sorting area using all the lanes and wait at the intersection stop line. The pre-signal then turns green for the TVs, which line up behind the LVs, again using all lanes.³ With this arrangement, vehicles are efficiently positioned to discharge using all the lanes when the intersection green phases start: first the LV-sub-phase, then the TV-sub-phase. Of course, if the LV-sub-phase lags the TV-sub-phase then the order is reversed and the pre-signal starts its cycle with the TVs.

The duration of the pre-signal phases (for LVs and TVs) should be chosen so that the number of vehicles of either type discharged by the pre-signal at saturation is close to, but does not exceed, the maximum number that all the intersection lanes can jointly discharge during the corresponding intersection sub-phase. In this way queues of either vehicle type clear at the signal in every sub-phase so that blocking is avoided when sub-phases change. The pre-signal phases should also ensure that if there is sufficient demand, then the discharged numbers should be close to this maximum. In this way both signal sub-phases will be nearly saturated. This idea is illustrated in Fig. 2a by the two rectangular blocks in the sorting area. These blocks represent the space needed for the maximum number of vehicles that the signal can discharge in its two sub-phases. The sub-phase durations shall be denoted G_L and G_T , where the single-letter subscript refers to either LVs or TVs. Lengthwise, these blocks span the maximum number of vehicles that can discharge from a single lane in a sub-phase. Therefore, their lengths are proportional to G_L and G_T , as shown.

An advantage of the proposed pre-signal method when compared with approaches that require fixed infrastructure and/or markings is that the phases and sub-phases of the two signals can be changed with the time-of-day to be in balance with the time-varying percentage of turns. This produces (nearly) the same capacity as if left turns had been banned. A disadvantage is that drivers are sometimes asked to be in a counterintuitive lane; e.g., note from Fig. 2a that some LVs occupy the intersection’s right lane.

³ We assume that drivers will distribute themselves evenly over the lanes available to them.

To alleviate this drawback, the full-tandem concept of Fig. 2a can be moderated with “partial-tandem” designs in which only some of the lanes in the sorting area are shared by both types of vehicles; see Fig. 2b, where only two lanes are shared in tandem. To avoid confusion with other types of shared lanes, these lanes will be called “tandem lanes” from now on. The disadvantage of the partial-tandem concept is that it does not engage all the lanes fully in each sub-phase. To balance user-friendliness with capacity needs, one can define for any application the smallest possible set of tandem lanes that will meet demand.

Since the full-tandem case is a special case of partial tandem, we will from now on focus on the latter, often dropping the word “partial”. The most general case (illustrated in Fig. 2c) does not even require that the number of lanes at the signal and the pre-signal be equal.

3. Capacity analysis

The capacity of tandem and conventional pre-timed intersection designs are compared here.⁴ Capacity formulae and capacity-maximizing timing plans are developed, first for an idealized best case scenario in which vehicles behave deterministically, and then for a more realistic scenario that captures stochastic phenomena. Although the corrections introduced for the latter reduce the ideal capacity, results show that the tandem design typically outperforms the conventional design nonetheless. The outperformance is considerable when left turns are numerous.

In what follows the letters g, n, q shall denote the green times, number of lanes, and vehicle discharge flows under various scenarios and at different locations. The superscript “0” will indicate a conventional design without a pre-signal, and no superscript the tandem design. Subscripts “L” and “T” will indicate the vehicle type, and no subscript the total. Upper and lower cases for g and n will refer to the intersection and the pre-signal respectively. Note that $N_L + N_T - N$ is the number of tandem lanes, which can range from 0 to N ; and that $n = n_L + n_T$, since there are no shared lanes upstream of the pre-signal.

To simplify the expressions, we shall use the cycle length as the unit for time, and the average number of TVs (or LVs) that one lane can discharge in one cycle’s worth of green time as the unit of TV (or LV) quantity. In this system of units, the green phases $g_L, g_T, G_L, G_T < 1$ are also the fractions of green, and the saturation flows per lane of both vehicle types are 1. Figs. 2b–c use rectangles just as Fig. 2a to denote the maximum number of vehicles that the signal can discharge in its two sub-phases. These rectangles would have the same lengths in all the figures if the sub-phase durations were the same in the three cases, but these rectangles span fewer lanes in Figs. 2b and c. This reduced rectangular width illustrates why the partial tandem system can sustain smaller flows.

Given as parameters are: the total green time available to the approach (G); the fraction of left-turns to be accommodated ($l = q_L/q$); the original approach geometry, with no shared lanes anywhere ($N_L^0, N_T^0, N^0 = N_L^0 + N_T^0, n_L, n_T, n = n_L + n_T$); and the modified lane definitions for the tandem design in the sorting area ($N = N^0, N_L, N_T$, with $N \leq N_L + N_T \leq 2N$).

For both the conventional and tandem designs, we first solve the “optimal timing problem”; i.e., we find the maximum total flow that the approach can sustain for a given G by optimally choosing the intersection sub-phase durations (G_L^0, G_T^0, G_L , and G_T), and for the tandem design the pre-signal phase durations (g_L and g_T) too. In doing so, we shall assume that the lost time at the pre-signal can be neglected; i.e., that the pre-signal green phases can span the whole cycle: $g_L + g_T \leq 1$. This seems reasonable as a first approximation since the conflicts resolved at the pre-signal involve vehicles traveling in the same direction. Likewise, we shall also assume that G is an “effective green” so we can choose any sub-phases such that $G_L^0 + G_T^0 \leq G$ and $G_L + G_T \leq G$. We shall ignore the impact of this choice on the opposing flows, which is reasonable if these flows are low. Otherwise, a couple of capacity constraints should be added to the formulation about to be presented. Though these additions are straightforward, the effect of high opposing flows will not be evaluated in this paper in the interest of brevity.

With the optimum timing problem as a building block, we then solve the “optimal design problem”. For this problem, the lane assignments are no longer treated as parameters, but as decision variables.

3.1. Deterministic analysis

It is assumed in this section that drivers discharge from the traffic signals with deterministic headways. The timing problem is presented first.

3.1.1. Optimal timing

The maximum flow of the conventional design is given by the following simple linear program, which we denote as “CLP” (conventional linear program). The geometry (i.e., the number of lanes) is given, and the green sub-phase durations are the decision variables.

$$\begin{aligned}
 & \text{(CLP) } \max_{G_L^0, G_T^0} q^0 \\
 & q_L^0 = q^0 l; \quad q_T^0 = q^0 (1 - l)
 \end{aligned} \tag{1.1}$$

⁴ Recall the VA designs have similar capacities to the pre-timed designs.

$$G_L^0 + G_T^0 \leq G \tag{1.2}$$

$$q_L^0 = G_L^0 N_L^0 \leq n_L \tag{1.3}$$

$$q_T^0 = G_T^0 N_T^0 \leq n_T \tag{1.4}$$

$$G_L^0, G_T^0 \geq 0 \tag{1.5}$$

Eq. (1.1) ensures that the intersection serves the correct balance of both vehicle classes; (1.2) ensures that only the available green time is used; and (1.3) and (1.4) that both the signals and the upstream approach lanes can sustain the flows. The inequalities in (1.3) and (1.4) are redundant if $n_L \geq GN_L^0$ and $n_T \geq GN_T^0$. This is almost always the case.

Consideration shows that if n_L and n_T do not enter the picture then the optimum solution of the CLP is:

$$q^0 = \frac{G}{l/N_L^0 + (1-l)/N_T^0} \tag{2.1}$$

$$q_L^0 = q^0 l \tag{2.2}$$

$$q_T^0 = q^0 (1-l) \tag{2.3}$$

$$G_L^0 = q^0 l / N_L^0 \tag{2.4}$$

$$G_T^0 = q^0 (1-l) / N_T^0 \tag{2.5}$$

Eq. (2.1) gives the capacity and (2.4) and (2.5) the signal sub-phase durations. As expected, (1.2) is binding.

The maximum flow of the tandem design can also be found with a similar LP, which shall be called ‘‘TLP’’. The main two differences are that now there are four green phase durations to be determined, and that the flows of the two vehicle types are now constrained both by the signal and the pre-signal. If the storage area is long enough to prevent any transient queues at the signal from backing up to the pre-signal, their capacities can be evaluated independently. This assumption is made in the LP below:

$$(TLP) \max_{G_L, G_T, g_L, g_T} q$$

$$q_L = ql; \quad q_T = q(1-l) \tag{3.1}$$

$$G_L + G_T \leq G \tag{3.2}$$

$$g_L + g_T \leq 1 \tag{3.3}$$

$$q_L = G_L N_L = g_L n_L \tag{3.4}$$

$$q_T = G_T N_T = g_T n_T \tag{3.5}$$

$$G_L, G_T, g_L, g_T \geq 0 \tag{3.6}$$

New in this program are constraint (3.3) and the last members of constraints (3.4) and (3.5). Although the TLP appears to be more constrained due to these additions, this is not necessarily so because the tandem design always has more lanes for at least one vehicle type; i.e., $N_L \geq N_L^0, N_T \geq N_T^0$, and $N_L + N_T > N_L^0 + N_T^0$.

As before, the reader can verify that the solution of the TLP is:

$$q = \min \left\{ \frac{G}{l/N_L + (1-l)/N_T}, \frac{1}{l/n_L + (1-l)/n_T} \right\} \tag{4.1}$$

$$q_L = ql \tag{4.2}$$

$$q_T = q(1-l) \tag{4.3}$$

$$G_L = ql/N_L \tag{4.4}$$

$$G_T = q(1-l)/N_T \tag{4.5}$$

$$g_L = ql/n_L \tag{4.6}$$

$$g_T = q(1 - l)/n_T \quad (4.7)$$

The second term of (4.1) is the maximum flow that can pass through the pre-signal, and the first term the maximum flow through the signal. For an intersection without turn pockets ($N_L^0 = n_L$ and $N_T^0 = n_T$), the second term is greater than (2.1) by a factor of $1/G$. Furthermore, since $N_L \geq N_L^0$, $N_T \geq N_T^0$, and $N_L + N_T > N_L^0 + N_T^0$, the first term of (4.1) is also greater than (2.1); perhaps considerably so. Thus, for any intersection without turn pockets the tandem system improves capacity.

The improvements for typical cases can be quite large. For example, assume that: $G = 1/2$; $l = 1/3$; $N_L^0 = 1$; $N_T^0 = 2$; and $n_L = 1$, $n_T = 2$, $N_L = N_T = 3$ as in Fig. 2a. Then, for the conventional design, (2.1), (2.2), (2.3) yield: $q_L^0 = 1/4$; $q_T^0 = 1/2$; and $q^0 = 3/4$; and for the tandem design (4.1), (4.2), (4.3) yield: $q_L = 1/2$; $q_T = 1$; and $q = 3/2$. Thus, capacity is increased by 100%. The same calculations for the partial design of Fig. 2b and c show capacity increases of 71% and 33% respectively. These results are typical. Although it is possible to construct examples with turn pockets where the tandem design would reduce capacity, these examples always involve unreasonably large values of G and/or small values of n/N .

3.1.2. Optimal design

The above assumes that the lane assignments are given and only the durations of the pre-signal phases and signal sub-phases can be adjusted. In reality lane assignments can be changed in response to changing demand. It is therefore of some interest to know the capacity that can be achieved when both the green-phase durations and the lane designations (n_L , n_T , N_L , N_T , N_L^0 , and N_T^0) are optimally set. This can be done both for the conventional and tandem configurations by adding the following constraints to the CLP and TLP:

$$n_L + n_T = n \quad \text{for CLP and TLP} \quad (5.1)$$

$$N_L^0 + N_T^0 = N \quad \text{for CLP} \quad (5.2)$$

$$N_L, N_T \leq N \quad \text{for TLP} \quad (5.3)$$

$$N_L + N_T - N = N_{LT} \quad \text{for TLP with } N_{LT} \text{ tandem lanes} \quad (5.4)$$

With the new variables, some of the constraints in the CLP and the TLP become non-linear. Furthermore, since the new variables are natural numbers, the resulting problems are mixed-integer non-linear programs. In practical cases the number of feasible lane designations arising from (5) is small. Therefore, these non-linear programs can be easily solved by evaluating (2.1) or (4.1) for all feasible lane designations and choosing those that maximize the result.

To identify the proper application domain for the tandem method, a battery of these generalized CLP and TLP problems were solved. Four basic approach configurations were examined: approaches with 2 and 3 lanes, with and without 1-lane turn pockets. Their capacities were evaluated for all possible values of the input parameters (G and l), both under conventional and tandem control. For the sake of brevity, the latter was only analyzed for the case in which only one tandem lane is used; i.e., where its potential benefit is least. Fig. 3 shows the result. Contour lines show the ratio of the partial tandem capacity over the maximal possible flow (GN). Shading shows the ratio of the partial tandem capacity over the conventional capacity, with lighter shades denoting greater benefits reaped by the tandem design. These figures can also be used to determine if a given pair of flows can be served with a given G . To do so, go to the appropriate figure and determine from the point with the relevant G and l whether the given total flow is larger or smaller than the capacity displayed for the point's contour.

Note that when G is very large (approaching 1) the tandem system performs worse than the conventional. This happens because the pre-signal then becomes the binding constraint. But for common settings with G around 0.5, the capacity increase is about 20–30%. This is encouraging because the benefit is obtained with only one tandem lane. On the other hand, the results in this sub-section are optimistic because they assume that vehicles discharge from the intersection at a deterministic rate. The next sub-section obtains more realistic results by relaxing this assumption.

3.2. Stochastic considerations

The concepts discussed below are easier to understand if the cycle time (C) and the average discharge headway (H) are explicitly used as variables. Therefore, the special system of units we have been using, where these two variables took the value “1”, will not be used. Instead the results will be derived for an arbitrary system and then converted to the special system at the end.

Refer to Fig. 2a (full tandem) and consider what would happen if the LVs in one of the sorting area's lanes were unable to fully discharge in their signal sub-phase (call this a lane failure) due to the randomness in discharge headways. Assume now that vehicles do not change lanes once sorted and consider what happens. The residual LVs in the failed lane would have to stop and wait for the next sub-phase. No TVs in that lane would discharge in their sub-phase. Instead, these TVs would have to wait until the residual LVs have cleared the intersection.⁵ Note that the next cycle will discharge these queues and nobody else. Thus a full cycle would have been wasted for both vehicle types.

⁵ In reality, some of these TVs may change lanes to take advantage of unused capacity in neighboring lanes. Thus, our assumption of no lane changing is conservative.

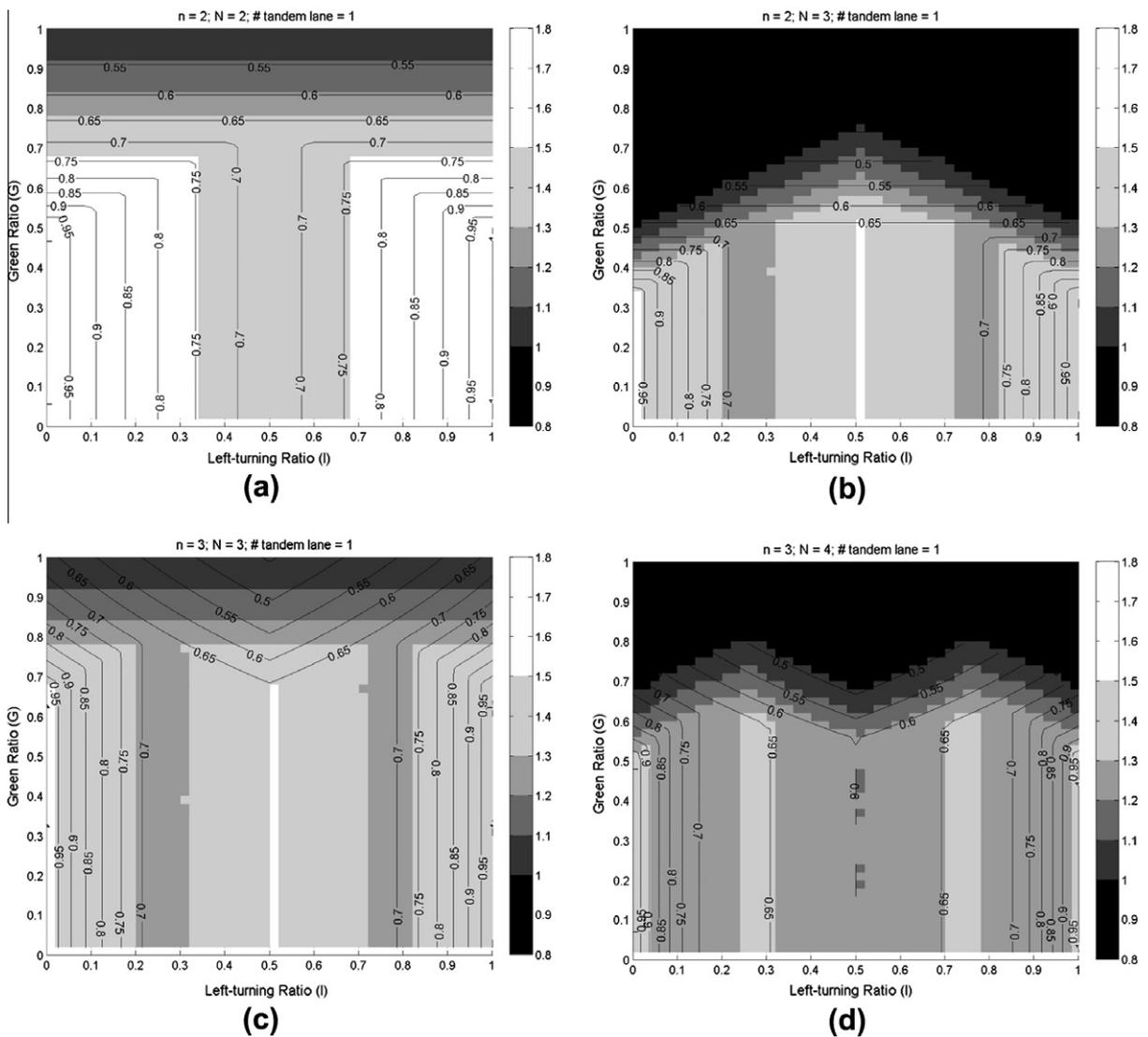


Fig. 3. Comparison of the deterministic version of capacities of conventional and tandem design. Contour lines show the ratio of the tandem capacity over the maximal possible flow; shading shows the ratio of the tandem capacity over the conventional capacity: (a) 2 lanes with no turn pocket ($n = N = 2$), 1 tandem lane; (b) 2 lanes with 1-lane turn pocket ($n = 2, N = 3$), 1 tandem lane; (c) 3 lanes with no turn pocket ($n = N = 3$), 1 tandem lane; (d) 3 lanes with 1-lane turn pocket ($n = 3, N = 4$), 1 tandem lane.

It should be clear that if the TV sub-phase fails on one lane, then a cycle is still lost for the same reasons; and that if a lane fails back to back for both the LV and TV sub-phases, then 2 cycles are lost. Thus, a sub-phase lane failure of either type, regardless of when it happens relative to other failures, wastes exactly one cycle for that lane.

To manage lane failures, we will hold constant the signal sub-phase durations but will reduce the size of the vehicle batches that the pre-signal allows to pass in every cycle. The pre-signal is assumed to be adaptive, normally releasing batches of fixed size, but when a lane has failed the batch size is reduced just enough to ensure that the other lanes receive their full allocation of vehicles. Lane failures can be identified with detector(s) located at the signal stop lines in the tandem lane(s). If during either sub-phase there is any stopped vehicle over the detector(s), the lane fails.

In light of the above, we see that a lane failure does not affect other lanes. Therefore, the long-term discharge rate of any lane can be analyzed independently of the other lanes. In the analysis that follows we will focus on a single lane and evaluate the probability of the lane's failure for the given batch size. Then we shall derive the expected LT and TV flow per cycle for the given batch sizes.

To do this, let m_s be the size of the released batch in one of the lanes of the sorting area, where “.” denotes L or T . The expected number of vehicles that this lane can discharge in a sub-phase is $m_s = G_s/H$. If the coefficient of variation of the saturation headways is γ , then the probability of failure p_s is:

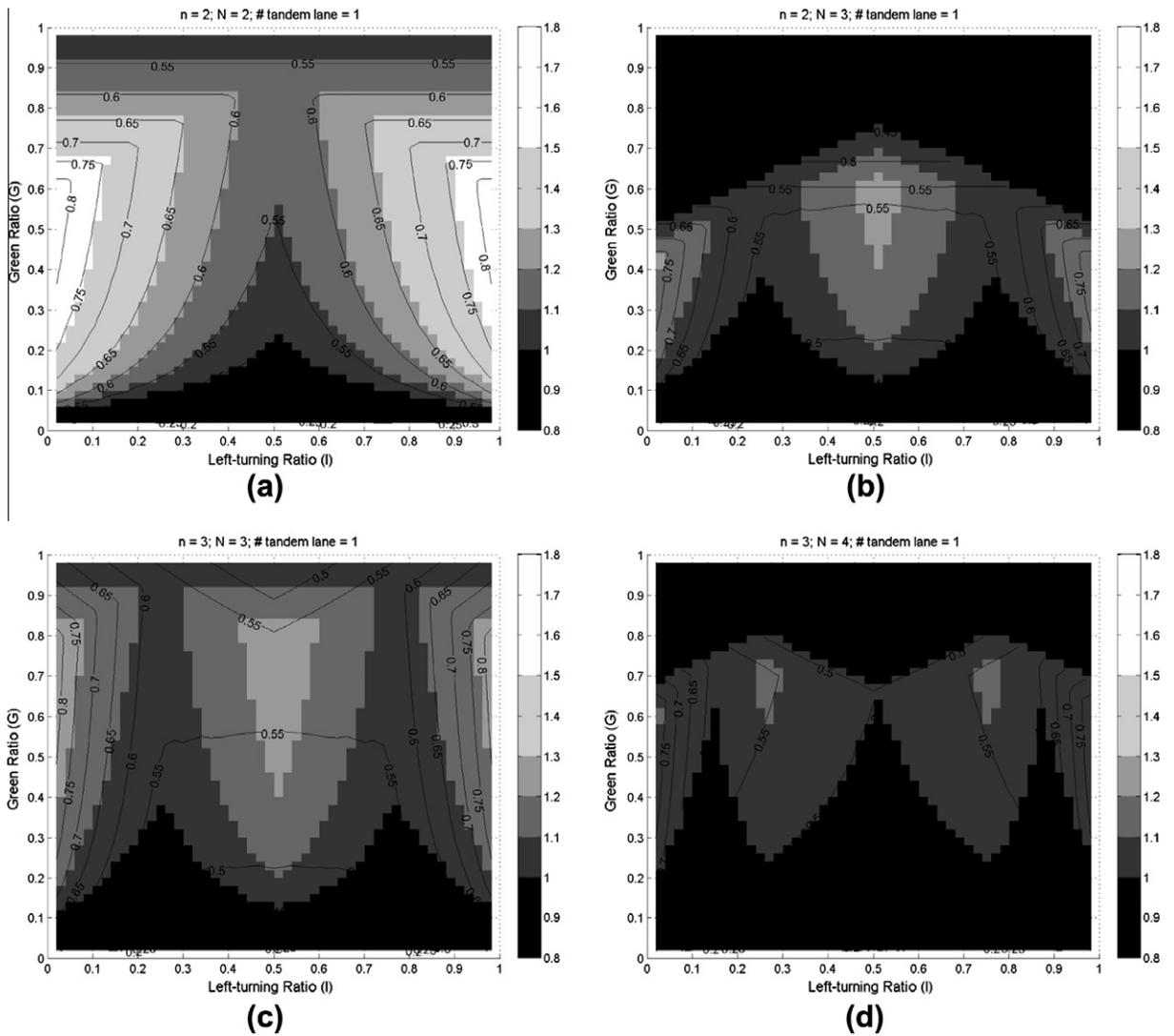


Fig. 4. Stochastic capacities of conventional and tandem design with $C/H = 48$. Contour lines show the ratio of the tandem capacity over the maximal possible flow; shading shows the ratio of the tandem capacity over the conventional capacity: (a) 2 lanes with no turn pocket ($n = N = 2$), 1 tandem lane; (b) 2 lanes with 1-lane turn pocket ($n = 2, N = 3$), 1 tandem lane; (c) 3 lanes with no turn pocket ($n = N = 3$), 1 tandem lane; (d) 3 lanes with 1-lane turn pocket ($n = 3, N = 4$), 1 tandem lane.

$$p = \Pr\left(\sum_{i=1}^{m.s} H_i > m.H\right) = \Phi\left(-\frac{(m. - m.s)}{(\sqrt{m.s}\gamma)}\right)$$

where $\Phi(\cdot)$ is the standard normal c.d.f.⁶ This can be written as:

$$p = \Phi(-k), \quad \text{where } k = \frac{(m. - m.s)}{(\sqrt{m.s}\gamma)} \quad \text{and } m. = G/H \tag{6}$$

The fixed number of vehicles released by the pre-signal in one of its regular cycles (i.e., a cycle without a lane failure) is: $N_L m_L^s + N_T m_T^s$. For any lane, the average number of cycles required to serve its share of these vehicles is $(1 + p_T + p_L)$, because every lane failure implies an unused cycle. Thus, the average flow through the signal is: $(N_L m_L^s + N_T m_T^s) / [C(1 + p_T + p_L)]$. This can be rewritten in terms of k using (6):

$$q^s = \frac{N_L G_L / H \left(1 - k_L \gamma / \sqrt{G_L / H}\right) + N_T G_T / H \left(1 - k_T \gamma / \sqrt{G_T / H}\right)}{C(1 + \Phi(-k_L) + \Phi(-k_T))} \tag{7.1}$$

⁶ We assume the saturation headways of different drivers are independently distributed. According to the central limit theorem, $\sum_{i=1}^{m.s} H_i$ is approximately normal, since $m.s$ is usually large enough.

To express this equation in the special unit system that was used in Section 3.1 without C or H , replace γ (which is the coefficient of variation of the time it takes to discharge one unit of vehicle quantity) by its counterpart γ' in the special unit system. This counterpart is $\gamma' = \gamma/\sqrt{C/H}$ because in the special unit system a unit of vehicle quantity consists of C/H independent vehicles. Thus the equation becomes:

$$q^s = \frac{N_L G_L (1 - k_L \gamma' / \sqrt{G_L}) + N_T G_T (1 - k_T \gamma' / \sqrt{G_T})}{1 + \Phi(-k_L) + \Phi(-k_T)} \quad (7.2)$$

To find the optimum system configuration and signal settings, replace the objective function of TLP with (7.2) and solve the resulting problem. This stochastic version of the design problem will be called STLTP. It provides a more realistic assessment of the system than the TLP.⁷

Note the k variables only appear in the objective function of the STLTP. Thus, to solve it, we first maximize (7.1), (7.2) with respect to these variables and then solve for the remaining decision variables. Although the first step is analytically challenging, we find numerically from (7.1) that q^s is a very smooth function of k_L and k_T around the optimum. For example, given $H = 2.5$ s, $G/C = 0.5$, and $\gamma = 0.25$, with C ranging from 30 s to 180 s, and l ranging from 0.1 to 0.9, we find that the value of q^s for $k_L = k_T = 2$ always exceeds 99% of the true optimum.⁸ Therefore, we fix these variables at $k_L = k_T = 2$ and then solve the STLTP for the remaining variables as in Section 3.1. This is done by evaluating all feasible combinations of N_L and N_T as in Section 3.1.2. The resulting solution should be a conservative approximation of what might be expected in reality. Fig. 4 shows these solutions for the same battery of problems as in Fig. 3, using $C/H = 48$. Note that improvements are still achieved, albeit of a smaller magnitude.

4. Discussion

We close by discussing the benefits of the proposed tandem concept and application issues.

4.1. Potential benefits

Note from Figs. 3 and 4 that low green ratios are problematic under stochastic considerations, even though they were fine in the deterministic cases. This happens because the rate that is produced by the signal in each lane is the product of $(C/H) = 48$ vehicles per lane per cycle and the green ratio; i.e., less than 10 vehicles per lane per cycle if the green ratio is less than 0.2. Such low vehicle numbers magnify the detrimental impact of stochastic fluctuations. However, for more usual green ratios ($0.4 < G < 0.5$), the tandem system with 1 tandem lane increases capacity in all four lane configurations displayed in Fig. 4. The benefit is greater if the intersection is narrow and has no turn pockets. In these cases capacity increases by more than 15% when G is between 0.3 and 0.7, and l is below 0.2. The improvement can exceed 30% for certain combinations of G and l .

Greater benefits are achieved if one allows for more tandem lanes. This is shown in Fig. 5, which evaluates the same intersection configurations as before, but with 2 or 3 tandem lanes. As the figure shows, improvements on the order of 50% can be obtained when $G \approx 0.5$ and the turning ratios are significant.

The reader may complain that the conventional case is unduly penalized in these comparisons because LVs and TVs are not allowed to share lanes in the conventional design—and that a significant penalty would exaggerate the benefits of the tandem configuration. But this penalty turns out to be either non-existent or insignificant. Calculations show that a shared lane actually *reduces* the capacity of the conventional design unless the turning ratio is quite small—and in this case the tandem configuration would not be of much benefit anyway; see Table 1. This table shows critical turning ratios, which if exceeded negate the benefit of a shared lane in the conventional configuration. The reason for the ineffectiveness of shared lanes with a conventional design is that during the LV sub-phase, any TV in a shared lane would block the lane from discharging, and vice versa. The tandem strategy in essence removes the blocking; it even removes the limitation to use only one shared lane. This is why the capacity increases in Fig. 5 are so large.

4.2. Application issues

The tandem concept is not intended for intersections that are always undersaturated, because in this case extra capacity is not needed, and the concept would actually delay some vehicles a little. It should only be applied to reduce or eliminate oversaturation. Ideally, the tandem system would only be activated during the oversaturated times of day, when it can produce a benefit.

To further visualize how effective the concept can be, visit the following url: "http://www.its.berkeley.edu/volvocenter/pre-signal/Tandem_Design.html". This web page displays an animated simulation in CORSIM (FHWA, 2007) of a real 3-lane

⁷ The STLTP does not include extra constraints in connection with the reduced batch sizes, m^s , because the deterministic pre-signal green times are always sufficient to accommodate them. To find m^s , first obtain m by inserting the optimal G in the last equality of (6), and then insert m and the optimum k in the second equality of (6).

⁸ The γ value (coefficient of variation of the saturation headway) of 0.25 is consistent with our field measurement which is 0.24, and the literature: Jin et al. (2009) measured a γ value of 0.3, and Li and Prevedouros (2002) measured a value of 0.22. We find that changing the γ value modestly has no appreciable effect on our predicted outcomes.

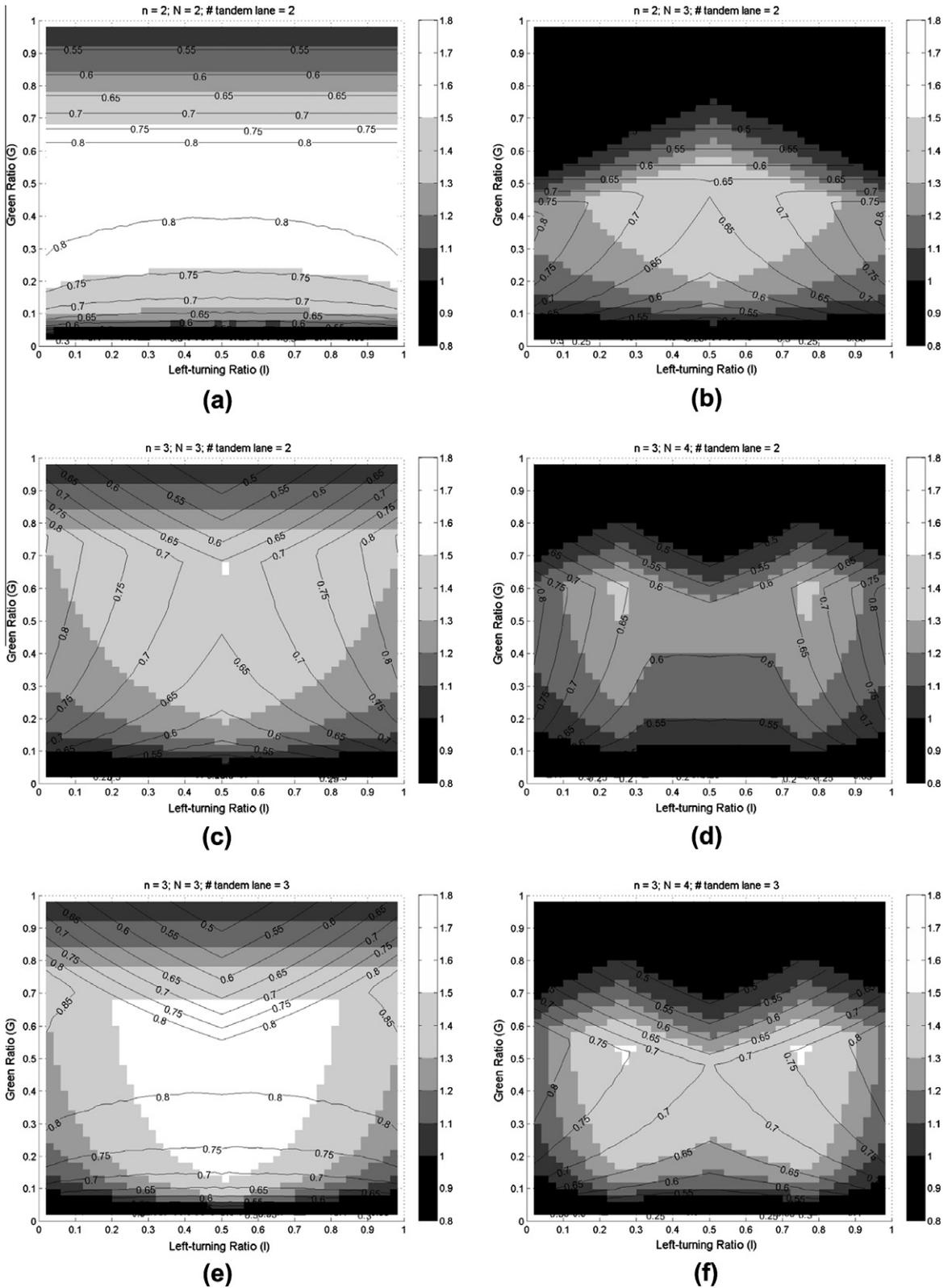


Fig. 5. Stochastic capacities of the conventional and tandem designs with $C/H = 48$. Contour lines show the ratio of the tandem capacity over the maximal possible flow; shading shows the ratio of the tandem capacity over the conventional capacity: (a) 2 lanes with no turn pocket ($n = N = 2$), 2 tandem lanes; (b) 2 lanes with 1-lane turn pocket ($n = 2, N = 3$), 2 tandem lanes; (c) 3 lanes with no turn pocket ($n = N = 3$), 2 tandem lanes; (d) 3 lanes with 1-lane turn pocket ($n = 3, N = 4$), 2 tandem lanes; (e) 3 lanes with no turn pocket ($n = N = 3$), 3 tandem lanes; (f) 3 lanes with 1-lane turn pocket ($n = 3, N = 4$), 3 tandem lanes.

Table 1

Critical left-turning ratios on approaches without turn pockets for a shared lane to be beneficial.

Critical left-turning ratio	$n = N = 2$			$n = N = 3$		
	C = 60 s (%)	C = 90 s (%)	C = 120 s (%)	C = 60 s (%)	C = 90 s (%)	C = 120 s (%)
$G/C = 0.4$	14	8	6	7	4	3
$G/C = 0.5$	11	6	5	5	3	2
$G/C = 0.6$	8	5	4	4	3	2

approach in Chengdu, China, which was studied in Xuan et al. (2010). The approach is currently oversaturated, and this condition cannot be removed by conventional means. The simulation shows side by side how the approach performs under both, the current design and a proposed pre-signal design. While queues grow with the current design, the pre-signal system prevents this growth and serves more vehicles.

Of course, the concept can be used on multiple approaches to an intersection, including on approaches where opposing movements receive green time simultaneously. Though the concept is suitable only for cases when separate phases are given to LVs and TVs on an approach, it can be used when the signal also displays an overlapping phase to simultaneously serve the LVs and TVs on the approach with higher left-turn demand.

The tandem concept requires extra space to hold the transient queues of the vehicles released into the sorting area. Appendix A derives expressions for the lengths of both, the sorting area and the street section upstream of the pre-signal that are required to hold its queues without spill-backs. Notice that this total distance is roughly proportional to cycle length—it turns out to be about 100 m per minute of cycle length. Since this combined distance cannot exceed the approach leg length, short cycles may be needed if city blocks are short. Fortunately, by increasing capacity, pre-signals allow cycles to be shortened. Short cycles can also benefit other users of the intersection, like bicyclists and pedestrians. And even if the distance requirements cannot be met, the concept may still work if suitably modified, though the capacity gains would be lower.

Performance of the tandem concept could be hampered by a lack of driver compliance. For example, an ill-intentioned driver might jump part of the queue in the sorting area by using a pre-signal phase that does not correspond to his desired movement, and then block other drivers while he waits for the right-of-way into the intersection. A video-based enforcement system that records the license plates of offending vehicles and automatically issues citations might minimize the occurrence of this undesirable game-playing.

At this point, the tandem concept is new, and thus we do not know how people will react to it. Field tests are being planned to see how it would work in reality.

Acknowledgements

This work is supported by the National Science Foundation under Grant No. 0856193, and the Volvo Center of Excellence for Future Urban Transport at the University of California, Berkeley.

Appendix A. Spatial considerations

This appendix determines the physical length requirements for the sorting area and the block so that queues do not back up to the pre-signal and to the upstream intersection. We explore a worst case scenario where the tandem design is working at capacity.

First, we derive a formula for the length, D_1 , of the sorting area. During each cycle, tandem lanes serve more vehicles than other lanes. Thus the sorting area needs to be just long enough to hold at jam density, K_j , all the vehicles that discharge from a tandem lane each cycle; see time–space diagram in Fig. 6. Clearly then, the minimal length of the sorting area is:

$$D_1 = (m_L^s + m_T^s) / K_j \tag{8}$$

Next, we express the distances, D_{2L} and D_{2T} , required to hold the queues of the LVs and TVs directly upstream of the pre-signal, assuming that demand equals capacity. These distances should be just long enough to hold at jam density all the vehicles that discharge in each of the pre-signal phases; see Fig. 6. Clearly then:

$$D_{2L} = \frac{C}{H} \frac{g_L^s}{K_j} \tag{9.1}$$

$$D_{2T} = \frac{C}{H} \frac{g_T^s}{K_j} \tag{9.2}$$

The distance that needs to be provided upstream of the pre-signal is therefore:

$$D_2 = \max\{D_{2L}, D_{2T}\} \tag{9.3}$$

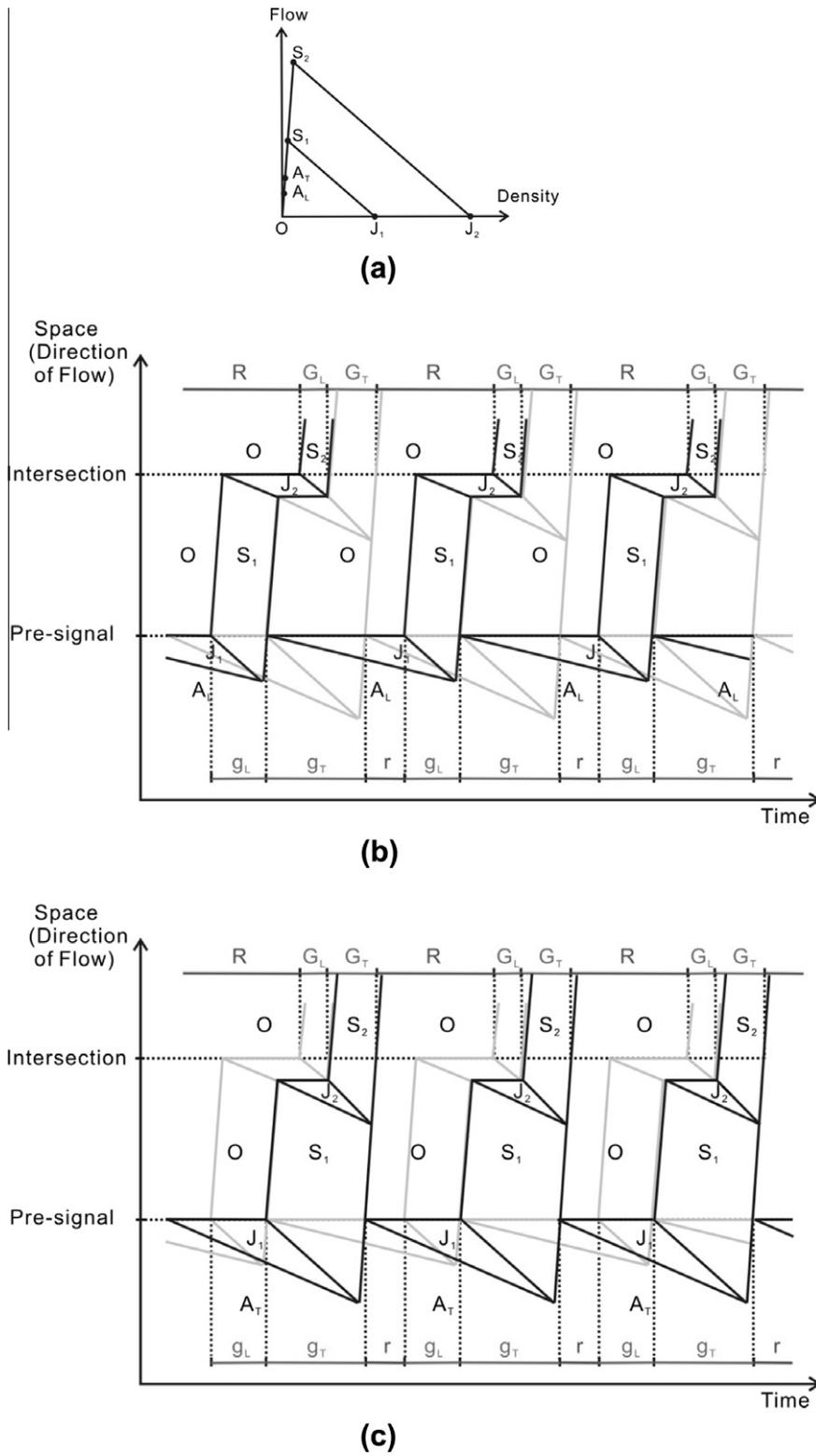


Fig. 6. Spatial evolution during the operation of the tandem design with $n = N_L = N_T = N = 2$ and saturated demand: (a) fundamental diagram; (b) time-space diagram of the LVs (with that for TVs in gray color); (c) time-space diagram of the TVs (with that for LVs in gray color).

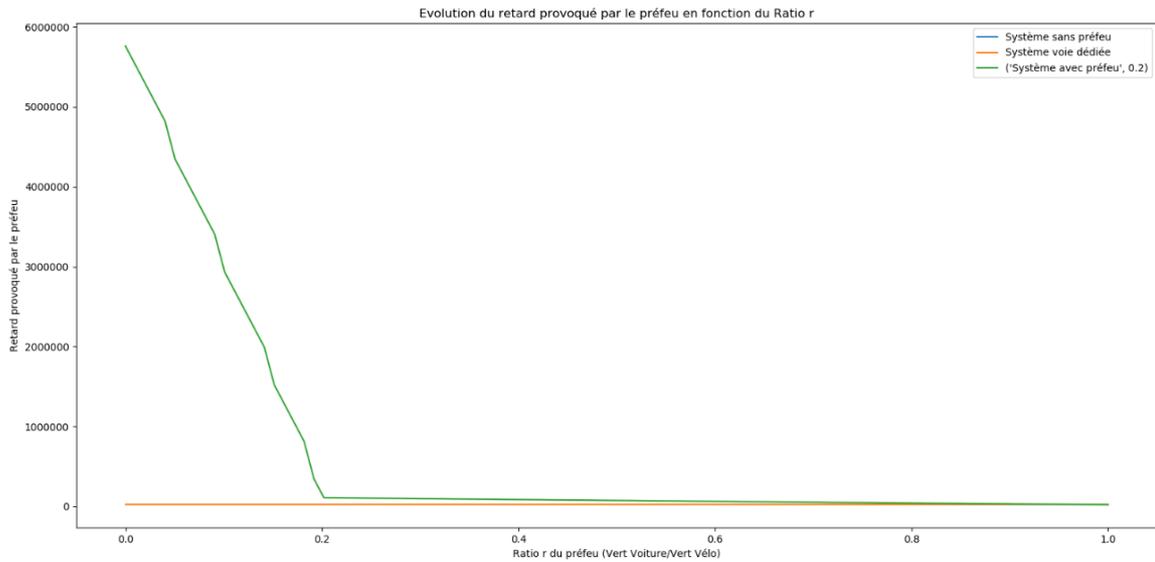
References

- Allsop, R.E., 1972. Estimating the traffic capacity of a signalized road junction. *Transportation Research* 6 (3), 245–255.
- Al-Salman, H.S.T., Salter, R.J., 1974. The control of right turning vehicles at signal controlled intersections. *Traffic Engineering & Control* 15 (15), 683–686.
- ATTAP, University of Maryland, 2006. Unconventional Arterial Intersection Design. <<http://attap.umd.edu/uaid.php>>.
- Daganzo, C.F., 2007. Urban gridlock: macroscopic modeling and mitigation approaches. *Transportation Research Part B* 41 (1), 49–62.
- Federal Highway Administration, 2007. Traffic Analysis Toolbox Volume IV: Guidelines for Applying CORSIM Microsimulation Modeling Software, No. FHWA-HOP-07-079. <http://ops.fhwa.dot.gov/trafficanalysisistools/tat_vol4/vol4_guidelines.pdf>.
- Gallivan, S., Heydecker, B.G., 1988. Optimising the control performance of traffic signals at a single junction. *Transportation Research Part B* 22 (5), 357–370.
- Greenough, J., Kelman, L., 1999. ITS technology meeting municipal needs – the Toronto experience. In: 6th World Congress Conference on ITS. Toronto, Canada, 8–12 November.
- Goldblatt, R., Mier, F., Friedman, J., 1994. Continuous flow intersection. *Institute of Transportation Engineers Journal* 64 (7), 35–42.
- Improta, G., Cantarella, G.E., 1984. Control system design for an individual signalized junction. *Transportation Research Part B* 18 (2), 147–167.
- Jin, X., Zhang, Y., Wang, F., Li, L., Yao, D., Su, Y., Wei, Z., 2009. Departure headways at signalized intersections: a log-normal distribution model approach. *Transportation Research Part C* 17 (3), 318–327.
- Li, H., Prevedouros, P.D., 2002. Detailed observations of saturation headways and start-up lost times. *Transportation Research Record* 1802, 44–53.
- Lo, H.K., Chow, A.H.F., 2004. Control strategies for oversaturated traffic. *Journal of Transportation Engineering* 130 (4), 466–478.
- Newell, G.F., 1989. Theory of Highway Traffic Signals. Research Report, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, UCB-ITS-RR-89-7.
- Oakes, J., Thellmann, A.M., Kelly, I.T., 1994. Innovative bus priority measures. In: Proceedings of Seminar J, Traffic Management and Road Safety, 22nd PTRC European Transport Summer Annual Meeting, vol. 381, pp. 301–312.
- Peck, C., Blanco, J., Lopez, J., 1999. Learning from the User – Next Steps for ITACA's Adaptive Control. *Traffic Technology International, Annual Review*, pp. 155–158.
- Rodegerdts, L.A., Nevers, B., Robinson, B., 2004. Signalized Intersections: Informational Guide. No. FHWA-HRT-04-091. <<http://www.tfhr.gov/safety/pubs/04091/04091.pdf>>.
- Silcock, J.P., 1997. Designing signal-controlled junctions for group-based operation. *Transportation Research Part A* 31 (2), 157–173.
- Sussman, J., et al., 2000. What have we Learned about Intelligent Transportation Systems. No. FHWA-OP-01-006. <http://www.itsdocs.fhwa.dot.gov/JPODOCS/REPTS_TE/13316.pdf>.
- Webster, F.V., 1958. Traffic Signal Settings. Road Research Lab Technical Paper No. 39.
- Wong, C.K., Wong, S.C., 2003. Lane-based optimization of signal timings for isolated junctions. *Transportation Research Part B* 37 (1), 63–84.
- Wu, J., Hounsell, N., 1998. Bus priority using pre-signals. *Transportation Research Part A* 32 (8), 563–583.
- Xuan, Y., Gayah, V., Daganzo, C.F., Cassidy, M.J., 2009. Multimodal Traffic at Isolated Signalized Intersections: New Management Strategies to Increase Capacity. Working Paper, Volvo Center of Excellence for Future Urban Transport, University of California, Berkeley, UCB-ITS-VWP-2009-10.
- Xuan, Y., Li, Y., Daganzo, C.F., Cassidy, M.J., 2010. Improving Flows of Buses and Cars through an Intersection by Enforcing Bus-only Lane and Increasing Car Flow Capacity with Pre-signal. Volvo Technical Report (in Chinese). <http://www.its.berkeley.edu/volvo-center/pre-signal/Chengdu_TechnicalReport_chn.doc>.

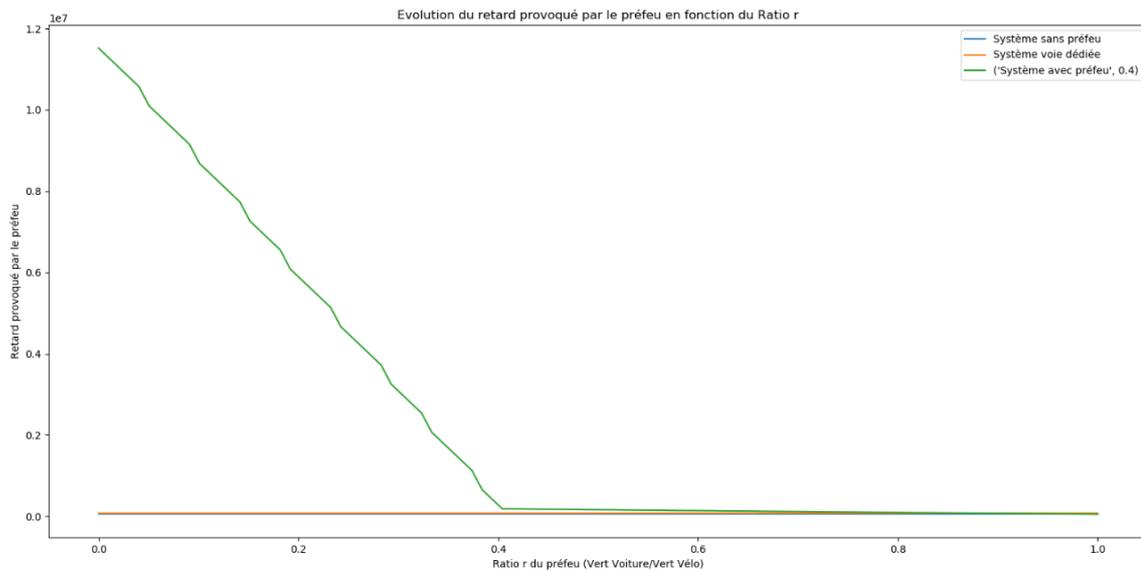
Annexe 3 : Graphiques de l'évolution des retards provoqués par le préfeu en fonction du ratio de celui-ci avec quatre demandes différentes.

Ces graphiques contiennent, pour chaque demande, les courbes des différents scénarii :

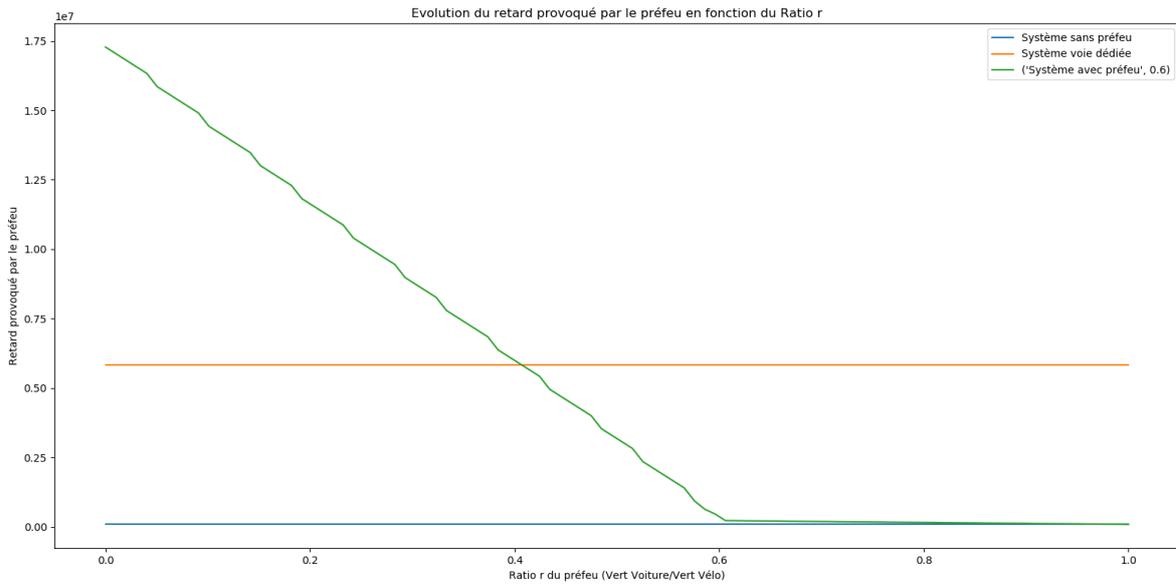
- Scénario de référence, « tout voiture »,
- Scénario avec l'utilisation du préfeu,
- Scénario qui prévoit une voie dédiée sur tout le long du tronçon.



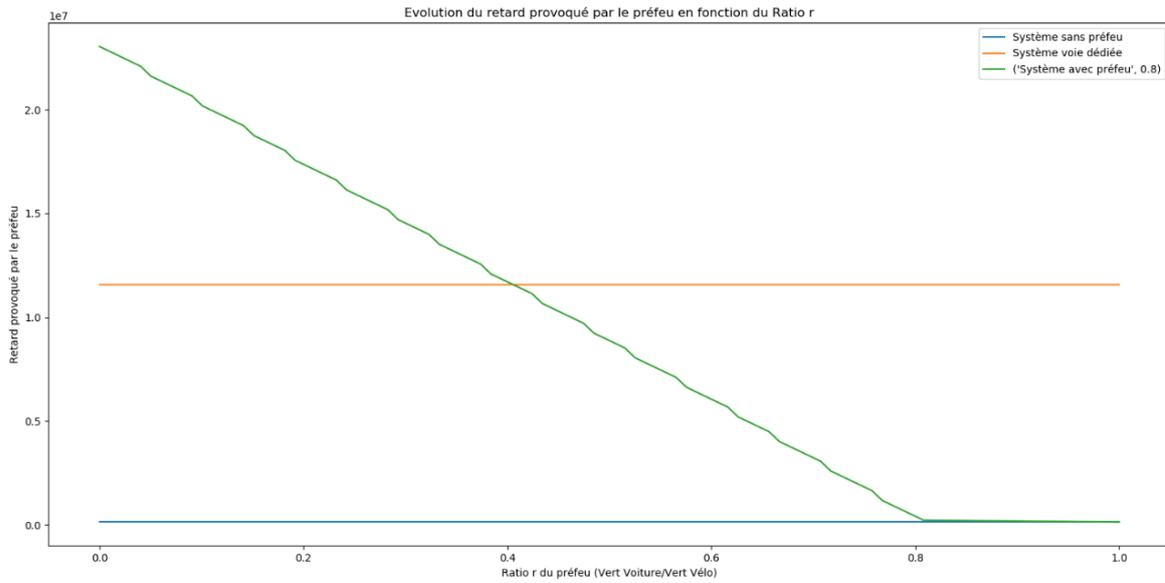
Annexe 3.1 : Graphique de l'évolution du retard provoqué par le préfeu en fonction du Ratio, Pour une demande de 0,2



Annexe 3.2 : Graphique de l'évolution du retard provoqué par le préfeu en fonction du Ratio, Pour une demande de 0,4



*Annexe 3.3 : Graphique de l'évolution du retard provoqué par le préfeu en fonction du Ratio,
Pour une demande de 0,6*



*Annexe 3.4 : Graphique de l'évolution du retard provoqué par le préfeu en fonction du Ratio,
Pour une demande de 0,8*