

CIGI QUALITA MOSIM 2023

Microsimulation du transport de marchandises : Impact des réseaux routiers et du niveau de circulation

JACQUES RENAUD¹, LEANDRO COELHO², KHALED BELHASSINE³

¹ Faculté des sciences de l'administration, Université Laval
2325 rue de la Terrasse, Québec, Canada
Jacques.Renaud@fsa.ulaval.ca

² Faculté des sciences de l'administration, Université Laval
2325 rue de la Terrasse, Québec, Canada
leandro.callegari-coelho@fsa.ulaval.ca

³ Centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport (CIRRELT)
2325 rue de la Terrasse, Québec, Canada
khaled.belhassine@cirrelt.ca

Résumé – Une gestion appropriée des phases de feux de circulation peut réduire considérablement la congestion, la consommation de carburant et augmenter la mobilité. Ce type de gestion est déjà utilisé dans de nombreux services de transport en commun en apportant de petites modifications aux phases des feux afin de faciliter la circulation de certains véhicules ciblés. Pour le transport de marchandises, les gains réalisés par les camions ne doivent pas nuire à la circulation régulière, ce qui rend les analyses plus délicates. Plusieurs études se concentrent sur des réseaux routiers très restreints comme un boulevard, parfois même sur quelques intersections. Dans cet article, nous analysons les impacts des différentes tailles de réseaux et des niveaux de congestion sur la performance de mesures prioritaires pour le transport lourd. Nous observons que les avantages sont, toutes proportions gardées, plus élevés sur un petit réseau. En utilisant un réseau plus étendu, les avantages demeurent pour les véhicules ciblés, mais l'impact global s'amenuise pour le reste des véhicules. Cela confirme l'importance de mettre les résultats en lien avec les réseaux utilisés.

Mots clés – Gestion des feux, circulation, consommation, simulation

Abstract – Careful management of traffic signal phases can significantly reduce congestion and fuel consumption. It enables increased mobility and is already used in many public transport services, making small modifications to the phases of a cycle to modify traffic lights and facilitate the flow of certain vehicles. For the transport of goods, the gains made by prioritizing trucks must not penalize the regular traffic, which makes analysis more difficult. Several studies focus on very restricted road networks such as a single boulevard, sometimes even on as small as one or a few intersections. In this article, we analyze the impacts of different network sizes and congestion levels on the evaluation of priority measures for heavy transport. We observe that the general benefits are, all things considered, higher on a small network. By using a larger network, the benefits remain for the targeted vehicles, but the overall impact is reduced for the rest of the vehicles. This confirms the importance of relating the results to the networks used.

Keywords – Traffic light management, consumption, simulation

1 INTRODUCTION

La congestion routière est un problème qui affecte de nombreuses villes. Les centres-villes sont particulièrement sujets à la congestion, entraînant de nombreux effets néfastes : bruit, pollution, diminution de la mobilité, augmentation des risques d'accident, etc. Cette congestion est exacerbée par la présence de véhicules lourds qui doivent traverser ces zones, ce qui est souvent le cas lorsque les parcs industriels sont situés dans les limites de la ville. Pour assurer une fluidité maximale de la circulation, le phasage des feux de circulation joue un rôle

primordial. La majorité des grandes villes ont implanté les outils technologiques permettant l'accès à distance aux programmes de phasage des feux ce qui leur permet d'intervenir en temps réel sur une intersection précise pour favoriser l'écoulement de la circulation.

Plusieurs sociétés de transport en commun bénéficient de cette technologie qui permet à leurs autobus de bénéficier de mesures préférentielles. Dans ce cas, la position de l'autobus est analysée et comparée avec son horaire. En situation de retard sur l'horaire prévu, l'autobus peut communiquer avec le gestionnaire des

feux. Ce dernier peut appliquer de légères modifications au phasage des feux pour permettre à l'autobus de reprendre son retard. La mesure la plus courante est d'allonger la durée du feu vert de quelques secondes pour éviter que l'autobus doive s'immobiliser.

Si les mesures préférentielles pour autobus sont assez bien étudiées dans la littérature, beaucoup moins d'attention a été accordée au transport lourd ou de marchandises. Une seconde lacune de la littérature est de ne simuler que de très petites portions du réseau routier étudié ce qui peut amplifier l'efficacité de la mesure de préemption utilisée et sous-estimer les impacts collatéraux de ces mesures.

Dans cet article nous allons contribuer à la littérature en développant un système de gestion préférentielle des feux en contexte de transport lourd et en analysant les résultats de ce système sur différentes configurations de réseaux routiers et divers niveaux de circulation. À la section 2 nous allons présenter un survol de la littérature pertinente. Les caractéristiques du modèle de simulation sont expliquées à la section 3. Nos résultats et analyses suivent à la section 4. La section 5 termine avec nos conclusions et apprentissages.

2 REVUE DE LA LITTÉRATURE PERTINENTE

Les stratégies de gestion des feux de circulation peuvent être considérées comme un ensemble de règles utilisées pour faire fonctionner un système de priorité des signaux de circulation – PSC (*transit signal priority* – TSP). Les systèmes PSC facilitent le mouvement des véhicules de transport en commun à travers des intersections contrôlées par des feux de circulation [Smith et al., 2005]. La priorité de signalisation est une stratégie qui modifie les phases des feux de circulation. L'objectif est d'améliorer la fluidité d'un véhicule ou d'un axe particulier sans perturber significativement le trafic environnant. Cette stratégie est bien connue dans les systèmes de transport en commun [Ngan et al. 2004, Kim et Rilett, 2005].

Nous pouvons classer les stratégies PSC en trois types principaux. Les stratégies de *priorité passive* fonctionnent en continu, elles ne nécessitent pas de système de détection ni de priorisation. Par exemple ces systèmes ajustent les signaux en fonction de l'heure de la journée. Les stratégies de *priorité active* donnent la priorité à un véhicule lors de sa détection ou à la réception d'une demande de priorité. Les stratégies *adaptatives/en temps réel* donnent la priorité tout en optimisant simultanément la synchronisation des signaux selon des critères de performance donnés.

En analysant plusieurs méthodes de priorité des signaux pendant les heures de pointe et les heures creuses [Garrow et Machemehl, 1999] indiquent qu'il est souvent justifié de donner la priorité pendant les heures creuses, en raison de la capacité excédentaire disponible sur le réseau de transport. Cependant, pendant les heures de pointe, la priorité du signal doit être utilisée avec prudence. Ce résultat a été confirmé par [Dion et al., 2004] qui indiquent que les autobus bénéficient de la priorité, mais que ces avantages pourraient être obtenus aux dépens du trafic global, en particulier lorsque la demande de trafic est élevée. [Ali et al., 2017] confirment que s'il y a trop de congestion, la préemption devient inefficace, les véhicules ne pouvant pas en bénéficier. À l'opposé, lorsque le trafic est faible, le système est inutile puisque les autobus respectent déjà leurs horaires.

Plusieurs de ces études se concentrent sur des réseaux limités, parfois une seule intersection [Xu et al., 2016, Zhou et al., 2017]. L'une des rares études à envisager un réseau plus vaste [Lozner et al. 2018] rapporte une implantation dans la région métropolitaine de Washington. Le système a été mis en œuvre avec succès sur 195 intersections et plusieurs itinéraires. [Wu et Guler, 2018] ont étudié le positionnement des capteurs afin de maximiser les avantages marginaux ou de minimiser les coûts marginaux. Une comparaison de l'évaluation d'une artère comme une somme d'intersections isolées par opposition à l'évaluation de l'artère dans son ensemble est présentée. Ils ont souligné que le fait de ne considérer qu'une intersection isolée surestime les avantages. Dans [Iqbal et al., 2022], des lignes directrices pour la mise en œuvre de la priorité des signaux pour le transport de personnes et de marchandises sont proposées en fonction des configurations des réseaux et du trafic. Ils tiennent compte de divers éléments dont la proportion du volume de trafic entre les rues principales et secondaires, de la fréquence horaire des camions et de mesures de congestion. Ils ont conclu qu'une priorité de signal pour un camion est bénéfique dans certaines conditions, comme pour un itinéraire avec beaucoup de camions, des dénivelés importants, pour des raisons de sécurité et environnementales ainsi que pour réduire les retards de livraison. Des simulations ont été réalisées sur un corridor multimodal à Fort Lauderdale en Floride.

Notre revue de la littérature mène à deux conclusions. Premièrement, la majorité des études sont réalisées dans des conditions très simplifiées et sur des réseaux schématisés. Deuxièmement, pour le transport en commun, les objectifs sont relativement simples : réduire le temps de déplacement des usagers et/ou améliorer l'adhérence aux horaires. Il est généralement accepté que ces améliorations peuvent être réalisées au détriment du trafic régulier. Pour le transport de marchandises, la mesure des gains est plus floue et ceux-ci ne doivent pas nuire outre mesure à la circulation régulière.

Dans cet article, nous analysons les impacts croisés du niveau de circulation, de l'étendue du réseau routier et de la gestion des feux sur la consommation et le temps d'attente des véhicules. Nous montrons que l'ampleur de ces impacts diminue grandement si le réseau étudié est plus grand et ce pour des niveaux de circulation comparables.

3 LE MODELE DE SIMULATION

Afin d'évaluer l'impact des stratégies de priorité, nous avons utilisé le logiciel SUMO (*Simulation of Urban MObility*) disponible en libre accès [Alvarez et al., 2018]. Dans ce qui suit nous décrivons les réseaux routiers utilisés, les véhicules modélisés, les niveaux de circulation ainsi que la méthode de priorisation active des feux que nous avons testée.

3.1 Réseaux routiers

Nous avons importé le réseau routier de la ville de Trois-Rivières à l'aide de OpenStreetMap. Afin de reproduire les opérations d'un partenaire industriel, nous avons isolé un chemin d'environ 6 km de long. Les véhicules de notre partenaire circulent toute la journée entre l'entreprise et un lieu de livraison. Chaque aller-retour fait 11,7 km et implique 26 feux de circulation, 13 dans chaque direction. La Figure 1 illustre le réseau ainsi que le positionnement des feux. Pour chacun de ces 26 feux de circulation, nous avons implanté les plans de phasages obtenus par la ville et ainsi reproduit la synchronisation. Les autres feux sont gérés par le phasage par défaut de SUMO.

À partir de ce réseau de base, nous avons généré deux réseaux tests. Le premier réseau ne renferme deux types de segments : les segments sur le chemin immédiat du camion de la compagnie et tous les segments directement adjacents. La Figure 2 illustre ce réseau minimal qui renferme 259 segments d'une longueur de 35,2 km.

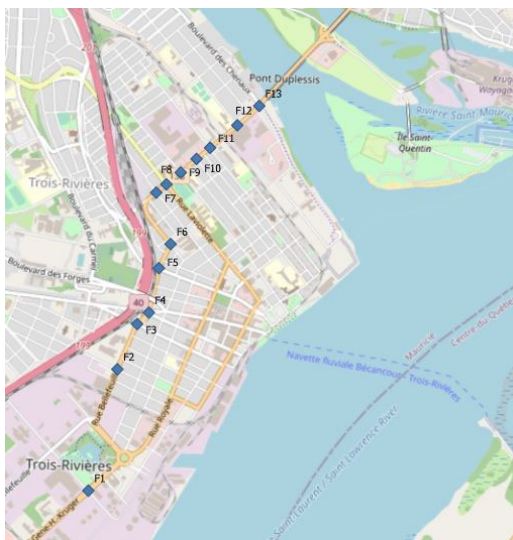


Figure 1 Réseaux de base et feux de circulation

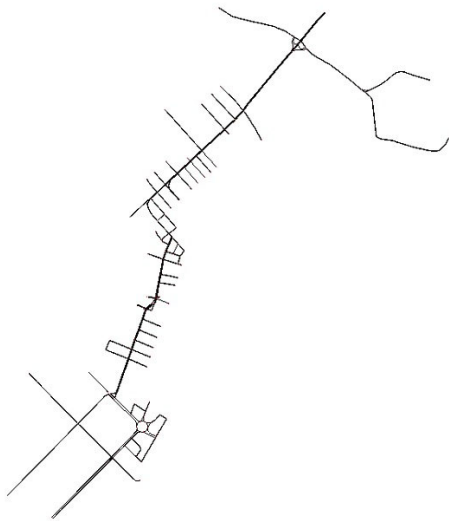


Figure 2 Le réseau minimal

Le second réseau (Figure 3) se compose des segments de base sur le chemin immédiat du camion et de tous les autres segments connectés à moins de 1 000 mètres des segments de base. Ce troisième réseau comporte 1 819 segments pour 218,22 km.



Figure 3 Le réseau étendu

3.2 Véhicules

Afin de reproduire fidèlement la structure de la circulation, nous avons utilisé sept types de véhicules différents (autobus, voiture de plaisance, véhicule utilitaire sport, camionnette, et trois types de véhicules lourds). Nous avons utilisé le modèle de consommation approprié à chacun des véhicules selon les normes des constructeurs. À titre d'exemple, lorsque le camion de notre partenaire circule plein, son poids de 50 tonnes est modélisé avec le modèle de consommation PHEMlight/HDV-TT-D-EU6 inclut dans SUMO. Une fois déchargé, le modèle de consommation utilisé est le PHEMlight/HDV-TT-D-EU4 pour un poids de 25 tonnes. Les fichiers de sortie de la simulation procurent les informations sur tous les véhicules simulés à la seconde, incluant les vitesses, positions, consommation, émissions...

3.3 Niveaux de circulation

À l'aide des outils de génération de SUMO, nous avons généré trois niveaux différents de circulation. Pour les générer, nous avons utilisé le paramètre *density* qui calcule combien il y a de véhicules par kilomètres en tout temps sur l'ensemble du réseau. Les véhicules ont été générés afin d'obtenir des niveaux de *density* d'environ de 8 (Léger), 10 (Moyen) et 13 (Élevé). Une *density* de 13 procure un trafic qui reproduit une lourde congestion sur l'axe principal. À titre d'exemple, pour notre réseau, l'utilisation d'une *density* de 41 immobiliserait presque entièrement les véhicules.

3.4 Méthode de priorisation des feux

Pour gérer dynamiquement les feux de circulation, nous avons positionné plusieurs capteurs sur le chemin suivi par les camions de notre partenaire. Pour interagir avec ces capteurs, nous utilisons l'interface de contrôle TraCI (*Traffic Control Interface*) de SUMO, qui nous permet de récupérer l'état de la circulation et de modifier la valeur de certains paramètres. Nous avons positionné 24 capteurs sur 13 emplacements sur le trajet aller et 24 sur 13 emplacements sur le trajet retour du camion.

Avant de présenter la stratégie testée, rappelons quelques notions importantes. À une intersection, une *phase* est une configuration donnée de feux pendant une période de temps. Le *temps de cycle* est la durée entre le début d'une phase et le retour au début de cette même phase. Par exemple, supposons une intersection simple où il n'y a que trois feux possibles dans chaque direction : vert (V), jaune (J) et rouge (R). Cette intersection simple n'a pas de voies doubles, de feux clignotants ou de flèches. Dans le sens des aiguilles d'une montre, on peut numéroter les voies de 1 à 4. Ensuite, pour un temps de cycle de

110 secondes, les voies 1 et 3 ont une phase verte pendant 55 secondes, une phase jaune pendant 5 secondes et une phase rouge pendant 50 secondes. Ainsi, l'axe perpendiculaire (voies 2 et 4) a une phase rouge pendant 60 secondes (la somme du vert et du jaune de l'autre sens), verte pendant 45 secondes, et jaune pendant 5 secondes. Il en résulte les quatre phases suivantes (une lettre pour chacune des quatre voies et la durée de la phase en secondes) : {V, R, V, R, 55 s.}, {J, R, J, R, 5 s.}, {R, V, R, V, 45 s.}, {R, J, R, J, 5 s.}. Le temps de cycle total de 110 secondes est réparti entre ces quatre phases. En pratique, les carrefours routiers sont beaucoup plus compliqués.

Lorsque le camion atteint un capteur, nous devons identifier sa prochaine phase verte (qui peut être la phase actuelle). Soit \bar{p} ce numéro de phase. Dans la direction perpendiculaire, on s'intéresse à la phase jaune précédente, appelée $\bar{p} - 1$, et sa phase verte précédente $\bar{p} - 2$. De même, dans le sens du camion, les phases jaune et rouge suivantes sont numérotées $\bar{p} + 1$ et $\bar{p} + 2$. Cette identification des phases nous permet de déterminer les phases précédentes et suivantes pour la direction du camion et la direction perpendiculaire.

Maintenant, concernant la phase \bar{p} , nous définissons \underline{v} , \bar{v} et v' comme la durée minimale, maximale et restante du feu vert sur le chemin du camion (respectivement r , \bar{r} et r' pour le feu rouge). Comme la durée des feux jaunes est fixe, nous avons sa durée j et sa durée restante j' .

Stratégie de prolongation

Selon cette stratégie, on gère les feux de façon à ce que le changement de la durée d'un cycle soit compensé dans le cycle suivant. Les capteurs sont positionnés à $d = 150$ m. Soit s la vitesse du véhicule, si disponible ; sinon, s est un paramètre qui peut être défini, par exemple, par la limite de vitesse du segment. Lorsque le camion est détecté, et s'il continue à la même vitesse, il atteindra l'intersection en d/s secondes.

Nous utilisons également un paramètre η qui détermine combien de secondes à l'avance nous voulons que la phase soit verte pour empêcher le véhicule de s'arrêter (et de trop ralentir), et un paramètre tampon π pour laisser le temps au camion de traverser le carrefour. Lorsque le camion atteint le capteur :

- i. si le feu du camion est rouge et $r' < (d/s) - \eta$, aucune action n'est entreprise car le feu passera au vert avant l'arrivée du camion ;
- ii. si le feu du camion est rouge et $r' \geq (d/s) - \eta$, nous validons :
 - a. si le feu dans l'autre sens est jaune, aucune action n'est entreprise, car nous ne pouvons pas raccourcir un feu jaune.
 - b. si le feu dans l'autre sens a été vert pendant plus que la durée verte minimale, nous la passons à la phase suivante avec un jaune pendant j secondes. Cette réduction de $\delta = v'$ secondes, est utilisée pour avancer la phase verte du camion (dans les j secondes suivantes). Ainsi la durée de la phase verte du camion sera augmentée de δ secondes, et le temps de cycle restera équilibré.
 - c. si le feu dans l'autre sens est vert depuis moins que la durée verte minimale, on attend le temps requis w pour atteindre \underline{v} et la phase passe au jaune pendant j secondes. Cette réduction de $\delta = \bar{v} - \underline{v}$ est utilisée pour faire avancer la phase verte du camion dans les prochaines

$w + j$ secondes. Cette phase verte sera prolongée de δ , et le temps de cycle est garanti.

- iii. si le feu du camion est vert et $v' \geq (d/s) + \pi$, aucune action n'est entreprise car le camion arrivera à l'intersection dans (d/s) secondes et il aura π secondes supplémentaires pour traverser.
- iv. si le feu du camion est vert et $v' < (d/s) + \pi$, la phase verte est prolongée de $\delta = \min\{d/s + \pi - v'; \bar{v} - \underline{v}\}$ (ce qui étend également la durée rouge dans les autres directions). La phase verte suivante dans le sens du croisement sera réduite de δ . Nous imposons la condition $\delta \leq \bar{v} - \underline{v}$ pour respecter la prochaine durée minimale du vert des camions.
- v. si le feu du camion est jaune, on peut le changer en rouge dans j' secondes :
 - a. Si $\underline{r} + j' > d/s$, nous ne pouvons pas passer au rouge et réduire suffisamment la durée du rouge pour empêcher le camion de s'arrêter, donc aucune action n'est entreprise.
 - b. Si $\underline{r} + j' \leq d/s$, on fixe la phase rouge à son minimum, on réduit sa durée de $\bar{r} - \underline{r}$, et on commence la phase verte suivante plus tôt. Sa durée sera de $\bar{v} + \bar{r} - \underline{r}$, donc le cycle reste équilibré.

4 RESULTATS ET ANALYSES

Dans cette section nous présentons le plan expérimental utilisé, suivi des résultats et de nos analyses.

4.1 Plan expérimental

Au niveau expérimental, nous allons évaluer toutes les combinaisons des deux réseaux (minimal et étendu), des trois niveaux de trafic (Léger, Moyen, Élevé) et des deux méthodes de gestion des feux (sans gestion des feux, avec gestion des feux). Chaque simulation est effectuée sur 115 minutes où les 15 premières minutes servent au démarrage de la simulation (chargement initial des véhicules) et les 10 dernières à terminer les voyages déjà débutés. Les statistiques sont donc comptabilisées sur 90 minutes. Pour chacune des 12 combinaisons de paramètres, 10 répétitions indépendantes de la simulation sont réalisées.

4.2 Résultats

Le Tableau 1 présente les résultats pour le réseau minimal sans gestion proactive des feux de circulation. La première colonne présente les 3 niveaux de trafic étudiés. La colonne Véhicules réfère aux types de véhicules étudiés : P pour les parcours aller-retour du partenaire, Pa et Pr pour les parcours individuels aller et retour du partenaire et Autres pour tous les autres véhicules simulés. Les colonnes Nb et Dmoy donnent respectivement le nombre de voyages et la distance moyenne de chaque voyage pour le type de véhicule considéré. Les deux dernières colonnes rapportent respectivement la consommation en litres et en litres par 100 kilomètres. Il est possible de compléter l'interprétation du Tableau 1 à l'aide de la troisième colonne du Tableau 5 qui illustre le temps d'attente moyen sans gestion des feux (SansG) pour le réseau minimal. Le temps d'attente se définit ici comme le nombre de secondes qu'un véhicule est arrêté. Rappelons que chaque chiffre est une moyenne sur 10 répétitions. Le Tableau 1, qui utilise la synchronisation de base de la ville, confirme que la consommation moyenne de chaque type de véhicule augmente lorsque le niveau de trafic augmente. Cette augmentation est particulièrement marquée lorsque l'on passe du niveau de congestion Moyen au niveau Élevé (1 482 voyages

sur le réseau). Dans ce cas, la consommation de l'ensemble des véhicules passe de 20,90 l / 100 km à 25,86 l / 100 km.

Le Tableau 2 montre les mêmes données, mais lorsque les capteurs sont activés par le passage des camions du partenaire et appliquent la Stratégie de prolongation. Dans la dernière colonne, les chiffres en gras indiquent une baisse de la consommation (en l. / 100 km) lorsque la gestion des feux est active. Si l'on considère les véhicules du partenaire en aller-retour (type de véhicule P), on enregistre une réduction de consommation pour les trois niveaux de trafic. En analysant les allers et les retours séparément, on constate un seul gain à l'aller (Pa), mais tous les voyages de retour notent une réduction de consommation. Aux niveaux de trafic Moyen et Élevé, les Autres véhicules semblent bénéficier de la gestion active des feux.

Tableau 1 Réseau minimal, sans gestion des feux

Trafic	Véhicules	Nb	Dmoy	C (l.)	(l/100km)
Léger	P	10	5,86	62,37	106,53
	Pa	5	5,78	32,64	112,82
	Pr	5	5,92	29,72	100,38
	Autres	1059	2,37	470,65	18,72
Moyen	P	10	5,86	64,09	109,47
	Pa	5	5,78	32,90	113,71
	Pr	5	5,92	31,19	105,32
	Autres	1305	2,36	649,59	20,90
Élevé	P	10	5,86	67,58	115,48
	Pa	5	5,78	33,88	117,10
	Pr	5	5,91	33,69	113,89
	Autres	1482	2,50	959,56	25,86

Il est possible d'expliquer ce comportement par le fait que la majorité du trafic du réseau minimal est concentrée sur le chemin du camion, qui est également l'axe principal du réseau, voir la Figure 2, et que ces véhicules profitent également des privilèges du camion pour fluidifier leur parcours.

Tableau 2 Réseau minimal, avec gestion des feux

Trafic	Véhicules	Nb	Dmoy	C (l.)	(l/100km)
Léger	P	10	5,86	62,26	106,34
	Pa	5	5,78	32,71	113,06
	Pr	5	5,92	29,54	99,77
	Autres	1063	2,34	479,84	19,20
Moyen	P	10	5,86	62,15	106,16
	Pa	5	5,78	32,30	111,63
	Pr	5	5,92	29,85	100,80
	Autres	1279	2,36	586,48	19,35
Élevé	P	10	5,86	66,80	114,12
	Pa	5	5,78	33,96	117,38
	Pr	5	5,92	32,83	110,92
	Autres	1486	2,47	849,13	23,14

Les résultats du Tableau 1 sont reproduits au Tableau 3, mais sur le réseau étendu. La première observation est que pour des niveaux d'occupation équivalents du réseau, la consommation est plus basse. Cette réduction de la consommation est d'autant plus importante que le niveau de trafic augmente.

L'analyse des données et la visualisation des simulations nous permettent d'expliquer ce comportement par le fait que les voyages sont mieux espacés sur le réseau routier. Leur distance moyenne est également un peu plus longue, par exemple le

voyage moyen des véhicules *Autres* avec un niveau de trafic Élevé passe de 2,50 km (Tableau 1) à 3,21 km (Tableau 3). Ce premier résultat démontre à l'évidence que la structure du réseau routier a un impact non négligeable sur les résultats de la simulation et les niveaux de consommation enregistrés. Cette plus grande fluidité du réseau se confirme au Tableau 5 lorsque l'on compare les temps d'attente des colonnes SansG pour le réseau minimal et le réseau étendu. Ainsi, par exemple, pour un niveau de trafic Moyen, le temps d'attente des camions P passe de 178,3 secondes à 128,7 sur le réseau étendu, cette baisse est de 150,0 à 41,8 secondes pour le reste des véhicules.

Le Tableau 4 analyse maintenant l'impact de la gestion des feux sur le réseau étendu. À nouveau on constate des réductions intéressantes de la consommation en l. / 100 km.

Tableau 3 Réseau étendu, sans gestion des feux

Trafic	Véhicules	Nb	Dmoy	C (l.)	(l/100km)
Léger	P	10	5,86	61,91	105,74
	Pa	5	5,78	32,81	113,41
	Pr	5	5,92	29,09	98,25
	Autres	2708	3,14	1523,99	17,86
Moyen	P	10	5,86	63,08	107,74
	Pa	5	5,78	32,99	114,00
	Pr	5	5,92	30,09	101,62
	Autres	3722	3,20	2156,73	18,10
Élevé	P	10	5,86	62,71	107,10
	Pa	5	5,78	33,05	114,21
	Pr	5	5,91	29,65	100,14
	Autres	4204	3,21	2470,19	18,24

Ces réductions sont cependant plus faibles que sur le petit réseau puisque le trafic est mieux réparti ce qui occasionne une congestion moindre. Tout comme observé précédemment, la longueur moyenne des voyages augmente légèrement entre le Tableau 2 et le Tableau 4.

Tableau 4 Réseau étendu, avec gestion des feux

Trafic	Véhicules	Nb	Dmoy	C (l.)	(l/100km)
Léger	P	10	5,86	60,60	103,49
	Pa	5	5,78	31,58	109,14
	Pr	5	5,92	29,02	97,97
	Autres	2677	3,15	1494,86	17,70
Moyen	P	10	5,86	62,37	106,53
	Pa	5	5,78	33,10	114,39
	Pr	5	5,92	29,27	98,85
	Autres	3816	3,20	2206,32	18,03
Élevé	P	10	5,86	61,72	105,41
	Pa	5	5,78	32,12	111,03
	Pr	5	5,92	29,59	99,92
	Autres	4574	3,22	2723,48	18,48

Le Tableau 5 met en évidence l'importance du réseau étudié. Sur le réseau minimal, la gestion active des feux (AvecG) crée une diminution importante des temps d'attentes puisque pratiquement tous les véhicules circulent sur l'axe visé. L'impact de la mesure de gestion active des feux est donc extrême. En analysant le réseau étendu, on constate que l'activation des feux demeure toujours bénéfique pour les camions de la compagnie qui économisent entre 13,9 et 29,9 secondes. Comme on pouvait s'y attendre avec un plus grand réseau et un trafic plus dispersé, les impacts sur le reste des

véhicules sont plus faibles, même nuls pour le niveau de trafic Léger où le temps d'attente moyen est exactement le même à 37,2 secondes.

Tableau 5 Évolution des temps d'attente moyens

Trafic	Véhicules	Réseau minimal		Réseau étendu	
		SansG	AvecG	SansG	AvecG
Léger	S	128,8	114,8	120,8	90,9
	Autres	76,6	75,1	37,2	37,2
Moyen	S	178,3	108,1	128,7	103,7
	Autres	150,0	91,96	41,8	41,3
Élevé	S	308,6	248,5	134,2	120,3
	Autres	324,2	235,1	44,2	48,4

Ce résultat montre que l'impact de mesures de gestion active des feux est plus important sur des petits réseaux et que cet impact s'amenuise considérablement lorsque la mesure est analysée sur un réseau plus complet. Autrement dit, l'impact de la gestion active des feux de circulation reste très local, avec peu d'effets sur le reste du réseau.

Le Tableau 6 permet d'effectuer une analyse similaire sur la consommation en l. / 100 km. La colonne Réseau minimal rapporte le pourcentage de réduction dans la consommation en litres au 100 km entre l'approche sans gestion des feux et l'approche avec gestion des feux. Par exemple, pour les véhicules du partenaire avec un niveau de trafic Léger, la gestion des feux a fait passer la consommation de 106,53 l. / 100 km à 106,34 l. / 100 km soit une différence de -0,18%. La principale conclusion est que pour les véhicules Autres, les différences en pourcentage sont beaucoup plus élevées sur le réseau minimal (respectivement 2,56, -7,42 et -10,52) que pour le réseau étendu (respectivement -0,90, -0,39 et 1,32). Bref, plus le réseau est étendu, moins la gestion des feux impacte significativement l'ensemble du trafic.

Tableau 6 Différence en % du taux de consommation (en l. / 100 km)

Trafic	Véhicules	Réseau minimal	Réseau étendu
Léger	P	-0,18	-2,13
	Pa	0,21	-3,77
	Pr	-0,61	-0,28
	Autres	2,56	-0,90
Moyen	P	-3,02	-1,12
	Pa	-1,83	0,34
	Pr	-4,29	-2,73
	Autres	-7,42	-0,39
Élevé	P	-1,18	-1,58
	Pa	0,24	-2,78
	Pr	-2,61	-0,22
	Autres	-10,52	1,32

5 CONCLUSION ET APPRENTISSAGES

Dans cet article nous avons reproduit le réseau routier emprunté par les camions lourds d'une compagnie de transport partenaire. Après avoir reproduit la synchronisation des feux de circulation de la ville, nous avons testé une approche de gestion active des feux qui tente de réduire le nombre de fois que le camion doit s'arrêter aux feux de circulation. Le but est de diminuer la consommation de carburant reliée à l'énergie que demande l'accélération du véhicule lourd. Les résultats montrent que

l'approche permet effectivement de réduire la consommation du camion en question.

Nous avons ensuite évalué deux grandeurs de réseaux pour voir comment les impacts de la gestion active se propagent dans un réseau plus grand. On constate que les économies pour les camions du partenaire sont toujours présentes et alors les impacts pour l'ensemble des véhicules du grand réseau s'amenuisent grandement.

Ces analyses démontrent que les résultats d'approches proactives de gestion des feux de circulation sont intimement reliés aux réseaux étudiés. Si les réseaux sont trop petits, les impacts tendent à être surestimés. Avec des réseaux plus grands, les impacts indirects se perdent dans la masse des déplacements. Cela signifie qu'une mesure ciblée pour favoriser le déplacement de certains types de véhicules ne se répercute que très peu sur l'ensemble de la circulation avoisinante.

Nous pensons que plus d'études seront nécessaires pour bien identifier les impacts de la structure et de la grandeur des réseaux modélisés. Des recherches devront également être effectuées pour mesurer les impacts lorsque plusieurs types de véhicules ont accès à des mesures préférentielles. Des règles de priorité devront probablement être développées et il faudra déterminer jusqu'à quel point ces mesures préférentielles peuvent être étendues à d'autres partenaires.

6 REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier M. Vincent Turgeon, directeur des technologies de l'information à la ville de Trois-Rivières pour sa précieuse collaboration ainsi que l'accès aux données. Nous remercions également le gestionnaire de la compagnie de transport partenaire et deux réviseurs pour leurs commentaires constructifs. Cette recherche a été rendue possible grâce au support financier du Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada [2018-03712, 2019-00094]. Ce support est grandement apprécié.

7 REFERENCES

- Ali, M. S., Kaiser, E. I. & Hadi, M. (2017). Guidance for identifying corridor conditions that warrant deploying transit signal priority and queue jump. 5th IEEE International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS), 657–662.
- Alvarez Lopez, P., Behrisch, M., Bieker-Walz, L., Erdmann, J., Flötteröd, Y.-P., Hilbrich, R., Lücken, L., Rummel, J., Wagner, P. & Wiesner, E. (2018). Microscopic Traffic Simulation using SUMO. *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, 2575–2582.
- Dion, F., Rakha, H. & Zhang Y. (2004). Evaluation of Potential Transit Signal Priority Benefits along a Fixed-Time Signalized Arterial. *Journal of Transportation Engineering*, 130, 294–303.
- Garrow, M. & Machemehl, R. (1999). Development and Evaluation of Transit Signal Priority Strategies. *Journal of Public Transportation*, 2, 65–90.
- Iqbal, S., Ardalan, T., Hadi, M. & Kaiser, E. (2022). Developing guidelines for implementing transit signal priority and freight signal priority using simulation modeling and a decision tree algorithm. *Transportation Research Record*, 2676, 133 – 144.

- Kim, W. & Rilett, L. R. (2005). Improved transit signal priority system for networks with nearside bus stops. *Transportation Research Record*, 1925, 205–214.
- Lozner, B., Lee, K., Raja, A. W., Habib, M. G. & Cesme, B. (2018). Large-scale transit signal priority implementation: District of Columbia's path to success. *Transportation Research Record*, 2672, 64 – 74.
- Ngan, V., Sayed, T. & Abdelfatah, A. (2004). Impacts of various parameters on transit signal priority effectiveness. *Journal of Public Transportation*, 7, 71–93.
- OpenStreetMap contributors, Extraction de la région métropolitaine de Trois-Rivières à partir de <http://extract.bbbike.org/>. Septembre 2022.
- Smith, H. R., Hemily, B. & Ivanovic, M. (2005). *ITS America*.
- Wu, K. & Guler, S. I. (2018). Optimizing transit signal priority Implementation along an arterial, *Transportation Research Record*, 2672, 215 – 227.
- Xu, M., Ye, Z., Sun, H. & Wang, W. (2016). Optimization model for transit signal priority under conflicting priority requests. *Transportation Research Record*, 2539, 140–148.
- Zhou, L., Wang, Y. & Liu, Y. (2017). Active signal priority control method for bus rapid transit based on Vehicle Infrastructure Integration. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 6, 99–109.