



HAL
open science

Étude a priori de la régulation dynamique des vitesses appliquée au cas de l'A22

Marie-Juliette Barthès

► **To cite this version:**

Marie-Juliette Barthès. Étude a priori de la régulation dynamique des vitesses appliquée au cas de l'A22. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2016. dumas-02473513

HAL Id: dumas-02473513

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02473513v1>

Submitted on 10 Feb 2020

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



ETUDE *a priori* DE LA RÉGULATION DYNAMIQUE DES VITESSES
APPLIQUÉE AU CAS DE L'A22



FIGURE 1 – Photographie de l'échangeur 15 de l'autoroute A22, le jeudi 26 mai 2015 à 7h30

Marie-Juliette BARTHES
VA Transport
Promotion 61
6 juillet 2016

Président du jury : M. DURET Aurélien
Maître de TFE : M. GIL David
Expert : M. MURARD Frédéric

NOTICE ANALYTIQUE

	NOM	PRENOM	
AUTEUR	BARTHES	Marie-Juliette	
TITRE	ETUDE <i>a priori</i> DE LA RÉGULATION DYNAMIQUE DES VITESSES APPLIQUÉE AU CAS DE L'A22		
	ORGANISME D’AFFILIATION ET LOCALISATION	NOM PRENOM	
ENCADRANT	CEREMA Nord Picardie	M. GIL David	
COLLATION	Nombre de pages du rapport	Nbre d’annexes	Nbre de réf. biblio.
	116	9	38
MOTS CLEFS	Diagnostic, Régulation dynamique des vitesses, A22, modèle mésoscopique, évaluation a priori		
KEYWORDS	Diagnostic, variable speed limits, A22, mesoscopic model, evaluation a priori		
TERMES GEOGRAPHIQUES	Belgique, Gand, Lille, Département du Nord		
RESUME	Ce travail de fin d'études aborde la problématique de l'évaluation d'une mesure de gestion de trafic sur l'autoroute A22 à partir d'un outil de simulation dynamique. Le travail a consisté d'une part à rendre compte des conditions de circulation sur la portion d'autoroute étudiée, puis à paramétrer l'outil de simulation dynamique afin de simuler le réseau et d'intégrer un scénario de régulation dynamique des vitesses.		
ABSTRACT	This report deals with the problem of evaluating a traffic management measure, on the A22, thanks to a dynamic simulation tool. The work consisted in describing traffic conditions on the studied motorway and setting the dynamic simulation tool to simulate the network and integrate a variable speed limits scenario.		

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mon président de jury, Aurélien DURET qui a pris le temps de m'orienter dans mon travail.

Je remercie également Frédéric MURARD qui a bien voulu être mon expert.

Je remercie vivement David GIL pour son encadrement tout au long de ce TFE. Elle a su se rendre disponible au moment opportun et a réuni toutes les conditions nécessaires pour la bonne réussite de mon travail.

Je remercie sincèrement Etienne HANS pour son soutien et son appui technique concernant la plateforme mésoscopique.

Pour finir, je voulais également remercier toutes les personnes du groupe Systèmes de Transport et Sécurité pour leur accueil et leur participation à l'élaboration de mon rapport de stage.

Table des matières

Introduction	11
1 Etat de l'art	14
1.1 Etape préliminaire : définitions des outils de caractérisation du trafic autoroutier . . .	15
1.1.1 Le diagramme fondamental d'une section	15
1.1.2 Le niveau d'utilisation des voies	16
1.1.3 Courbes de véhicules cumulés	19
1.2 Les stratégies de gestion de circulation et le retour d'expériences	20
1.2.1 Régulation d'accès	20
1.2.2 Interdiction de dépassement pour les poids-lourds	22
1.2.3 Voies réversibles	23
1.2.4 Régulation des vitesses	24
1.3 Evaluation <i>a priori</i> d'une régulation du trafic	27
1.3.1 Evaluation à partir d'un modèle microscopique	27
1.3.2 Evaluation à partir d'un modèle macroscopique	28
1.3.3 Evaluation à partir d'un modèle mésoscopique	29
2 Diagnostic	31
2.1 Généralités	31
2.1.1 Périmètre de l'étude	31
2.1.2 Contexte	32
2.1.3 Données disponibles	33
2.2 Analyse des niveaux de trafic journalier	36
2.2.1 Estimation pour les véhicules légers	36
2.2.2 Estimation pour les poids-lourds	36
2.3 Caractérisation des conditions de circulation par semaine étudiée	37
2.3.1 Analyse qualitative du trafic	37
2.3.2 Choix des jours de référence	43
2.3.3 Analyse quantitative de la congestion	44
2.4 Conclusion	50
3 Utilisation de l'outil Mésoscopique	51
3.1 Initialisation de l'outil mésoscopique	51
3.1.1 Représentation du réseau	51

3.1.2	Hypothèses de modélisation	53
3.1.3	Elaboration de la demande	53
3.2	Elaboration du calage	53
3.2.1	Choix des indicateurs	53
3.2.2	Paramètres à caler	55
3.2.3	Simulation avec les paramètres par défaut	55
3.2.4	Elaboration d'une routine de calage	56
3.2.5	Résultats de la routine de calage	59
3.3	Scénario de régulation dynamique des vitesses	61
3.3.1	Le scénario	61
3.3.2	Vitesse tronçon	62
3.3.3	Justification du choix de l'indicateur	62
3.3.4	Détermination des paramètres S et x	63
3.4	Evaluation du scénario de régulation dynamique des vitesses	65
3.4.1	Choix des indicateurs d'évaluation	65
3.4.2	Résultats de la simulation	65
Conclusion		74
A Formules pour la reconstitution des données 6 min à partir des données 1 min		77
A.1	Reconstitution du débit	77
A.2	Reconstitution de la vitesse	77
B Comparaison des données stations et des données reconstituées		79
C Tableau de la demande par jour		82
D Extraction de la main courante		87
E Représentation du réseau par la plateforme mésoscopique		90
F Représentation des CVC pour les paramètres par défaut		91
G Représentation des CVC du jeudi 10 mars pour $u = 31$ m/s, $w = 4.2$ m/s, $k_x = 0,16$ véh/m, une demande de croisement égale à 0.916 véh/s et une répartition de 41% sur la voie lente		97
H Représentation des CVC du lundi 21 mars pour $u = 27,5$ m/s, $w = 4.3$ m/s, $k_x = 0,16$ véh/m, une demande de croisement égale à 0.916 véh/s et une répartition de 41% sur la voie lente		101
I Représentation des moyennes des données simulées et leur écart-type		105
I.1	Moyenne des débits	105
I.2	Moyenne des temps de parcours	109

Table des figures

1	Photographie de l'échangeur 15 de l'autoroute A22, le jeudi 26 mai 2015 à 7h30	1
1.1	Les trois représentations du diagramme fondamental	15
1.2	Diagramme fondamental sur une section à plusieurs voies	16
1.3	Niveaux d'utilisation des voies sur une section à 2 voies	17
1.4	Répartition des débits par voie en fonction du débit et de la densité pour une autoroute à 3 voies	18
1.5	Evolution du débit cumulé au cours du temps	19
1.6	Fonctionnement de la régulation d'accès sur autoroutes	20
1.7	Photographie d'une section soumise à une mesure d'interdiction de dépasser pour les poids-lourds	22
1.8	(a) Débit maximal observé sur la voie de droite (Q_s^*) en fonction du débit maximal total (Q_{tot}); (b) Débit maximal observé sur la voie de droite en fonction de la différence de vitesses entre la voie du milieu et la voie de droite	23
1.9	Photographie du pont de Saint Nazaire	24
1.10	Schéma explicatif du MTFC	26
2.1	Carte de la section de l'A22 étudiée	31
2.2	Tableau récapitulatif de l'activation/désactivation théorique de l'IDPL	32
2.3	Tableau récapitulatif de l'activation/désactivation réelle de l'IDPL	32
2.4	Photographie d'un PMV pour l'IDPL	33
2.5	Plan des arcs et des stations considérées pour l'étude	34
2.6	Diagrammes débit/vitesse en fonction du temps, semaine 9	38
2.7	Diagrammes débit/vitesse en fonction du temps, semaine 9	39
2.8	Diagrammes débit/vitesse en fonction du temps, semaine 11	40
2.9	Diagrammes débit/vitesse en fonction du temps, semaine 12	40
2.10	Diagramme débit/vitesse en fonction du temps, les samedis étudiés	41
2.11	Diagramme débit/vitesse en fonction du temps, les samedis étudiés	42
2.12	Photographie de l'insertion de l'échangeur 15	43
2.13	Diagramme espace/temps jeudi 10 mars	44
2.14	Diagramme espace/temps lundi 21 mars	45
2.15	Diagrammes fondamentaux jeudi 10 mars	45
2.16	Diagrammes fondamentaux jeudi 10 mars	46

2.17	Diagrammes de répartition du nombre de poids lourds sur l'ensemble des deux voies et sur chacune des voies de circulation pour les arcs 4 (en haut) et 3 (en bas), le jeudi 10 mars	47
2.18	Diagrammes de répartition du nombre de poids lourds sur l'ensemble des deux voies et sur chacune des voies de circulation pour les arcs 4 (en haut) et 3 (en bas), le lundi 21 mars	47
2.19	Courbes de niveau d'utilisation des deux voies de circulation, jeudi 10 mars	48
2.20	Courbes de niveau d'utilisation des deux voies de circulation, lundi 21 mars	48
2.21	Débits et vitesse en fonction du temps pour les stations en aval et en amont de l'échangeur 15, le matin	49
2.22	Débits et vitesse en fonction du temps pour les stations en aval et en amont de l'échangeur 15, le matin	49
3.1	Schéma récapitulatif de la modélisation du réseau	52
3.2	Schéma de principe	54
3.3	CVC d'une simulation pour les paramètres par défaut, jeudi 10 mars	55
3.4	CVC d'une simulation pour les paramètres par défaut, lundi 21 mars	56
3.5	CVC d'une simulation pour $u = 30m/s$, $w = 5m/s$, $k_x = 0,2veh/m$, une demande de croisement égale à 0.916 véh/s et une répartition de 41% sur la voie lente, jeudi 10 mars	58
3.6	CVC d'une simulation pour $u = 30m/s$, $w = 5m/s$, $k_x = 0,2veh/m$, une demande de croisement égale à 0.916 véh/s et une répartition de 41% sur la voie lente, lundi 21 mars	58
3.7	CVC d'une simulation pour $u = 31 m/s$, $w = 4.2 m/s$, $k_x = 0,16 veh/m$, une demande de croisement égale à 0.916 véh/s et une répartition de 41% sur la voie lente	60
3.8	CVC d'une simulation pour $u = 27,5 m/s$, $w = 4,3 m/s$, $k_x = 0,16 veh/m$, une demande de croisement égale à 0.916 véh/s et une répartition de 41% sur la voie lente, le lundi 21 mars	61
3.9	Débit horaire et Vitesse tronçon en fonction du temps, de la station de l'arc A0025021720 sur l'A25 le 24/03/2016	63
3.10	Vitesse tronçon en fonction du temps pour le jeudi 10 mars	64
3.11	Vitesse tronçon en fonction du temps pour le lundi 21 mars	64
3.12	Débit moyen 6 min pour chaque station pour le jeudi 10 mars	67
3.13	Chroniques des temps de parcours moyens pour le jeudi 10 mars	68
3.14	Histogrammes des temps de parcours moyen pour chaque itinéraire pour le jeudi 10 mars	69
3.15	Distribution des temps de parcours moyen pour chaque itinéraire pour le jeudi 10 mars	70
3.16	Débit moyen 6 min lundi 21 mars	71
3.17	Chroniques des temps de parcours moyens pour le lundi 21 mars	72
3.18	Histogrammes des temps de parcours moyens pour chaque itinéraire pour le lundi 21 mars	73
3.19	Distribution des temps de parcours moyens pour chaque itinéraire pour le lundi 21 mars	73

B.1	Comparaison des débits par sens pour le jeudi 10 mars	79
B.2	Comparaison des débits par sens pour le lundi 21 mars	80
B.3	Comparaison des vitesses par sens pour le jeudi 10 mars	80
B.4	Comparaison des vitesses par sens pour le lundi 21 mars	81
E.1	Représentation du réseau par la plateforme mésoscopique	90
F.1	Première simulation avec les paramètres par défaut, jeudi 10 mars	91
F.2	Deuxième simulation avec les paramètres par défaut, jeudi 10 mars	92
F.3	Troisième simulation avec les paramètres par défaut, jeudi 10 mars	92
F.4	Quatrième simulation avec les paramètres par défaut, jeudi 10 mars	93
F.5	Première simulation avec les paramètres par défaut, lundi 21 mars	94
F.6	Deuxième simulation avec les paramètres par défaut, lundi 21 mars	94
F.7	Troisième simulation avec les paramètres par défaut, lundi 21 mars	95
F.8	Quatrième simulation avec les paramètres par défaut, lundi 21 mars	96
G.1	Première simulation avec les paramètres déterminés par la routine de calage, jeudi 10 mars	97
G.2	Deuxième simulation avec les paramètres déterminés par la routine de calage, jeudi 10 mars	98
G.3	Troisième simulation avec les paramètres déterminés par la routine de calage, jeudi 10 mars	99
G.4	Quatrième simulation avec les paramètres déterminés par la routine de calage, jeudi 10 mars	100
H.1	Première simulation avec les paramètres déterminés par la routine de calage, lundi 21 mars	101
H.2	Deuxième simulation avec les paramètres déterminés par la routine de calage, lundi 21 mars	102
H.3	Troisième simulation avec les paramètres déterminés par la routine de calage, lundi 21 mars	103
H.4	Quatrième simulation avec les paramètres déterminés par la routine de calage, lundi 21 mars	104
I.1	Moyenne du débit sur les 6 simulations et écart-type en fonction du temps, sans régulation, jeudi 10 mars	105
I.2	Moyenne du débit sur les 6 simulations et écart-type en fonction du temps, avec régulation, jeudi 10 mars	106
I.3	Moyenne du débit sur les 6 simulations et écart-type en fonction du temps, sans régulation, lundi 21 mars	107
I.4	Moyenne du débit sur les 6 simulations et écart-type en fonction du temps, avec régulation, lundi 21 mars	108
I.5	Moyenne du temps de parcours sur les 6 simulations et écart-type en fonction du temps, sans régulation, jeudi 10 mars	109

I.6	Moyenne du temps de parcours sur les 6 simulations et écart-type en fonction du temps, avec régulation, jeudi 10 mars	110
I.7	Moyenne du temps de parcours sur les 6 simulations et écart-type en fonction du temps, sans régulation, lundi 21 mars	111
I.8	Moyenne du temps de parcours sur les 6 simulations et écart-type en fonction du temps, avec régulation, lundi 21 mars	111

Liste des tableaux

2.1	Tableau récapitulatif des types de données	35
2.2	Tableau récapitulatif du trafic journalier	37
3.1	Tableau récapitulatif des valeurs des paramètres des simulations les plus acceptables pour le jeudi 10 mars	59
3.2	Tableau récapitulatif des heures d'activation/désactivation de la régulation	66
3.3	Tableau récapitulatif des durées de la congestion, jeudi 10 mars	68
3.4	Tableau récapitulatif des heures d'activation/désactivation de la régulation pour le lundi 21 mars	71
3.5	Tableau récapitulatif de la durée de la congestion, lundi 21 mars	72
3.6	Tableau récapitulatif des résultats	74
C.1	Tableau de la demande par jour de semaine pour les VL	83
C.2	Tableau de la demande par jour de week-end pour les VL	84
C.3	Tableau de la demande par jour de semaine pour les PL	85
C.4	Tableau de la demande par jour de week-end pour les PL	86
D.1	Tableau des mains courantes	87
I.1	Tableau de l'écart-type des débits 6 min des 6 simulations, jeudi 10 mars	107
I.2	Tableau de l'écart-type des débits 6 min des 6 simulations, lundi 21 mars	109
I.3	Tableau de l'écart-type des temps de parcours des 6 simulations, jeudi 10 mars	110
I.4	Tableau de l'écart-type des temps de parcours des 6 simulations, lundi 21 mars	112

Introduction

L'utilisation de la voiture reste le moyen de transport privilégié de nos jours. Le trafic est devenu tel que les infrastructures sont saturées en heures de pointe et ne permettent plus de satisfaire la demande. Il existe plusieurs solutions pour réduire la congestion. Une solution évidente serait de proposer de nouvelles infrastructures ou un agrandissement des routes existantes. Cependant, cette solution ne répond pas aux critères de développement durable car trop coûteuse et néfaste pour l'environnement. Une autre solution consisterait à limiter la demande, en proposant d'autres offres de transport ou en utilisant des méthodes de restriction d'utilisation de la voiture, par exemple l'utilisation de péages urbains. Une troisième solution serait d'optimiser l'usage de l'infrastructure grâce à une meilleure gestion du trafic.

En effet, une bonne exploitation du réseau permet d'obtenir en permanence les meilleures conditions de circulation, de diminuer les phénomènes de congestion, de réduire la pollution et les accidents. Les outils de gestion du trafic sont nombreux et permettent d'optimiser l'usage de l'infrastructure. Dans notre cas d'étude, il s'agit de la régulation dynamique des vitesses sur autoroute. Cette mesure de régulation consiste à baisser la vitesse réglementaire pour faire diminuer la vitesse des usagers. Cette méthode a régulièrement été évaluée comme avantageuse pour les usagers à condition qu'elle soit mise en place au moment opportun.

Mon cas d'étude s'inscrit dans ce contexte d'optimisation de l'infrastructure. En effet, la Direction Interdépartementale des Routes du Nord (DIRN), exploitante du réseau autoroutier national dans la région des Hauts de France, souhaite mettre en place deux stratégies de régulation de trafic sur l'axe A22, située au nord de Lille. Cette autoroute relie la frontière belge à la rocade nord-ouest de Lille (RNO). Elle est régulièrement congestionnée dans le sens Belgique-Lille (Nord-Sud). C'est pourquoi, la DIR Nord a souhaité que le Cerema Nord-Picardie étudie l'opportunité de mettre en place une régulation d'accès et une régulation dynamique des vitesses sur cette autoroute.

Mon stage a porté spécifiquement sur la régulation dynamique des vitesses. L'objectif était d'analyser l'effet d'un scénario de régulation dynamique du trafic sur l'axe A22. Afin de remplir cet objectif, nous avons choisi de travailler avec un outil mésoscopique. La régulation des vitesses n'étant pas mise en place, il s'agit d'une évaluation a priori. C'est pourquoi, le présent travail aborde la problématique suivante :

Comment un outil de simulation mésoscopique peut-il permettre l'évaluation a priori d'une mesure de régulation dynamique de vitesses, appliquée à l'autoroute A22 ?

Afin de répondre au mieux à cette problématique, nous analyserons tout d'abord l'état de l'art en ce qui concerne les mesures de gestion de trafic et les méthodes d'évaluation a priori de ces mesures. Puis, afin de définir un scénario de régulation dynamique de trafic correspondant aux conditions de trafic sur l'A22, nous élaborerons un diagnostic de l'état du trafic. Nous expliciterons ensuite les étapes pour la simulation. Nous clôturerons sur les résultats des simulations et sur les limites des simulations.

Chapitre 1

Etat de l'art

La gestion du trafic permet l'optimisation des conditions de trafic. Elle comporte 3 étapes :

- Le recueil de données permettant de connaître de l'état de trafic en instantané sur le réseau routier. Cette étape est assurée, en temps réel, par des capteurs : des boucles électromagnétiques implantées dans la chaussée, des radars ou des caméras placés en bord de route.
- Les données expérimentales ainsi obtenues sont analysées par un système informatique. Ce dernier, en fonction des consignes et des algorithmes initialement implémentés, envoie des commandes informatiques.
- Ces commandes s'affichent sur des Panneaux à Messages Variables (PMV) à l'intention des usagers.

Il est possible de classer les stratégies de gestion de trafic selon quatre catégories :

- Limiter la gêne des véhicules à vitesse lente en les contraignant à circuler sur une seule voie de circulation. Cette stratégie s'illustre par exemple par l'interdiction de dépassement des poids-lourds. (cf. section 1.2.2)
- Contrôler le débit entrant dans une zone géographique. La régulation d'accès en est un parfait exemple. Il s'agit de limiter la quantité de véhicules entrants sur une section pour éviter qu'une congestion se forme, tout en contrôlant le nombre de véhicules en attente. (cf. section 1.2.1)
- Augmenter l'offre de la section sans créer une nouvelle infrastructure. Cette stratégie peut par exemple s'effectuer en ouvrant l'accès à la bande d'arrêt d'urgence ou en utilisant une voie réversible que l'on affecte tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre en fonction du trafic. (cf. section 1.2.3)
- Homogénéiser les vitesses. Il s'agit de réguler de façon dynamique les vitesses afin de réduire le différentiel de vitesses des véhicules entre les voies. (cf. section 1.2.4)

La suite de ce chapitre se compose de 3 parties. Nous commencerons par une étape préliminaire afin de définir les outils nécessaires à l'étude. La deuxième partie abordera un panel de régulation dynamique du trafic, complété par le retour d'expériences développées dans la littérature. Enfin, nous aborderons différentes approches d'évaluation a priori de gestion du trafic.

1.1 Etape préliminaire : définitions des outils de caractérisation du trafic autoroutier

Cette partie préliminaire a pour objectif de présenter 3 outils que nous utiliserons pour caractériser le trafic dans le diagnostic présenté chapitre 2 et le calage du modèle mésoscopique présenté en section 3.2.

1.1.1 Le diagramme fondamental d'une section

Le diagramme fondamental permet de représenter les états d'équilibres du trafic. Il est divisé en deux parties, une partie dite fluide et l'autre dite congestionnée comme indiqué sur la figure 1.1. Il peut être représenté sous 3 formes : le débit en fonction de la concentration (figure a/), la vitesse du flot en fonction du débit (figure b/) et la vitesse du flot en fonction de la concentration (figure c/).

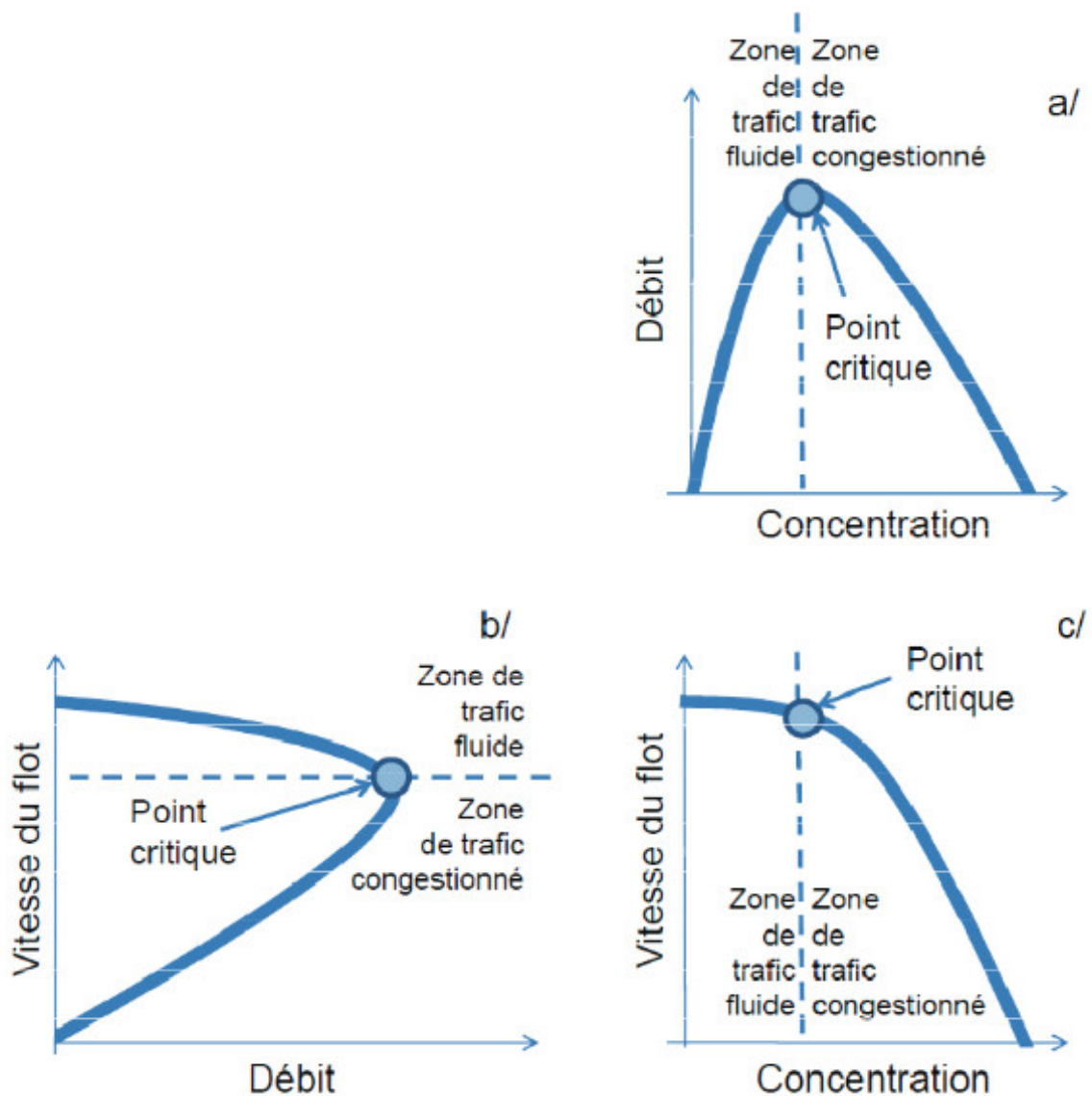


FIGURE 1.1 – Les trois représentations du diagramme fondamental - Source : [Buisson and Lesort, 2010]

Il est le plus fréquemment représenté par le plan débit-concentration comme sur la figure 1.2. Ce plan permet de lire des grandeurs caractéristiques de l'état de trafic :

- u : la vitesse libre correspondant à la vitesse hors congestion ;
- C : la capacité correspondant au débit maximal ;
- k_c : la concentration critique correspondant au nombre de véhicules par unité de longueur au-delà de laquelle, le trafic devient congestionné ;
- k_x : la concentration maximale correspondant au nombre maximal de véhicules par unité de longueur qui peut être stocké ;
- w : la vitesse de propagation d'onde qui correspond à la vitesse avec laquelle la congestion remonte en amont.

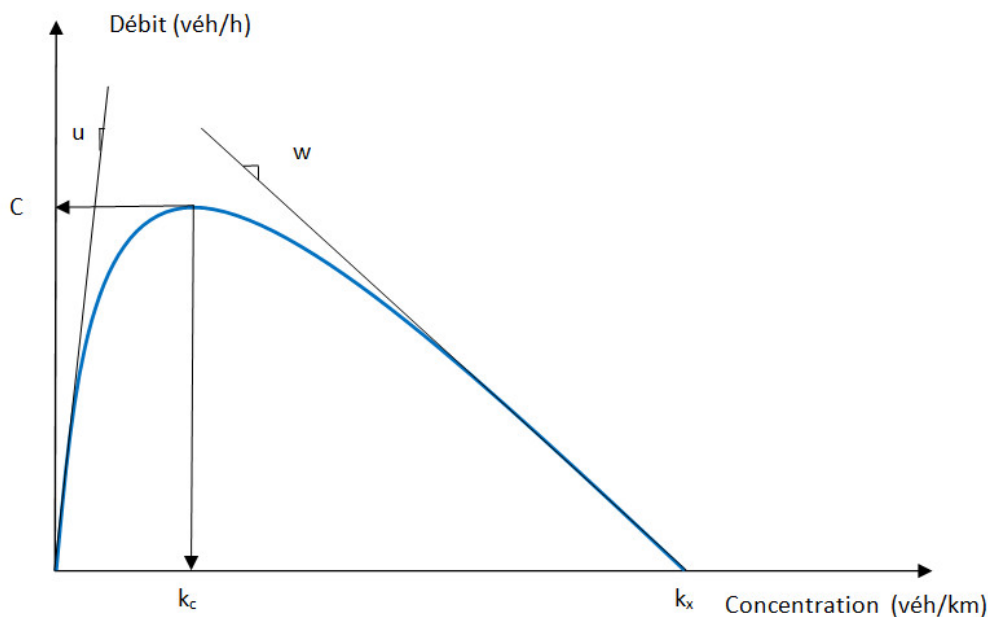


FIGURE 1.2 – Diagramme fondamental sur une section à plusieurs voies Les grandeurs caractéristiques sont u : la vitesse libre, w : la vitesse de propagation, k_c : la concentration critique, k_x : la concentration maximale, C : le débit maximal.

1.1.2 Le niveau d'utilisation des voies

Le LFD (Lane Flow Distribution) permet d'analyser le niveau d'utilisation de chacune des voies. 2 formes de diagrammes existent : la répartition des débits par voie en fonction du débit total sur la section ou la répartition d'utilisation des voies en fonction de la densité totale.

Dans le cas d'une autoroute à 2 voies, la principale différence entre la voie de droite et la voie de gauche est la vitesse des véhicules. Le LFD permet de mettre en évidence les différences de débits qui s'écoulent sur les deux voies. En effet, on remarque que sur la figure 1.3, pour des demandes de trafic faibles, la majorité des véhicules circule sur la voie lente. A mesure que la demande augmente, le débit sur la voie rapide augmente. La répartition du débit est rarement identique entre les voies. Mais il existe une valeur du débit total pour lequel le débit est le même sur les deux voies : 1500 véh/h sur la figure 1.3. Au-delà de cette valeur, appelée demande de croisement ou débit de croisement, la voie rapide accueille une proportion de véhicules plus élevées que la voie lente.

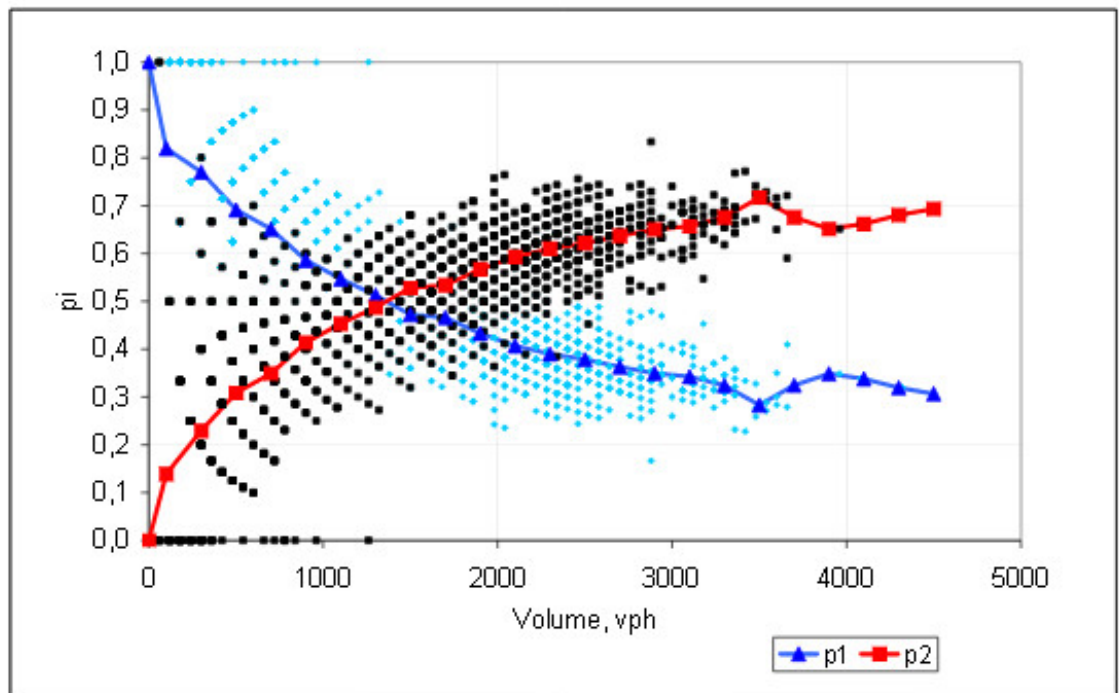


FIGURE 1.3 – Niveaux d'utilisation des voies sur une section à 2 voies d'une autoroute en Allemagne, p1 correspond à la voie lente et p2 à la voie rapide - Source : [Wu, 2006]

Cependant, cette représentation ne permet pas de caractériser l'état de trafic. En effet, sur la figure 1.4, les zones ombrées représentent la situation du trafic congestionné. Sur la figure (a), le débit q_1 peut correspondre à deux vitesses : u_1 située en fluide et u_2 en zone congestionnée. En revanche, si la répartition des véhicules sur les voies est représentée en fonction de la concentration totale (figure (d)), les deux états de trafic peuvent être distingués. Ainsi, lorsque le LFD représente la répartition des véhicules en fonction du débit total, il n'est pertinent de l'utiliser qu'en un lieu non congestionné.

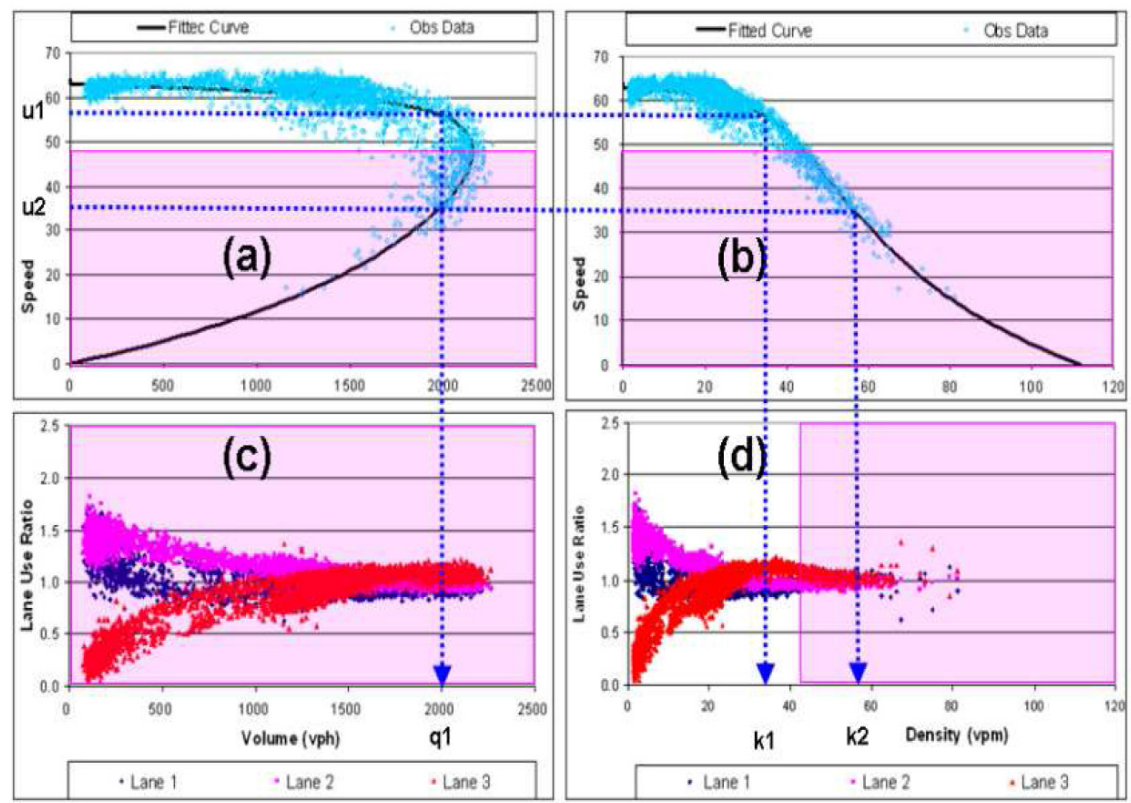


FIGURE 1.4 – Répartition des débits par voie en fonction du débit et de la densité pour une autoroute à 3 voies - Source : [Wu, 2006]

1.1.3 Courbes de véhicules cumulés

La représentation des courbes de véhicules cumulés (CVC), permet d'analyser les temps de parcours, les retards, sur un segment de route. [Buisson and Lesort, 2010] définissent : « le débit cumulé (ou nombre de véhicules cumulés) en un point est égal au nombre de véhicules passés en ce point depuis le passage d'un véhicule arbitrairement choisi comme référence (« zéro » de la courbe) ».

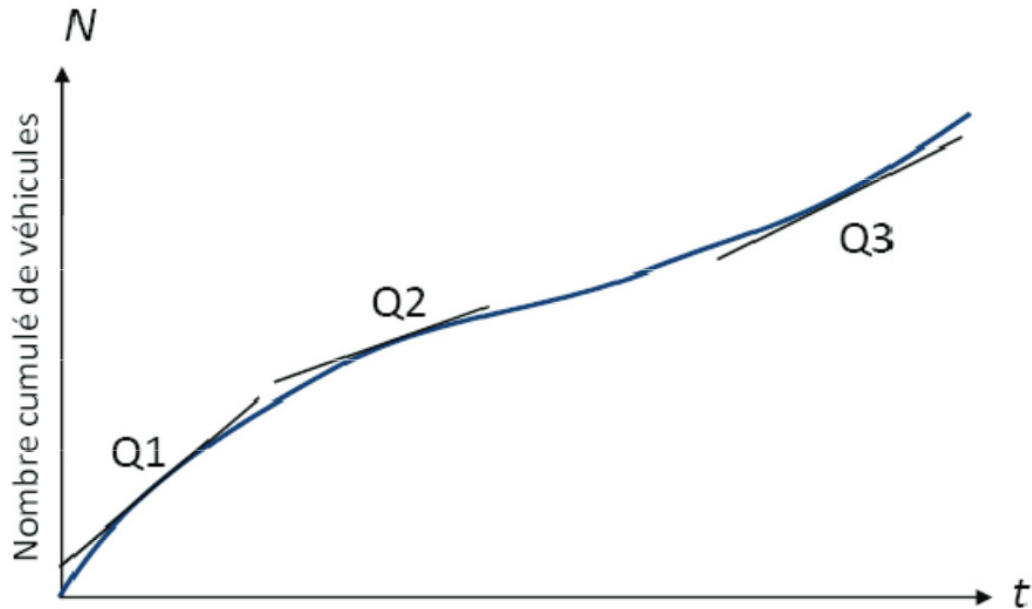


FIGURE 1.5 – Evolution du débit cumulé au cours du temps - Source : [Buisson and Lesort, 2010]

La figure 1.5, représente le nombre de véhicules cumulés en fonction du temps. Le débit est à chaque instant égal à la pente de la courbe de débit cumulé.

Les applications des CVC sont multiples, elles peuvent notamment être représentées en plusieurs points de la section sur la même courbe. Ainsi, elles permettent de déterminer les conditions de trafic en amont de la congestion. Ces méthodes de résolution ne seront pas explicitées dans cette partie (cf. [Buisson and Lesort, 2010] pour plus de détails) , seule la définition des CVC nous intéresse pour la suite du présent rapport.

1.2 Les stratégies de gestion de circulation et le retour d'expériences

Cette partie vise à explorer différents exemples de gestion du trafic et d'en expliciter les effets à partir d'évaluation a posteriori.

1.2.1 Régulation d'accès

La régulation d'accès consiste à limiter l'accès d'une section par l'utilisation de feux de signalisation. On peut distinguer 2 cas d'utilisation :

- Sur autoroute, pour limiter l'accès à la section courante des véhicules en provenance d'une bretelle d'insertion afin de retarder l'apparition de la congestion sur la section courante (cf. figure 1.6)
- En milieu urbain, pour protéger une zone de toute congestion [Keyvan-Ekbatani, 2015].

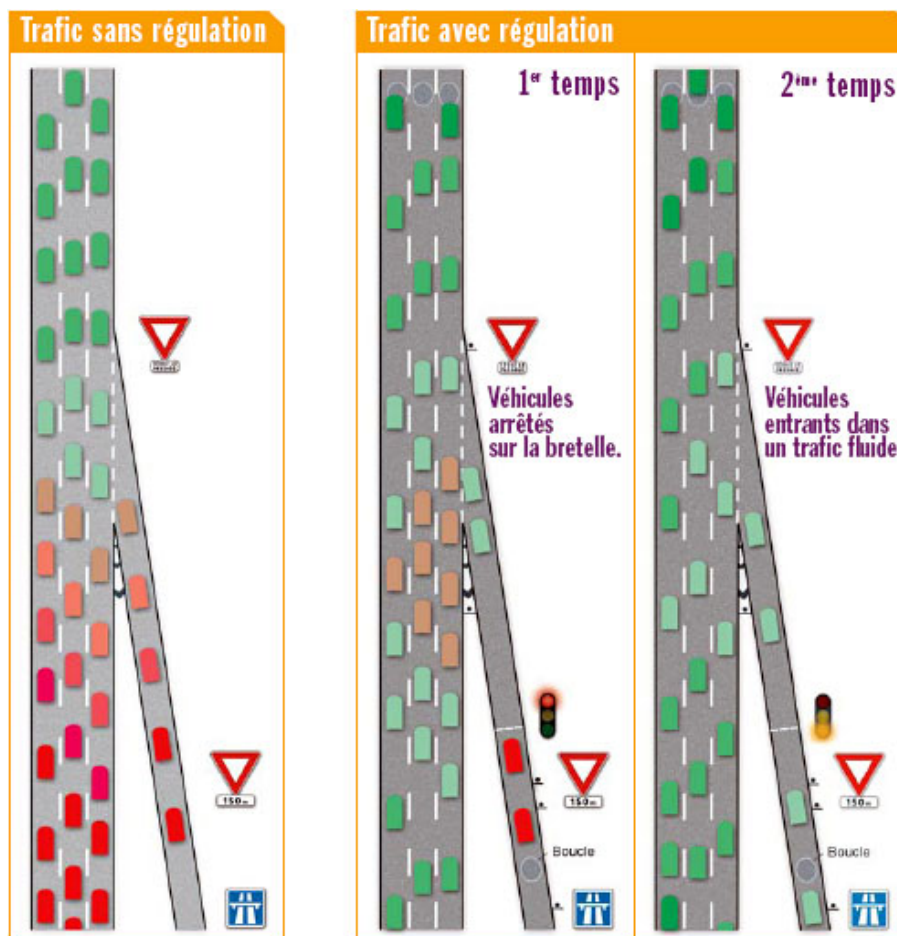


FIGURE 1.6 – Fonctionnement de la régulation d'accès sur autoroutes - Source : DIR Ile-de-France

Dans le cas d'une régulation sur autoroute, le principe de la régulation d'accès consiste à maximiser l'offre de l'infrastructure en maintenant le plus longtemps possible une situation fluide au droit de la zone de l'autoroute où la rampe d'accès s'insère sur l'autoroute. Divers études telles que [Cassidy and Ahn, 2005] et [Laval et al., 2007] indiquent que lorsque le trafic est congestionné au niveau d'une voie d'insertion, la capacité en ce point peut être réduite de 3 à 20% par rapport à la

situation fluide. Ce phénomène, appelé chute de capacité (« capacity drop » en anglais) s'expliquerait par la vitesse faible en congestion et à l'accélération progressive des véhicules.

C'est pourquoi, pour garantir la fluidité sur la section courante de l'autoroute, dès que la demande sur la bretelle d'entrée atteint un certain seuil, un feu situé sur cette bretelle est enclenché. Le positionnement de la ligne de feu garantit une vitesse suffisante des véhicules sur la bretelle pour qu'ils ne provoquent pas de ralentissements sur la section courante. La zone en amont du feu sert de stockage pour les véhicules. Si la file d'attente est trop importante sur la bretelle d'entrée et risque de remonter sur le réseau urbain, le feu situé sur la bretelle enclenche des durées de vert plus longues pour décharger la bretelle. Si le temps de vert est trop important, une congestion sur la section courante risque d'apparaître. L'enjeu est donc de maximiser le nombre de véhicules entrants sur l'autoroute tout en garantissant un état fluide sur la section courante et en évitant une remontée de congestion sur le réseau urbain.

L'utilisation des feux de signalisation pour la régulation d'accès peuvent être de deux sortes :

- permettant le passage de véhicules en peloton (plusieurs véhicules à la fois) avec un temps de feu vert adapté au seuil de demande maximal imposé.
- permettant le passage d'un véhicule à la fois, appelé passage goutte à goutte.

Il existe des algorithmes permettant le passage de véhicules en peloton. Le plus connu et le plus répandu est l'algorithme ALINEA¹ [Papageorgiou et al., 1991]. Son fonctionnement consiste à maintenir la densité sur la section aval du convergent au voisinage de sa capacité. Pour cela, l'algorithme comprend une loi de commande qui permet de définir le débit à appliquer sur le prochain intervalle de temps. Sa formulation est la suivante :

$$r(k) = r_m(k-1) + K_R [O_c - O_m(k-1)]$$

où

$r(k)$ Flux calculé qui sera appliqué sur la bretelle pour la régulation lors du prochain intervalle de temps.

$r_m(k-1)$ Débit mesuré de la rampe d'accès durant le cycle précédent

K_R Constante positive, paramètre de régulation

O_c Taux d'occupation critique de la station en aval de l'accès (en %)

$O_m(k-1)$ Taux d'occupation mesuré en section courante, à l'intervalle de temps précédent.

La valeur du débit d'entrée de la rampe d'accès doit être transformé en durée de feu vert :

$$g(k) = \frac{r(k)}{q_{sat}}$$

avec q_{sat} le débit de saturation (maximum) de la rampe en (véh/s)²

1. ALINEA : Asservissement Linéaire d'entrée sur Autoroute
 2. Extrait de [Boukhniifer and Haj Salem, 2010]

Cette stratégie a plusieurs fois été mise en oeuvre sur les autoroutes françaises. On peut citer récemment la mise en place de la régulation d'accès sur l'A25. Pour ce dernier, l'algorithme ALINEA est combiné à un autre algorithme nommé CSM et qui a été développé à l'Ecole Polytechnique.

Cet algorithme est aussi utilisé sur 17 accès du réseau autoroutier situé sur la partie Est du réseau de l'Ile de France. Ces derniers ont fait l'objet d'une évaluation [Boukhnifer and Haj Salem, 2010]. Il en ressort 3 points positifs :

- Une diminution du temps passé entre 3% et 15%, une augmentation de la vitesse moyenne de 12% à 20%
- Une amélioration de la sécurité
- Une amélioration en termes d'émissions de polluants et de consommation de carburant.

1.2.2 Interdiction de dépassement pour les poids-lourds

Les mesures d'interdiction de dépassement pour les poids-lourds (IDPL) visent à limiter l'impact de la présence de ces véhicules, plus lents, sur les conditions d'écoulement.

Une IDPL expérimentale est mise en place au niveau de l'A22. Son fonctionnement sera détaillé dans le chapitre 2. Le rapport d'évaluation de l'interdiction de dépassement sur l'A22 indique que cette mesure est globalement respectée. Elle a permis d'augmenter la vitesse des véhicules sur la voie rapide. Cette augmentation se perçoit dès le début de la journée jusqu'à la fin de la période de pointe du soir. Une augmentation de la vitesse est aussi observée sur la voie lente, notamment en heure de pointe.

Dans la littérature, sur les voies rapides, les poids-lourds (PL) sont modélisés comme étant des « bouchons mobiles », intitulés « moving bottleneck » en anglais.



FIGURE 1.7 – Photographie d'une section soumise à une mesure d'interdiction de dépasser pour les poids-lourds - Source : Charente Libre

Considérons le cas où le PL est sur la voie de droite sur une section d'autoroute à deux voies, si le différentiel de vitesses entre le poids-lourd considéré et les véhicules situés en amont est trop élevé, on peut observer une perturbation de l'écoulement. De même, si la demande en amont du PL est trop importante et que tous ces véhicules ne peuvent s'écouler à vitesse fluide sur une seule voie de circulation (au droit du camion), alors une file d'attente apparaît en amont du camion. [Leclercq et al., 2004]. Dans le cas où un PL plus lent que les véhicules situés en amont commencent à doubler un autre véhicule lent, le débit de dépassement au droit du véhicule lent est cette fois nulle, une file d'attente se forme en amont des deux véhicules. Ainsi, en interdisant aux poids-lourds de dépasser, on écarte cette configuration. Les PL pouvant potentiellement dépasser d'autres PL plus lents sont contraints de rester derrière ces derniers.

Cette interdiction a pour vocation d'augmenter la capacité globale de la section, de limiter les gênes occasionnées par les dépassements de poids-lourds et l'apparition de la congestion. L'article [Duret et al., 2012] montre, à travers la figure 1.8 (a)³ que l'interdiction de dépassement des poids-lourds, dans le cas de l'autoroute à trois voies étudiées, permettait d'augmenter le débit sur la voie lente par rapport au cas non régulé pour un débit total sur la section équivalent. La figure (b) a permis de montrer que la différence des vitesses entre la voie lente et la voie du milieu diminue grâce à l'IDPL.

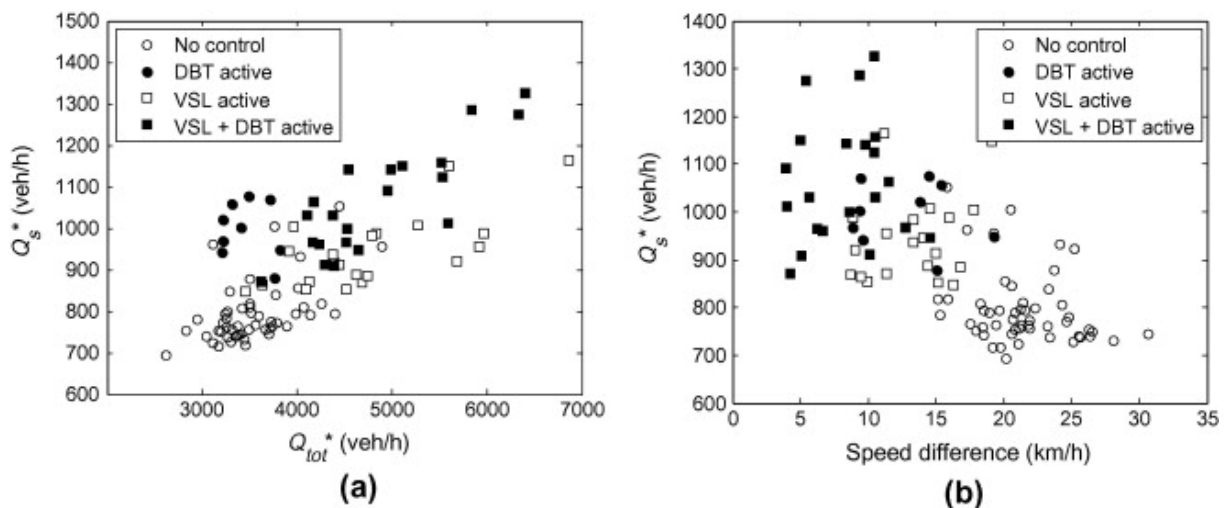


FIGURE 1.8 – (a) Débit maximal observé sur la voie de droite en fonction du débit maximal total ; (b) Débit maximal observé sur la voie de droite en fonction de la différence de vitesses entre la voie du milieu et la voie de droite - Source : [Duret et al., 2012]

1.2.3 Voies réversibles

Il s'agit de gérer de façon dynamique les voies. Cette régulation consiste à ouvrir, pendant certaines périodes de la journée, une ou plusieurs voies de circulation, en fonction de l'augmentation de la demande. Par exemple, il peut s'agir de l'ouverture de la bande d'arrêt d'urgence à la circulation ou d'utiliser une voie de circulation tantôt dans un sens tantôt dans l'autre selon la demande.

3. DBT : Driving ban for trucks, correspondant à l'IDPL - VSL : Variable Speed Limits

Le pont de Saint Nazaire est un exemple de cette stratégie de régulation. Ce dernier comprend trois voies de circulation, la voie centrale est réversible. De 6h30 à 12h30, la voie centrale autorise la circulation dans le sens Sud-Nord. De 12h30 à 20h30, le sens de circulation est inversé. Le reste du temps, la voie centrale est interdite à la circulation. Une évaluation a posteriori a été réalisée par le Certu au regard des temps de parcours et de la dispersion des temps de parcours. Il en ressort un temps de parcours sur le pont quasiment constant entre 5 et 6 min contre 20 min en heure de pointe avant la mise en place de la stratégie de régulation.[Certu, 2013].



FIGURE 1.9 – Photographie du pont de Saint Nazaire - Source : Ouest France

Cette mesure peut aussi être prise en complément d'une autre mesure de régulation du trafic. Dans le cas présenté ci-après, il ne s'agit pas de proposer une augmentation de l'offre mais une diminution de la demande. En effet, sur l'autoroute A50 à Toulon, un tunnel connaît de forts risques de saturation en heures de pointe. Ainsi, pour éviter d'avoir des véhicules à l'arrêt dans le tunnel, une régulation d'accès a été mise en place sur les bretelles d'entrée. Si cette dernière n'est pas efficace, une voie est fermée en entrée du tunnel afin de garder un trafic toujours fluide dans le tunnel.

1.2.4 Régulation des vitesses

Présentation

La régulation de vitesses porte sur la limitation variable de la vitesse maximale autorisée en utilisant des panneaux à messages variables (PMV). D'après la neuvième partie de l'IISR⁴, « Les vitesses maximales autorisées sur la section à réguler peuvent être réduites temporairement par paliers de 10km/h ou de 20 km/h. Le palier de dégressivité ne doit pas être supérieur à 20km/h sur deux panneaux successifs ou, dans le temps, sur un même panneau ». La régulation dynamique de vitesses peut être activée :

- Dans le cas d'une action préventive, la régulation de vitesse vise à maintenir un trafic fluide à une vitesse supérieure à la vitesse de basculement en congestion

4. Instruction Interministérielle sur la Signalisation Routière

- Dans le cas d'une action curative, la régulation de vitesse a pour but de faire ralentir les automobilistes à l'approche d'un incident. Il s'agit ainsi de garantir des conditions de circulation apaisées et sécurisées.

Impacts

Les principaux impacts de la régulation de vitesse sur les autoroutes sont nombreux :

- Réduction de la vitesse moyenne [Zackor and Papageorgiou, 1991] :
- Homogénéisation des vitesses i.e. réduction des différences de vitesse parmi les véhicules et des différences de vitesses entre les voies. [Zackor and Papageorgiou, 1991]
- Amélioration la sécurité [Allaby et al., 2007, Abdel-Aty et al., 2006]
- Réduction du stress du conducteur [Allaby et al., 2007]

Les conséquences de l'utilisation de la régulation dynamique des vitesses peuvent s'évaluer au regard du diagramme fondamental. En effet, l'article [Papageorgiou et al., 2008] apporte une meilleure compréhension de l'impact de la régulation dynamique des vitesses sur le diagramme fondamental. A partir de données d'une autoroute européenne, les auteurs ont pu mettre en évidence les changements causés par la régulation de vitesses sur le diagramme fondamental. Les auteurs concluent par le fait qu'une limitation de vitesse pour une situation en dessous de la concentration critique fera diminuer la pente du débit en fonction de la concentration. Plus la baisse de vitesses est importante, plus la baisse de la pente sera remarquable. De plus, la superposition des diagrammes fondamentaux avec et sans régulation de vitesses permet de montrer que la concentration critique augmente pour le cas régulé. En ce qui concerne l'augmentation de la capacité, les auteurs ne se prononcent pas car les résultats ne permettent pas de l'affirmer de façon indéniable. Enfin, pour les auteurs, une limitation de vitesses à 90km/h semble provoquer le plus de changements sur le diagramme fondamental et proposer de meilleures conditions pour la circulation des véhicules. Une limitation à 100 km/h n'apporte quasiment rien. Une limitation à 70 km/h n'a d'intérêt à être utilisé que pour de fortes concentrations dans un souci de sécurité routière.

D'autres recherches ont été établies en termes de conséquences sur les niveaux d'utilisation des voies. C'est le cas de [Knoop et al., 2010]. A partir des données réelles d'une autoroute aux Pays-Bas, les auteurs ont montré que la régulation dynamique des vitesses avait une influence sur le LFD (Lane Flow Distribution) à proximité d'un convergent et qu'elle avait une influence sur le débit de la bretelle d'entrée. Il a été observé à travers cet article, que la régulation des vitesses permettait de diminuer le différentiel de vitesses entre le véhicule provenant de l'insertion, et les véhicules qui le précèdent ou le suivent sur la section courante. De ce fait, les véhicules provenant de la bretelle d'accès connaîtront une moindre perturbation sur le trafic de la section courante sauf si les distances inter-véhiculaires sont insuffisantes et provoquent des difficultés d'insertion.

Dans ce même objectif d'étudier l'impact de la régulation de vitesses sur le LFD, l'article [Duret et al., 2012] explicite les bénéfices de la régulation dynamique des vitesses. Le débit a été mesuré sur une autoroute comprenant 3 voies de circulation. Les auteurs ont pu observer que le LFD suivait un schéma récurrent. En effet, quand le débit total est faible, la majorité des véhicules

circulent sur la voie lente, la voie rapide se charge lorsque le trafic total augmente. Lorsque la demande se rapproche de la capacité, la voie lente reçoit moins de 20% du débit total, les auteurs parlent alors d'une sous-utilisation de la voie lente. Les auteurs montrent dans un second temps que la régulation dynamique des vitesses homogénéise l'utilisation des voies de circulation, réduit notamment la sous-utilisation de la voie lente en rendant moins attractive l'utilisation de la voie rapide. Comme en témoigne la figure 1.8 (b), page 23, la différence de vitesses entre la voie centrale et la voie lente tend à diminuer, la figure (a) montre quant à elle une augmentation de la capacité. L'étude [Duret et al., 2012] profite pour faire une combinaison de régulation du trafic. Dans le cas étudié, il s'agit de l'IDPL et de la régulation dynamique des vitesses. Ces deux régulations combinées permettent une meilleure utilisation de la voie lente.

Exemples d'algorithmes

Il existe plusieurs algorithmes de régulation dynamique des vitesses, ces derniers ne sont diffusés qu'à la discrétion des exploitants. Cependant, on peut citer un algorithme destiné à la régulation curative. Il s'agit de l'algorithme SPECIALIST⁵ [Hegyí et al., 2008] proposé par l'université de Delft. Il n'a pas pour vocation de protéger une zone en cas de bouchon mais de permettre le retour à une situation fluide le plus rapidement possible. Cet algorithme repose sur la théorie des ondes cinématiques. Il est appliqué en amont de l'apparition de la congestion. En limitant la vitesse en amont de la zone congestionnée, le volume de trafic qui alimente la zone congestionnée est réduit. Cet algorithme se compose de 4 étapes, destinées à recueillir les données de trafic en temps réel, d'interpréter ces données et de fixer la limitation de vitesses en conséquences.

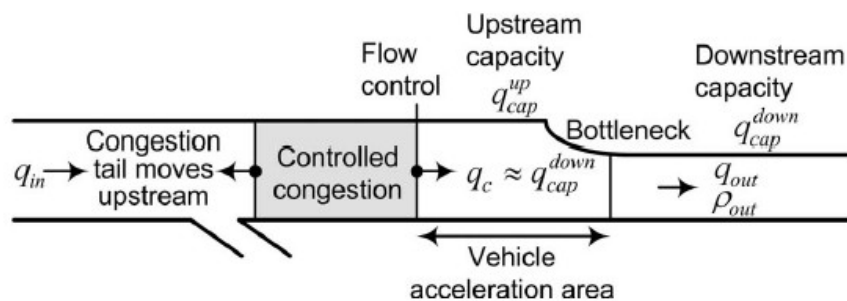


FIGURE 1.10 – Schéma explicatif du MTFC - Source : [Carlson et al., 2011]

Une autre approche de régulation dynamique des vitesses est le « mainstream traffic flow control » (MTFC). Il s'agit d'une action préventive d'apparition d'un bouchon. Son objectif est de réguler le nombre de véhicules entrants dans la zone. Comme indiqué sur la figure 1.10, tant que le débit en amont est inférieur à la capacité en aval, aucun bouchon ne se forme et donc MTFC n'est pas activée. En revanche, si le débit en amont q_{in} est supérieur à la capacité aval q_{cap}^{down} alors MTFC est activé afin de ne laisser passer qu'un débit q_c correspondant à la capacité en aval. Cette mesure a été améliorée en implémentant un système de contrôle permanent sur l'autoroute qui permet une adaptation permanente de la régulation [Carlson et al., 2011].

5. SPEEd ControllIng ALgorithm using Shockwave Theory

D'autres algorithmes sont fondés sur les mesures directes de la demande sur le tronçon à réguler. Par exemple dans [Duret and Plantier, 2014], la régulation de vitesses appliquée sur l'A31 entre Richemont et Thionville comprend un algorithme préventif et un curatif pour la protection d'un évènement, comme par exemple un accident. L'algorithme préventif repose sur la détection du débit de demande en amont du tronçon à réguler. L'activation de la régulation et la baisse de la vitesse réglementaire de 20 km/h s'effectue lorsque la demande est supérieure au débit de croisement et inférieure à 90% de la capacité du tronçon, et que la vitesse est supérieure à la vitesse critique. Le système est désactivé lorsque la demande est inférieure au débit de croisement et que la vitesse est supérieure à la vitesse critique. Cet algorithme, mis en oeuvre sur l'axe A31 semble être pertinent d'après [Duret and Plantier, 2014], les activations ont lieu durant les périodes de pointe du matin et du soir, et il n'y a pas de déclenchement intempestif.

Dans un souci de lisibilité et de compréhension de la part des usagers, la régulation dynamique des vitesses doit s'enclencher quand cela est réellement nécessaire. C'est pourquoi, des études ont été menées a priori en simulation afin de tester des algorithmes de régulation de vitesses. Ils permettent aussi d'estimer si un site peut potentiellement être soumis à une régulation quelque quelle soit. C'est pourquoi, la troisième partie de l'état de l'art détaillera les approches d'évaluation a priori.

1.3 Evaluation *a priori* d'une régulation du trafic

Afin de connaître l'opportunité d'une mesure de régulation dynamique du trafic, différentes approches existent et sont présentées dans la littérature.

L'opportunité d'une mesure de régulation du trafic peut s'évaluer en termes de critères. Il s'agit de construire un diagnostic autour du site étudié et de vérifier que le site répond à certains critères de sélection.

L'évaluation peut aussi s'effectuer en utilisant des modèles que ce soit par des modèles analytiques ou bien grâce à des outils de simulation dynamique. Cette dernière approche fera l'objet de la suite du chapitre. Classiquement, les modèles du flux de trafic sont de 3 sortes : microscopique, macroscopique et mésoscopique. Les évaluations des régulations du trafic s'effectuent elles aussi grâce à ces trois modèles.

1.3.1 Evaluation à partir d'un modèle microscopique

Les modèles microscopiques décrivent le comportement des véhicules de façon individuelle. Il existe de nombreux simulateurs microscopiques. Le plus souvent, ils utilisent les modèles de véhicule-suiveur couplés avec des modèles de changements de voies. Ainsi, le comportement de chaque véhicule est décrit en fonction du comportement du véhicule qui le précède et de l'ensemble des véhicules qui l'entourent pour connaître sa capacité à dépasser.

Il existe de nombreux exemples de simulations dynamiques par des modèles microscopiques pour évaluer des stratégies de régulation dynamique des vitesses. Le plus souvent, les modèles microscopiques sont couplés avec des simulateurs d'estimation des accidents. Par exemple, dans l'article

[Abdel-Aty et al., 2006], les auteurs ont utilisé le simulateur PARAMICS couplé avec le modèle d'estimation des accidents développé par [Abdel-Aty et al., 2005]. La simulation est effectuée d'après les données boucles d'une artère urbaine d'Orlando. La régulation de vitesses est évaluée au regard d'un indicateur évaluant le comportement accidentogène des automobilistes et des temps de parcours. Après avoir effectué des simulations sur différentes stratégies de régulation de vitesses, les auteurs ont pu définir des recommandations :

- Changer la vitesse abruptement de 15 mph
- Déclencher à 2 miles en amont de la zone à réguler est suffisant.

[Lee et al., 2006] ont simulé des stratégies de régulation de vitesses sur une autoroute de Toronto avec le simulateur PARAMICS couplé avec un modèle estimant les risques d'accidents défini dans ce même article. Il en ressort, que pour des valeurs de limitations de vitesses fixes (20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 km/h) au niveau d'une bretelle d'entrée provoquant de la congestion, la baisse de vitesses à 60km/h est la meilleure solution en termes de réduction des accidents et en temps de parcours moyen. Les auteurs expliquent alors que les 60km/h correspondent à la vitesse des véhicules sur la bretelle d'entrée. Ils concluent que la régulation de vitesses permet de réduire de 5 à 17% les risques d'accidents à condition que la vitesse ne soit pas trop faible. En effet, l'expérience a montré qu'une baisse de vitesses trop importante peut engendrer une violation de la limitation de vitesse et augmenter les risques d'accidents.

Une étude similaire, [Allaby et al., 2007], utilisant PARAMICS couplé à un modèle de risques d'accidents sur les données d'une artère urbaine à Toronto a permis de montrer que les risques d'accidents étaient effectivement réduits grâce à la régulation de vitesse. Mais ces résultats ne sont significatifs que pour des périodes de pointe ou à fort trafic. En revanche, la régulation de vitesse provoque incontestablement une augmentation du temps de parcours en heures creuses. Les auteurs indiquent alors, que d'après la simulation, il n'est pas possible de faire diminuer les temps de parcours et les risques d'accidents simultanément grâce à la baisse de vitesse.

Ainsi, les simulateurs microscopiques sont souvent couplés avec des modèles de risques d'accidents. Ils peuvent être utilisés afin de caler les paramètres de la stratégie de régulation ou évaluer de façon générale l'impact d'une régulation de vitesse.

1.3.2 Evaluation à partir d'un modèle macroscopique

Les modèles macroscopiques, notamment le modèle LWR, sont basés sur l'analogie entre le flux de trafic et les flux hydrauliques. Ils utilisent des variables agrégées, tels que la concentration (ou densité) de trafic, la vitesse moyenne et le débit du trafic. La concentration correspond au nombre de véhicules par unité de distance et par voie (exprimée en véh/km/voie) et le débit au nombre de véhicules passant en un point par unité de temps (généralement en véh/h). Dans le cas de ces modèles, les changements de voies ne sont pas considérés.

Dans la littérature, contrairement aux modèles microscopiques, les stratégies de régulation d'accès ne sont pas évaluées en termes de risques d'accidents mais selon des variables de trafic.

[Chen et al., 2014] propose une démarche analytique d'évaluation de stratégies de régulations dynamique du trafic selon la composition du trafic : un trafic uniforme et une demande de trafic non régulière. Pour l'évaluation, les auteurs utilisent les variables agrégées du débit et de la densité à travers l'utilisation du diagramme fondamental et le modèle des vagues cinématiques.

Outre l'évaluation, les modèles macroscopiques servent à tester des modèles de régulation du trafic. Par exemple, dans l'étude [Hegyi et al., 2005b], l'objectif est de proposer une approche pour coordonner de façon optimale les stratégies de régulations de vitesses dans le but de supprimer les ondes de choc. Pour cela, les auteurs ont défini un modèle prévisionnel de contrôle couplé avec le simulateur macroscopique METANET sur un lien de 12 km, où 6 segments sont régulés sur 1 km. Ils en concluent que la meilleure solution est de proposer une diminution de la vitesse de façon continue sur chaque segment pour optimiser aussi bien la densité que le temps total passé. Cette même démarche peut être utilisée pour optimiser deux stratégies de régulation de trafic, comme par exemple optimiser l'utilisation du contrôle d'accès avec la régulation dynamique des vitesses [Hegyi et al., 2005a]. Il ressort de cette étude que la limitation de vitesse est efficace lorsque le contrôle d'accès est incapable de garder l'insertion sur l'autoroute non congestionnée. C'est pourquoi, le choix entre l'utilisation de la régulation des vitesses ou du contrôle d'accès devrait s'effectuer selon la demande en entrée sur la bretelle, et il devrait y avoir un basculement entre les deux stratégies selon la sévérité de la congestion.

1.3.3 Evaluation à partir d'un modèle mésoscopique

Le modèle mésoscopique est un intermédiaire entre le modèle macroscopique et le modèle microscopique. En effet, les véhicules ne sont pas considérés individuellement mais par « paquets ». Cependant, comme pour le modèle macroscopique, les variables utilisées pour caractériser le niveau de service sont des variables agrégées, telles que la densité de véhicules et le débit. Chaque « paquet » de véhicules est considéré comme une seule entité qui connaît les mêmes conditions de trafic. Les modèles mésoscopiques, comparés aux modèles microscopiques, ont l'avantage de proposer moins de paramètres à caler, le temps de simulation par ordinateur est réduit. De plus, ne nécessite pas autant de réplifications que les modèles microscopiques car plus déterministes. [Duret, 2014].

Le modèle mésoscopique peut lui aussi être utilisé pour évaluer des stratégies de régulation. Par exemple, [Di Gangi et al., 2015] proposent de tester une stratégie de contrôle d'accès avec le modèle mésoscopique. Le modèle sert, dans un premier temps à optimiser le temps de vert des feux de signalisation et dans un second temps à optimiser la coordination des différents feux entre eux. L'article propose de tester l'optimisation de la stratégie de régulation selon deux configurations du réseau : un de 3 noeuds et un de 9 noeuds. Les résultats ont ensuite été comparés à un autre outil de simulation (TRANSYT-CTM) pour évaluer les performances de l'outil mésoscopique. Il en ressort que les longueurs des files d'attente ne sont pas similaires entre les deux outils de simulation. C'est pourquoi, les auteurs proposent des poursuites de recherche afin d'améliorer leur outil mésoscopique. Ainsi cet article met en évidence que l'outil mésoscopique est lui aussi un outil d'optimisation de stratégies de régulation.

Dans notre cas d'étude, il s'agira d'évaluer les performances d'une régulation dynamique des vitesses à travers l'outil mésoscopique créé par Aurélien DURET, et en cours de développement par Etienne HANS. Cet outil a une vocation à la fois de recherche, comme présenté dans l'article ??, et d'usage opérationnel. Il permet de réaliser des simulations du trafic routier à l'aide d'un modèle mésoscopique basé sur le modèle LWR.

Afin d'utiliser la plateforme, il nous faut connaître plus précisément les états de trafic sur l'axe étudié, caractériser la congestion. Ce diagnostic, permettra alors de modéliser le réseau, d'appréhender le calage du modèle et d'élaborer le scénario de régulation des vitesses.

Chapitre 2

Diagnostic

2.1 Généralités

2.1.1 Périmètre de l'étude

Le présent diagnostic a pour vocation de présenter l'état du trafic sur l'A22 dans le sens Nord-Sud. Comme présenté sur la figure 2.1, l'autoroute A22 est située entre la frontière belge et l'agglomération lilloise. Elle est dans la prolongation de l'axe belge reliant la frontière française jusqu'à la ville de Gand. L'étude a été focalisée sur la section de l'A22 entre la frontière et l'accès à la rocade nord ouest de Lille dans le sens Gand-Lille. Il s'agit d'un linéaire de deux voies de 10 km de long comprenant 4 bretelles d'entrée et une de sortie.

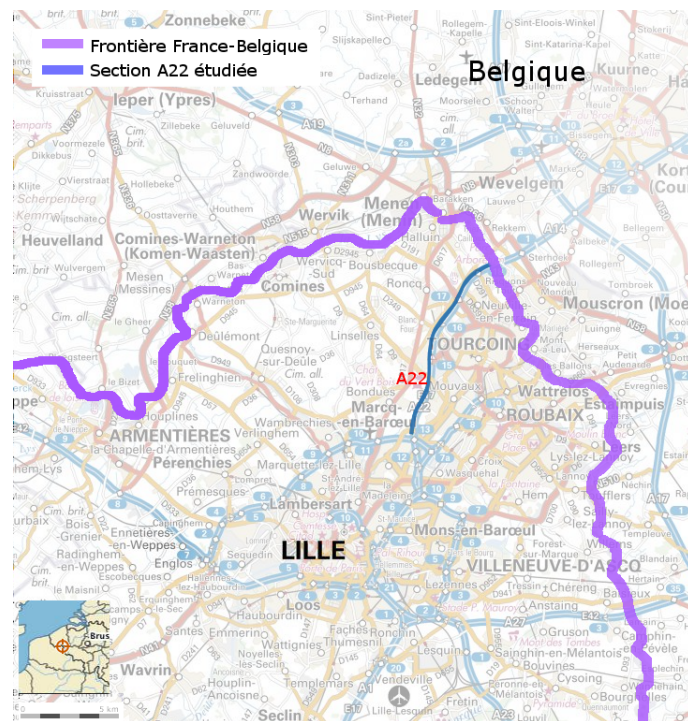


FIGURE 2.1 – Carte de la section de l'A22 étudiée - Source : geoportail.fr

2.1.2 Contexte

Actuellement, la section étudiée fait l'objet d'une expérimentation d'interdiction de dépassement des poids lourds (IDPL). Sont concernés les véhicules automobiles, les véhicules articulés ainsi que les trains doubles ou ensemble de véhicules affectés au transport de marchandises dont le poids total autorisé en charge (PTAC) ou le poids total roulant autorisé (PTRA) est supérieur à 3,5 tonnes. Cette mesure a pour objectif d'améliorer le niveau de service et de confort du réseau et de concourir à une meilleure sécurité routière. Théoriquement, comme indiqué par la figure 2.2 et d'après le rapport d'étude de l'IDPL sur l'A22, elle est activée manuellement toute la journée sauf de 7h15 à 9h30 du lundi au vendredi, et de 22h le vendredi soir jusqu'à 15h le dimanche. Elle est de nouveau désactivée entre 22h et 23h59 le dimanche soir.

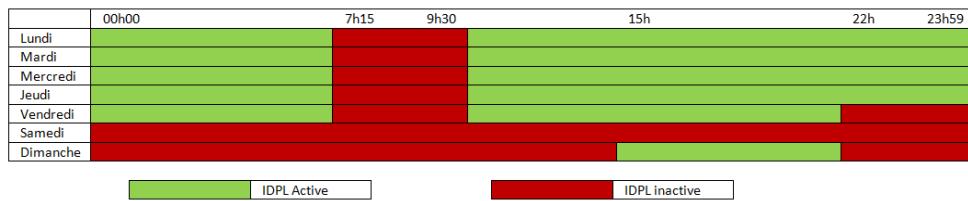


FIGURE 2.2 – Tableau récapitulatif de l'activation/désactivation théorique de l'IDPL - Source : Rapport d'étude de l'IDPL sur l'A22, Cerema

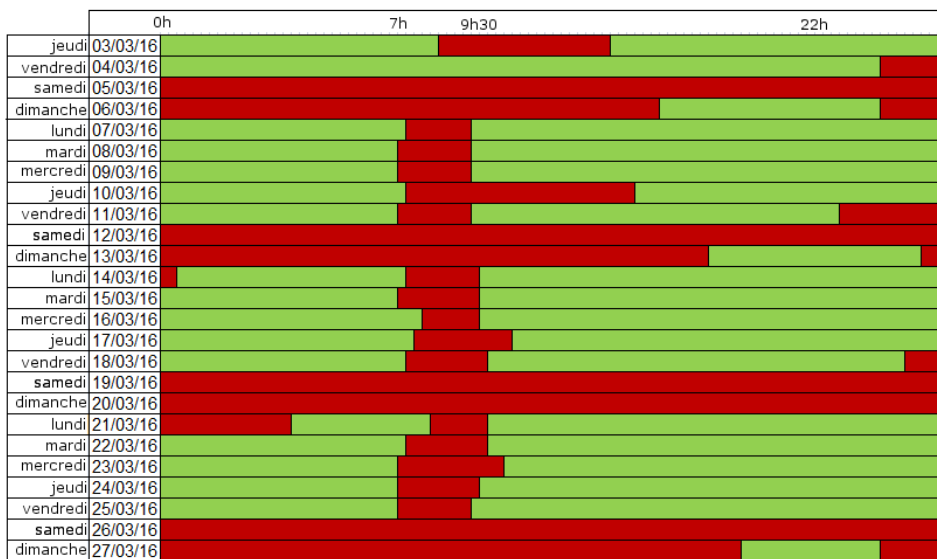


FIGURE 2.3 – Tableau récapitulatif de l'activation/désactivation réelle de l'IDPL - Source : Historique des données d'affichage des panneaux à messages variables

Cependant, la mesure de l'IDPL est activée et désactivée manuellement lorsque les agents du centre d'ingénierie et gestion du trafic (CIGT) le peuvent. En filtrant les messages affichés sur les panneaux à messages variables, on a pu extraire les heures d'activation et de désactivation de l'IDPL, schématisées dans le tableau de la figure 2.3. On s'aperçoit qu'en pratique, l'activation et la désactivation de l'IDPL ne correspond pas exactement aux durées prévues dans la théorie mais s'en

rappoquent fortement.

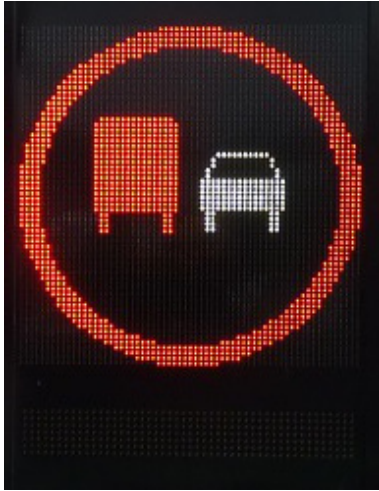


FIGURE 2.4 – Photographie d'un PMV pour l'IDPL - Source : Cerema

D'un point de vue pratique, l'activation de l'IDPL se fait grâce à l'utilisation de PMV, comme représenté par la figure 2.4, situés sur les bas-côtés de l'autoroute.

Parrallèlement à ce projet, la DIRN souhaite mettre en place deux nouvelles stratégies de régulation de trafic, à savoir une régulation d'accès sur une des bretelles et la régulation dynamique de vitesses. Pour cette dernière et dans un souci d'économies, les PMV installés pour l'IDPL seront utilisés pour afficher la vitesse. Ce fonctionnement sous-entend que l'IDPL et la régulation dynamique des vitesses ne pourront fonctionner simultanément.

2.1.3 Données disponibles

Les données fournies par le CIGT proviennent de boucles électromagnétiques présentes sur la chaussée à divers endroits de la section étudiée, on parle alors de stations pour indiquer l'emplacement des boucles. Le linéaire de voies se décompose en arcs, leur longueur est variable et chacun comprend une station de comptage.

L'étude a été menée entre le 29 février 2016 et le 27 mars 2016, afin de considérer 4 semaines complètes consécutives de données, sur une période ne comprenant pas de périodes scolaires ni de jours fériés. Sur cette période, seules 6 stations situées sur la section courante ont permis de remonter des données au système ALLEGRO, représentées sur la figure 2.5. Les données étaient en effet disponibles pour tous les jours considérés et il manquait peu de données dans une journée. Le réseau ne possède aucune station sur les bretelles. La station de l'arc représentée en noire n'aura été considérée que pour l'élaboration des courbes de niveau d'utilisation des voies (page 48) car située loin des conflits liés aux mouvements de véhicules à l'approche des entrées et des sorties.

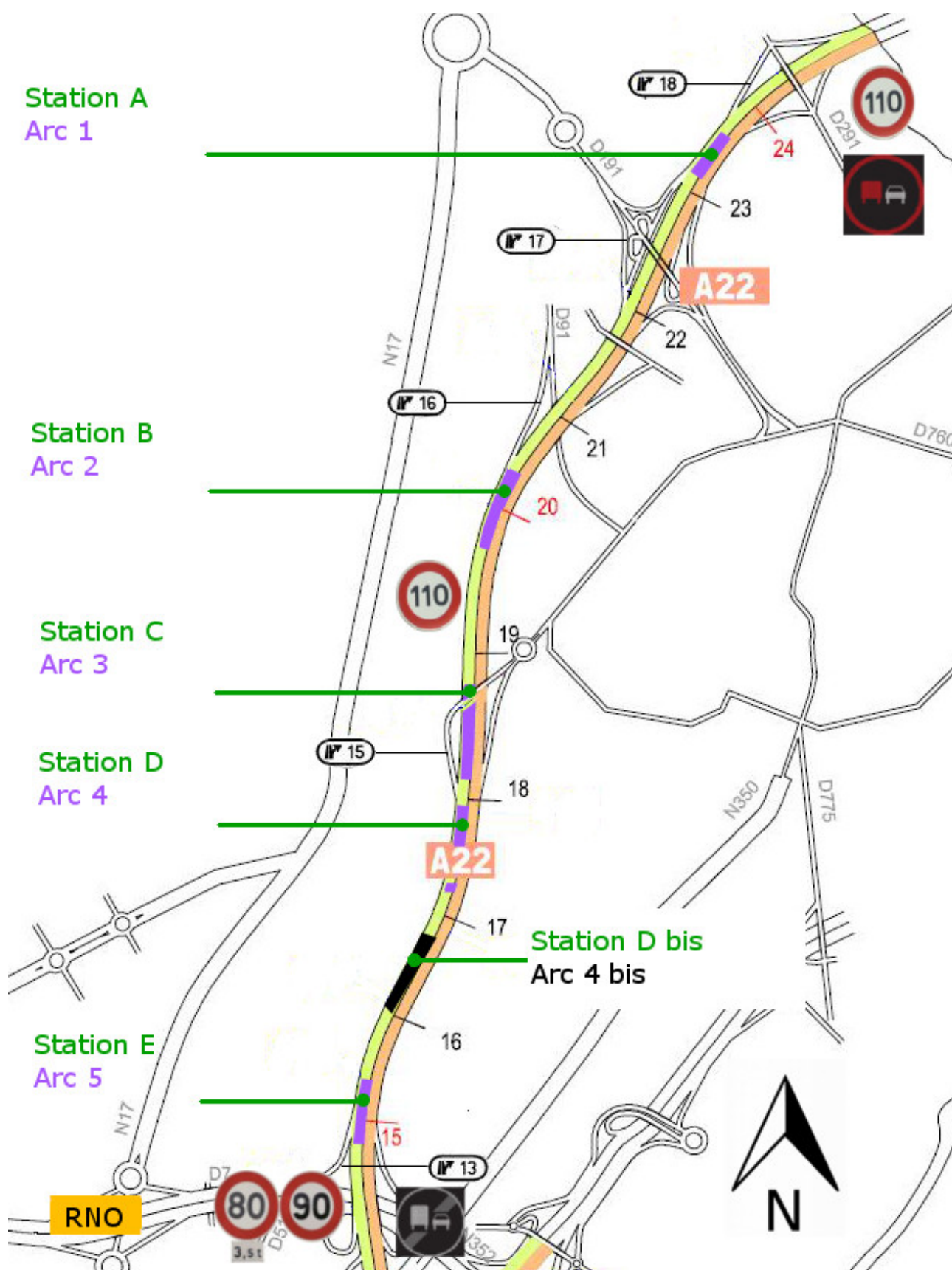


FIGURE 2.5 – Plan des arcs et des stations considérées pour l'étude - Source : Plan des équipements de la DIR Nord

NB : RNO : Rocade Nord Ouest

Les données utilisées sont diverses. En effet, certaines correspondent à des données par voie, d'autres par sens, certaines permettent de faire remonter la vitesse, le débit et le taux d'occupation, d'autres le nombre de véhicules classifiés par longueur. Les données peuvent être sur des périodes de 1 min, 6 min ou 1h. Le tableau 2.1 récapitule l'ensemble des données disponibles. Concernant les données minutes, dans le cas des comptages par voies, le système effectue un lissage des données de 1 min sur 3 min pour obtenir des données 1 min par voie. Ainsi, les données minutes récupérées sont déjà des données lissées et il n'est pas possible de récupérer des données réelles sur 1 min. Pour obtenir par sens, le système effectue la somme sur chaque voie. En revanche, les données sur 6 min ne sont pas reconstituées par le système mais sont directement issues des stations de comptage.

Les stations ne proposaient pas toujours le même type de données. Il manquait parfois des données 6 min pour les comptages par voie et par sens. Pour les stations A, B et C, les données minutes étaient quant à elles disponibles pour toutes les stations considérées. Dans une volonté de garder la dynamique des évolutions du nombre de véhicules, tout en limitant le bruit, nous avons décidé de travailler avec des données 6 min. C'est pourquoi, une reconstitution des données 6 min à partir des données minutes, a été nécessaire. Les formules utilisées pour cette reconstitution des données sont disponibles en annexe A, page 77. Afin de s'assurer que la reconstitution sur 6 min restait cohérente avec les données du système, nous avons tracé pour la station D les données 6 min reconstituées et des données 6 min du système ALLEGRO en fonction du temps pour certains jours. Les graphiques présentés en annexe B correspondent aux deux jours de référence que nous expliciterons ultérieurement. Les courbes des données reconstituées et des données ALLEGRO sont tout à fait similaires, que ce soit pour le débit ou la vitesse. Aux vues des graphiques en annexes, cette reconstitution permet une bonne approximation des données du système.

Nom des données	Type de données	Période	Comptage par
Arc	Débit, Taux d'occupation, Vitesse	1 ou 6 min	sens
Arc classifié par longueur	Nombre de véhicules selon leur longueur, de 0 à 6m, de 6 à 7m, de 7 à 9 m et de plus de 9 m	60 min	sens
Arc voies	Débit, Taux d'occupation, Vitesse	1 min	voie
Voies classifiées par longueur	Nombre de véhicules selon leur longueur, de 0 à 6m, de 6 à 7m, de 7 à 9 m et plus de 9 m	60 min	voie

TABLE 2.1 – Tableau récapitulatif des types de données

Ainsi, ces approximations devront être prises en compte pour les conclusions des analyses données dans la suite du diagnostic. Ce dernier se compose en premier lieu d'une estimation globale du trafic de véhicules sur les jours de semaine et les jours de week-end. En parallèle, l'analyse permettra de faire ressortir 2 jours de référence pour lesquelles une analyse quantitative sera effectuée.

2.2 Analyse des niveaux de trafic journalier

La demande a été caractérisée grâce aux débits horaires, classifiées par longueur de véhicules, fournis par le système ALLEGRO pour chaque arc. Pour cela, seuls les jours où les données étaient complètes et consécutives sur 24h ont été sélectionnés, les tableaux récapitulatifs sont disponibles à l'annexe C, page 82.

Ne possédant pas de données sur les échangeurs 16 et 17 ni de données entre les stations A et B, et au regard de la différence entre le nombre de véhicules en amont et en aval, la sortie et l'entrée de l'échangeur 17 ainsi que la bretelle d'entrée de l'échangeur 16 situées entre ces deux stations, seront considérées comme une entrée.

Dans toute la suite du document, les véhicules légers seront considérés comme étant les véhicules de moins de 6m et les poids-lourds (PL) comme ceux de plus de 6m. Cette hypothèse ne correspond pas à la définition de poids-lourds selon le code de la route. C'est pourquoi, un biais est introduit dans l'estimation de la proportion de poids-lourds.

Sur les jours ouvrés disponibles, on estime que les poids-lourds représentent 17% du trafic et le trafic total, en bout de section, au niveau du PR15, est estimé à 49 400 véhicules en moyenne.

2.2.1 Estimation pour les véhicules légers

Dans le cas des jours de semaine, (cf. Tableau C.1, page 83) le nombre de véhicules de moins de 6 m provenant de Belgique et au niveau de l'arc A est en moyenne de 16 000 véhicules. Les échangeurs 16 et 17 permettent l'entrée d'en moyenne 13 600 véhicules. Un afflux de 13 100 véhicules est constaté au niveau de l'échangeur 15. Ces résultats sont à nuancer au regard des erreurs de mesures observées entre les arcs B et C situés sur une section ne comportant ni entrée ni sortie. En moyenne, on perd 5% de véhicules entre ces deux arcs, soit 1400 véhicules en moyenne.

Le nombre de véhicules le samedi est estimé à 40 500, et le dimanche il est en moyenne de 31 000 véhicules. L'échantillon de jours, 1 pour le samedi et 2 pour le dimanche, n'est pas suffisant pour faire une généralité sur le nombre de véhicules présents le samedi et le dimanche. Cependant, on peut s'apercevoir que la quantité de véhicules particuliers circulant le samedi est similaire au trafic des véhicules particuliers de la semaine. (cf. Tableau C.2, 84).

2.2.2 Estimation pour les poids-lourds

Pour les véhicules de plus de 6m (cf. Tableau C.3, page 85), pour les jours de semaine, on comptabilise 8 500 véhicules arrivant sur la station E, 10% proviennent de l'échangeur 15, 15% proviennent des échangeurs 17 et 16, le reste de Belgique et de l'échangeur 18 situé juste en aval de la frontière. La répartition du trafic poids-lourd n'est pas uniforme sur les jours de semaine, on note une augmentation du nombre de poids lourds en début de semaine. Le week-end, (cf. TableauAnnexeD, 86) le trafic poids-lourd est estimé à 2 700 le samedi retenu et en moyenne à 1 200 le dimanche. Cette différence de trafic poids-lourd entre un jour ouvré et le week-end est lié à la restriction de circulation des poids lourds le week-end.

Le tableau 2.2 récapitule les ordres de grandeur des niveaux de trafic journalier.

	Jours ouvrés			Samedi			Dimanche		
	Trafic total	Trafic VL	Trafic PL	Trafic total	Trafic VL	Trafic PL	Trafic total	Trafic VL	Trafic PL
En provenance de Belgique et de l'échangeur 18 (station A)	22 100	15 800	6 300	19 100	17 000	2 100	14 600	13 600	1 000
Des échangeurs 16 et 17 (station B-station A)	15 000	13 700	1 300	13 900	13 600	300	11 000	10 900	100
De l'échangeur 15 (station D-station C)	14 000	13 100	900	11 100	10 900	200	7 700	7 600	100
Trafic total (station E)	51 100	42 600	8 500	44 100	41 500	2 600	33 300	32 100	1 200

TABLE 2.2 – Tableau récapitulatif du trafic journalier

2.3 Caractérisation des conditions de circulation par semaine étudiée

Sur les 4 semaines étudiées et en considérant les données débit et vitesse agrégées sur 6 min, nous avons tracé le nombre de véhicules observés sur 6 min et la vitesse en fonction du temps pour chaque jour et pour chaque arc. Cette étude a deux objectifs :

- Mettre en évidence et caractériser la congestion
- Caractériser les données disponibles
- Ressortir 2 jours de référence pour l'étude quantitative

2.3.1 Analyse qualitative du trafic

Afin de garder la dynamique des phénomènes mais réduire le bruit, nous avons décidé de travailler avec les données 6 min reconstituées. Ces données ont permis de tracer pour chaque jour étudié et pour les 5 stations indiquées en violet sur la figure 2.5, page 34, le débit et la vitesse en fonction du temps.

D'un point de vue qualitatif, on observe habituellement une baisse de la vitesse et une augmentation du débit durant l'heure de pointe du matin. De plus, la demande est maximale le matin. Si l'observation d'une congestion en période de pointe du matin est récurrente, ce n'est pas le cas pour le soir, on ne l'observe que 5 jours sur les 20 retenus.

On distingue aisément pour chaque jour de la semaine, les trois augmentations de demande de la journée, le matin, le midi et le soir. Les demandes du midi et du soir sont moins importantes que le matin et plus étalées dans le temps.

La congestion semble apparaître au niveau de la station D . Il s'agit de la station située en aval de la bretelle d'entrée de l'échangeur 15. La congestion semble remonter en amont jusqu'à la station B. Notons que cette station étant situé au niveau de l'entrée de l'échangeur 16, la congestion observée au niveau de cet arc peut aussi être causée par l'entrée de véhicules à ce niveau. Dans la majorité des jours étudiés, aucune congestion n'est observée au niveau de l'arc 1 sauf pour 5 jours sur les 20 considérés.

On observe de plus, une baisse de la vitesse au niveau de l'arc 5 sur des durées de temps plus faibles que la congestion causée au niveau de l'échangeur 15. C'est pourquoi, ces ralentissements ne semblent pas être la cause de la congestion observée au niveau de l'échangeur 15. On peut supposer qu'ils sont dus à des changements de voies liés à la sortie vers la rocade nord et/ou à la réduction de vitesse imposée en aval et à la forte demande durant cette période.

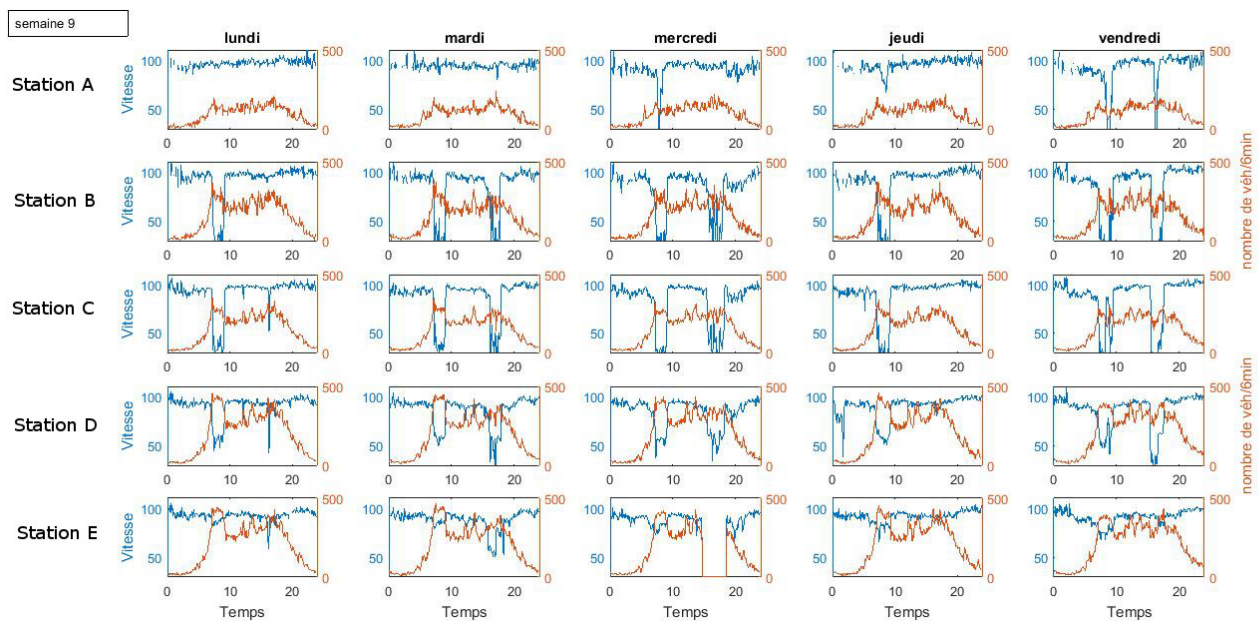


FIGURE 2.6 – Diagrammes débit/vitesse en fonction du temps, semaine 9

Une congestion du soir n'est observable que le mardi, mercredi et le vendredi de la semaine 9, ainsi que le mercredi et vendredi de la semaine 12, soit dans 25% des cas, c'est pourquoi, elle n'est pas considérée comme récurrente, De même, la remontée de congestion jusqu'à l'arc 1 n'est visible que dans 25% des cas, elle n'est observable que pour le mercredi, jeudi et vendredi de la semaine 9, lundi de la semaine 10 et le vendredi de la semaine 12.

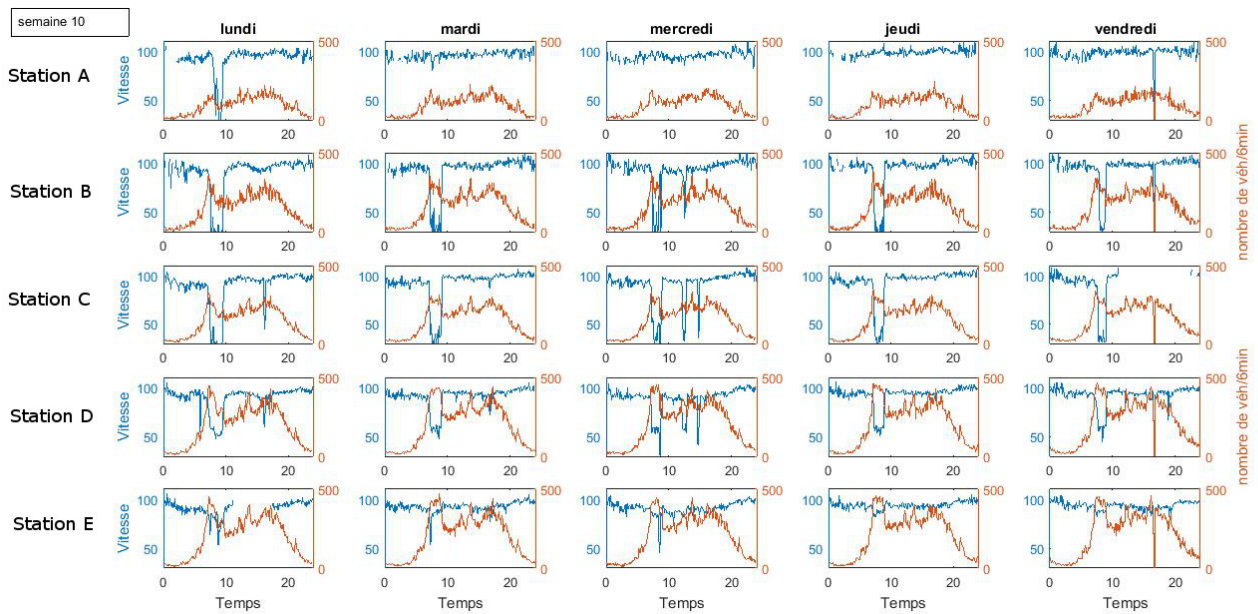


FIGURE 2.7 – Diagrammes débit/vitesse en fonction du temps, semaine 10 - Le jeudi de la semaine 10 correspond au jeudi 10 mars considéré ultérieurement

Le mercredi de la semaine 10 représente une situation non observée ailleurs. En effet, on observe deux pics deux baisses de vitesses, pour les stations C et D à la mi-journée. La première baisse apparaît, comme celle du matin, au niveau de l'échangeur 15. La première semble être causée par une augmentation de la demande en entrée de l'échangeur 15. En revanche pour la deuxième, aucune augmentation du débit n'est observée. En faisant un couplage avec les données météorologiques de la station située à l'aéroport Lille Lesquin, à environ 15 km de la portion d'autoroute étudiée, on observe une dégradation des conditions météorologiques avec du vent violent à la mi-journée. Ce phénomène peut permettre de formuler des hypothèses afin d'expliquer ces ralentissements.

La chute de vitesse et de débit observée le vendredi soir semble être liée à un défaut de remontée des informations jusqu'au système ALLEGRO.

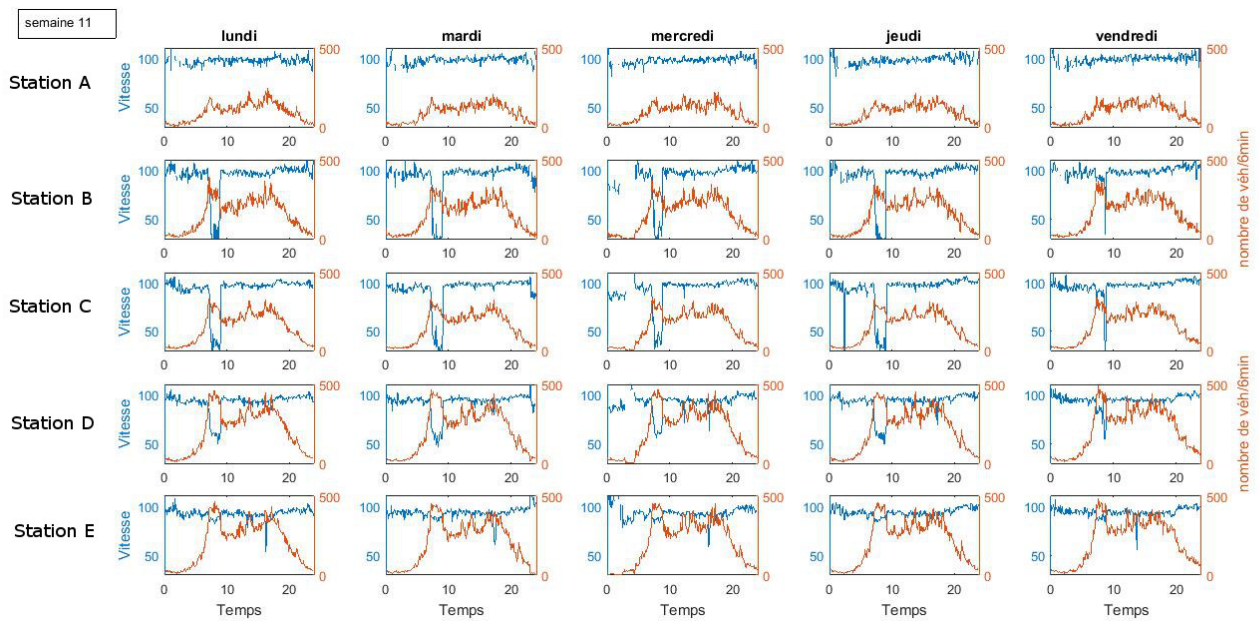


FIGURE 2.8 – Diagrammes débit/vitesse en fonction du temps, semaine 11

La semaine 11 est marquée par une congestion du vendredi matin plus courte que les autres vendredi étudiés.

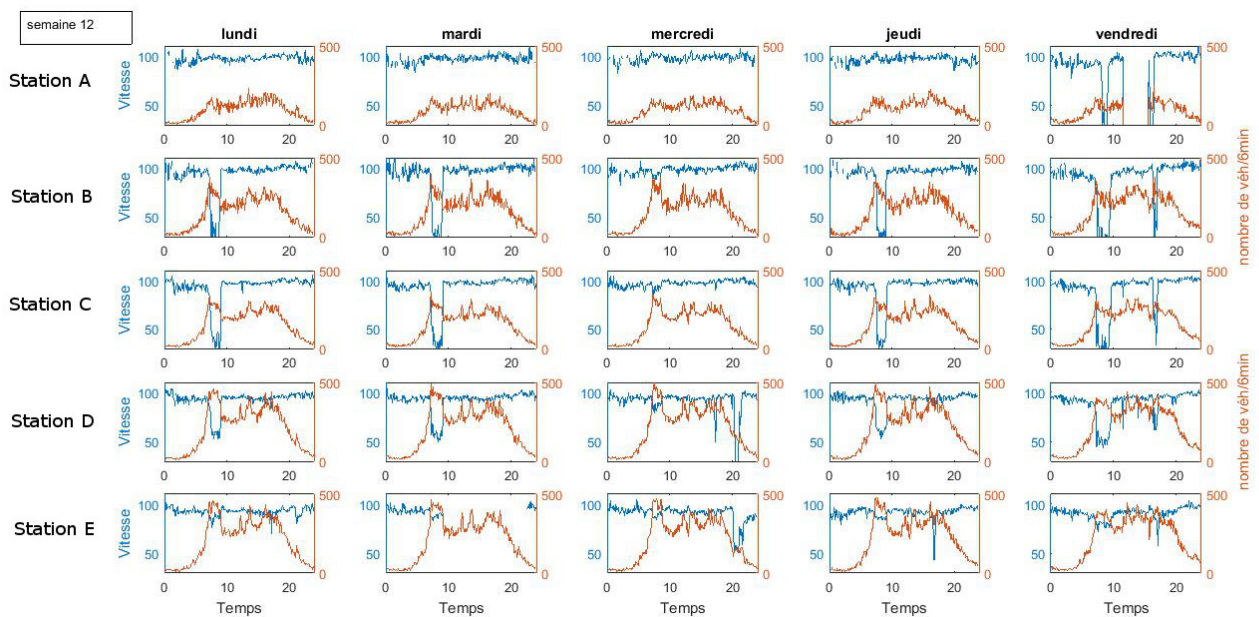


FIGURE 2.9 – Diagrammes débit/vitesse en fonction du temps, semaine 12. - Le lundi de la semaine 12 correspond au lundi 21 mars considéré ultérieurement

Le mercredi de la semaine 12 est le seul jour où une baisse de la vitesse est observée après 20h. Le nombre de véhicules comptabilisés sur 6 min n'augmente pas durant cette période. Cette baisse de vitesse pourrait être causée par une remontée de congestion au niveau de la rocade nord ouest (RNO).

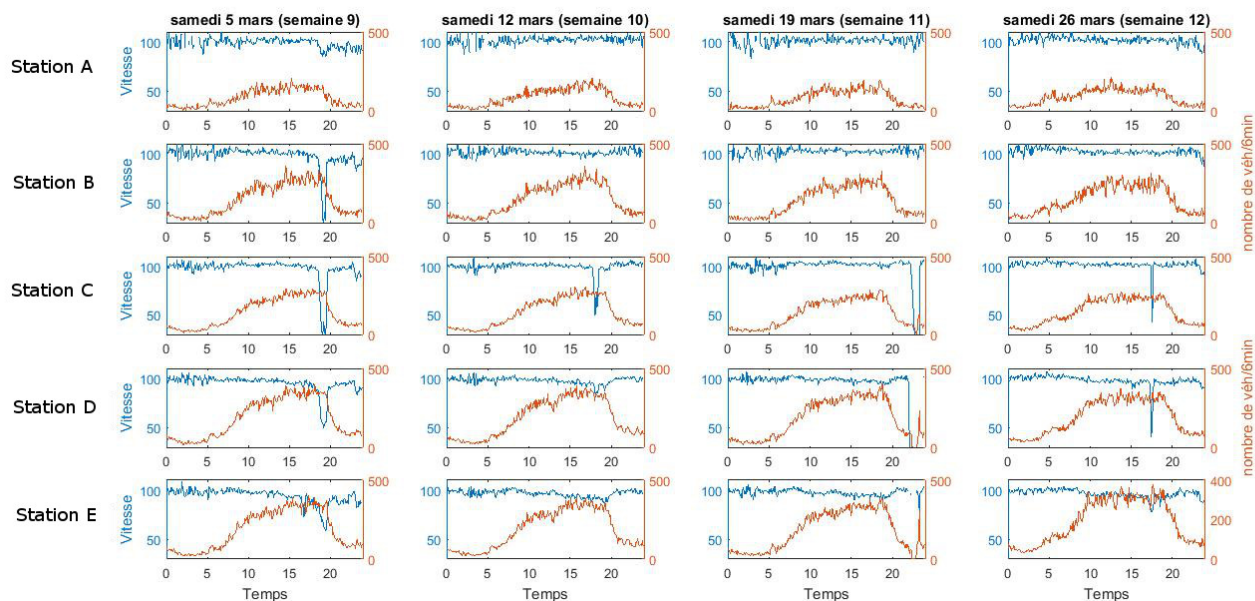


FIGURE 2.10 – Diagramme débit/vitesse en fonction du temps, les samedis étudiés

Le profil de la demande, les samedis, ne présente plus de pics comme précédemment. La demande croît de 6h jusqu'à 20h où elle atteint un maximum. Une congestion apparaît le samedi de la semaine 9 vers 19h au niveau de la station E. Cependant, cette baisse de vitesse n'est pas accompagnée d'une augmentation de la demande. L'analyse des mains courantes fournies pour l'A22 ne permettent pas d'expliquer ce phénomène. Il faudrait consulter les mains courantes pour la rocade nord ouest ou étudier l'état de trafic en aval de l'arc 5 ou sur la rocade afin de donner une explication à cette baisse de vitesse.

Une même baisse de vitesse peut être observée le samedi de la semaine 12 en milieu d'après-midi mais pour une durée plus courte que précédemment. Ce ralentissement apparaît en amont de l'échangeur 15 et remonte jusqu'à l'arc C.

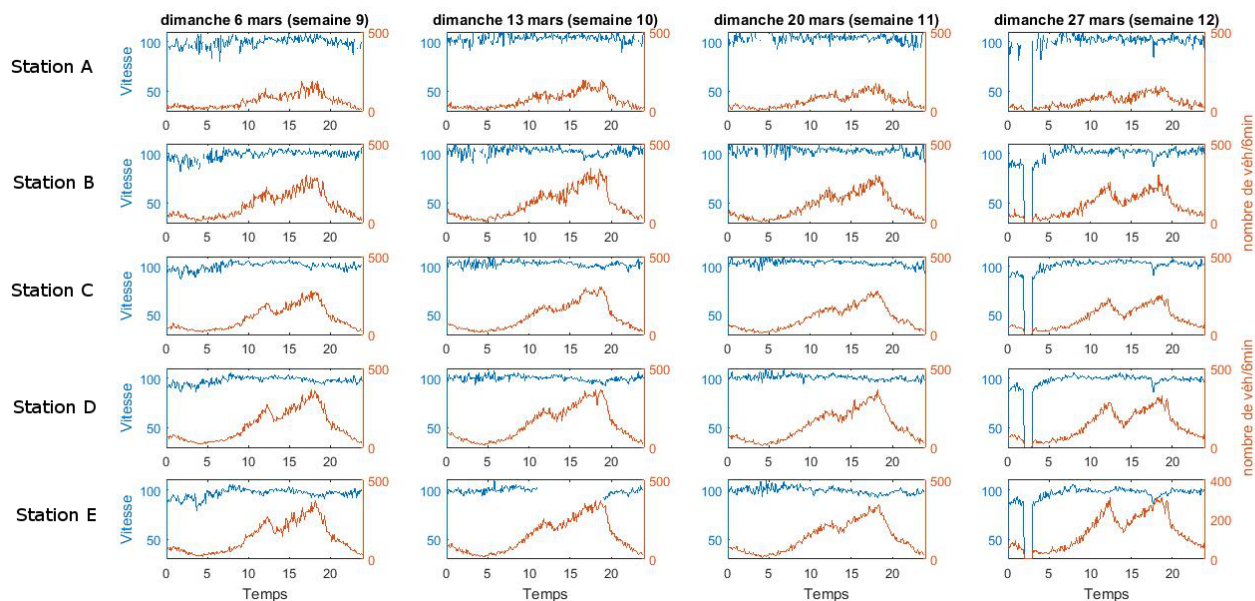


FIGURE 2.11 – Diagramme débit/vitesse en fonction du temps, les samedis étudiés

Le profil de la demande le dimanche présente deux maxima, un en fin de matinée et un en fin d'après-midi. Outre des défauts de capteurs, la vitesse présente une légère baisse en fin d'après-midi. Ainsi, aucune congestion n'est à observer pour les dimanches étudiés.

Ainsi, la représentation des chroniques débits et vitesses a permis de mettre en évidence la récurrence d'une congestion le matin, causée par l'augmentation de demande liée à la bretelle de l'échangeur 15.

L'entrée de l'échangeur 15 correspond à une insertion, illustrée par la photographie de la figure 2.12. Lors d'une visite de terrain, nous avons pu remarquer que les véhicules de la bretelle connaissaient des difficultés d'insertion. Lors de cette même visite, nous avons pu remarquer que la congestion apparaissait effectivement au niveau de l'échangeur 15 et qu'elle remontait sur la bretelle jusqu'au giratoire situé en amont.



FIGURE 2.12 – Photographie de l'insertion de l'échangeur 15 - Source : Google Map

La suite du diagnostic se focalisera sur la période 6h - 10h, la congestion du matin étant récurrente tous les jours de la semaine.

2.3.2 Choix des jours de référence

Afin de caractériser quantitativement au mieux la congestion, il nous faut sélectionner des jours de référence. Nous avons cherché deux jours de référence respectant les critères ci-dessous :

- Comprendre une congestion matinale au niveau de l'échangeur 15 et remontant jusqu'à l'arc 2 mais non observable au niveau de l'arc 1 ;
- Ne pas connaître de congestion en milieu de journée, ni le soir ;
- IDPL désactivée durant la congestion du matin en se référant à la figure 2.3 ;
- Ne pas avoir d'événement inscrit dans les mains courantes durant l'heure de pointe du matin (cf. Annexe D) ;
- Données complètes sur la période 6h-10h.

C'est pourquoi, le choix du jour de référence s'est porté sur le jeudi 10 mars (de la semaine 10). Tous les critères présentés ci-dessus sont respectés. Notamment, l'IDPL est levée de 7h20 à 14h29. De plus, des données vitesse sont manquantes seulement sur des heures de nuit.

Le lundi 21 mars (semaine 12) sera lui aussi considéré comme étant un lundi de référence. En effet il respecte les critères cités ci-dessus, avec une levée de l'IDPL entre 7h30 et 9h50. En outre, il permettra de prendre en compte l'augmentation du nombre de poids-lourds en début de semaine par rapport aux autres jours de la semaine. De plus, au regard des débits horaires disponibles, le 21 mars est un jour complet et ne présente pas de différences majeures entre deux stations d'une section captive. Néanmoins, d'après les mains courantes, présentées en annexe D, la voie de droite est neutralisée au bout de la section étudiée, ce point devra être pris en compte pour l'élaboration des diagrammes fondamentaux.

2.3.3 Analyse quantitative de la congestion

Analyse macroscopique

En dehors de la période 6h-10h, le trafic est fluide sur les deux jours de référence considérés. La représentation des diagrammes espace/temps, à partir des données 6 min, pour les deux jours de référence précédents nous indique que la congestion remonte effectivement au niveau de l'arc 3, voire au-delà entre les arcs 1 et 2, fautes de données capteurs, il nous est impossible de décrire jusqu'où elle est effectivement ressentie.

D'après les diagrammes débit/vitesse, la congestion apparait entre 6h30 et 9h30 pour tous les jours étudiés. Plus précisément pour le jeudi 10 mars, la congestion apparait au niveau de l'arc 3 à 7h14 jusqu'à 8h50. Le lundi 21 mars, la congestion débute à h21 pour durer jusqu'à 9h02. Les écarts entre les lignes de niveau des diagrammes espace/temps sur les figures 2.13 et 2.14, indiquent de plus, que la baisse de vitesse a lieu très rapidement, environ en 10 min, de même pour la reprise du trafic.

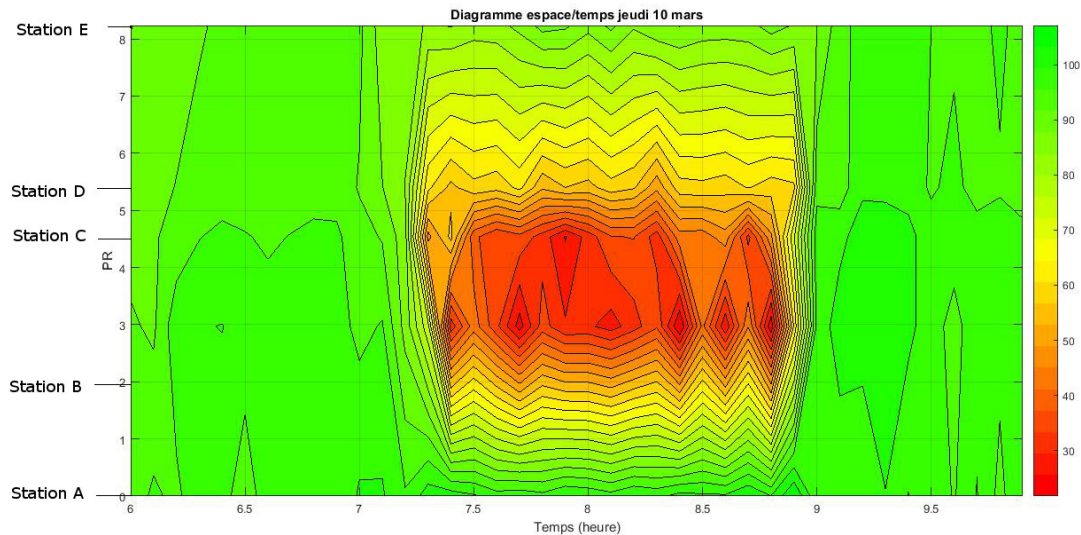


FIGURE 2.13 – Cartographie du trafic le jeudi 10 mars

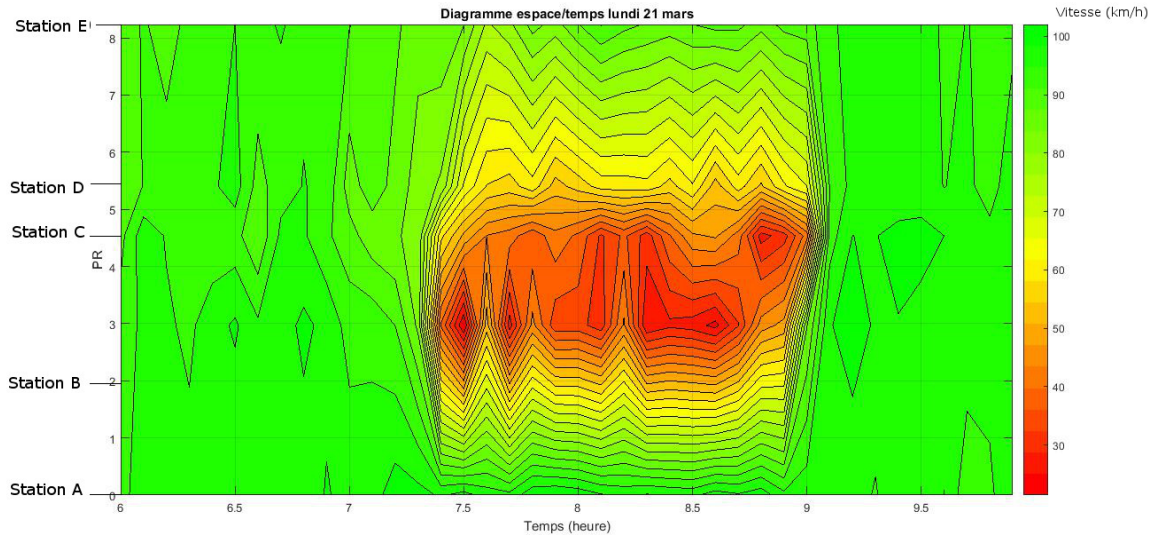


FIGURE 2.14 – Cartographie du trafic lundi 21 mars

Les diagrammes fondamentaux ont été réalisés d'après les données de la station B. La station considérée est située en amont de la congestion à 1,4 km de l'échangeur 15 et à 600 m en aval de l'échangeur 16, il connaît une remontée de congestion depuis l'échangeur 15 ce qui nous permettra d'estimer la vitesse de remontée de congestion et l'occupation maximale au niveau de cette station.

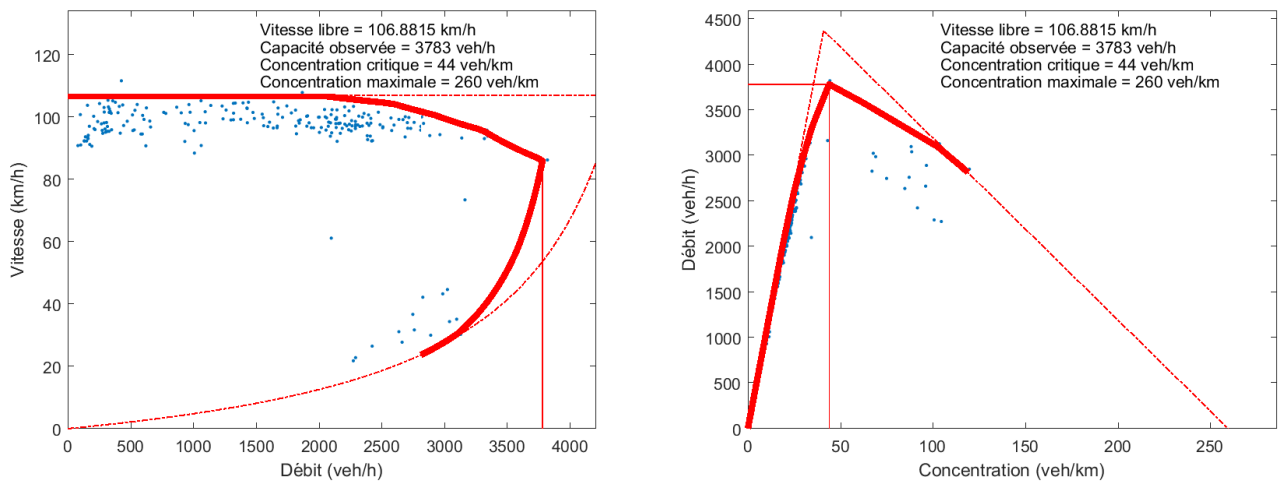


FIGURE 2.15 – Diagrammes fondamentaux jeudi 10 mars

Pour le jeudi 10 mars, la vitesse libre est estimée à 106,9 km/h, la capacité à 3783 veh/h, la concentration critique à 44 veh/km, pour une concentration maximale de 260 veh/km. En définissant la vitesse critique comme étant le quotient de la capacité sur la concentration critique, on obtient pour ce jour une vitesse critique de 85,9 km/h.

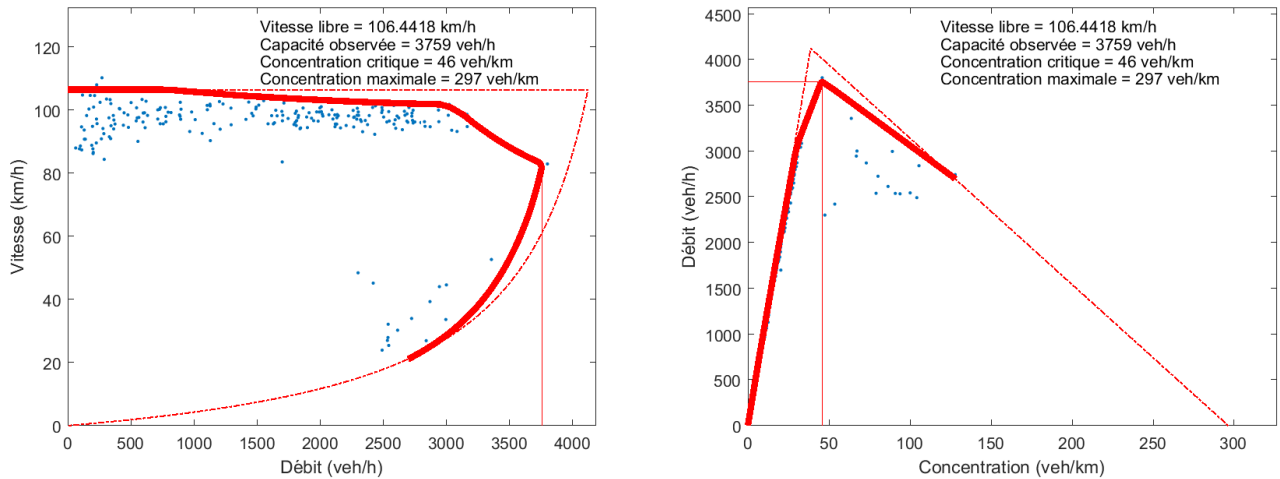


FIGURE 2.16 – Diagrammes fondamentaux jeudi 10 mars

Pour le lundi 21 mars, la vitesse libre est estimée à 106,4 km/h, la capacité observée est de 3759 veh/h, la concentration est quant à elle de 46 veh/km et la concentration maximale à 297 veh/km. On estime alors la vitesse critique à 81,7 km/h.

Analyse de la répartition du trafic par voie

A partir des débits horaires par voie et par type de véhicules pour les arcs situés juste en amont et en aval de l'échangeur 15, nous avons pu obtenir les graphiques ci-dessous pour les deux jours de référence sélectionnés. L'aire jaune correspond aux nombre de véhicules particuliers sur la journée, l'aire bleue au nombre de poids-lourds. Le contour supérieur de l'enveloppe jaune représente donc le nombre total de véhicules circulant pour chaque arc.

Tout d'abord, on remarque, une diminution du nombre de poids-lourds en heure de pointe du matin, il semble qu'il y ait un évitement de circuler durant cette période horaire de leur part. Toutefois, le taux de poids-lourds est en moyenne de 31% entre 7h et 10h contre 36% sur la journée entière, le taux de poids-lourds reste important durant la période de pointe du matin. La composition du trafic est sensiblement la même pour les deux jours étudiés.

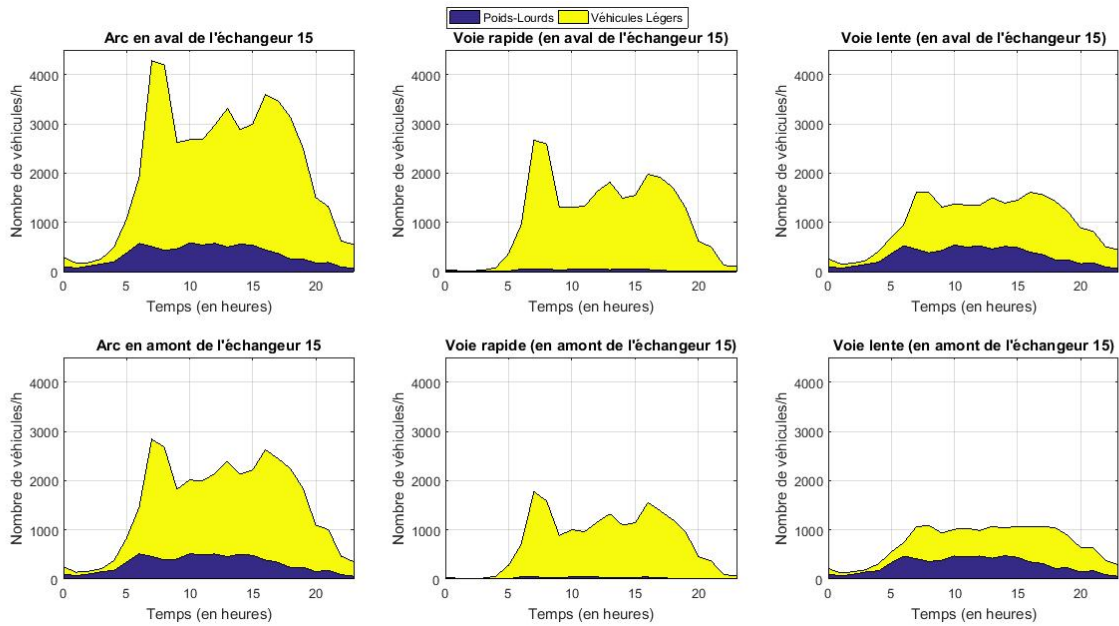


FIGURE 2.17 – Diagrammes de répartition du nombre de poids lourds sur l'ensemble des deux voies et sur chacune des voies de circulation pour les arcs 4 (en haut) et 3 (en bas), le jeudi 10 mars

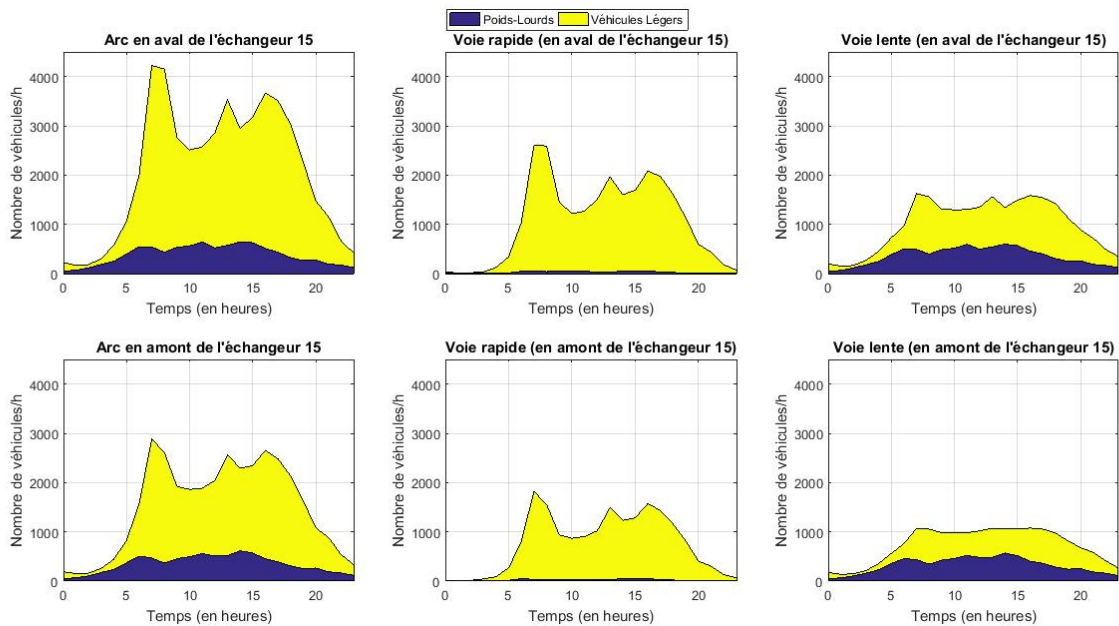


FIGURE 2.18 – Diagrammes de répartition du nombre de poids lourds sur l'ensemble des deux voies et sur chacune des voies de circulation pour les arcs 4 (en haut) et 3 (en bas), le lundi 21 mars

De plus, le peu de véhicules de plus de 6 m sur la voie rapide, indique que l'interdiction de dépassement mise en place est vraisemblablement bien respectée.

Tout type de véhicules confondus, la répartition sur les voies entre le jeudi 10 et le lundi 21 sont similaires. On remarque, qu'en dehors des périodes de forte affluence le matin, à la pause déjeuner et le soir, que le nombre de véhicules circulant sur la voie de droite était plus important. En revanche,

durant ces mêmes périodes, la voie lente est sous-utilisée. La comparaison entre l'arc situé en amont de l'échangeur et l'arc situé à l'aval, montre effectivement qu'il existe un report dit de courtoisie de la part des usagers de la voie lente vers la voie rapide.

Niveau de service

Afin de caractériser au mieux le tronçon, nous avons utilisé les données boucles d'une station intermédiaire entre l'arc 4 et 5, notée 4bis sur la figure 2.5. Cette station a été sélectionnée car elle n'est pas immédiatement située à proximité d'une entrée ou d'une sortie et n'est jamais congestionnée. Ainsi, le choix de la voie de circulation ne devrait pas être influencé par l'itinéraire que les usagers veulent suivre ni par un comportement dit de courtoisie, consistant à faciliter l'insertion des autres véhicules au niveau d'une entrée. Cette station n'a pas été utilisée précédemment car les données ont été récupérées tardivement, cependant, en traçant le diagramme fondamental pour les deux jours de référence on remarque que cette station n'est jamais en congestion, cela confirme donc que la congestion ne provient pas de l'aval de l'échangeur 15.

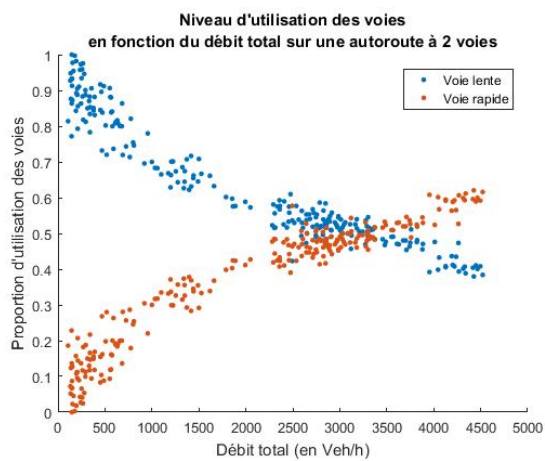


FIGURE 2.19 – Courbes de niveau d'utilisation des deux voies de circulation, jeudi 10 mars

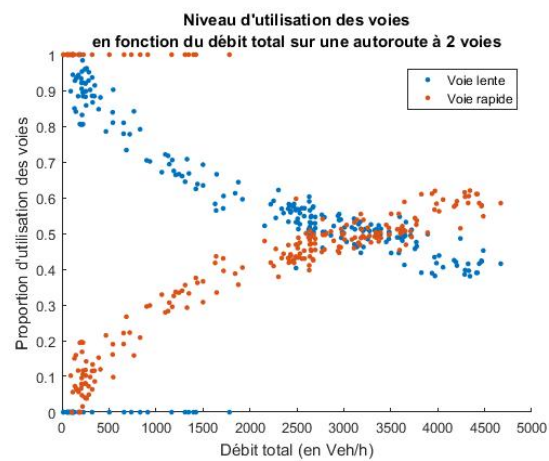


FIGURE 2.20 – Courbes de niveau d'utilisation des deux voies de circulation, lundi 21 mars

Pour les deux jours de référence sélectionnés, la demande de croisement est sensiblement la même et est estimée à 3 300 véh/h. Lorsque la demande est en dessous de cette valeur, la voie de droite est privilégiée par les usagers à 59%.

On remarque de plus que le lundi 21 mars, la voie de droite ait été fermée de toute utilisation au niveau de cet arc à partir de 21h06. Ce cas de figure est effectivement confirmé dans les mains courantes. Les véhicules se répartissent à 59% sur la voie de gauche lorsqu'on arrive à la capacité maximale.

Analyse de la demande en entrée sur l'A22 au niveau de l'échangeur 15

En utilisant les débits et les vitesses reconstituées sur 6 min pour les stations en amont et en aval de l'échangeur 15, on a pu donner un ordre de grandeur de la demande au niveau de l'échangeur 15 en effectuant une différence entre les données aval et amont. On obtient ainsi le graphique ci-dessous pour les deux jours de référence

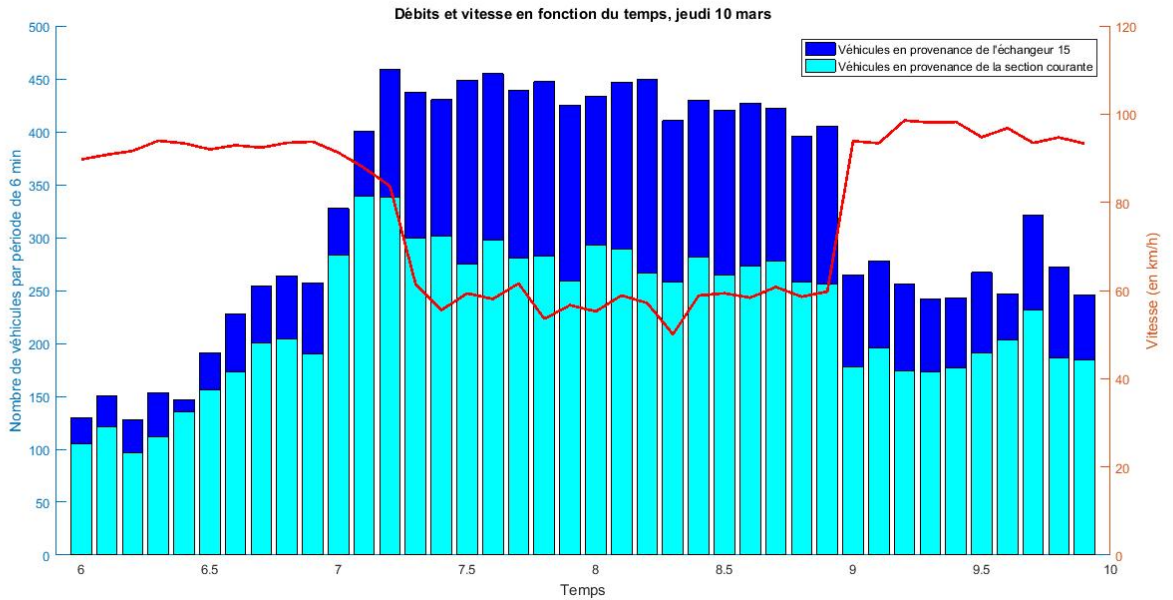


FIGURE 2.21 – Débits et vitesse en fonction du temps pour les stations en aval et en amont de l'échangeur 15, le jeudi 10 mars de 6h à 10h

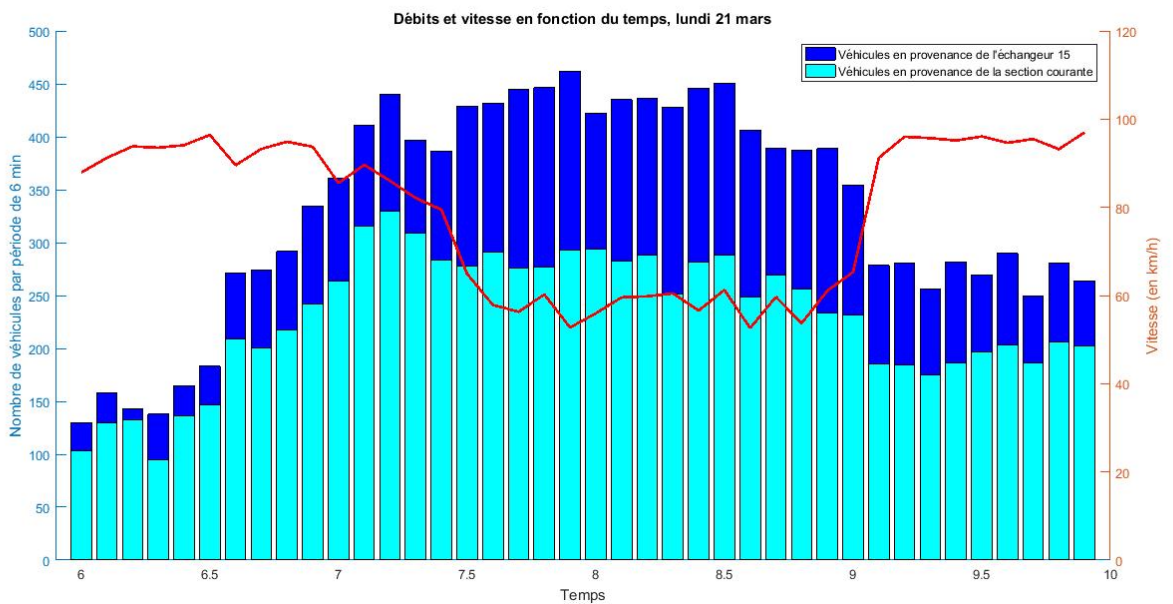


FIGURE 2.22 – Débits et vitesse en fonction du temps pour les stations en aval et en amont de l'échangeur 15, le lundi 21 mars de 6h à 10h

Ces deux graphes permettent de montrer qu'il y a effectivement une montée en charge du trafic à partir de 6h, la phase congestionnée représentée par une baisse de vitesse accompagnée d'une augmentation du nombre de véhicules, débute au même moment pour les deux jours étudiés. En revanche, la diminution de la vitesse est plus progressive pour le lundi 21 mars. Enfin, on remarque que la demande générée par l'échangeur 15 peut être quadruplée durant l'heure de pointe.

2.4 Conclusion

Le présent diagnostic a permis de mettre en évidence une forte tendance au tronçon étudié à congestionner au niveau de l'insertion des véhicules depuis la bretelle d'accès de l'échangeur 15. Cette congestion semble-t-il serait due à une trop forte demande en période de pointe du matin mais aussi par une insertion des véhicules difficiles sur la section courante, notamment causée par la présence non négligeable de poids-lourds sur la voie lente. Globalement, même lorsqu'ils sont autorisés à dépasser, la majorité des poids-lourds semblent rester sur la voie de droite. Ce diagnostic a fait l'objet d'une présentation auprès de la DIR Nord le 30 juin 2016 afin de justifier des projets de gestion de trafic envisagés sur l'axe A22.

Les résultats quantitatifs, présentés précédemment, sont à interpréter au regard de la qualité des données. Le système de gestion du trafic utilise des données minutes, lissées sur 3 min. Ces données servent notamment à l'animation du traficore ou au calcul des temps de parcours. Pour cette étude, les données minutes lissées ont été agrégées pour obtenir des données 6 min. Une vérification a ensuite été effectuée pour des stations où l'on disposait à la fois de données 6 min et 1 min, afin de s'assurer du bon fonctionnement de l'agrégation effectuée.

Chapitre 3

Utilisation de l’outil Mésososcopique

Cette partie se compose de trois parties distinctes. La première correspond à la partie d’initialisation comprenant la représentation du réseau, les hypothèses de modélisation et l’élaboration de la demande. La deuxième porte sur le calage de la simulation et la dernière sur la régulation dynamique des vitesses.

La plateforme utilisée est l’outil mésoscopique implémenté sous Matlab, développée initialement par Aurélien DURET et actuellement reprise par Etienne HANS.

3.1 Initialisation de l’outil mésoscopique

3.1.1 Représentation du réseau

La représentation du réseau sur la plateforme s’effectue par la définition de liens, correspondant aux tronçons de voies. Chaque lien est relié grâce à un noeud. Dans le cas du tronçon étudié de l’A22, comme présenté sur le schéma de gauche de la figure 3.1, page 52, la section courante de l’autoroute est décomposée en 4 liens, chacun comprenant deux voies de circulation (axe vertical du schéma). Les liens sont reliés entre eux par des noeuds (représentés par des disques gris).

Les échangeurs 16 et 17 ne sont représentés que par une seule entrée. En effet, comme démontré par le diagnostic, la demande apportée par ces deux échangeurs, soient deux entrées et une sortie, est toujours positive. Ce résultat est obtenu en faisant la soustraction du nombre de véhicules par intervalle de temps entre la station B et la station A.

L’échangeur 15 a quant à lui été modélisé par deux liens, un comprenant deux voies de circulation et 1 une seule voie comme cela peut être observée dans la configuration réelle. L’échangeur 18 n’a pas été représenté, il en est de même pour la sortie de l’échangeur 13. En effet, la demande en provenance de l’échangeur 18 et la demande sortant à l’échangeur 13 ne peuvent être évaluées. Aucune bretelle ne possède de boucles électromagnétiques de comptage.

Notons qu’il existe un noeud entre le station B et la station C, ce dernier a été ajouté pour la définition des scénarios de régulation et notamment pour la définition des cantons 1 et 2.

L'ensemble de la schématisation du réseau a été faite à l'échelle à partir de la représentation géocodée du réseau dressée par la DIR Nord. Le schéma complet, représenté grâce à la plateforme mesoscopique est disponible en annexe E, page 90.

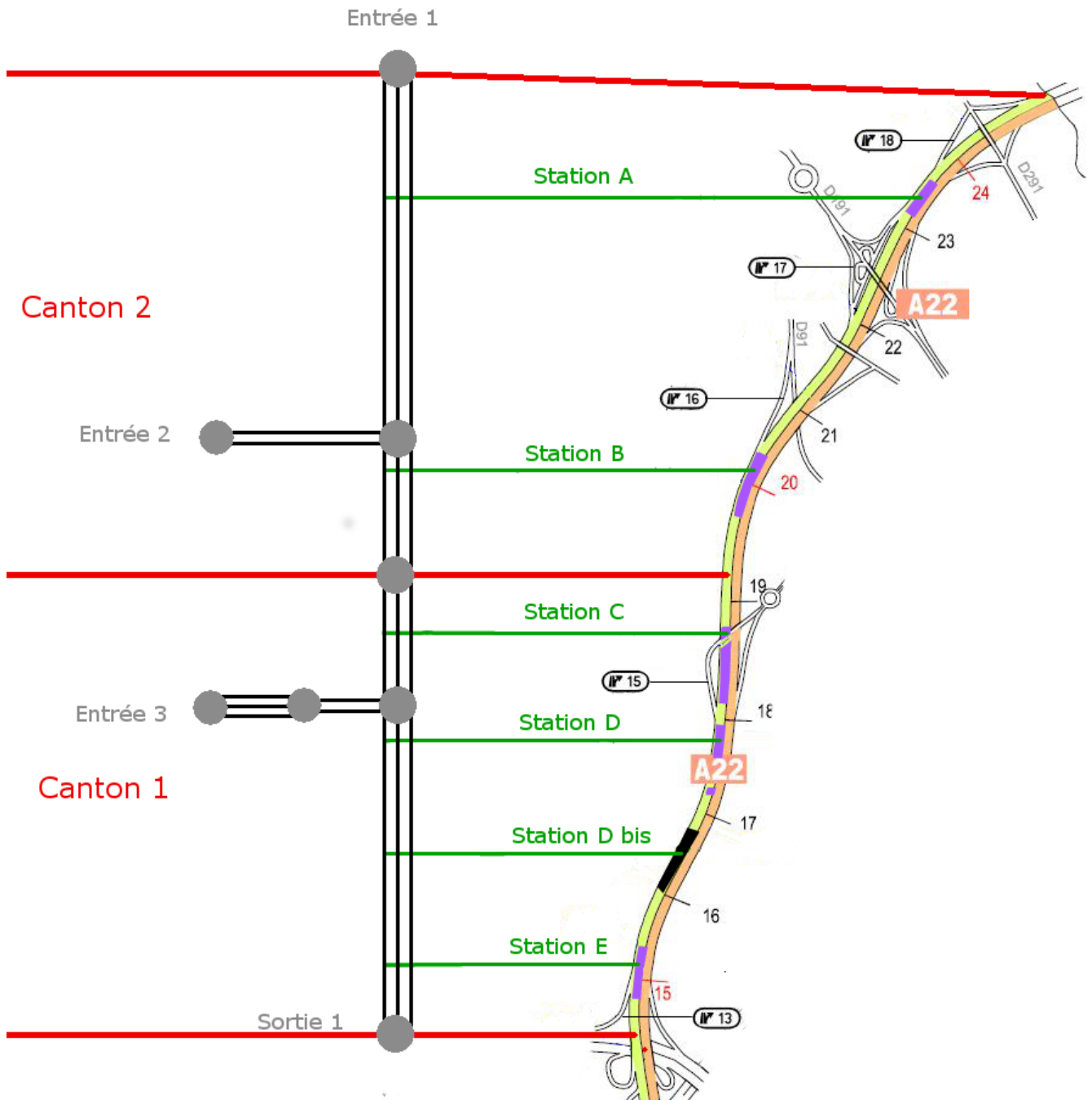


FIGURE 3.1 – Schéma récapitulatif de la modélisation du réseau

3.1.2 Hypothèses de modélisation

La plateforme mésoscopique propose de définir lien par lien le diagramme fondamental ou globalement pour tout le réseau. La définition du diagramme fondamental s'effectue en entrant la concentration maximale, la vitesse de remontée de file et la vitesse en fluide. Nous avons fait le choix d'une définition pour tout le réseau même si nous savons que les liens correspondant aux échangeurs comprennent une limitation de vitesses à 90 km/h, différentes de celles sur la section de l'autoroute. Ce choix a été induit afin de faciliter le calage du modèle avec au maximum 3 paramètres. Le diagramme fondamental devra être calé en fonction de ces 3 paramètres contre 21 dans le cas de la définition du diagramme fondamental par lien. Cette approche de calage permettra notamment de réduire les temps de calculs.

De même, les caractéristiques du LFD (Lane Flow Distribution) peuvent être définies par lien ou de façon globale à travers 2 paramètres que sont la répartition sur chacune des voies et le débit de croisement. De même que précédemment, le choix s'est porté sur une définition globale du LFD. Outre les raisons explicitées pour le diagramme fondamental, étant donné l'homogénéité de la configuration du réseau avec deux voies de circulation, on peut supposer que le comportement des usagers est le même sur toute la section courante en dehors des zones d'entrées et de sorties.

L'outil mésoscopique permet de définir plusieurs classes de véhicules. Or, les stations ne permettent pas de différencier les poids-lourds des véhicules légers pour l'estimation de la vitesse et du débit sur des périodes de 1 et 6 min. C'est pourquoi, une seule classe de véhicules est considérée. Ses paramètres sont la vitesse fluide et la vitesse de remontée de file, qui seront considérés égaux aux paramètres du diagramme fondamental.

3.1.3 Elaboration de la demande

La demande a été élaborée à partir des données reconstituées sur 6 min. Cette période permet d'éviter de considérer le bruit et de garder la dynamique du phénomène. De plus, la demande ne sera considérée que pour les 4 heures de pointe du matin, à savoir de 6h à 10h et pour les deux jours de références considérés.

La demande au niveau de l'entrée 1, indiquée sur le schéma gauche de la figure 3.1, a été évaluée à partir des données de la station A. Ainsi le trafic présenté au niveau de l'entrée 1 correspond au trafic en provenance de la Belgique et de l'échangeur 18. La demande au niveau de l'entrée 2 est obtenue en faisant la soustraction entre les données des stations C et A. N'ayant pas de stations entre les échangeurs 16 et 17, l'entrée 2 correspond au trafic global entrant au niveau de ces deux échangeurs. La demande au niveau de l'entrée 3 est évaluée comme étant la différence entre la station D et C.

3.2 Elaboration du calage

3.2.1 Choix des indicateurs

N'ayant pas à disposition d'autres données tels que des temps de parcours pour caler le modèle, et compte tenu des sorties possibles de la plateforme, nous avons fait le choix d'utiliser des courbes

de véhicules cumulés pour caler le modèle. En effet, la plateforme peut permettre la modélisation de stations qui renvoient le nombre de véhicules passant chaque minute sur ces dernières. C'est pourquoi, des stations fictives ont été ajoutées sur la section courante de l'A22, au même niveau que les stations réelles.

Afin de comparer les données réelles aux données simulées pour chaque station, nous avons défini 3 indicateurs.

- L'écart à la fin de la simulation, entre le nombre de véhicules cumulés réelles et le nombre de véhicules cumulés simulés : écart_{final} ;
- L'écart maximal observé entre le nombre de véhicules cumulés réelles et le nombre de véhicules simulés : écart_{max} ;
- L'écart moyen entre la courbe de données réelles et la courbe de données simulées défini comme :

$$\text{écart}_{moyen} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|d_{réelles_i} - d_{simulées_i}|}{d_{réelles_i}}}{n}$$

avec

$d_{réelles_i}$ le nombre de véhicules cumulés à la minute i d'après les données réelles

$d_{simulées_i}$ le nombre de véhicules cumulés à la minute i d'après les données simulées

n le nombre de minutes simulées

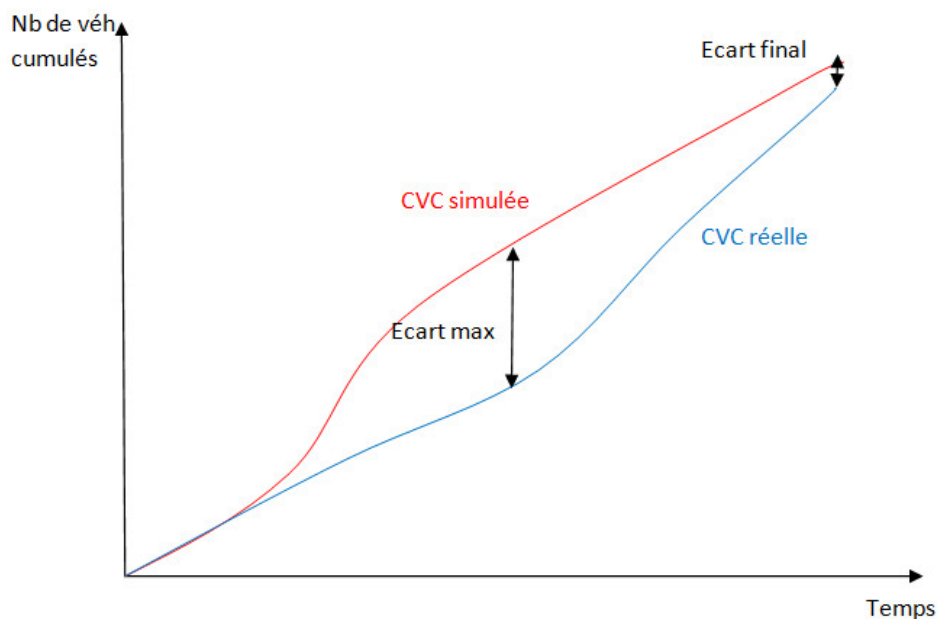


FIGURE 3.2 – Schéma de principe

Ces 3 indicateurs ont été définis afin de permettre une comparaison exhaustive des CVC. En effet, l'écart moyen permet de savoir si la courbe issue de la simulation est, durant toute la durée de la simulation, plus ou moins proche de la courbe issue des données réelles. Il s'agit d'un indicateur global, s'exprimant en pourcentages. A cet indicateur, nous avons souhaité prendre en compte l'écart maximal observé et l'écart final. Cela permet ainsi de savoir, même pour un écart moyen faible, quelle

est l'amplitude de l'erreur maximale au niveau local et l'erreur à la fin de la simulation.

3.2.2 Paramètres à caler

Comme présenté 3.1.2, nous avons choisi de considérer 5 paramètres pour la modélisation du réseau et de l'état de trafic :

- La concentration maximale k_x ;
- La vitesse libre u ;
- La vitesse de propagation d'onde w ;
- La demande de croisement ;
- La répartition du trafic sur chacune des voies.

Afin d'optimiser le temps de calage, nous avons choisi de nous focaliser seulement sur ces 5 paramètres.

3.2.3 Simulation avec les paramètres par défaut

Tout d'abord, en utilisant les valeurs initialement entrées dans la plateforme mésoscopique, nous avons tracé les CVC des données réelles et des données simulées pour 4 simulations (cf. annexe F, page 91, figures 3.3 et 3.4 pour les deux jours de référence).

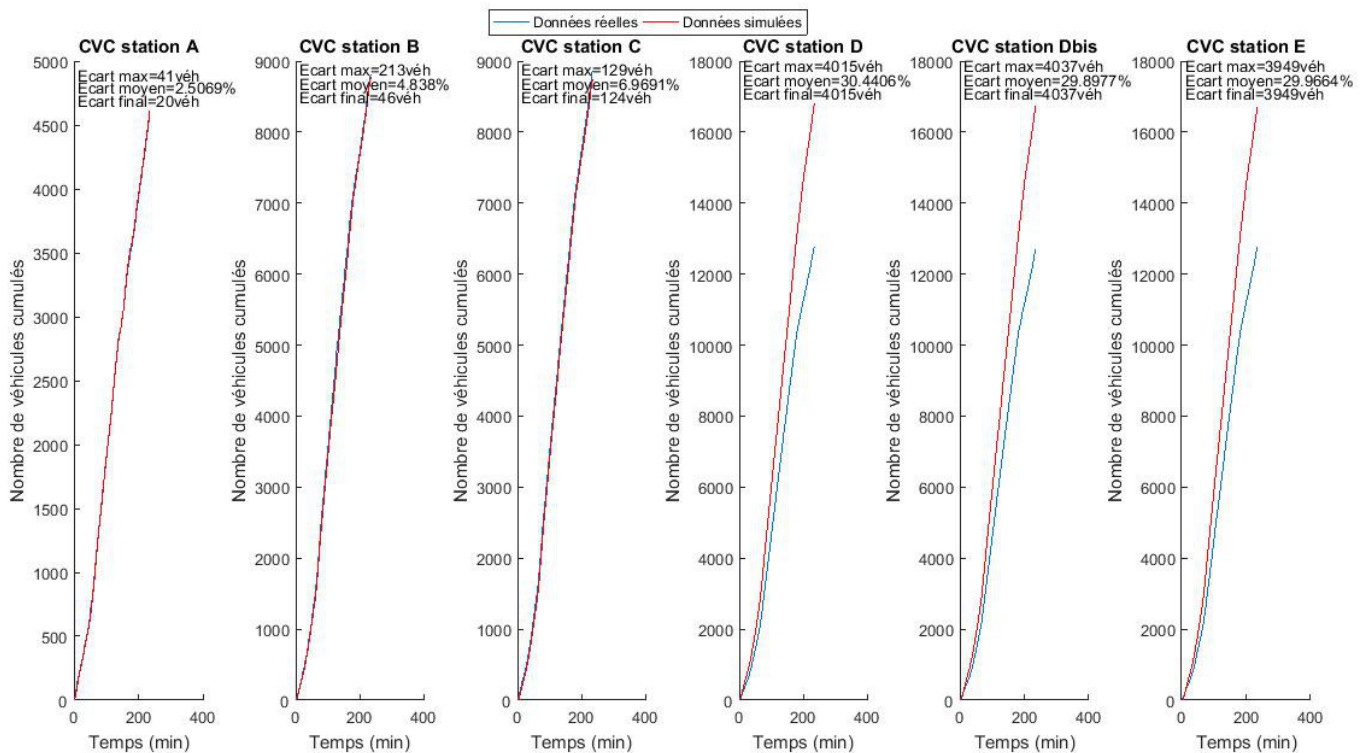


FIGURE 3.3 – CVC d'une simulation pour les paramètres par défaut, à savoir pour $u = 30m/s$, $w = 5m/s$, $k_x = 0,2veh/m$, une demande de croisement égale à 0.857 véh/s et une répartition de 50% sur chacune des voies, jeudi 10 mars

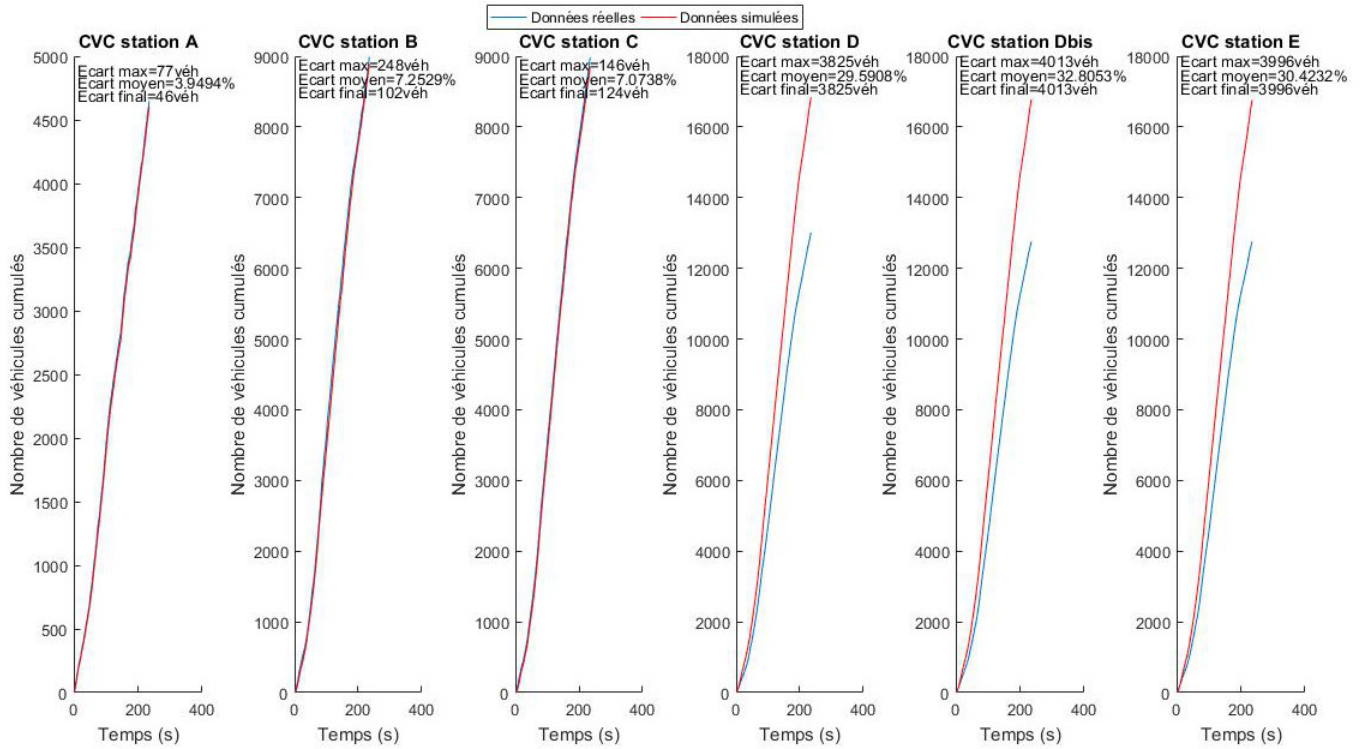


FIGURE 3.4 – CVC d’une simulation pour les paramètres par défaut, à savoir pour $u = 30m/s$, $w = 5m/s$, $k_x = 0,2veh/m$, une demande de croisement égale à 0.857 véh/s et une répartition de 50% sur chacune des voies, lundi 21 mars

Nous pouvons remarquer le caractère déterministe du modèle étant donné les faibles différences observées au niveau des indicateurs utilisés.

En observant les courbes obtenues, on remarque que les CVC simulées des 3 stations situées en aval de l’échangeur 15 sont très différentes des CVC réelles, à l’inverse des CVC des 3 stations en amont.

3.2.4 Elaboration d’une routine de calage

Pour le calage, nous avons construit un script grâce au logiciel Matlab. Il s’agit de parcourir un intervalle pour chaque paramètre avec un certain pas de temps et de simuler à chaque fois le réseau. A posteriori, les résultats des simulations selon les 3 critères sont récupérés afin de définir la simulation la plus acceptable. Nous avons défini la simulation la plus acceptable comme étant la simulation pour lequel l’indicateur I est minimal. L’indicateur I est défini pour chaque simulation i par :

$$I = \sum_{n=1}^6 \left(a \frac{\text{écart}_{final_i}^n}{\max_i(\text{écart}_{final_i}^n)} + b \frac{\text{écart}_{max_i}^n}{\max_i(\text{écart}_{max_i}^n)} + c \text{écart}_{moyen_i} \right)$$

avec

$\text{écart}_{final_i}^n$: l’écart final pour la simulation numéro i et la station n ;

$\text{écart}_{max_i}^n$: l’écart maximal pour la simulation numéro i et la station n ;

$\max_i(\text{écart}_{max_i}^n)$: maximum des écarts maximaux observés parmi toutes les simulations à la station n ;

$\max_i(\text{écart}_{final_i}^n)$: maximum des écarts finaux observés parmi toutes les simulations à la station n .
 a , b et c sont des constantes. Nous avons choisi $a = 0,25$, $b = 0,25$ et $c = 0,5$.

Cet indicateur est totalement subjectif. C'est un choix personnel de privilégier l'indicateur d'écart moyen à 50% dans la définition de I car, pour nous, le plus important est d'avoir un état de trafic le plus proche de la réalité globalement. L'écart final et l'écart maximal prennent part à 25% chacun dans la définition de I afin de limiter au maximum les erreurs au cours de la simulation et à la fin de cette dernière.

Idéalement, nous pourrions définir un intervalle pour chacun des 5 paramètres, effectuer les différentes simulations et choisir la simulation la plus acceptable. Cette démarche pourrait alors être renouvelée plusieurs fois afin de confirmer les valeurs des 5 paramètres. Cependant, le temps de calcul étant de 65 secondes en moyenne sur l'ordinateur utilisé, en fonction des intervalles choisis et des pas de calculs choisis, la durée totale des simulations pouvaient dépasser les 24h.

C'est pourquoi, afin de limiter les temps de calculs, nous avons décidé de fixer les valeurs du débit de croisement et de la répartition d'utilisation des voies grâce aux résultats du diagnostic. En effet, le LFD a pu être évalué pour les deux jours de référence au niveau de la station D bis, ne connaissant aucune congestion durant l'étude et éloignée d'une entrée et d'une sortie. Pour les deux jours considérés, nous trouvons un débit de croisement égal à 3300 véh/h soit 0.916 véh/s et une répartition sur la voie de droite égale à 41%. Ces résultats nous ont paru satisfaisants étant identiques pour les deux jours considérés et calculés sur une station répondant aux critères de non congestion et éloignées de toutes entrées et sorties. Ainsi, en modifiant ces paramètres et en gardant les valeurs par défaut pour les 3 paramètres du diagramme fondamental, nous pouvons améliorer le calage des CVC (figure 3.5 et figure 3.6).

Nous n'avons pas caler le modèle à partir des données du diagramme fondamental présenté dans le diagnostic. En effet, le diagramme fondamental n'a été tracé qu'à titre informatif sur une seule station. Il n'est donc pas représentatif de l'ensemble du tronçon. De plus, pour le tracer, le débit a été estimé en utilisant des données 6 min multipliées par 10. Cette méthode surestime les paramètres du diagramme fondamental. Il aurait fallu utiliser une moyenne glissante sur une heure pour estimer plus rigoureusement les paramètres.

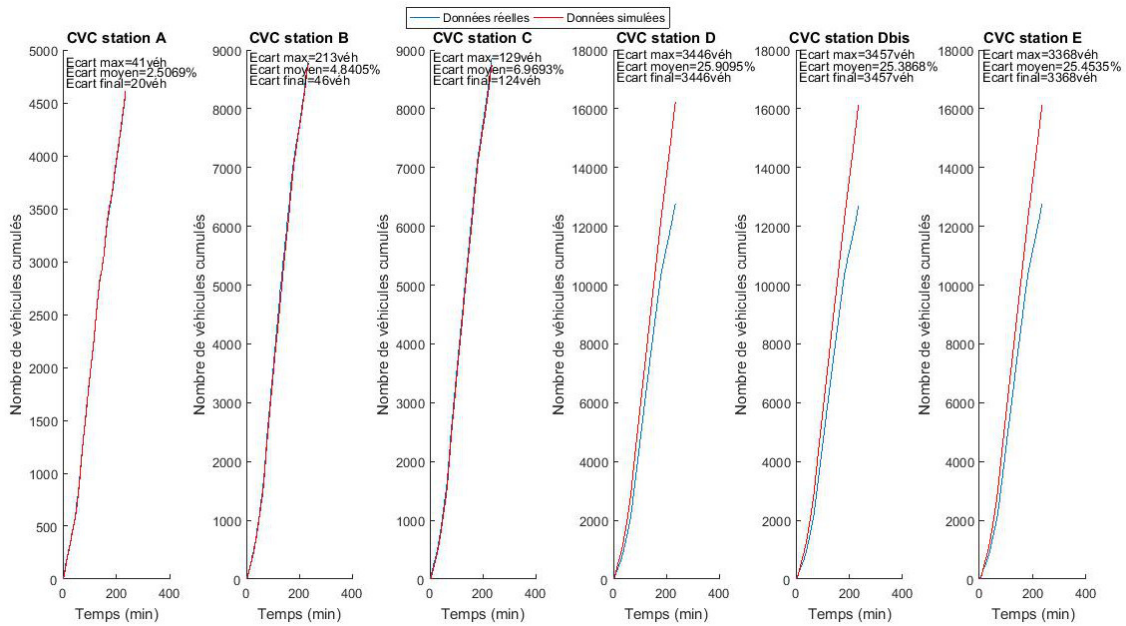


FIGURE 3.5 – CVC d’une simulation pour les paramètres pour $u = 30m/s$, $w = 5m/s$, $k_x = 0,2veh/m$, une demande de croisement égale à 0.916 véh/s et une répartition de 41% sur la voie lente, jeudi 10 mars

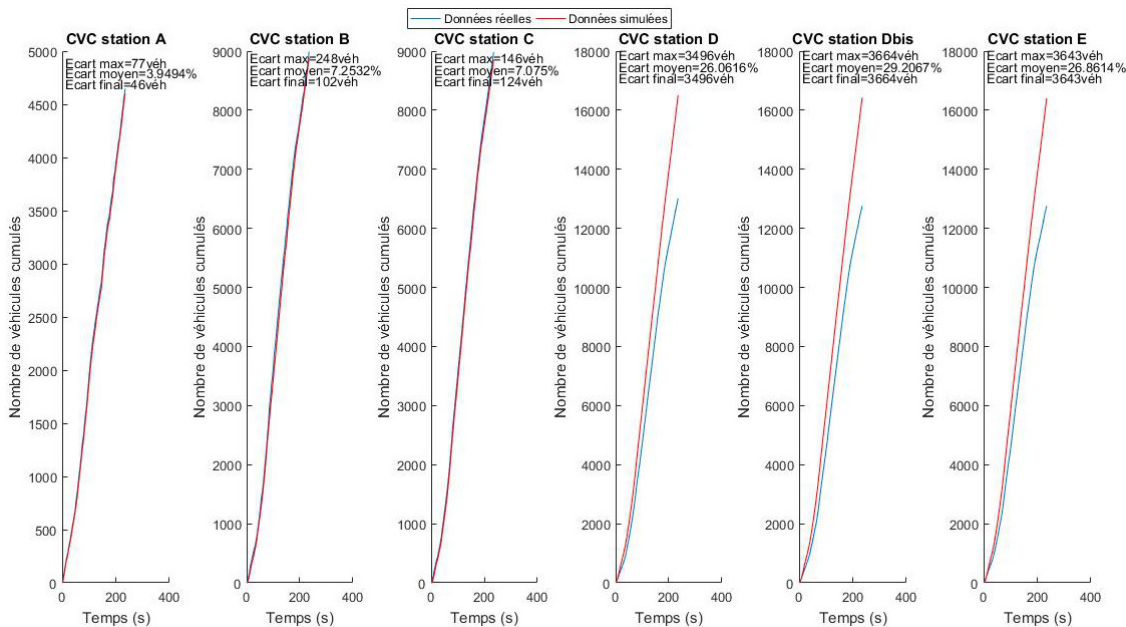


FIGURE 3.6 – CVC d’une simulation pour les paramètres pour $u = 30m/s$, $w = 5m/s$, $k_x = 0,2veh/m$, une demande de croisement égale à 0.916 véh/s et une répartition de 41% sur la voie lente, lundi 21 mars

3.2.5 Résultats de la routine de calage

Jeudi 10 mars

Nous avons fait l'hypothèse que si les valeurs des paramètres pour la simulation la plus acceptable correspondent aux bornes des intervalles choisis, alors, la série de simulation devait être rejouée en modifiant les intervalles. Les résultats présentés ci-dessous correspondent aux simulations pour lesquels l'intervalle a pu être stabilisé.

Pour le jeudi 10 mars, 4 simulations ont été effectuées. Les intervalles des valeurs testées pour u , k_x et w ont été choisies pour être :

- u compris entre 0,29 et 32 m/s avec un pas de 0,5 ;
- k_x compris entre 0,15 et 0,18 véh/m avec un pas de 0,01 ;
- w compris entre 4 et 5 m/s avec un pas de 0,1.

Les paramètres des simulations les plus acceptables sont alors :

TABLE 3.1 – Tableau récapitulatif des valeurs des paramètres des simulations les plus acceptables pour le jeudi 10 mars

Numéro de la simulation	k_x	u	w
1	0,16	31	4,2
2	0,16	31	4,2
3	0,16	30,5	4,2
4	0,16	31	4,2

Ainsi, étant donné la forte répétitivité et stabilité des valeurs des paramètres du diagramme fondamental, ces dernières seront prises égales à :

- $u = 31 \text{ m/s}$
- $k_x = 0,16 \text{ véh/m}$
- $w = 4,2 \text{ m/s}$

Notons que la valeur de u obtenue pour le calage est plus élevée que la vitesse réglementaire sur la portion de route.

Un exemple du résultat du calage est représenté figure 3.8, 3 autres simulations avec les paramètres déterminés ci-dessus sont disponibles en annexe G, page 97.

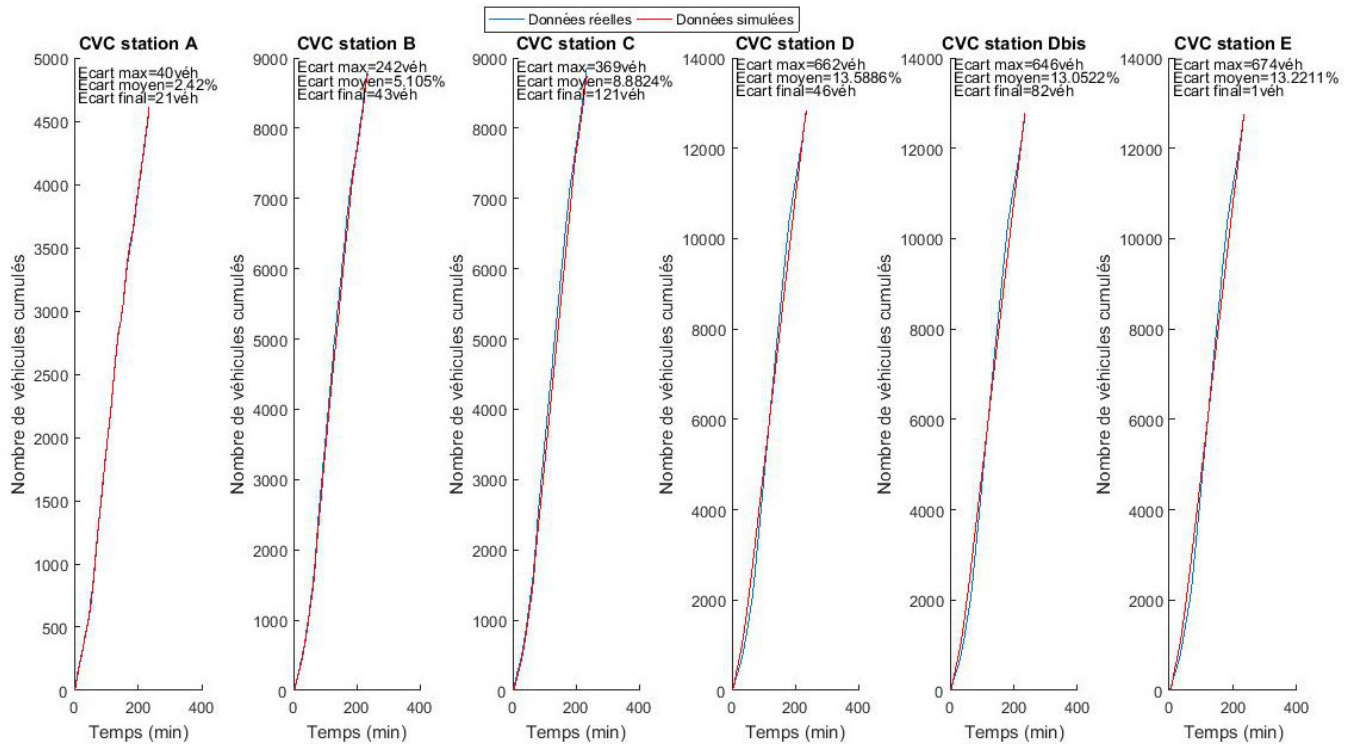


FIGURE 3.7 – CVC d’une simulation pour $u = 31 \text{ m/s}$, $w = 4.2 \text{ m/s}$, $k_x = 0,16 \text{ véh/m}$, une demande de croisement égale à 0.916 véh/s et une répartition de 41% sur la voie lente

Malgré le calage ainsi effectué, l’écart moyen sur chaque station n’est pas inférieur à 10% pour les stations D, D bis et E. L’écart maximal observé n’est pas satisfaisant car reste supérieur à 600 véhicules. En comparaison avec la figure 3.5, la modification des paramètres du diagramme fondamental a permis d’améliorer nettement le calage pour ces 3 stations. On note une diminution de l’ordre des 15% de l’écart moyen. En revanche, on peut noter une détérioration du calage pour les stations A, B et C. Cette dernière n’étant pas significative et voyant la nette amélioration vis-à-vis de la simulation par défaut pour les 3 stations D, D bis et E, le calage sera considéré comme satisfaisant pour le jour de référence du 10 mars.

Lundi 21 mars

De même, en utilisant la même méthodologie, nous avons calé le modèle pour le lundi 21 mars, on obtient alors pour les paramètres du diagramme fondamental les valeurs suivantes :

- $u = 27,5 \text{ m/s}$
- $k_x = 0,16 \text{ véh/m}$
- $w = 4,3 \text{ m/s}$

On remarque que, par rapport au jeudi 10 mars, la vitesse en régime fluide est inférieure pour le lundi 21. On peut supposer que cette différence provient d’une quantité supérieure de poids-lourds circulant le lundi. Ces derniers circulant avec une vitesse plus faible, il font baisser la vitesse en fluide du matin.

Comme pour le jeudi 10 mars, l'écart moyen sur chaque station n'est pas inférieur à 10% pour les stations D, D bis et E, contrairement aux stations A, B et C. Malgré cela, le calage sera considéré comme satisfaisant pour le reste du travail de simulation.

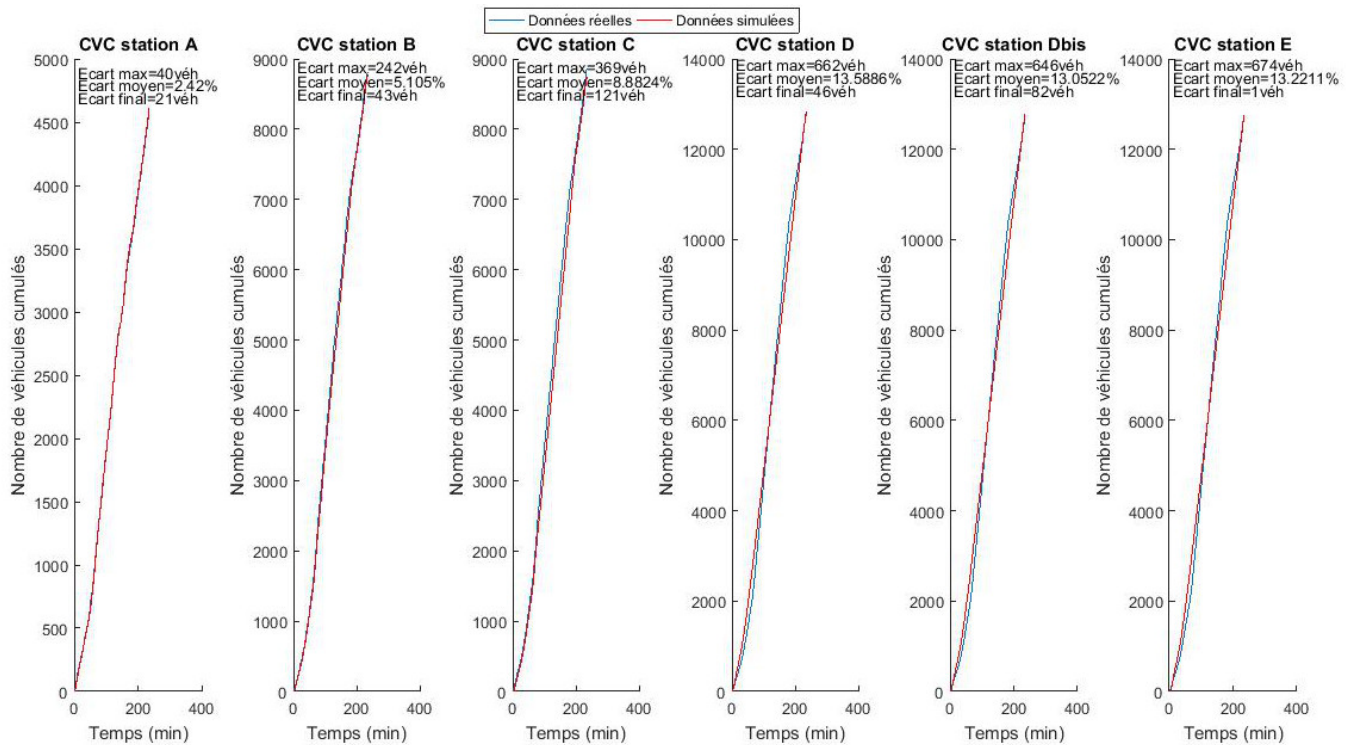


FIGURE 3.8 – CVC d'une simulation pour $u = 27,5 \text{ m/s}$, $w = 4,3 \text{ m/s}$, $k_x = 0,16 \text{ véh/m}$, une demande de croisement égale à 0.916 véh/s et une répartition de 41% sur la voie lente

3.3 Scénario de régulation dynamique des vitesses

3.3.1 Le scénario

Le scénario proposé repose sur l'utilisation de la vitesse tronçon qui sera définie à la section 3.3.2. L'algorithme suit le schéma suivant :

Activation de la régulation

Si la vitesse tronçon est inférieure à un certain seuil S durant 3 minutes consécutives, alors, la vitesse réglementaire sur le canton 1 (cf. schéma 3.1) est réduite à 90 km/h.

Si la régulation dynamique de vitesses est active durant x min consécutives alors la vitesse réglementaire sur le canton 2 est abaissée à 90 km/h.

Désactivation de la régulation

Si la vitesse tronçon est supérieure au seuil S pendant 3 minutes consécutives, alors, la vitesse réglementaire des cantons 1 et 2 basculent à 110 km/h.

Concrètement, lors de l'abaissement à 90 km/h de la vitesse, les PMV affichant l'interdiction de dépassement des poids lourds, afficheront la nouvelle limitation de vitesse. Ces derniers ne sont prévus que pour afficher un seul signal. C'est pourquoi, l'IDPL sera automatiquement désactivée. A l'inverse, lors du basculement à 110 km/h, les PMV afficheront de nouveau le panneau relatif à l'interdiction de dépassement. Comme nous l'avons indiqué dans le chapitre 2, l'IDPL est désactivée manuellement durant la période de pointe. Avec la mesure de régulation de vitesses, elle sera désactivée de façon automatique.

3.3.2 Vitesse tronçon

Le scénario que nous avons élaboré se déclenche en fonction d'un indicateur de l'état du trafic sur un tronçon, appelé vitesse tronçon. Cette vitesse correspond à la vitesse calculée par le système ALLEGRO pour déterminer les temps de parcours sur les tronçons, ces derniers sont alors affichés sur les PMV à l'entrée du tronçon considéré.

De façon générale, considérons un tronçon d'une autoroute comprenant n stations de comptage, à chaque station i correspond un arc de longueur l_i . A la minute j , la vitesse tronçon V^j est définie comme la moyenne des vitesses lissée sur 3 min pondérée par la longueur des arcs des stations considérées. Mathématiquement, la vitesse tronçon à la minute j est :

$$V^j = \frac{\sum_{i=1}^n v_i^j l_i}{\sum_{i=1}^n l_i}$$

avec

V^j la vitesse tronçon à la minute j

v_i^j la vitesse, lissée sur 3 min, à la minute j de la station i .

l_i la longueur de l'arc de la station i

Le temps de parcours est alors calculé grâce à la longueur du tronçon, celle qui est affichée sur les PMV est arrondie à la minute supérieure.

Dans notre cas d'étude, la vitesse tronçon pour le déclenchement de la régulation dynamique des vitesses est calculée avec les données vitesses des stations C, D, D bis et E (figure 3.1, page 52).

3.3.3 Justification du choix de l'indicateur

Afin de justifier du choix de l'indicateur, nous avons pris le cas de l'A25. Cet axe autoroutier fait l'objet d'une régulation dynamique de vitesses. L'algorithme de régulation n'utilise pas la vitesse tronçon comme indicateur. C'est pourquoi, sur la figure 3.9, nous avons superposé la vitesse tronçon (en rouge) avec la période d'activation de la régulation (couleurs vives). On s'aperçoit que le déclenchement de la mesure de régulation dynamique de trafic (période avec des couleurs vives), concorde avec la baisse de la vitesse tronçon. Inversement, la désactivation de la mesure intervient pendant l'augmentation de la vitesse tronçon. Ainsi, ces résultats montrent qu'un seuil de la vitesse tronçon peut définir l'activation et la désactivation de la mesure de régulation.

De plus, on remarque que durant le fonctionnement de la régulation des vitesses, la vitesse tronçon n'atteint pas le seuil. Ainsi, si la régulation dynamique des vitesses fonctionnait en suivant l'indicateur de vitesse tronçon, les activations et désactivations ne seraient pas intempestives.

C'est pourquoi, nous avons choisi la vitesse tronçon comme indicateur d'activation et de désactivation de la mesure.

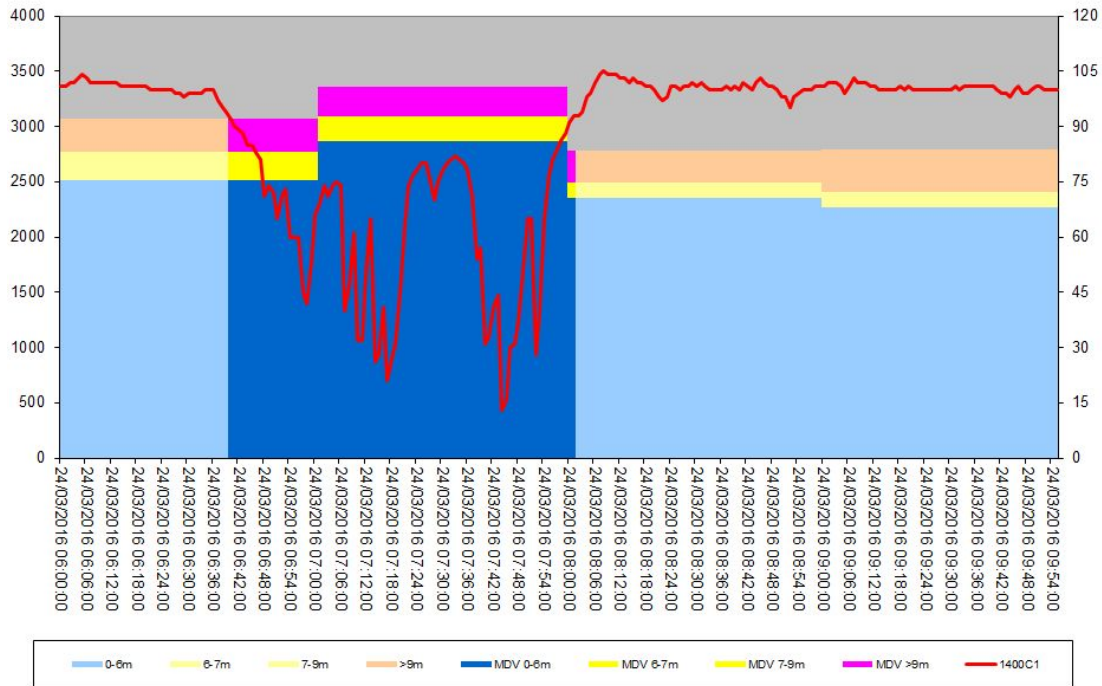


FIGURE 3.9 – Débit horaire et Vitesse tronçon en fonction du temps, de la station de l'arc A0025021720 sur l'A25 le 24/03/2016 - Source : David GIL

3.3.4 Détermination des paramètres S et x

S correspond au seuil de vitesse pour l'activation et la désactivation de la régulation. x est le décalage temporel entre l'activation du canton 1 et l'activation du canton 2. Un seuil S trop grand pourrait provoquer des déclenchements intempestifs de la régulation, à l'inverse une valeur de seuil trop faible activerait la régulation de vitesses trop tardivement, la congestion s'étant déjà installée. La valeur de x doit quant à lui correspondre au décalage d'apparition de la congestion entre le canton 1 et le canton 2.

Pour déterminer S et x, nous avons représenté les chroniques des vitesses tronçons entre 6h et 10h pour nos deux jours de référence.

10 mars

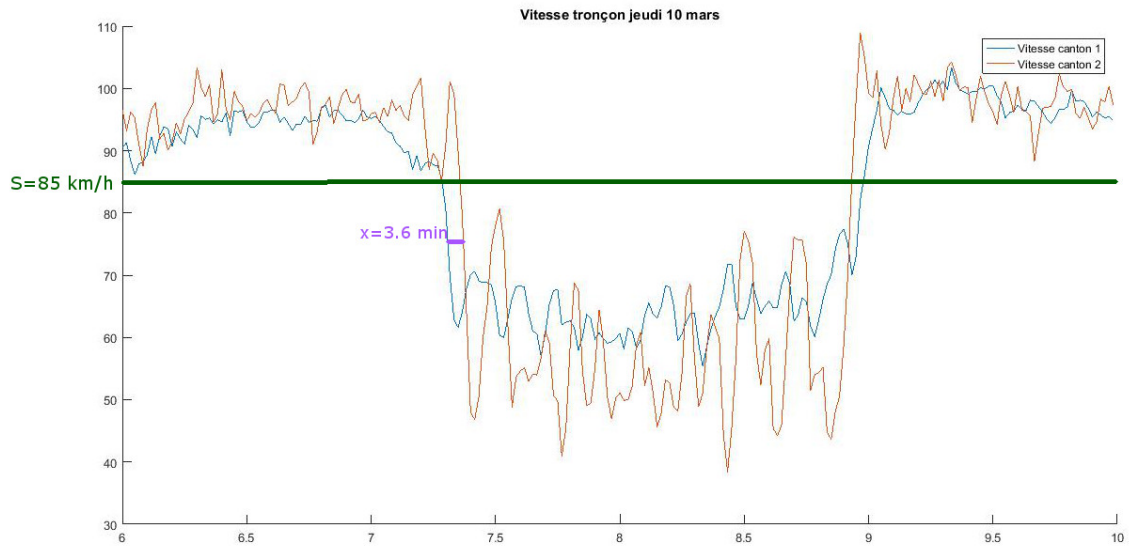


FIGURE 3.10 – Vitesse tronçon en fonction du temps pour le jeudi 10 mars

Pour le jeudi 10 mars, (cf. figure 3.10) la vitesse tronçon minimale évitant des activations et désactivations intempestives est estimée à 85 km/h. Le décalage temporel mesuré est lui estimé à 3,6 min.

21 mars

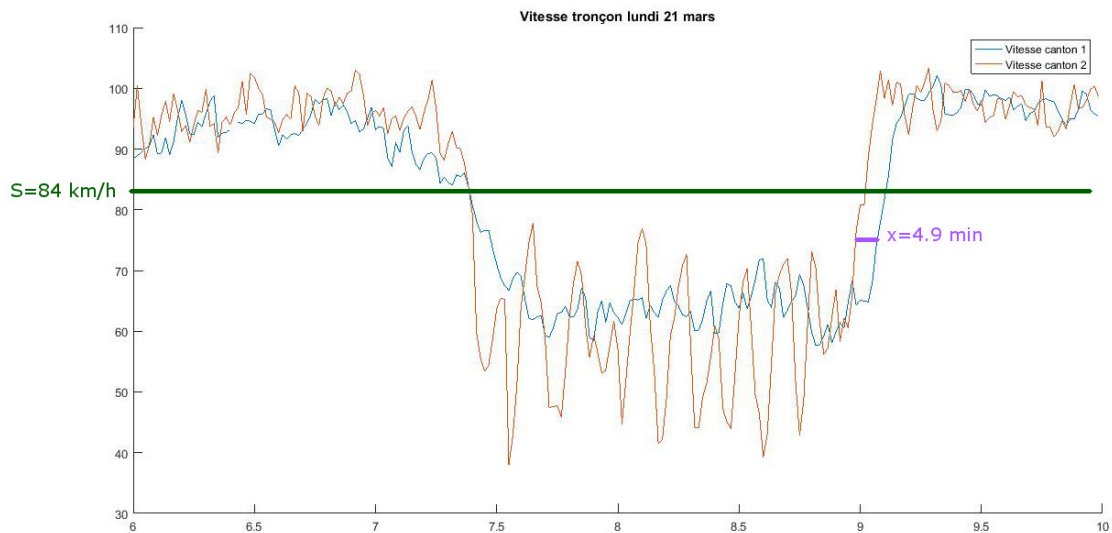


FIGURE 3.11 – Vitesse tronçon en fonction du temps pour le lundi 21 mars

Le seuil de vitesse est estimé à 84 km/h. En revanche, l'estimation du décalage temporel est estimé à 4,9 min.

Ainsi, aux vues des estimations sur les deux jours de référence, nous avons choisi un seuil S égal à 85 km/h et x de 5 min.

3.4 Evaluation du scénario de régulation dynamique des vitesses

3.4.1 Choix des indicateurs d'évaluation

Etant donné les données en sortie de l'outil mésoscopique, nous avons choisi de comparer le cas régulé du cas non régulé en fonction de 3 indicateurs :

- Par itinéraire possible, le temps de parcours moyen qui a pu être gagné avec la régulation ;
- Par itinéraire, la durée de congestion en moins grâce à la régulation ;
- Par station de comptage, la proportion de véhicules supplémentaires qui ont pu passer par période de 6 min grâce à la régulation

Afin de permettre cette comparaison entre situation régulée et non régulée, nous avons choisi de travailler avec des moyennes. Ainsi, nous avons effectué 6 réplifications de simulations non régulées et 6 réplifications régulées, les temps de parcours de chacune et le débit de chaque station ont été moyennés. Les écart-types et les représentations graphiques de la moyenne de chaque donnée sont présentés en annexe I, page 105. Elles permettent de se rendre compte que les valeurs des temps de parcours au cours du temps sont assez dispersés selon les simulations contrairement au débit, qui est très stable.

3.4.2 Résultats de la simulation

Simulation sur le 10 mars

Sur les 6 simulations où la régulation est activée, 5 connaissent des activations de la régulation intempestives sur des durées allant de 1 à 3 min. Ces activations ont lieu seulement quelques minutes avant l'activation de la régulation sur toute la durée de la congestion. Le tableau 3.2 récapitule l'ensemble des dates d'activation et de désactivation de la mesure de régulation. Ces activations intempestives se déroulant sur de courtes périodes, on peut penser qu'elles ont peu d'influence sur la vitesse des véhicules. Cependant, elles démontrent que le seuil de vitesse tronçon S n'est pas suffisant pour éviter ces déclenchements. Un autre indicateur pourrait être pris en compte, dans un scénario plus élaboré, tel que le taux d'occupation.

TABLE 3.2 – Tableau récapitulatif des heures d’activation/désactivation de la régulation pour le jeudi 10 mars

Numéro de la simulation	Heure d’activation	Heure de désactivation
1	7h15	7h16
1	7h19	9h06
2	7h20	7h21
2	7h23	7h24
2	7h25	9h05
3	7h16	7h17
3	7h18	9h07
4	7h16	7h20
4	7h21	9h09
5	7h15	7h18
5	7h20	9h09
6	7h19	9h10

Néanmoins, on remarque que les dates d’activation et de désactivation de la mesure sont stables sur les 6 simulations (activation vers 7h20 et désactivation vers 9h07).

En termes de performances, d’après les débits 6 min des 6 stations fictives, la régulation semble permettre le passage d’un plus grand nombre de véhicules. D’après la figure 3.12, la station A mesure la même demande dans le cas d’une simulation sans régulation et avec régulation car la station est située sur un lien non congestionné. De plus, la station A mesure la demande provenant de la frontière belge, elle a servi à déterminer la demande à l’entrée 1. Or, l’outil mésoscopique laisse la possibilité de choisir si la simulation de la demande est déterministe ou stochastique. Par défaut elle était indiquée comme déterministe, c’est pourquoi, malgré les 6 simulations, la demande mesurée par la station A est toujours la même.

Les stations B et C indiquent qu’en moyenne la même quantité de véhicules est captée durant les 4 heures de simulation. En revanche, on remarque une diminution des fluctuations du nombre de véhicules dans le cas d’une simulation avec régulation.

Tout comme pour les stations D, D bis et E, le débit de la station C diminue plus tôt dans le cas régulé que dans le cas non régulé. En outre, plus de véhicules peuvent passer (environ 1% en moyenne) au niveau des stations D, D bis et E dans le cas des simulations avec régulation. De plus, on remarque que les courbes de débit de ces 3 stations sont similaires car le lien comprenant ces 3 stations ne compte aucune entrée ni aucune sortie.

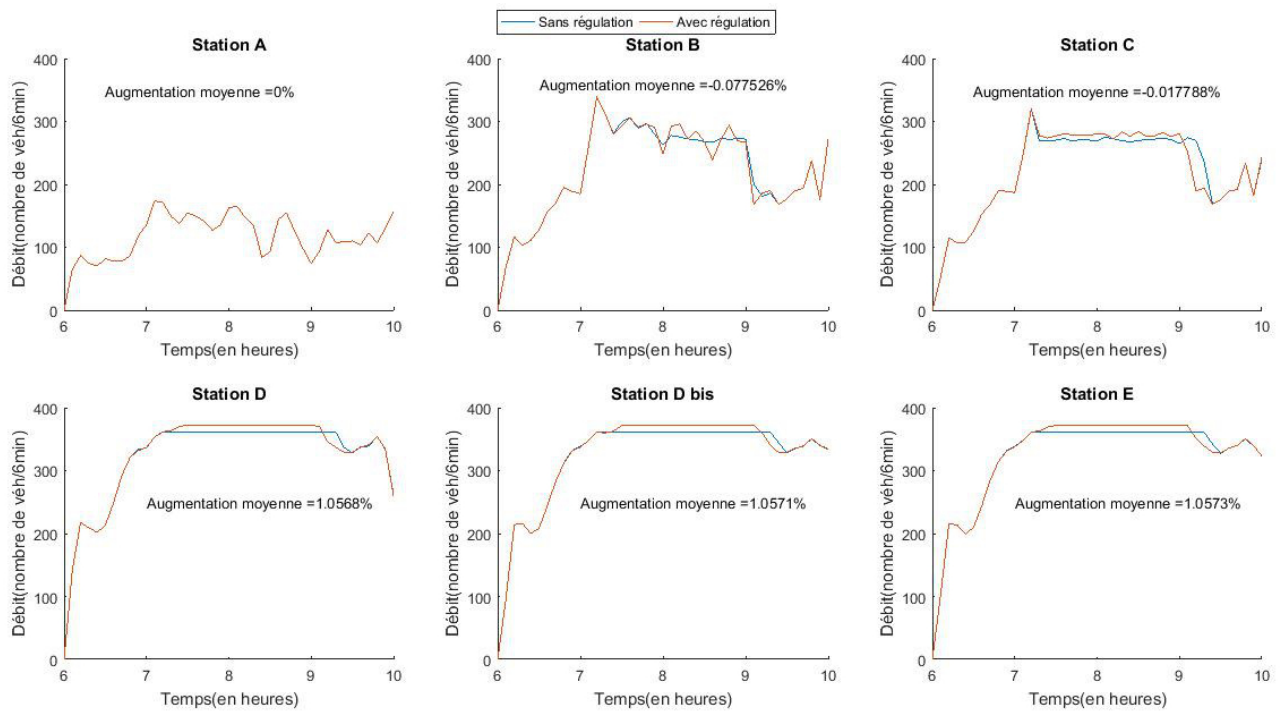


FIGURE 3.12 – Débit moyen 6 min pour chaque station pour le jeudi 10 mars

L’outil mésoscopique ne permet pas d’extraire des vitesses au niveau des stations. Afin de pouvoir dire si les liens sont congestionnés, nous utiliserons les temps de parcours de chaque itinéraire. En effet, le temps de parcours reflète la vitesse moyenne sur un itinéraire.

Pour les véhicules provenant de l’entrée 1 (Belgique) et de l’entrée 2 (échangeur 16 et 17), le temps de parcours est globalement diminué (cf. figure 3.13) dès l’activation de la régulation de vitesses. En effet, on remarque un décrochage entre le temps de parcours dans le cas régulé et dans le cas non régulé dès que la mesure de régulation est activée. On remarque le même décrochage pour les temps de parcours des véhicules provenant de l’entrée 3. Cependant, pour ces mêmes véhicules, l’amélioration en termes de temps de parcours est nettement moins flagrante que pour les deux situations précédentes. De plus, on remarque que le temps de parcours en fin de simulation que ce soit dans le cas régulé ou non régulé, ne retrouve pas sa valeur hors congestion. Il semble qu’il y ait d’autres ralentissements sur l’itinéraire 3 après la période de pointe.

Dans les trois cas, on observe un décalage de la chute du temps de parcours. On fait l’hypothèse que la durée de la congestion correspond au temps pour laquelle le temps de parcours n’est pas minimal. Avec cette définition, il nous est impossible de dire quand se termine l’épisode de congestion pour les véhicules provenant de l’entrée 3. Les durées de la congestion pour la simulation du 10 mars et pour les véhicules en provenance de l’entrée 1 et 2 sont résumées dans le tableau 3.3.

TABLE 3.3 – Tableau récapitulatif des durées de la congestion, jeudi 10 mars

Véhicules provenant de l'entrée	Scénario sans régulation	Scénario avec régulation
1	2h12	2h05
2	2h15	2h05

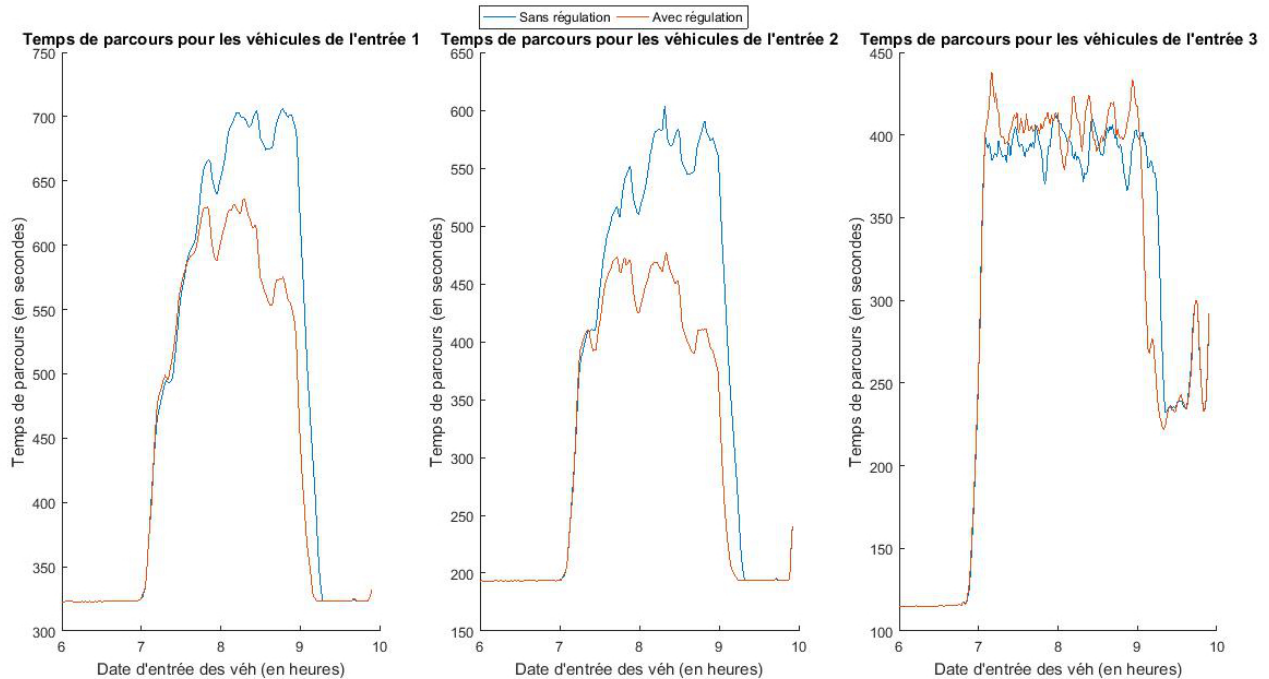


FIGURE 3.13 – Chroniques des temps de parcours moyens pour le jeudi 10 mars

Si on regarde plus précisément ce qui se passe en termes de distributions des temps de parcours, d'après la figure 3.14, on remarque qu'il n'y pas de temps de parcours dépassant les 640 s pour les véhicules provenant de l'entrée 1 et les 480 s pour les véhicules provenant de l'entrée 2 dans le cas régulé. Le gain moyen de temps de parcours par véhicule est de 36 s pour les véhicules de l'entrée 1 et de 51 s pour les véhicules de l'entrée 2. Les bénéfices de la mesure de régulation sont moins visibles pour les véhicules de l'entrée 3, en effet, le temps de parcours moyen est le même avec ou sans régulation. De plus, on peut observer que dans le cas régulé, certains véhicules ont des temps de parcours supérieurs au maximum du temps de parcours sans régulation.

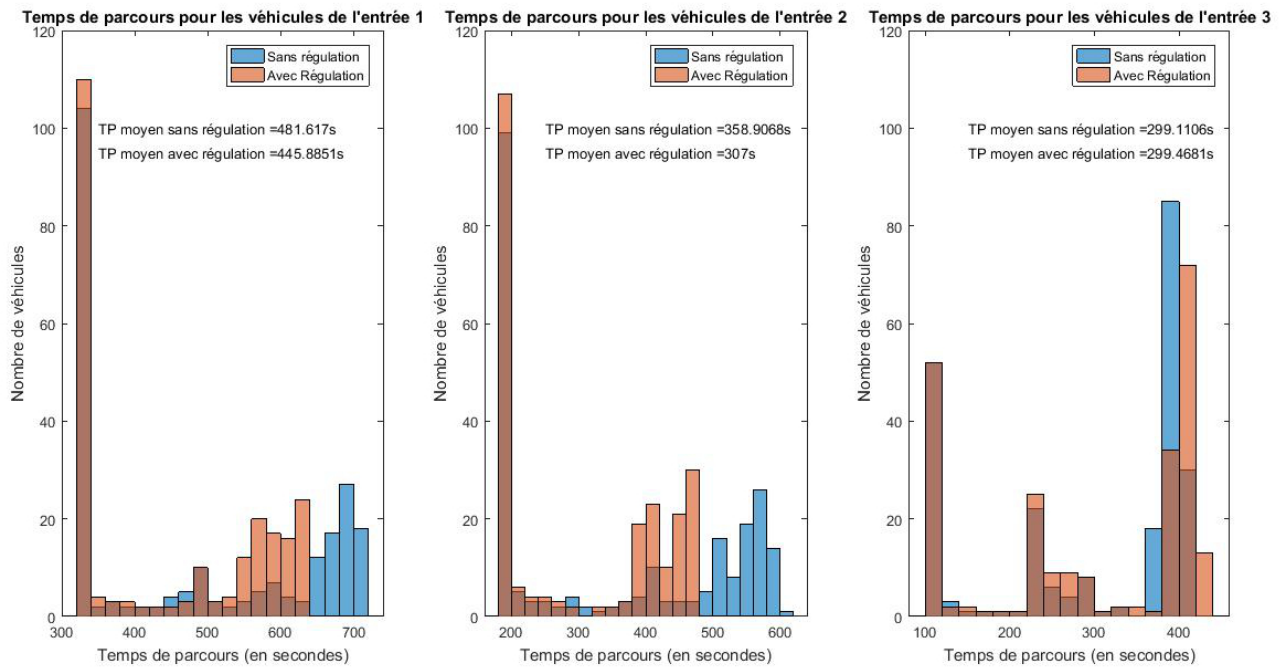


FIGURE 3.14 – Histogrammes des temps de parcours moyen pour chaque itinéraire pour le jeudi 10 mars

La régulation entraîne une redistribution des temps de parcours. En effet, la figure 3.15 illustre ce phénomène. Pour les véhicules de l'entrée 1 et de l'entrée 2, on remarque que pour les 20% de véhicules ayant les temps de parcours les plus élevés, le gain de temps est respectivement d'environ 84 s et 104s. Ainsi, la mesure de régulation de vitesses est la plus bénéfique pour les véhicules ayant les temps de parcours les plus élevés. Néanmoins, 60% des véhicules voient leur temps de parcours réduit. Cette conclusion ne peut pas être appliquée aux véhicules de l'entrée 3. En effet, seulement 25% des véhicules voient leur temps de parcours réduit et pour 50% leur temps de parcours est augmenté. On estime cette augmentation à 11s.

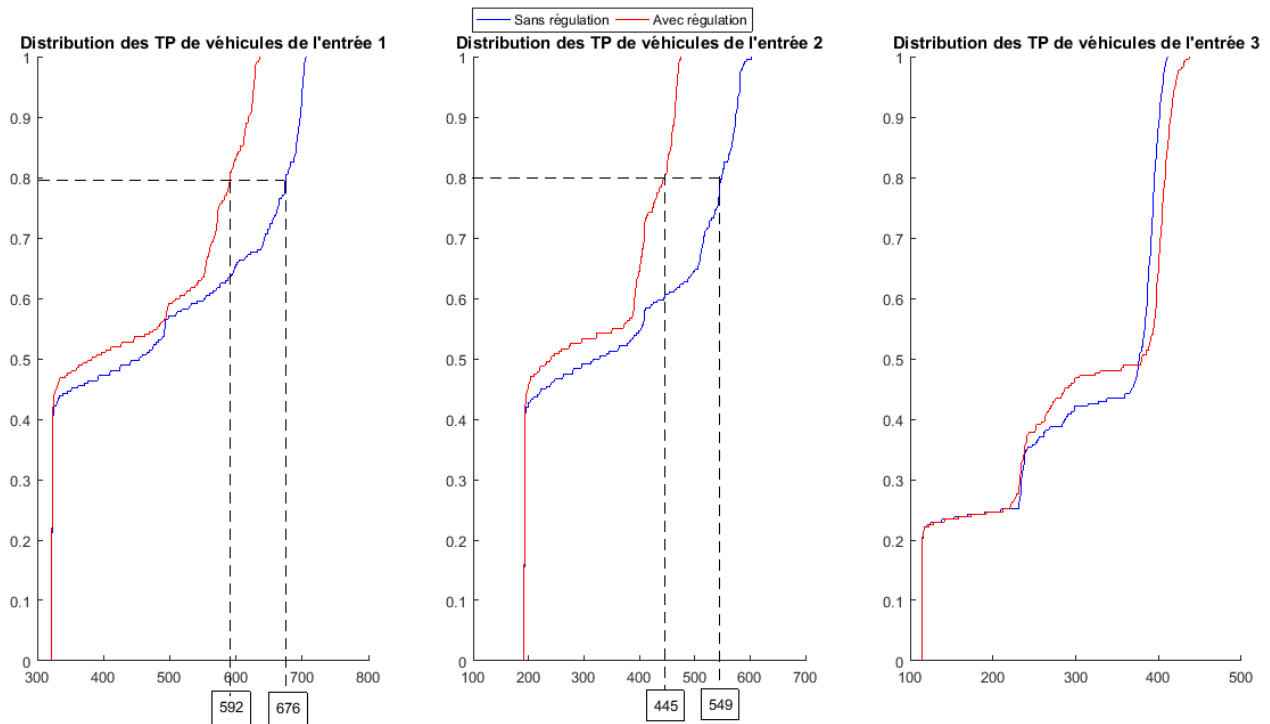


FIGURE 3.15 – Distribution des temps de parcours moyen pour chaque itinéraire pour le jeudi 10 mars

Ainsi, d'après les résultats de la simulation, il semble que la régulation dynamique des vitesses ait un effet positif, en termes de temps de parcours, pour les véhicules provenant de l'entrée 1 et de l'entrée 2, c'est-à-dire, pour les véhicules entrant sur l'autoroute avant le lieu d'apparition de la congestion (situé au niveau de l'insertion des véhicules de l'entrée 3 sur la section courante). De plus, la régulation permet le passage d'1% de véhicules en plus en aval de la congestion. On peut ainsi supposer que la chute de capacité engendrée au niveau de l'insertion de l'entrée 3 (échangeur 15) est réduite grâce à la régulation. Cependant, en moyenne, les véhicules provenant de l'entrée 3 ne connaissent ni une amélioration ni une détérioration de leur temps de parcours.

Les résultats obtenus à partir des simulations sur la demande du lundi 21 mars sont similaires. Notons toutefois la stabilité du déclenchement de la régulation pour ce jour de simulation. Cette stabilité est étonnante, car d'après la section 3.3.4, le paramètre S aurait dû être pris inférieur à 85km/h pour éviter les déclenchements intempestifs.

Simulation sur le 21 mars

TABLE 3.4 – Tableau récapitulatif des heures d’activation/désactivation de la régulation pour le lundi 21 mars

Numéro de la simulation	Heure d’activation	Heure de désactivation
1	7h22	9h09
2	7h22	9h11
3	7h19	9h09
4	7h21	9h04
5	7h20	9h11
6	7h23	9h09

On retrouve les mêmes heures d’activation et de désactivation de la régulation que pour les simulations sur le jeudi 10 mars.

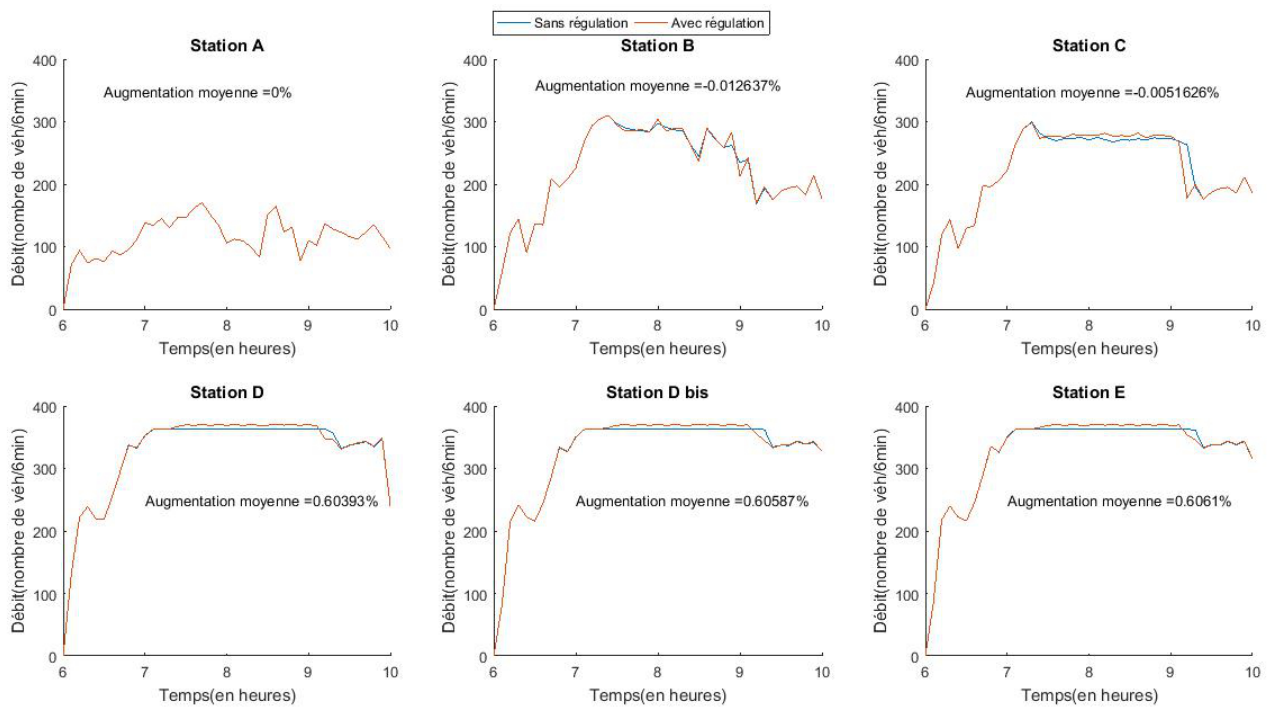


FIGURE 3.16 – Débit moyen 6 min lundi 21 mars

En revanche, sur ce jour du 21 mars, l’augmentation moyenne du nombre de véhicules au niveau des stations D, Dbis et E n’est plus que de 0,6% contre 1% précédemment.

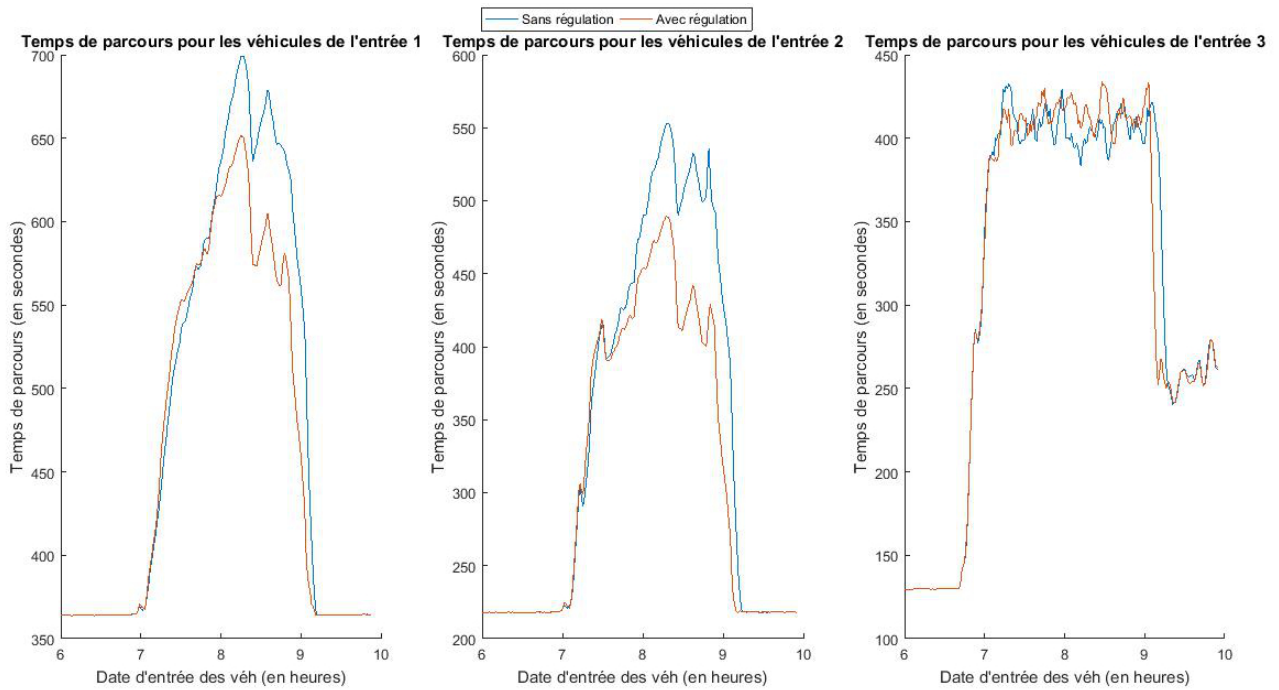


FIGURE 3.17 – Chroniques des temps de parcours moyens pour le lundi 21 mars

TABLE 3.5 – Tableau récapitulatif de la durée de la congestion, lundi 21 mars

Véhicules provenant de l'entrée	Scénario sans régulation	Scénario avec régulation
1	2h06	2h03
2	2h06	2h01

Globalement, on retrouve une diminution du temps de parcours des véhicules en provenance des entrées 1 et 2 lorsque la régulation est activée. Cependant, on peut observer que pour des dates d'entrées sur le réseau égales, le temps de parcours avec régulation est supérieur au temps de parcours sans régulation dans le cas de l'entrée 1. Ce phénomène n'était pas observé précédemment. Il semble que la baisse de la vitesse ait provoquée une augmentation du temps de parcours plus rapide que dans le cas d'une congestion. Cela signifie que la régulation de vitesses peut empirer les effets pour les automobilistes dans le cas où la congestion met plus de temps pour remonter en amont. Cependant, ce phénomène n'est visible qu'au début de l'augmentation du temps de parcours car en moyenne, (cf. figure 3.18), les véhicules en provenance de l'entrée 1 gagnent 18s. Les véhicules de l'entrée 2 gagnent quant à eux 25s en moyenne. Les résultats pour les véhicules en provenance de l'entrée 3 restent mitigés pour ce jour de simulation. On retrouve toujours un temps de parcours non minimal en fin de congestion pour les véhicules de cette entrée.

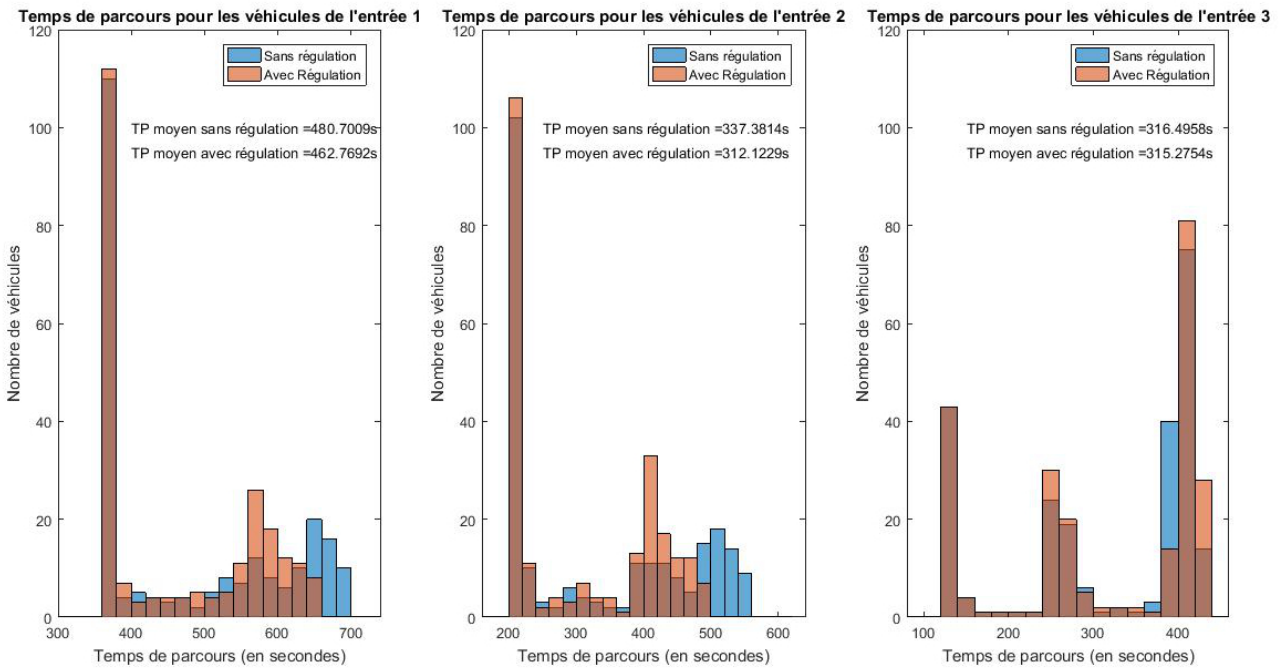


FIGURE 3.18 – Histogrammes des temps de parcours moyens pour chaque itinéraire pour le lundi 21 mars

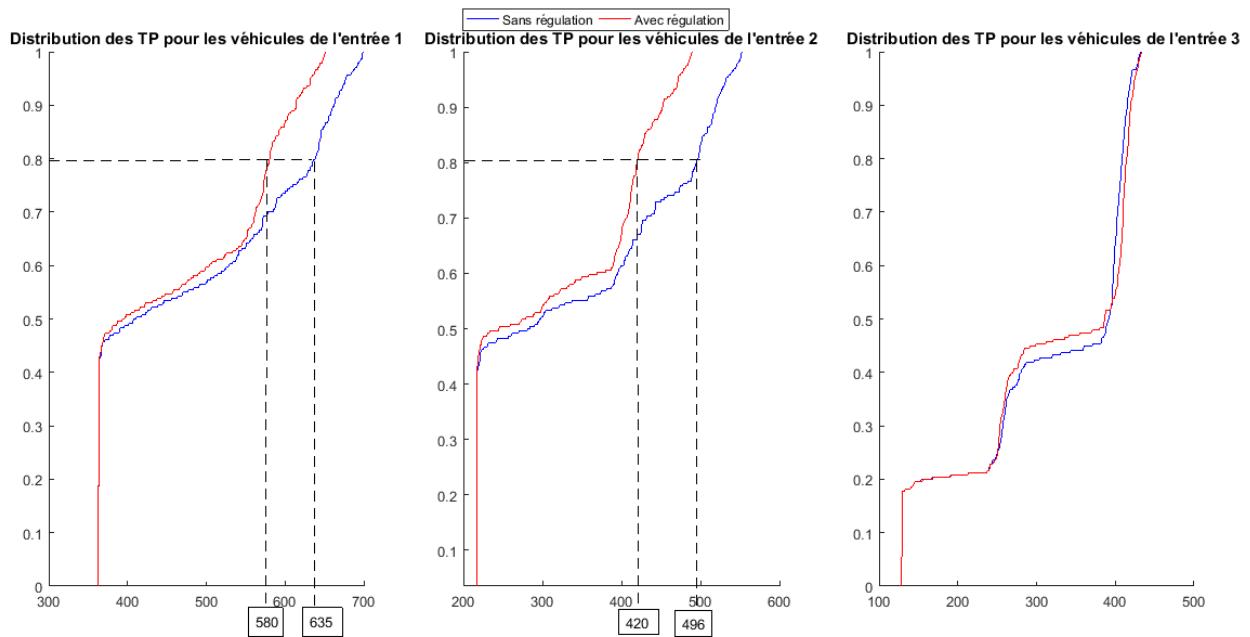


FIGURE 3.19 – Distribution des temps de parcours moyens pour chaque itinéraire pour le lundi 21 mars

Aux regards des distributions des temps de parcours pour les véhicules en provenance de l'entrée 1 et 2, l'amélioration des temps de parcours pour les 20% de véhicules ayant les temps de parcours les plus élevés, est respectivement de 55s et 76s. Cette amélioration est inférieure aux résultats obtenus précédemment. En effet, la vitesse fluide u est plus faible pour le 21 mars que pour les simulations du 10 mars. Ainsi, sans régulation, le temps de parcours pour le lundi 21 mars est supérieur au temps

de parcours du 10 mars. C'est pourquoi, le gain de temps n'est pas aussi significatif entre les deux jours de simulation.

Par conséquent, d'après les indicateurs (résumés dans le tableau 3.6), le scénario de régulation apporte positivement une réponse aux problèmes de saturation de l'infrastructure. Cependant, nous avons décidé de comparer la moyenne des simulations sans régulation avec la moyenne des simulations avec régulation. Ainsi, les résultats sont à lire aux regards des valeurs des écart-types moyens (disponibles en annexe I) et maximaux. En effet, pour les débits sur 6 min, on remarque que l'écart-type moyen est négligeable par rapport au débit moyen. Au maximum, l'écart-type représente 0,12% du débit moyen. C'est pourquoi, on peut supposer que le pourcentage des véhicules supplémentaires est stable quelque soit la réplication. En revanche, les écart-types des temps de parcours sur les 6 réplications sont assez significatifs pour interpréter les résultats de la simulation avec précaution. De plus, le scénario défini est perfectible, en effet, on a pu remarquer des fonctionnements intempestifs sur la simulation du 10 mars. Un autre critère de déclenchement pourrait être envisagé afin d'éviter cela. On pense notamment au taux d'occupation ou au débit.

TABLE 3.6 – Tableau récapitulatif des résultats

Indicateur	Station ou itinéraire	Résultats pour le jeudi 10 mars	Résultats pour le lundi 21 mars
% de véhicules supplémentaires	A	0	0
	B	-0,07	-0,01
	C	-0,02	0
	D	1,06	0,60
	D bis	1,06	0,61
	E	1,06	0,61
TP moyen gagné	1	36 s	18 s
	2	51 s	25 s
	3	0 s	-1 s
Temps gagné en congestion	1	6 min	3 min
	2	10 min	5 min
	3	non mesurable	non mesurable

Conclusion

Le scénario de régulation de vitesses, défini à la section 3.3.1 a été évalué grâce à un outil mésoscopique aux regards de trois indicateurs. Il en ressort que le scénario considéré est à améliorer pour éviter les déclenchements intempestifs mais qu'il favorise une baisse du temps de parcours pour les usagers en provenance des entrées 1 et 2 et une augmentation du débit. Cette évaluation a été possible grâce à diverses hypothèses que nous allons rappeler ci-dessous.

Tout d'abord, l'évaluation avec un outil mésoscopique nécessite une modélisation du réseau. Nous avons fait le choix de modéliser le réseau avec seulement 3 entrées (correspondant à la frontière belge et à l'échangeur 18, aux échangeurs 16 et 17 et à l'échangeur 15) et une sortie (correspondant à la sortie vers la RNO et la partie sud de l'autoroute). Avec cette schématisation, nous introduisons un biais quant à l'insertion de véhicules depuis les échangeurs 16 et 17. En effet, dans la réalité, des insertions peuvent s'opérer simultanément depuis ces deux échangeurs. Dans notre modèle, un seul véhicule peut rentrer sur la section courante à la fois. Ainsi, la congestion observée sur la bretelle modélisant les échangeurs 16 et 17 a été sur-évaluée par rapport à la réalité. Une partie de cette remontée de file devrait se situer entre les échangeurs 16 et 17.

La deuxième hypothèse concerne l'élaboration de la demande. Ne possédant pas de stations sur toutes les bretelles, nous avons soustrait la demande entre les stations amont et aval de la bretelle pour estimer son débit. Par cette méthode, la somme des demandes entrantes est exactement égale à la demande en sortie du réseau. Cette approche masque les problèmes de détection des stations. En effet, les erreurs de mesures des stations vont être traduites par une sur-évaluation ou sous-évaluation de la demande sur la bretelle.

De plus, les paramètres liés au trafic ont été considérés comme identiques sur toute la section. Néanmoins, on sait que la vitesse réglementaire sur les bretelles est différente de celle de la section courante. Etablir des paramètres sur les bretelles n'était pas envisageable car nous n'avions aucune donnée pour permettre de caler ces paramètres ou tout au moins de les estimer. En outre, se focaliser sur 5 paramètres facilitait le calage et les temps de calculs des simulations. L'avantage de caler le modèle grâce aux CVCs est d'utiliser une seule donnée en sortie : le nombre de véhicules mesurés chaque minute. Le calage effectué aurait nécessité d'être amélioré, notamment en réduisant les intervalles de recherche pour trouver des valeurs des paramètres plus finement.

De plus, parcourir l'ensemble des valeurs des intervalles des 3 paramètres du diagramme fondamental était très chronophage. Il existe des méthodes d'optimisation de parcours de plan d'expériences

qui auraient pu permettre de réduire le temps pour le calage.

Une autre hypothèse concerne directement la lecture des résultats. En effet, nous n'avons pas comparé les débits 6 min réels avec les débits 6 min simulés où la régulation est enclenchée. Pourtant, le système ALLEGRO fournissait les débits 6 min pour chaque station. Nous avons fait le choix de comparer les simulations avec ou sans régulation entre elles. En effet, nous voulions évaluer le scénario en termes de temps de parcours car il s'agit d'un indicateur facilement interprétable en termes de conséquences pour les usagers. Le système ALLEGRO n'ayant pas fourni les temps de parcours pour les jours considérés, nous avons décidé de simuler l'état de trafic réel pour calculer des temps de parcours avec la plateforme mésoscopique. Pour plus de cohérence, nous avons décidé de simuler aussi les débits 6 min pour chaque station pour faire la comparaison. Cette approche a l'avantage de s'exempter des approximations liées au calage.

Ainsi, en effectuant plusieurs suppositions, nous avons pu donner une évaluation *a priori* du scénario de régulation défini précédemment. Cette évaluation est évidemment perfectible. En effet, nous avons remarqué que les 3 indicateurs ne donnaient pas exactement les mêmes résultats pour les deux jours de simulation. Outre la demande qui n'est pas exactement la même, le paramètre u est inférieur dans le cas du lundi 21 mars. Il semble que le temps de parcours soit sensible à ce paramètre. C'est pourquoi, une analyse de sensibilité serait à envisager pour évaluer les résultats obtenus dans ce présent rapport.

Annexe A

Formules pour la reconstitution des données 6 min à partir des données 1 min

A.1 Reconstitution du débit

Le débit sur 6 min par voie est obtenu en sommant le débit lissé 1 min par voie pour les 6 minutes de la période d'agrégation considérée.

$$Q_k^j = \sum_{i=1}^6 q_i^j$$

avec

Q_k^j le débit sur la voie j pour la période d'agrégation k,

q_i^j le débit sur la voie j à la minute lissée i.

Pour obtenir le débit sur 6 min par arc, il faut sommer les données sur 6 min par voie.

$$Q_k = \sum_j Q_k^j$$

avec Q_k le débit de l'arc pour la période k

A.2 Reconstitution de la vitesse

La vitesse par voie s'obtient à partir d'une moyenne harmonique :

$$V_k^j = \frac{Q_k^j}{\sum_{i=1}^6 (q_i^j / v_i^j)}$$

avec

V_k^j la vitesse pour la période k de la voie j,

Q_k^j le débit sur la voie j pour la période d'agrégation k,

q_i^j le débit sur la voie j à la minute lissée i,

v_i^j la vitesse sur la voie j à la minute lissée i.

De même, la vitesse par arc s'obtient à partir d'une moyenne harmonique :

$$V_k = \sum_j \frac{1}{V_k^j}$$

avec V_k la vitesse pour l'arc considéré pour la période k

Annexe B

Comparaison des données stations et des données reconstituées

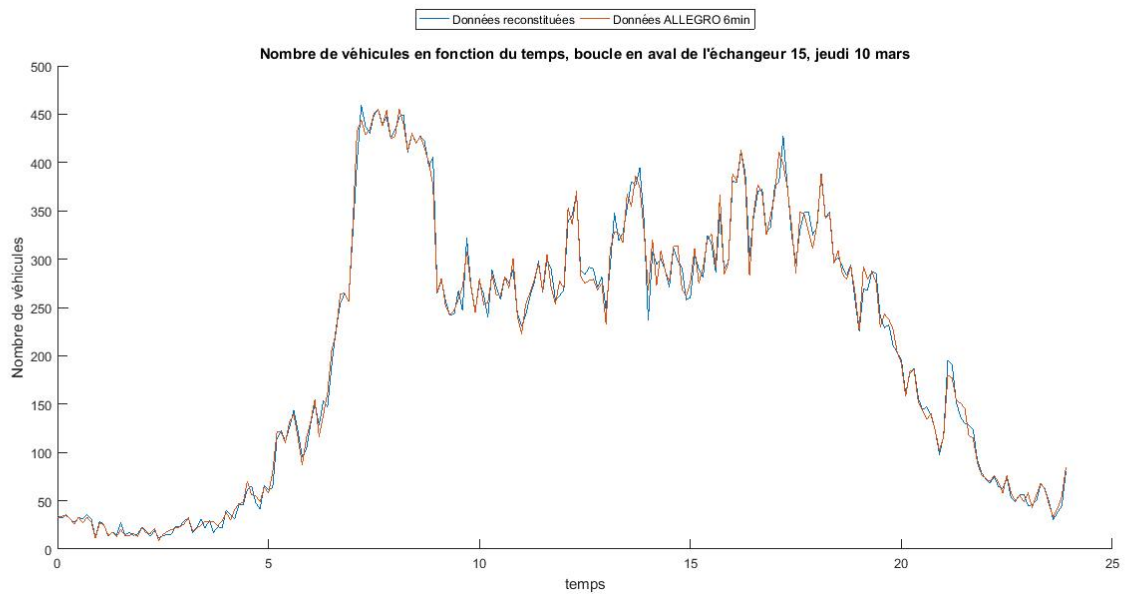


FIGURE B.1 – Comparaison des débits par sens pour le jeudi 10 mars

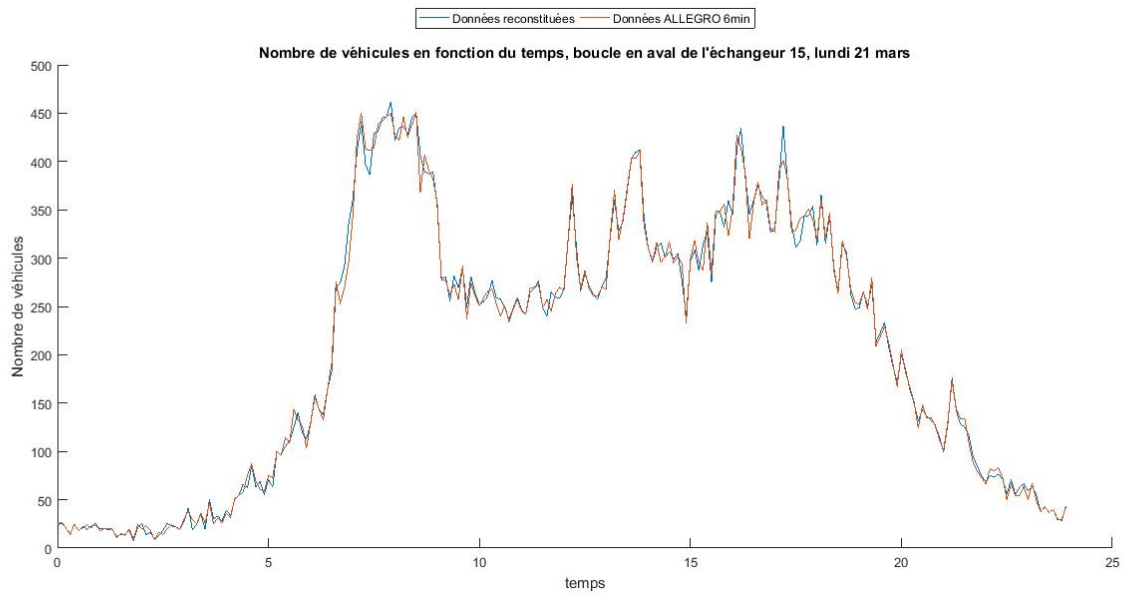


FIGURE B.2 – Comparaison des débits par sens pour le lundi 21 mars

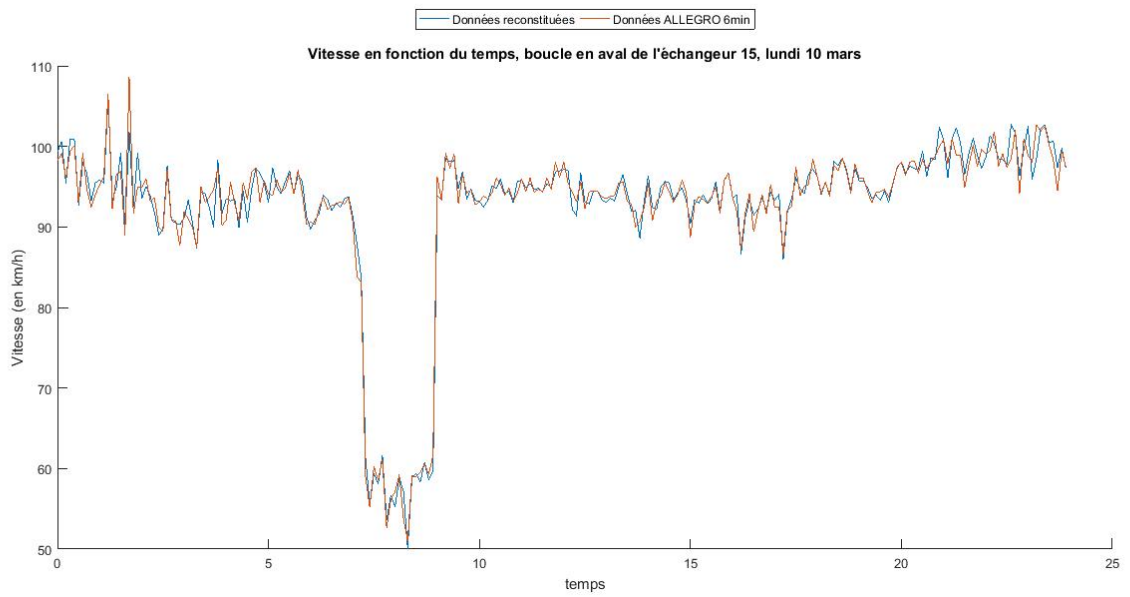


FIGURE B.3 – Comparaison des débits par sens pour le jeudi 10 mars

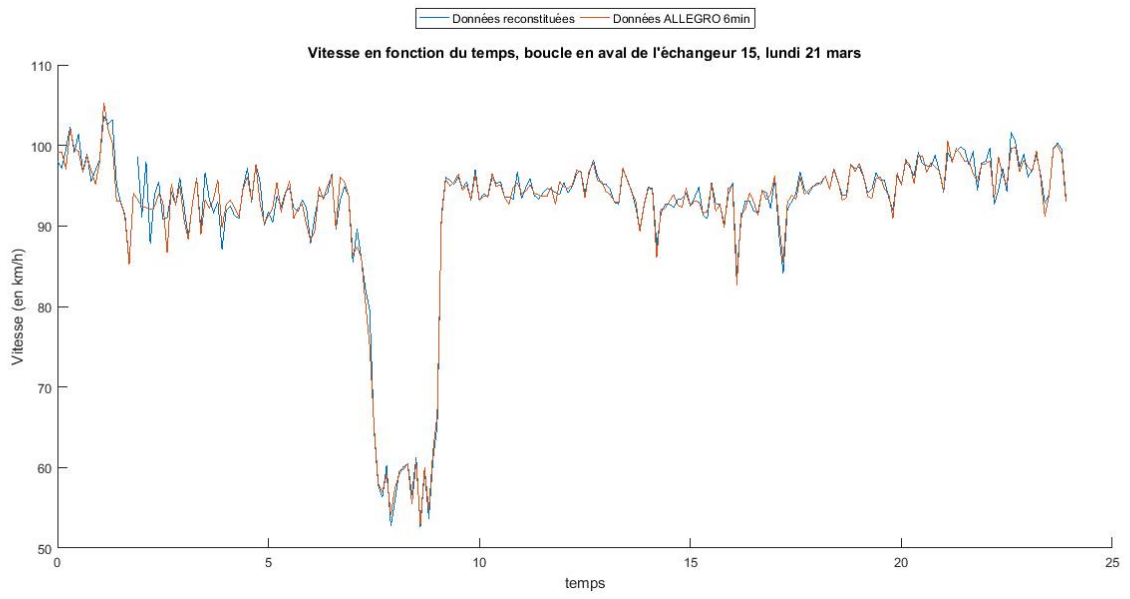


FIGURE B.4 – Comparaison des débits par sens pour le lundi 21 mars

Annexe C

Tableau de la demande par jour

TABLE C.1 – Tableau de la demande par jour de semaine pour les VL

Station	Lundi 29/02	Mardi 01/03	Jeudi 03/02	Vendredi 04/03	Mardi 15/03	Lundi 21/03	Jeudi 24/03	Moyenne	Ecart-type
A	15 524	14 570	15 913	17 277	15 395	15 531	16 574	15 826,29	876,93
B	28 882	27 855	29 910	31 121	28 738	28 942	30 841	29 469,86	1 194,96
C	27 469	26 542	28 587	29 317	27 343	27 527	29 373	28 022,57	1 081,95
D	39 992	39 326	41 721	43 564	40 232	40 424	42 597	41 122,29	1 542,70
E	39 625	39 152	41 458	43 562	39 725	40 100	42 439	40 865,86	1 656,29
Différence entre B et A	13 358	13 285	13 997	13 844	13 343	13 411	14 267	13 643,57	360,22
Différence entre C et B (section captive)	- 1 413	-1 313	-1 323	-1 804	-1 395	-1 415	-1 468	-1 447,29	154,04
Pourcentage de véhicules perdus entre B et C	-4,9%	-4,7%	-4,4%	-5,8%	-4,9%	-4,9%	-4,8%	-4,9%	0,4%
Différence entre D et C	12 523	12 784	13 134	14 247	12 889	12 897	13 224	13 099,71	514,18
Différence entre E et D (section captive)	-367	-174	-263	-2	-507	-324	-158	-256,43	151,58
Pourcentage de véhicules perdus entre D et E	-0,9%	-0,4%	-0,6%	-0,0%	-1,3%	-0,8%	-0,4%	-0,6%	0,4%

TABLE C.2 – Tableau de la demande par jour de week-end pour les VL

Station	Dimanche 06/03	Samedi 19/03	Dimanche 20/03	Moyenne	Ecart-type
A	13 506	17 065	13 616	14 729,00	2 023,78
B	24 379	30 588	24 471	26 479,33	3 558,51
C	23 291	29 109	23 494	25 298,00	3 301,98
D	31 077	40 023	31 003	34 034,33	5 186,47
E	31 050	40 577	31 011	34 212,67	5 511,71
Différence entre B et A	10 873	13 523	10 855	11 750,33	1 535,20
Différence entre C et B (section captive)	- 1 088	-1 479	-977	-1 181,33	263,69
Pourcentage de véhicules perdus entre B et C	-4,5%	-4,8%	-4,0%	-4,4%	0,4%
Différence entre D et C	7 786	10 914	7 509	8 736,33	1 890,99
Différence entre E et D (section captive)	-27	554	8	178,33	325,81
Pourcentage de véhicules perdus entre D et E	-0,1%	1,4%	0,0%	0,4%	0,8%

TABLE C.3 – Tableau de la demande par jour de semaine pour les PL

Station	Lundi 29/02	Mardi 01/03	Jeudi 03/02	Vendredi 04/03	Mardi 15/03	Lundi 21/03	Jeudi 24/03	Moyenne	Ecart-type
A	6 883	6 482	6 104	8 207	6 655	6 975	6 008	6 330,57	614,61
B	8 075	7 717	7 339	6 445	7 764	8 267	7 478	7 583,57	595,29
C	7 872	7 544	7 213	6 308	7 647	8 207	7 386	7 453,86	600,43
D	8 827	8 469	8 055	7 203	8 468	9 005	8 324	8 335,86	589,71
E	8 992	8 601	8 208	7 347	8 568	9 207	8 427	8 478,57	601,88
Différence entre B et A	1 192	1 235	1 235	1 238	1 109	1 292	1 470	1 253,00	102,78
Différence entre C et B (section captive)	-203	-173	-126	-137	-117	-60	-92	-129,71	44,33
Pourcentage de véhicules perdus entre B et C	-2,5%	-2,2%	-1,7%	-2,1%	-1,5%	-0,7%	-1,2%	-1,7%	0,6%
Différence entre D et C	1955	925	842	895	821	798	938	882,00	57,15
Différence entre E et D (section captive)	-165	132	153	144	100	202	103	142,71	33,03
Pourcentage de véhicules perdus entre D et E	1,9%	1,6%	1,9%	2,0%	1,2%	2,2%	1,2%	1,7%	0,4%

TABLE C.4 – Tableau de la demande par jour de week-end pour les PL

Station	Dimanche 06/03	Samedi 19/03	Dimanche 20/03	Moyenne	Ecart-type
A	940	2 116	1 088	1 381,33	640,53
B	1 050	2 420	1 209	1 559,67	749,30
C	1 056	2 426	1 222	1 568,00	747,67
D	1 145	2 647	1 314	1 702,00	822,74
E	1 159	2 660	1 319	1 712,67	824,31
Différence entre B et A	110	304	121	178,33	108,97
Différence entre C et B (section captive)	6	6	13	8,33	4,04
Pourcentage de véhicules perdus entre B et C	0,6%	0,2%	1,1%	0,6%	0,4%
Différence entre D et C	89	221	92	134,00	75,36
Différence entre E et D (section captive)	14	13	5	10,67	4,93
Pourcentage de véhicules perdus entre D et E	1,2%	0,5%	0,4%	0,7%	0,5%

Annexe D

Extraction de la main courante

TABLE D.1 – Tableau des mains courantes - Source : DIR Nord

Début le	Début à	Fin le	Fin à	Axe SIG	Axe	Sens	PR	Localisation	Commentaires	Type événement
29/02/2016	21:44	01/03/2016	01:25	A0022	A22	Gand Paris	0	bretelle insertion 17	Voie de droite neutralisée pour réparation de glissières durée 1 h, tel: 06 99 05 01 22	Travaux
01/03/2016	03:12	01/03/2016	04:54	A0022	A22	Gand Paris	10	10 + 0500 au PR 10+900	BAU neutralisée pour travaux sur glissières, durée 2h	Travaux
01/03/2016	15:41	01/03/2016	16:08	A0022	A22	Gand Paris	22	22 + 0100	Demande de protection	Véhicule en panne (hors PL)
03/03/2016	00:34	03/03/2016	01:53	A0022	A22	Gand Paris	18	18 + 0200 au 17.800	V2 pour radar tel 06 74 98 03 77	Travaux
04/03/2016	00:40	04/03/2016	02:42	A0022	A22	Gand Paris	3	3 + 0500 au 2.800	En v2 06 37 77 36 62 réparation gs	Travaux
04/03/2016	01:47	04/03/2016	03:11	A0022	A22	Gand Paris	5	5.700	Signalé N° de dossier 575 CF 084 DP TWINGO Blanche.	Accident
04/03/2016	08:30	04/03/2016	08:57	A0022	A22	Gand Paris	20	20 + 0001	1 VL	Véhicule en panne (hors PL)
04/03/2016	09:00	04/03/2016	11:05	A0022	A22	Gand Paris	18	18 + 0800	Bande de roulement sur voie PL demande de dépanneur	Obstacle(s) signalé(s) sur chaussée
06/03/2016	09:52	06/03/2016	11:35	A0022	A22	Gand Paris	17	17 + 0250	Demande présence des CRS.	Véhicule arrêté
06/03/2016	19:09	06/03/2016	20:18	A0022	A22	Gand Paris	0	17	Demande une protection	Accident

07/03/2016	11:13	07/03/2016	12:27	A0022	A22	Gand Paris	0	aire de repos	Usager a oublié son <u>vanity</u> sur l'aire près de Lille.	Obstacle(s) signalé(s) sur chaussée
07/03/2016	22:07	08/03/2016	03:32	A0022	A22	Gand Paris	0	12+200 au 9+000	Neutralisation de la voie de gauche pour plaquettes PR. M. <u>Deboudt</u>	Travaux
11/03/2016	09:38	11/03/2016	10:04	A0022	A22	Gand Paris	13	13.00	1 Pare-choc	Obstacle(s) signalé(s) sur chaussée
11/03/2016	14:04	11/03/2016	14:29	A0022	A22	Gand Paris	9	9 + 0001	Plaque de bois sur voies	Obstacle(s) signalé(s) sur chaussée
12/03/2016	17:01	12/03/2016	19:00	A0022	A22	Gand Paris	0	Jonction RN356	Nids de poule.	Autre
12/03/2016	17:59	12/03/2016	18:36	A0022	A22	Gand Paris	0	bretelle insertion 15	Personne faisant un malaise dans une ambulance, demande de protection	Véhicule arrêté
13/03/2016	13:13	13/03/2016	13:48	A0022	A22	Gand Paris	0	Bondues	Bois	Obstacle(s) signalé(s) sur chaussée
14/03/2016	06:58	14/03/2016	09:53	A0022	A22	Gand Paris	22	22 + 0100	Protection	PL en panne
14/03/2016	09:05	14/03/2016	10:11	A0022	A22	Gand Paris	2	2 + 0100	Signalé	Accident
14/03/2016	19:03	14/03/2016	19:09	A0022	A22	Gand Paris	22	22 + 0100	EN PROTECTION	Véhicule en panne (hors PL)
15/03/2016	02:47	15/03/2016	04:23	A0022	A22	Gand Paris	0	Du 22.00 au 21.500	Voie lente neutralisée. Hydro curage. 06-17-09-52-03	Travaux
15/03/2016	23:02	16/03/2016	04:31	A0022	A22	Gand Paris	0	22+100 au 14+400	V1 neutralisée pour travaux de purge 06-17-09-52-01	Travaux
16/03/2016	15:45	16/03/2016	16:06	A0022	A22	Gand Paris	0	Marck	1 brique	Obstacle(s) signalé(s) sur chaussée
16/03/2016	21:08	17/03/2016	05:06	A0022	A22	Gand Paris	14	14 + 0800 au 13	Voie de droite neutralisée pour balayage 06 03 91 51 44	Travaux
17/03/2016	22:04	18/03/2016	03:40	A0022	A22	Gand Paris	0	22+200 au 21+700	Hydro curage. Voie de droite neutralisée Tél:0601023695	Travaux
18/03/2016	08:04	18/03/2016	08:28	A0022	A22	Gand Paris	19	19 + 0500	Des briques.	Obstacle(s) signalé(s) sur chaussée
19/03/2016	22:10	19/03/2016	23:18	A0022	A22	Gand Paris	18	18 + 0001	1 VL et 1 moto	Accident
21/03/2016	21:07	22/03/2016	03:37	A0022	A22	Gand Paris	15	15 + 0900 au 15.500	Réfection de glissières en v1 tél 06 19 76 40 53	Travaux
22/03/2016	20:40	23/03/2016	06:00	A0022	A22	Gand Paris	0	13AU 11	Voie de gauche et voie médiane neutralisée pour contrôle OA si problème PIU	Travaux
22/03/2016	21:27	23/03/2016	02:11	A0022	A22	Gand Paris	0	5 au 4	V1 neutralisée pour travaux OA Nowacki Xavier	Travaux
23/03/2016	12:56	23/03/2016	13:15	A0022	A22	Bret Gand Lille N356	10	10 + 0100	Bois	Obstacle(s) signalé(s) sur chaussée

23/03/2016	20:04	24/03/2016	03:05	A0022	A22	Gand Paris	0	16+800 au 13+600	Voie de gauche neutralisée pour carottage pour la nuit si problème NOWACKI	Travaux
24/03/2016	19:45	24/03/2016	19:55	A0022	A22	Gand Paris	15	15 + 0100	Signalé	PL en panne
24/03/2016	20:02	24/03/2016	23:02	A0022	A22	Gand Paris	22	22 + 0650	Voie de droite neutralisée pour CEREMA Nowacki	Travaux
24/03/2016	23:53	25/03/2016	03:11	A0022	A22	Gand Paris	14	14 + 0590 bretelle de sortie vers Roubaix	Début de balisage en bretelle 13 b pour fermeture de la bretelle remontant vers Gand durée la nuit	Travaux
25/03/2016	14:27	25/03/2016	15:46	A0022	A22	Gand Paris	0	TC A22	Demande de protection.	Véhicule en panne (hors PL)
28/03/2016	15:39	28/03/2016	16:16	A0022	A22	Gand Paris	18	18 + 0500	Demande de protection.	Véhicule en panne (hors PL)
29/03/2016	08:33	29/03/2016	09:23	A0022	A22	Gand Paris	9	9 + 0100	Demande de protection	Accident
28/03/2016	15:39	28/03/2016	16:16	A0022	A22	Gand Paris	18	18 + 0500	Demande de protection.	Véhicule en panne (hors PL)
29/03/2016	08:33	29/03/2016	09:23	A0022	A22	Gand Paris	9	9 + 0100	Demande de protection	Accident
29/03/2016	20:16	30/03/2016	04:41	A0022	A22	Gand Paris	0	bretelle 17a et 17b	Fermeture des bretelles s 17a et 17b pour travaux assainissement pour la nuit si problème la PIU	Travaux
30/03/2016	06:36	30/03/2016	09:28	A0022	A22	Gand Paris	0	Auchan Roncq	Demande de protection.	PL en panne
30/03/2016	20:33	31/03/2016	02:30	A0022	A22	Gand Paris	22	22 + 0150	Arrêté T16-52N Bretelles d'insertions 17 a et 17 b fermées PIU	Travaux
02/04/2016	09:42	02/04/2016	09:59	A0022	A22	Gand Paris	13	13 + 0900	Encombrant voie de gauche.	Obstacle(s) signalé(s) sur chaussée
02/04/2016	14:20	02/04/2016	15:08	A0022	A22	Gand Paris	2	2 + 0300	Se dépanne seul, reste en protection voie droite.	Véhicule en panne (hors PL)

Annexe E

Représentation du réseau par la plateforme mésoscopique

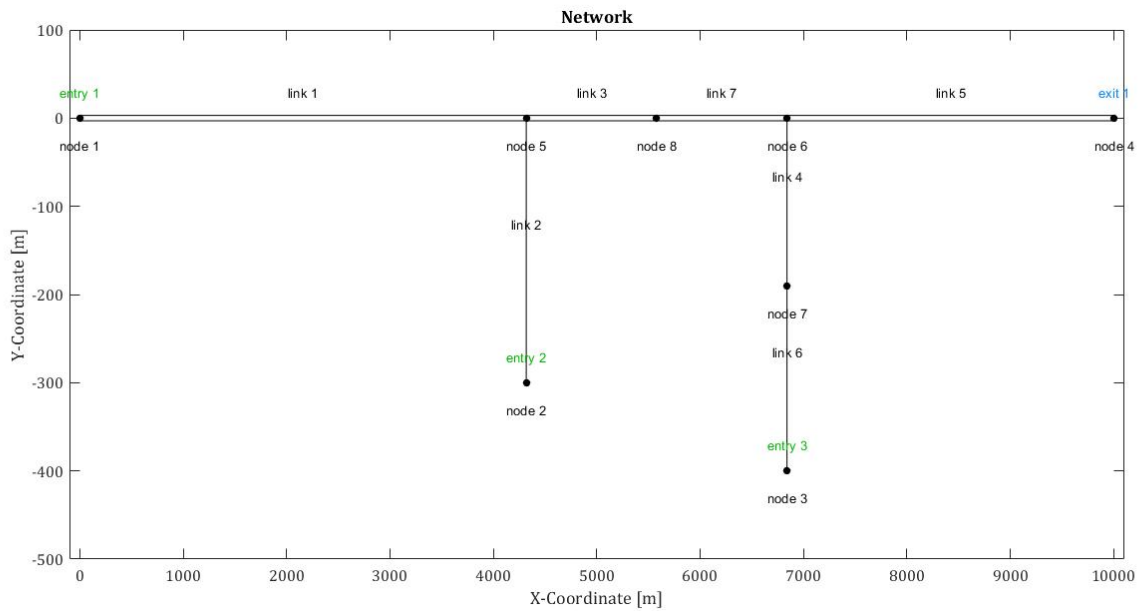


FIGURE E.1 – Représentation du réseau par la plateforme mésoscopique

Annexe F

Représentation des CVC pour les paramètres par défaut

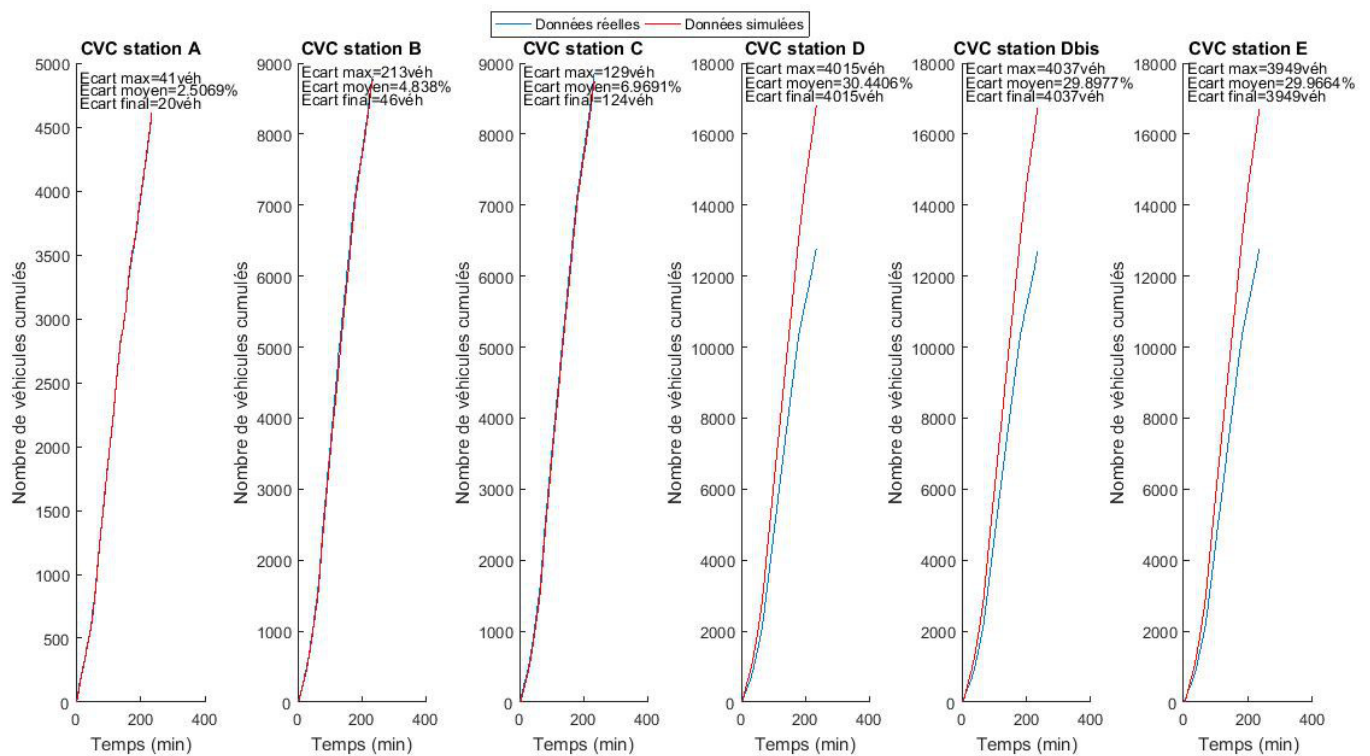


FIGURE F.1 – Première simulation avec les paramètres par défaut, jeudi 10 mars

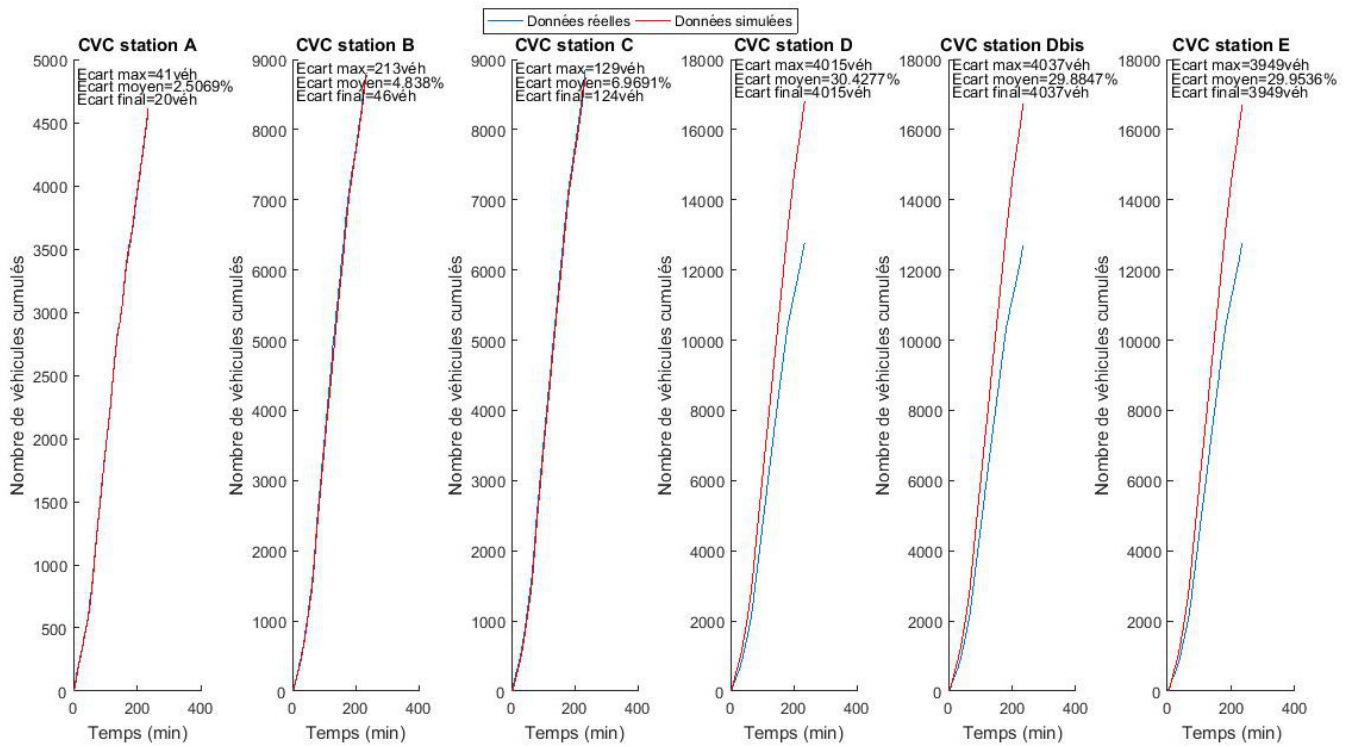


FIGURE F.2 – Deuxième simulation avec les paramètres par défaut, jeudi 10 mars

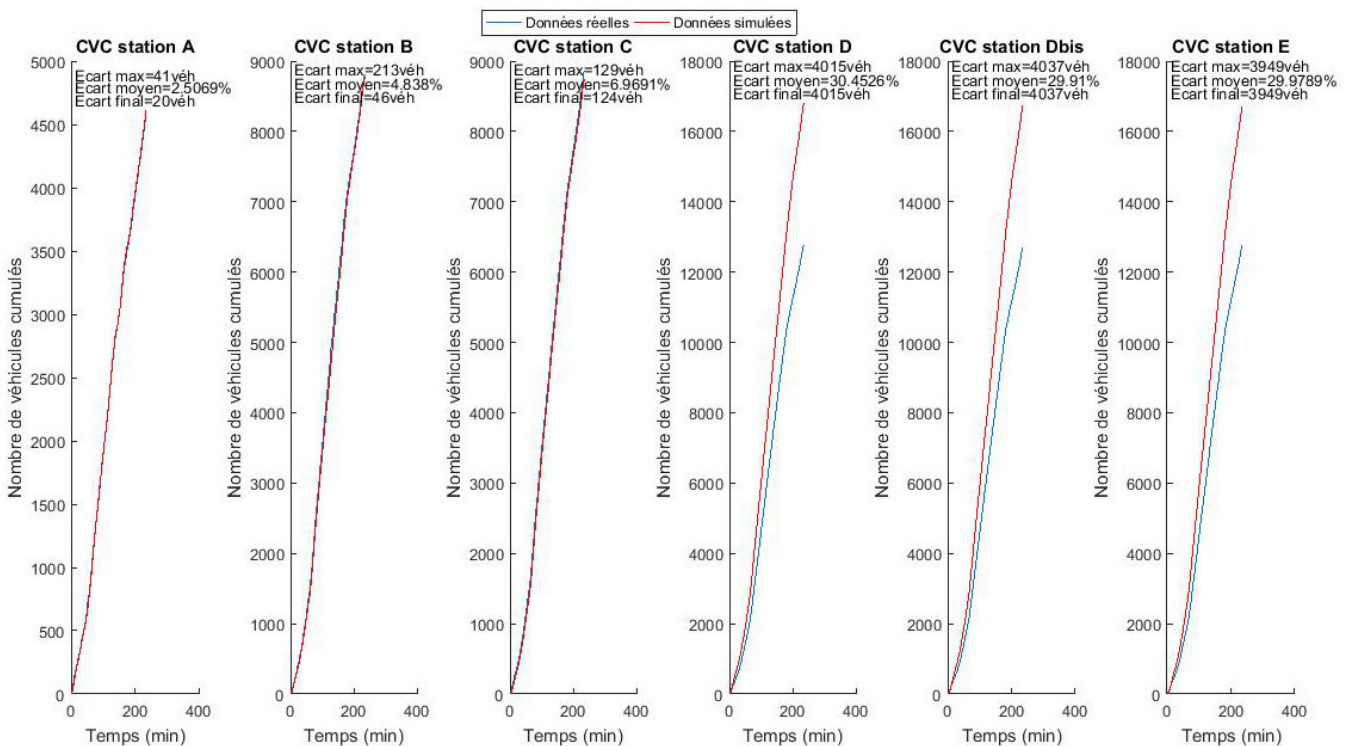


FIGURE F.3 – Troisième simulation avec les paramètres par défaut, jeudi 10 mars

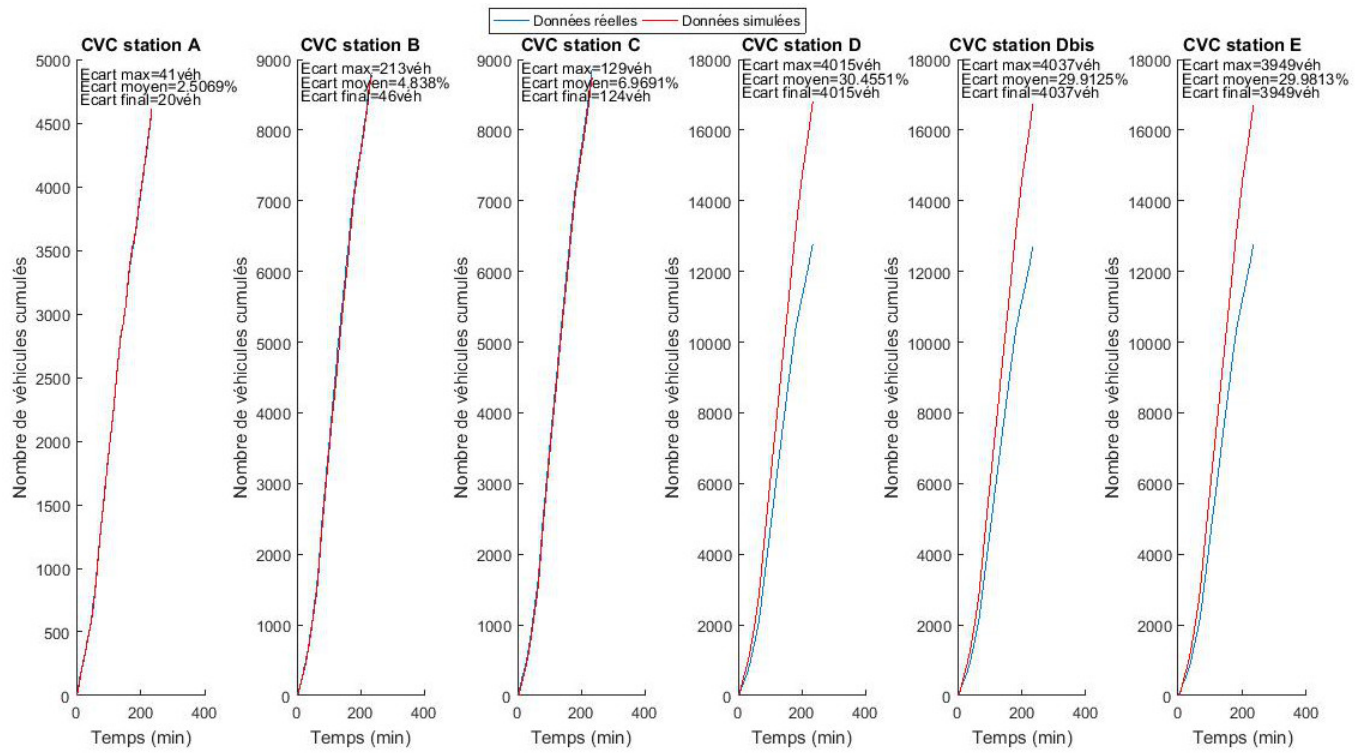


FIGURE F.4 – Quatrième simulation avec les paramètres par défaut, jeudi 10 mars

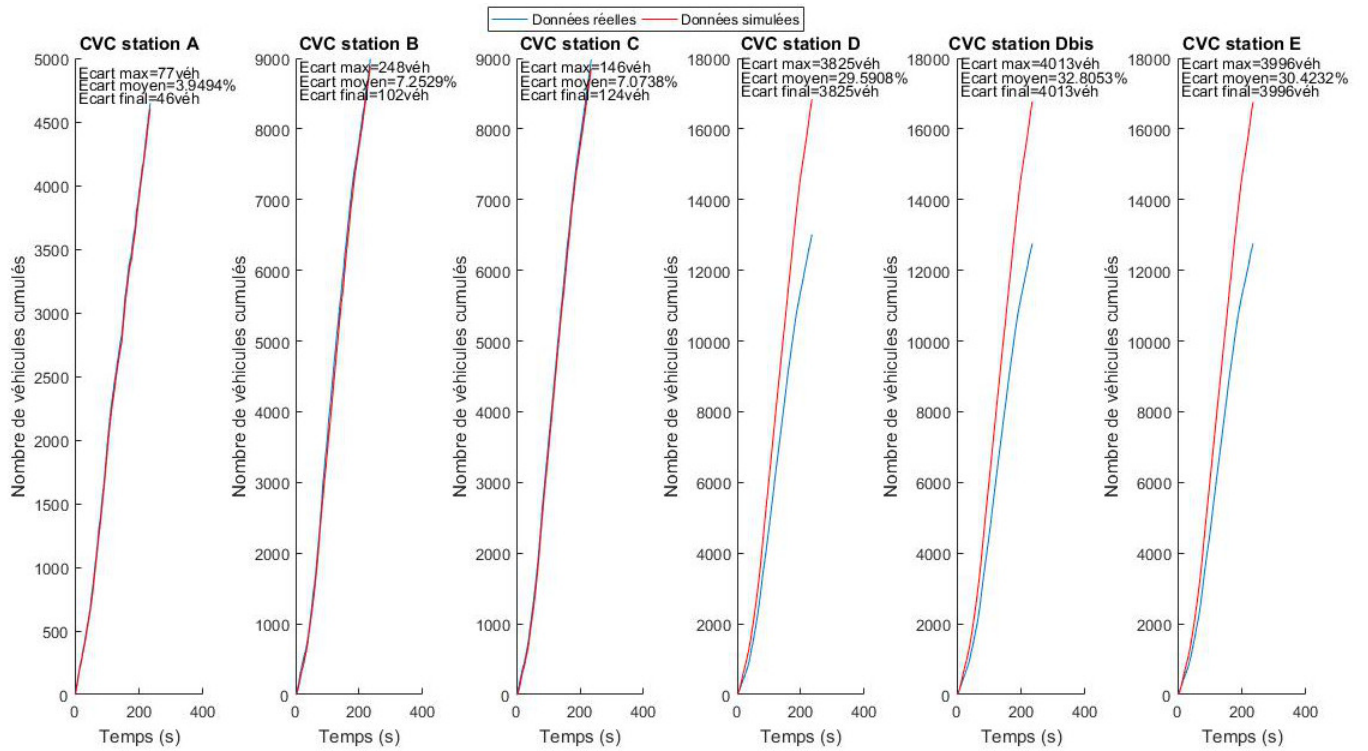


FIGURE F.5 – Première simulation avec les paramètres par défaut, lundi 21 mars

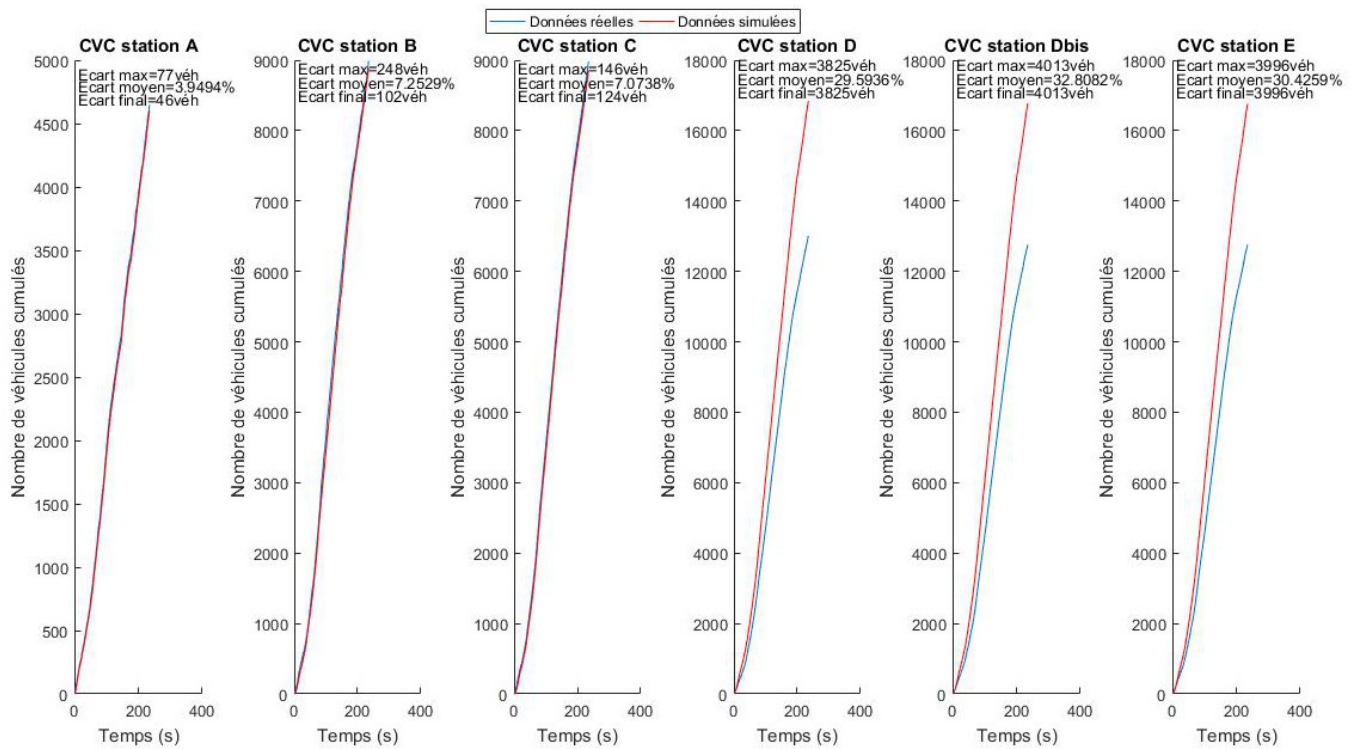


FIGURE F.6 – Deuxième simulation avec les paramètres par défaut, lundi 21 mars

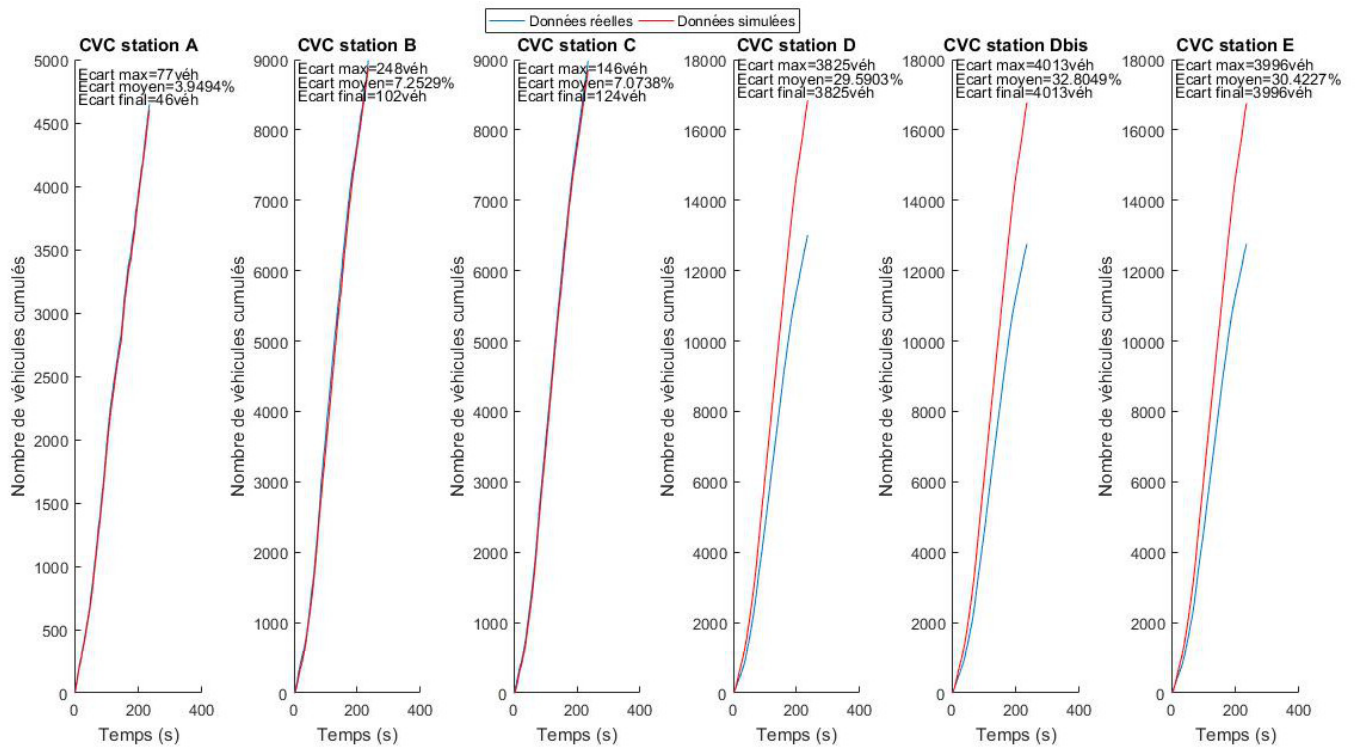


FIGURE F.7 – Troisième simulation avec les paramètres par défaut, lundi 21 mars

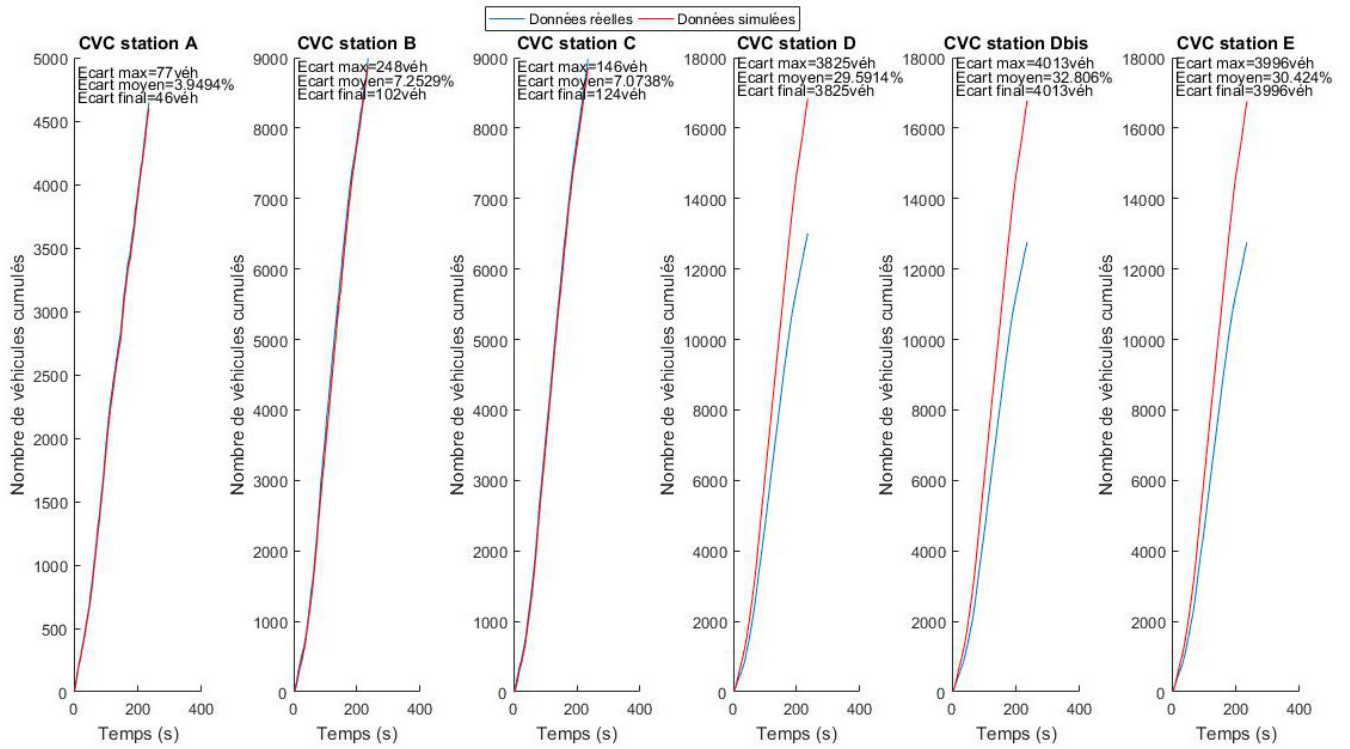


FIGURE F.8 – Quatrième simulation avec les paramètres par défaut, lundi 21 mars

Annexe G

Représentation des CVC du jeudi 10 mars pour $u = 31 \text{ m/s}$, $w = 4.2 \text{ m/s}$, $k_x = 0,16 \text{ véh/m}$, une demande de croisement égale à 0.916 véh/s et une répartition de 41% sur la voie lente

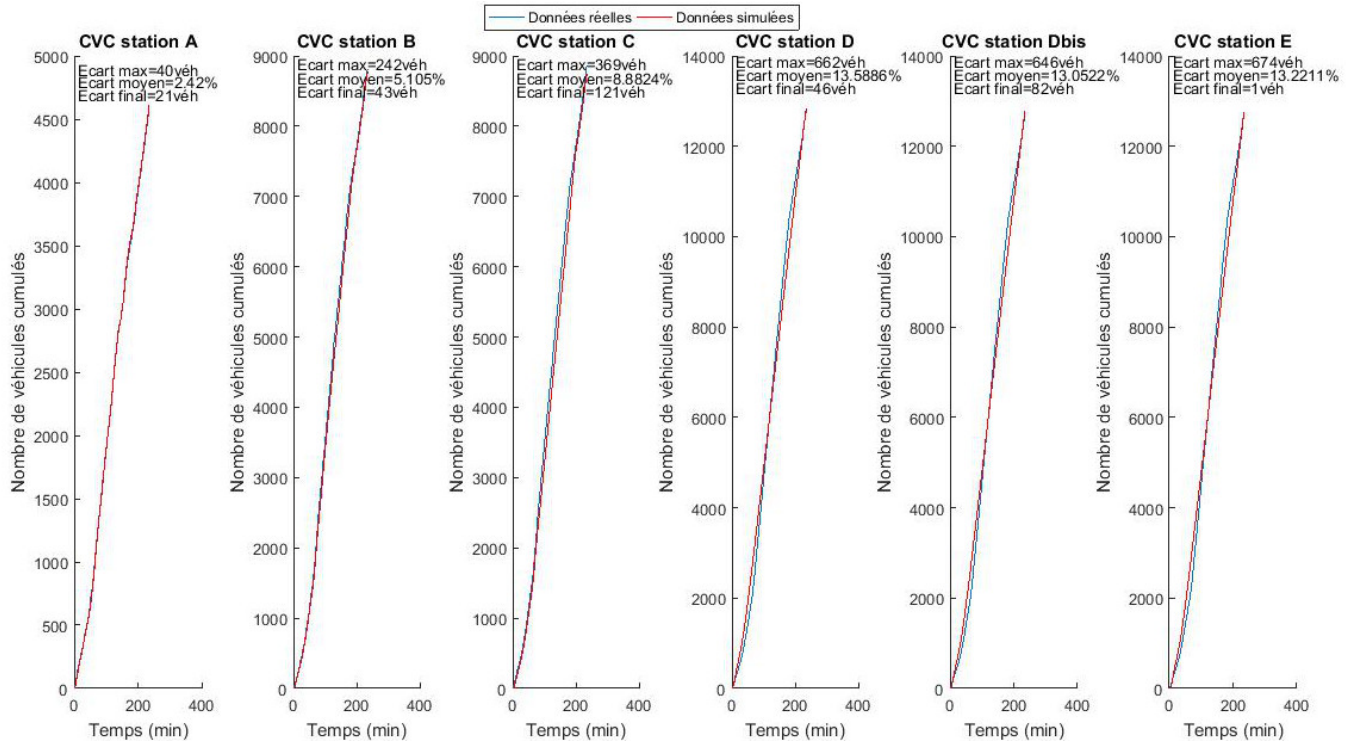


FIGURE G.1 – Première simulation avec les paramètres déterminés par la routine de calage, jeudi 10 mars

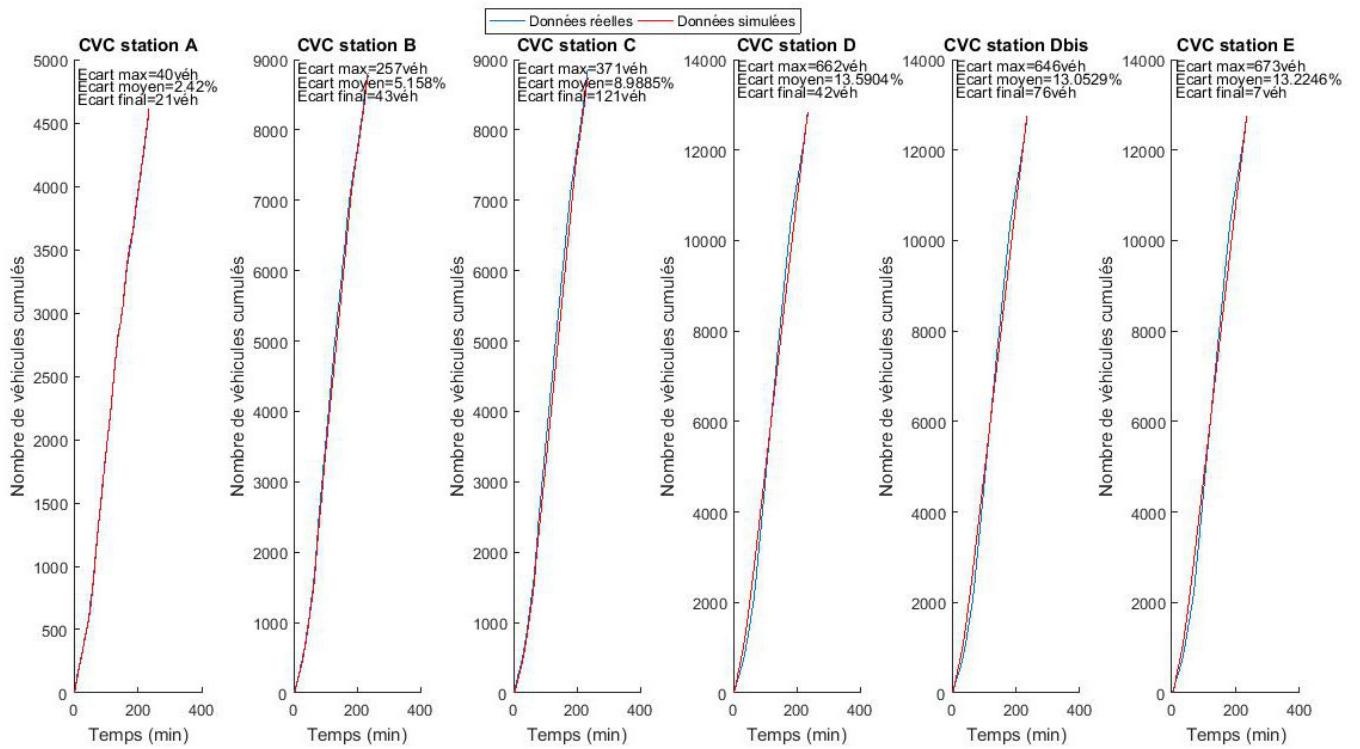


FIGURE G.2 – Deuxième simulation avec les paramètres déterminés par la routine de calage, jeudi 10 mars

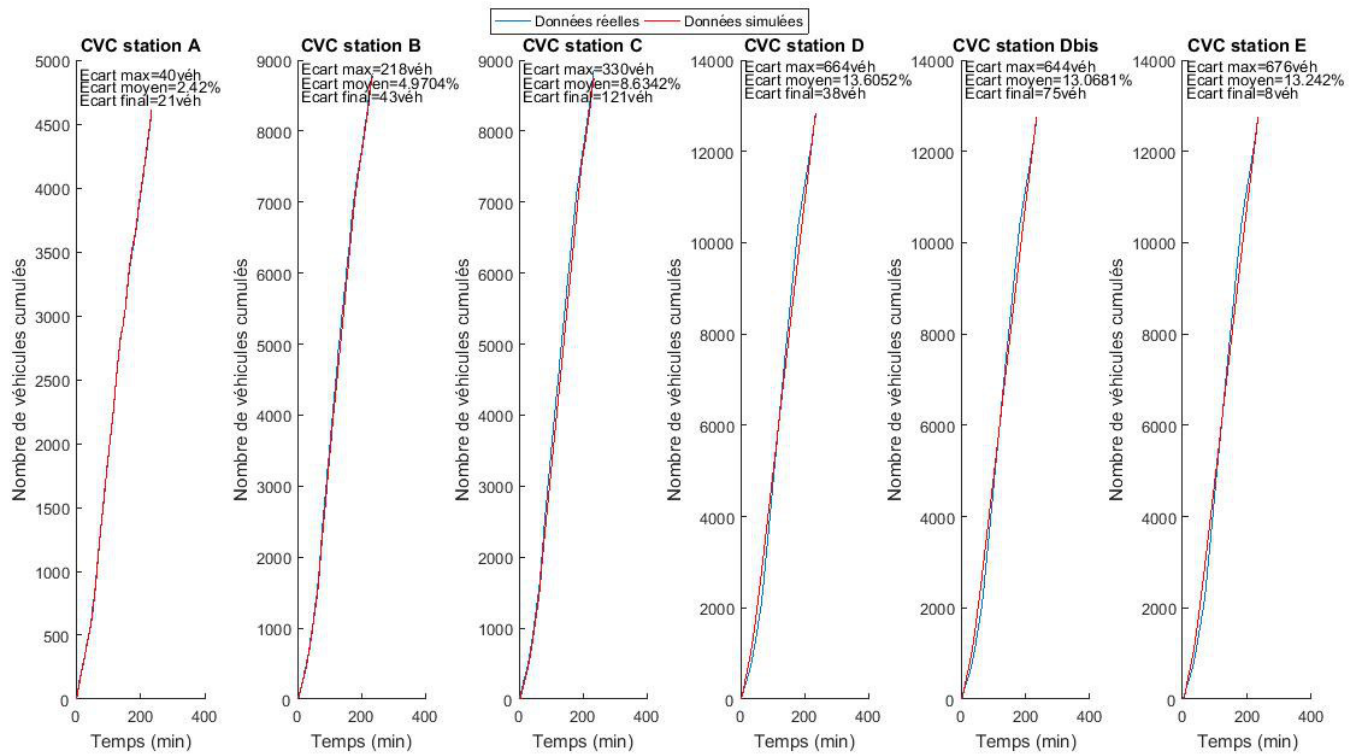


FIGURE G.3 – Troisième simulation avec les paramètres déterminés par la routine de calage, jeudi 10 mars

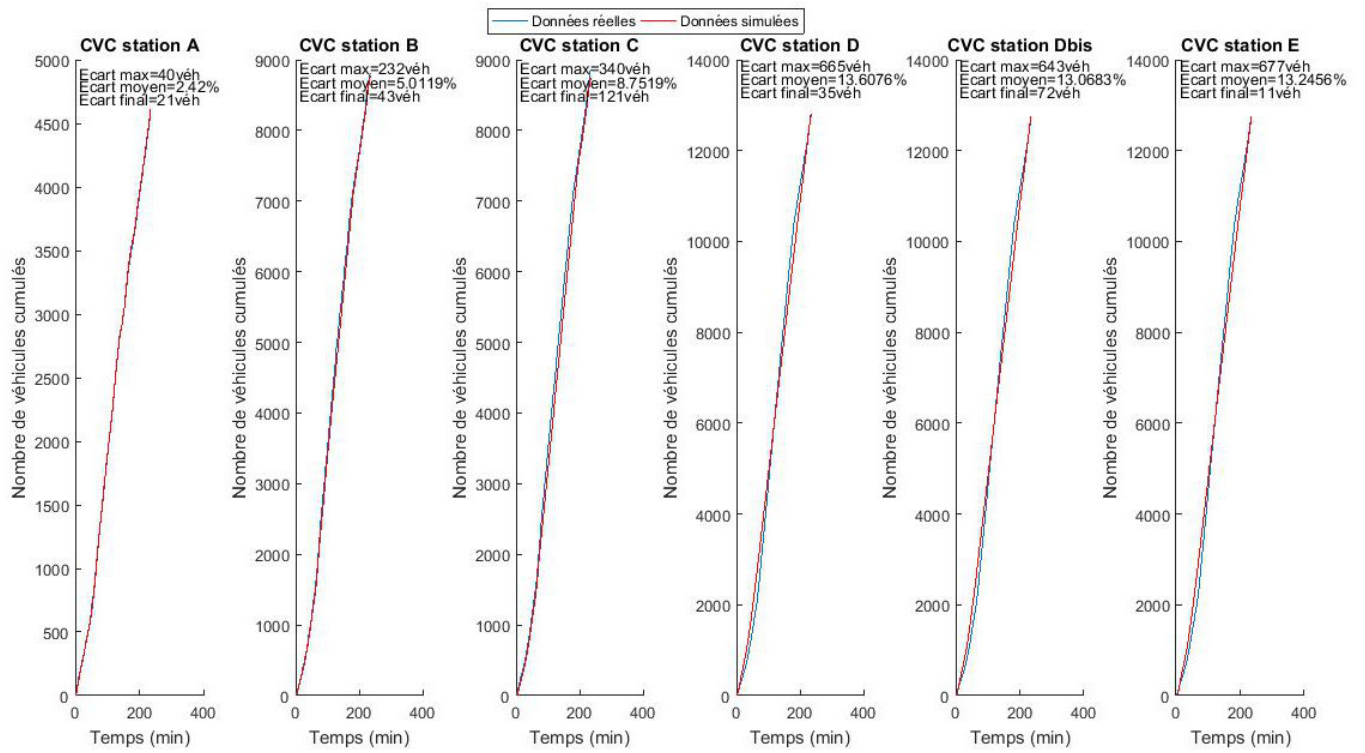


FIGURE G.4 – Quatrième simulation avec les paramètres déterminés par la routine de calage, jeudi 10 mars

Annexe H

Représentation des CVC du lundi 21 mars pour $u = 27,5 \text{ m/s}$, $w = 4.3 \text{ m/s}$, $k_x = 0,16 \text{ véh/m}$, une demande de croisement égale à 0.916 véh/s et une répartition de 41% sur la voie lente

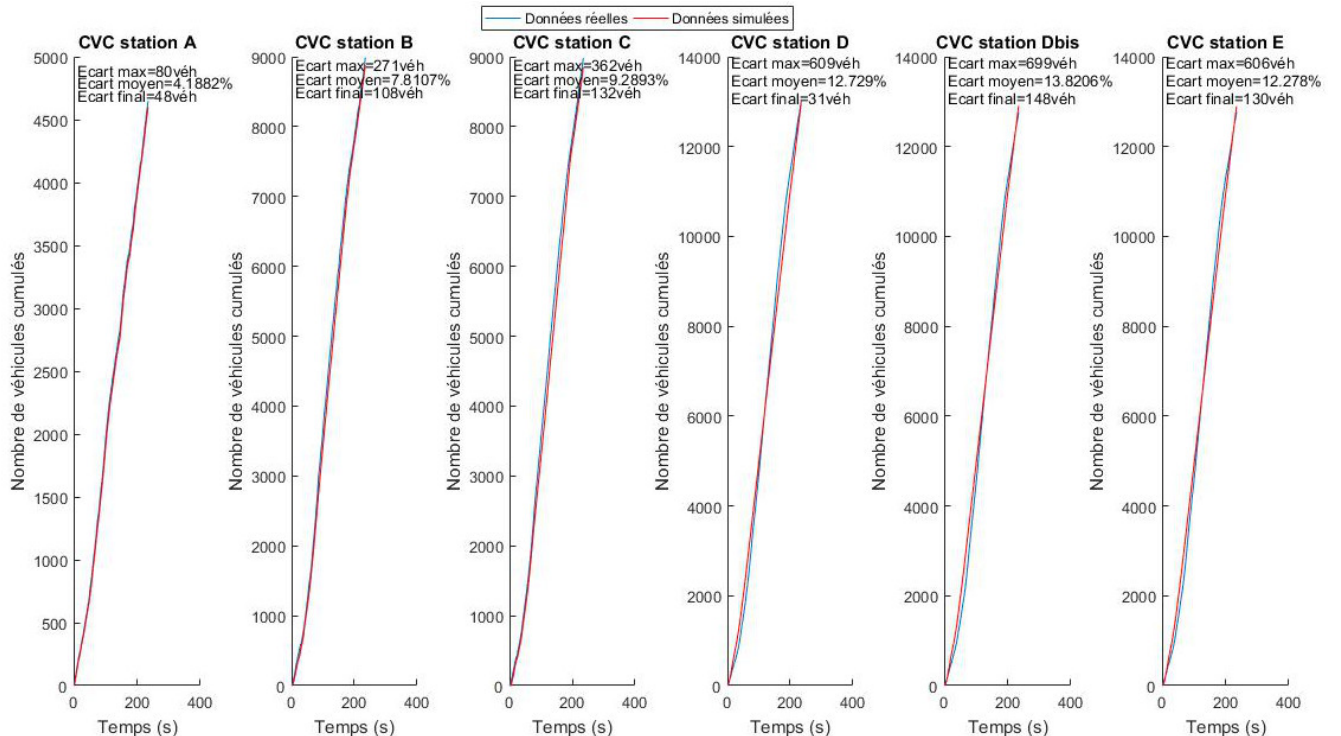


FIGURE H.1 – Première simulation avec les paramètres déterminés par la routine de calage, lundi 21 mars

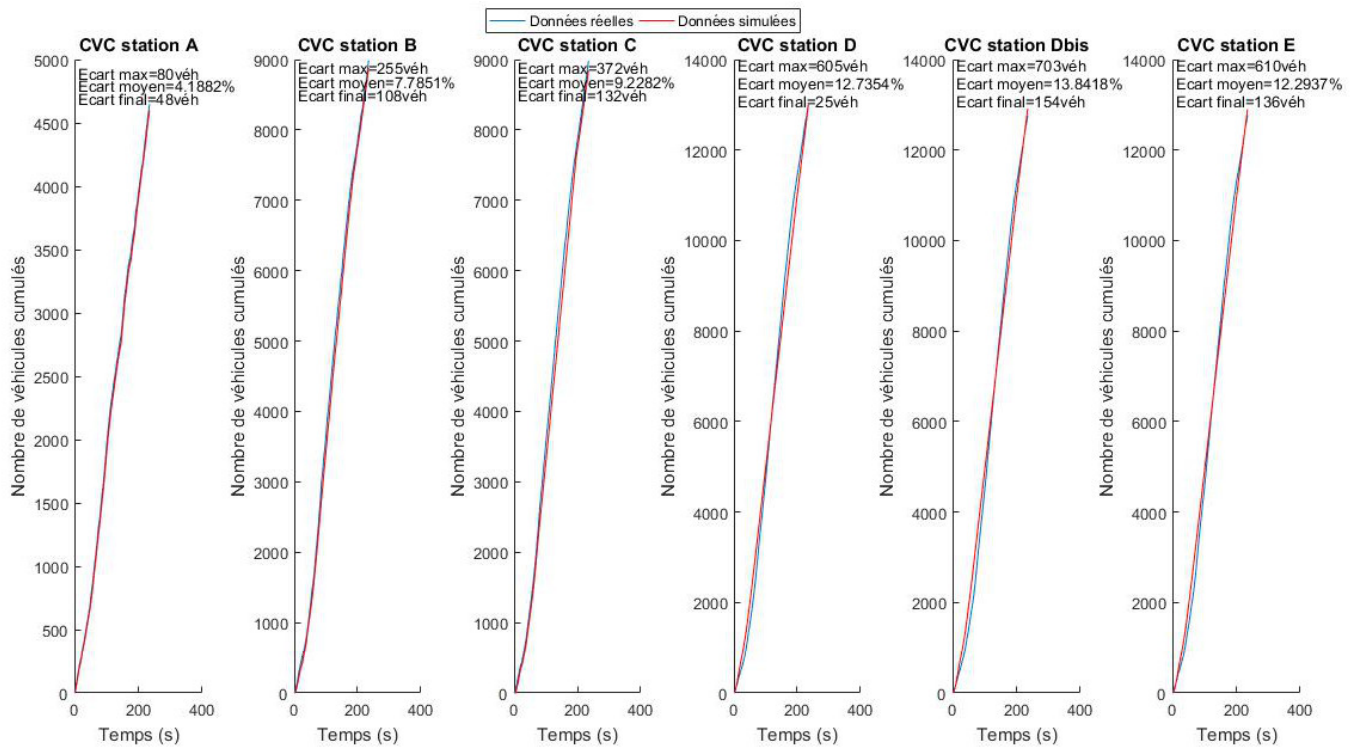


FIGURE H.2 – Deuxième simulation avec les paramètres déterminés par la routine de calage, lundi 21 mars

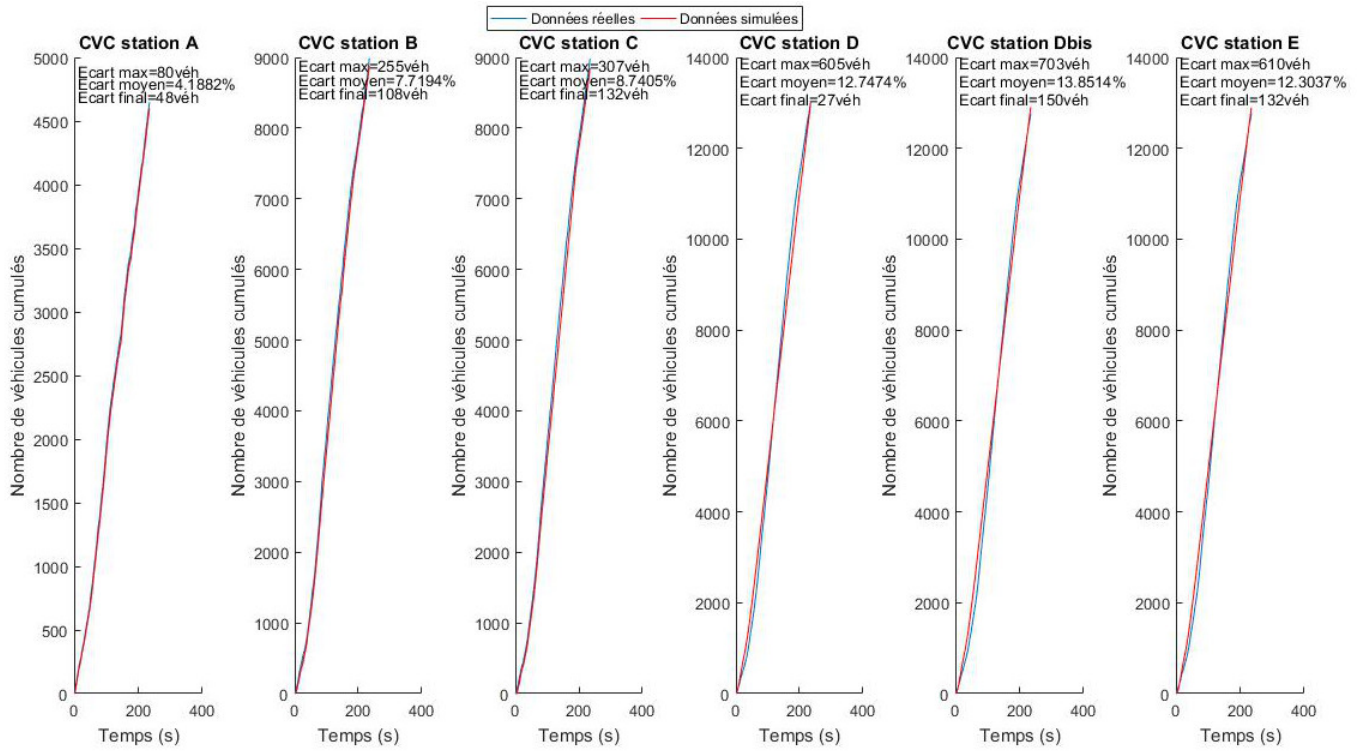


FIGURE H.3 – Troisième simulation avec les paramètres déterminés par la routine de calage, lundi 21 mars

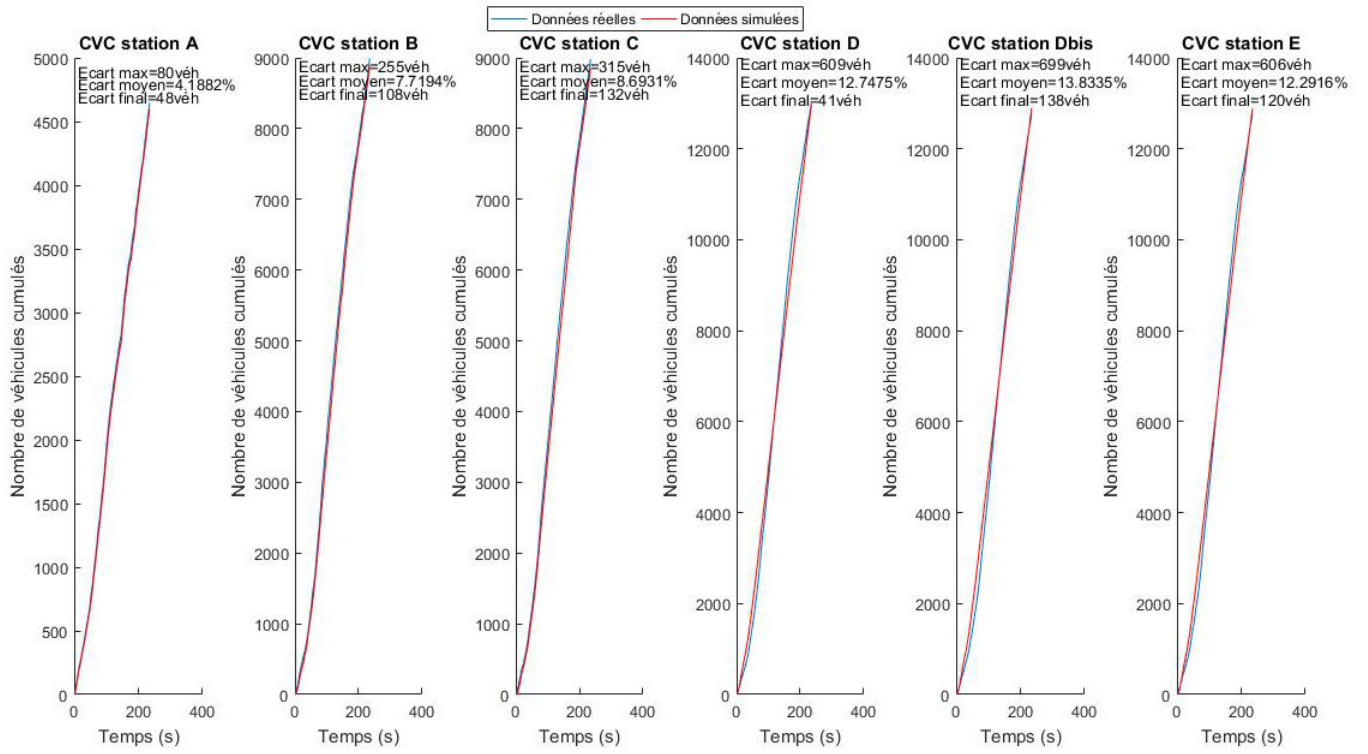


FIGURE H.4 – Quatrième simulation avec les paramètres déterminés par la routine de calage, lundi 21 mars

Annexe I

Représentation des moyennes des données simulées et leur écart-type

I.1 Moyenne des débits

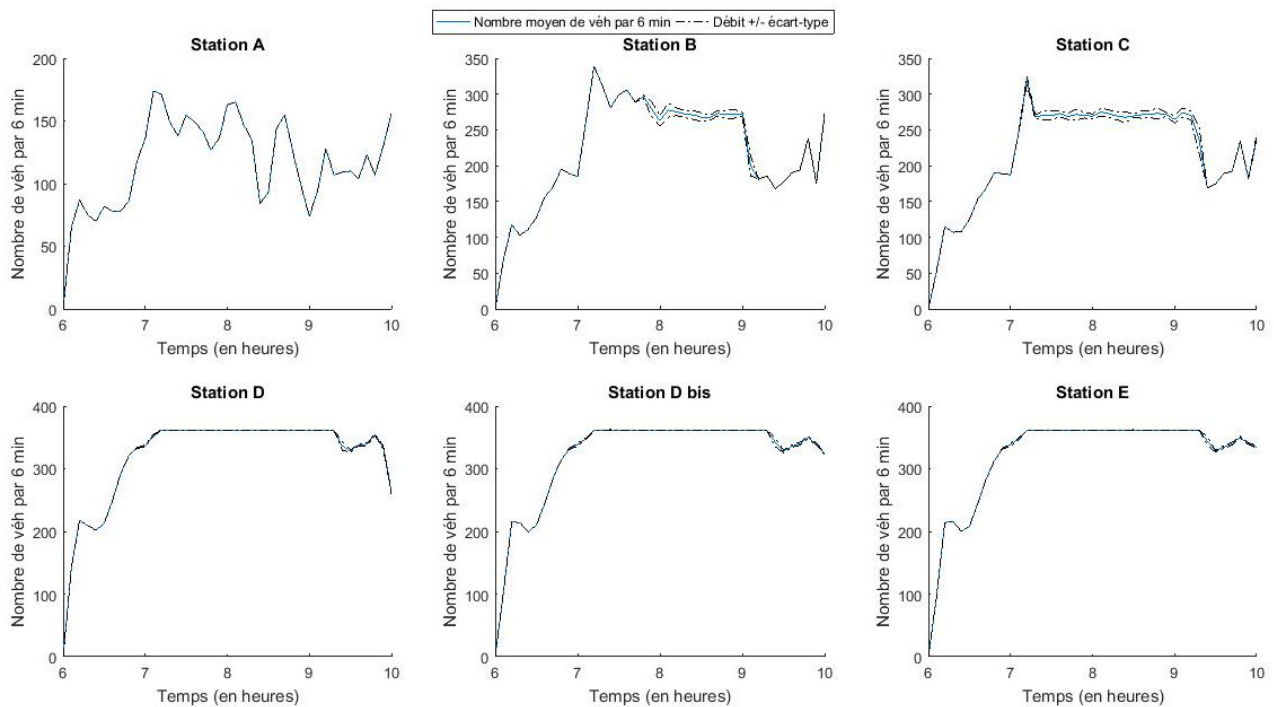


FIGURE I.1 – Moyenne du débit sur les 6 simulations et écart-type en fonction du temps, sans régulation, jeudi 10 mars

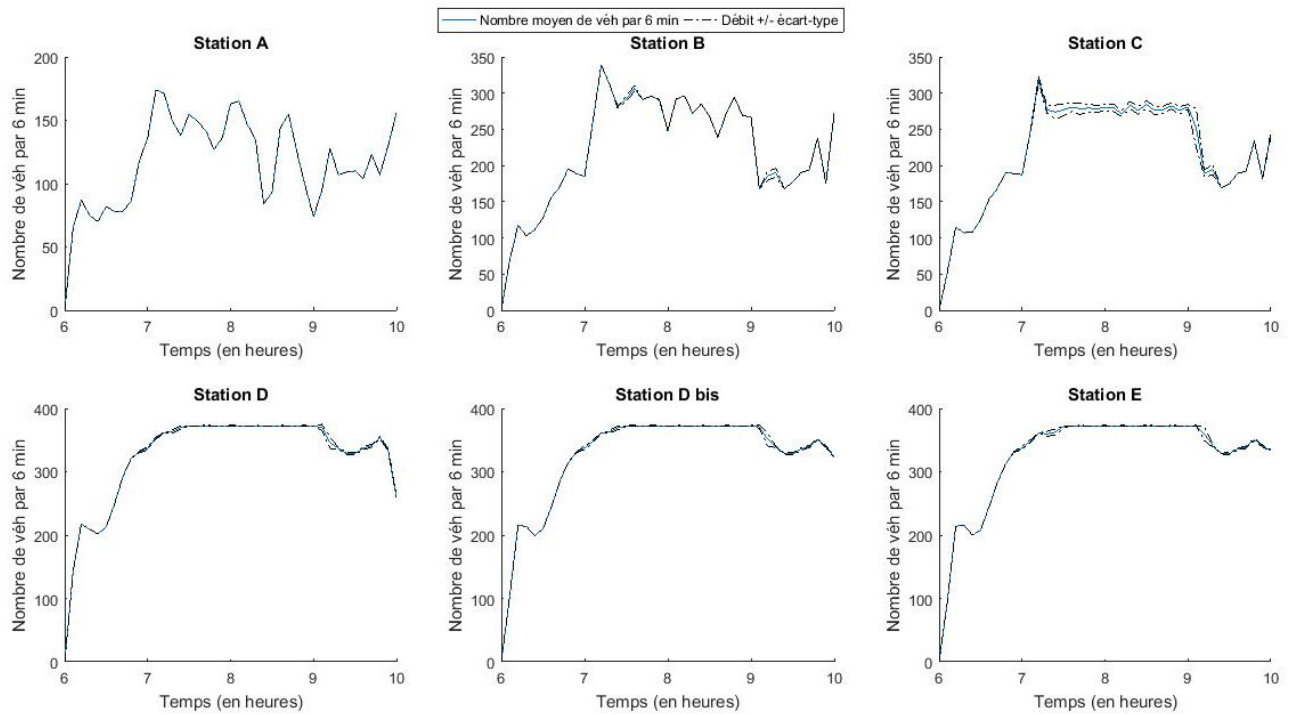


FIGURE I.2 – Moyenne du débit sur les 6 simulations et écart-type en fonction du temps, avec régulation, jeudi 10 mars

TABLE I.1 – Tableau de l'écart-type des débits 6 min des 6 simulations, jeudi 10 mars

		Station A (en véh)	Station B (en véh)	Station C (en véh)	Station D (en véh)	Station D (en véh) bis	Station E (en véh)
Sans régulation	Ecart-type maximal	0	13,99	18,29	7,26	7,23	6,72
	Ecart-type moyen	0	2,15	3,15	0,54	0,59	0,59
	Débit moyen par période de 6 min	116	221	219	320	320	320
Avec régulation	Ecart-type maximal	0	6,19	26,87	9,13	10,52	10,71
	Ecart-type moyen	0	0,55	3,59	1,12	1,07	1,15
	Débit moyen par période de 6 min	116	221	219	323	323	323

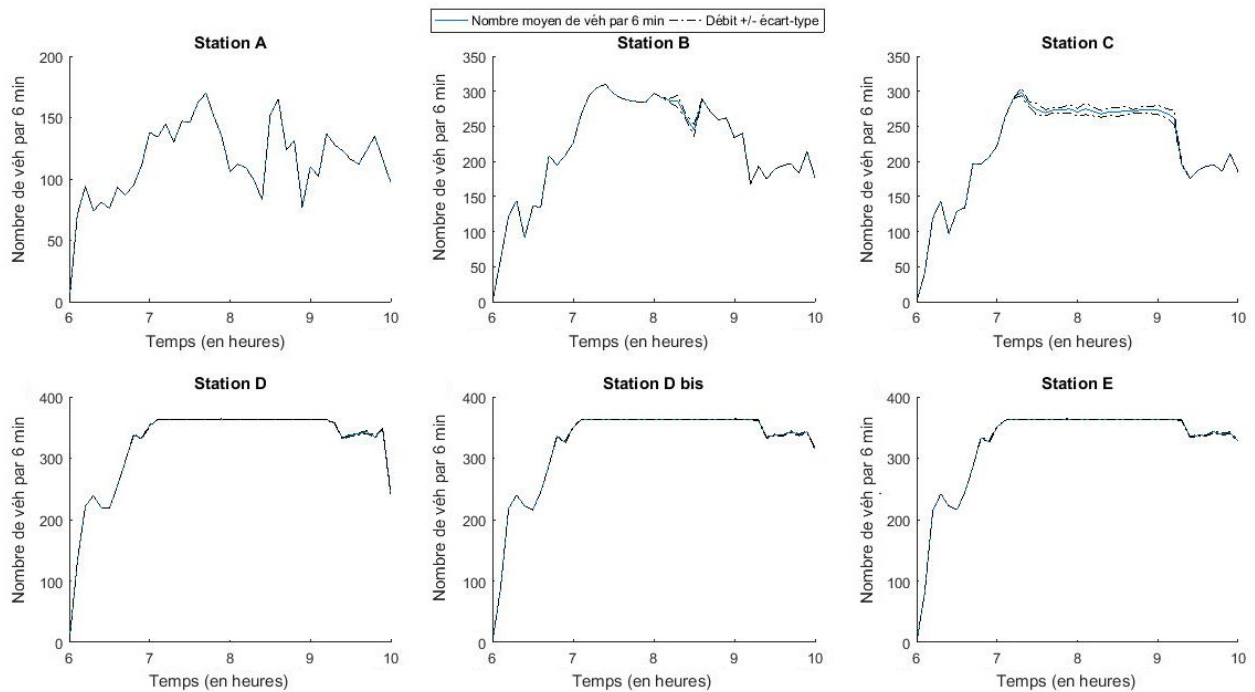


FIGURE I.3 – Moyenne du débit sur les 6 simulations et écart-type en fonction du temps, sans régulation, lundi 21 mars

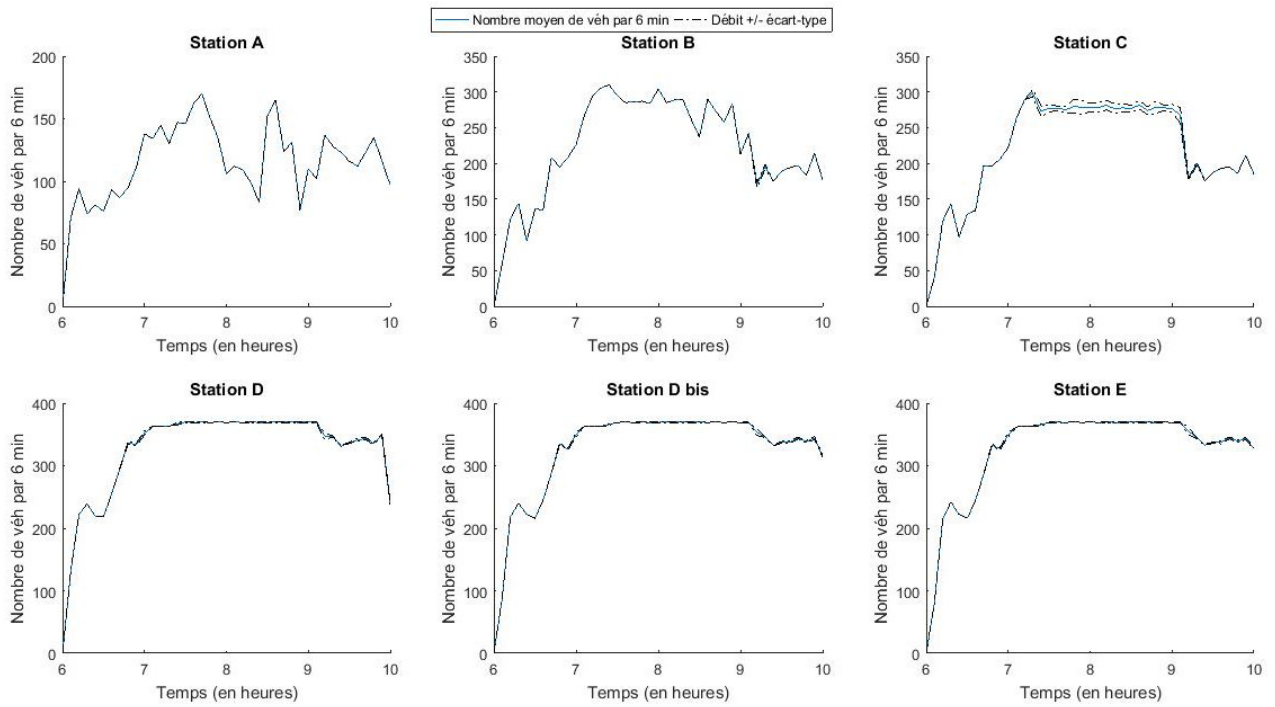


FIGURE I.4 – Moyenne du débit sur les 6 simulations et écart-type en fonction du temps, avec régulation, lundi 21 mars

TABLE I.2 – Tableau de l'écart-type des débits 6 min des 6 simulations, lundi 21 mars

		Station A (en véh)	Station B (en véh)	Station C (en véh)	Station D (en véh)	Station D (en véh) bis	Station E (en véh)
Sans régulation	Ecart-type maximal	0	8,66	9,67	2,13	2,09	1,86
	Ecart-type moyen	0	0,57	2,75	0,41	0,36	0,38
	Débit moyen par période de 6 min	114	221	220	322	322	322
Avec régulation	Ecart-type maximal	0	3,62	10,93	5,39	5,15	5,54
	Ecart-type moyen	0	0,17	3,06	0,83	0,78	0,78
	Débit moyen par période de 6 min	114	221	220	325	325	325

I.2 Moyenne des temps de parcours

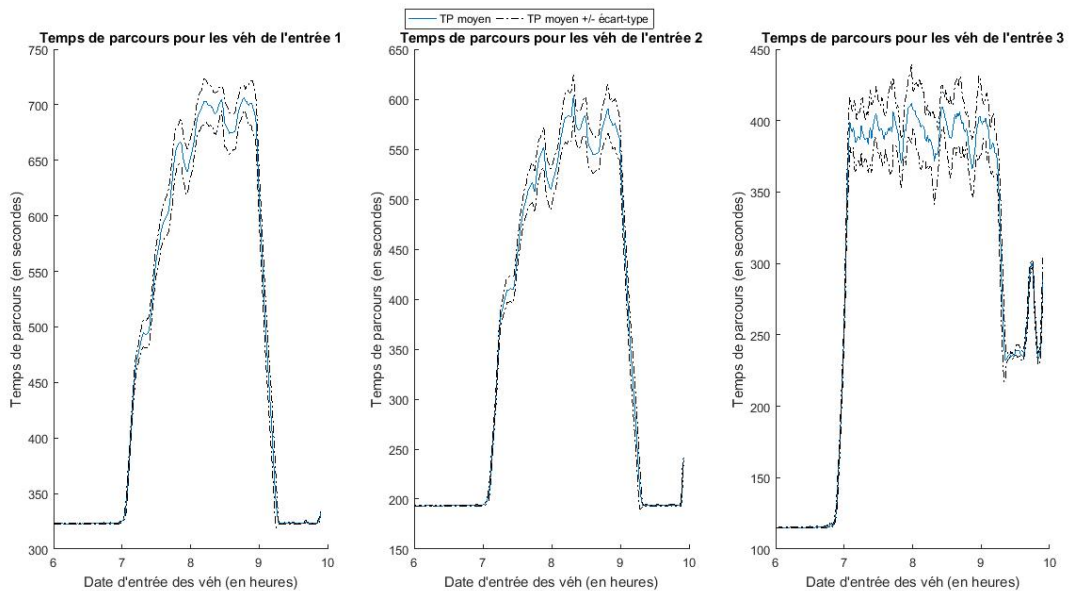


FIGURE I.5 – Moyenne du temps de parcours sur les 6 simulations et écart-type en fonction du temps, sans régulation, jeudi 10 mars

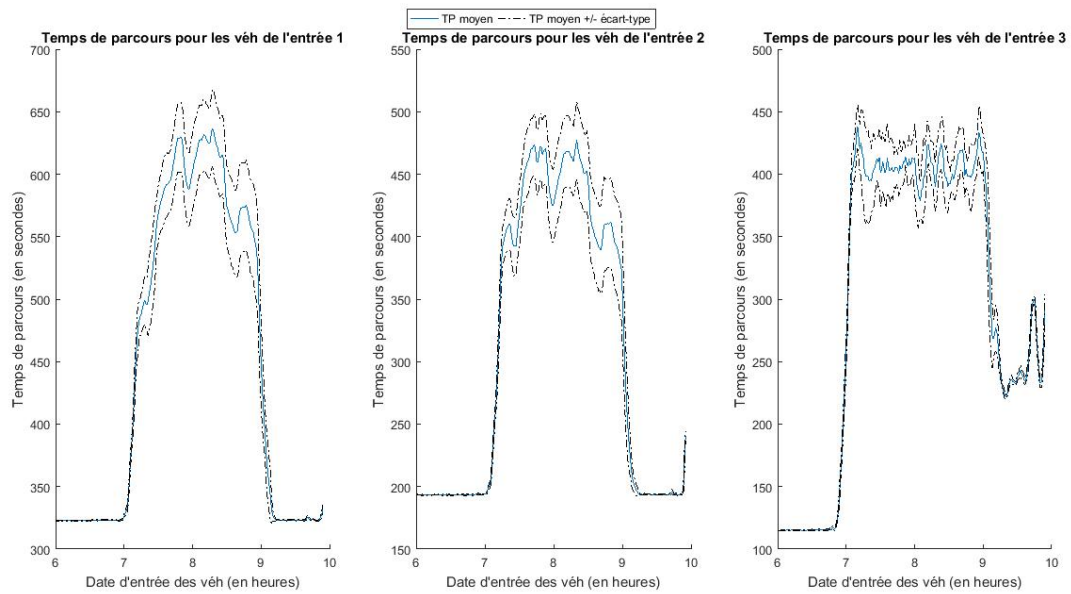


FIGURE I.6 – Moyenne du temps de parcours sur les 6 simulations et écart-type en fonction du temps, avec régulation, jeudi 10 mars

TABLE I.3 – Tableau de l'écart-type des temps de parcours des 6 simulations, jeudi 10 mars

		Véhicules de l'entrée 1	Véhicules de l'entrée 2	Véhicules de l'entrée 3
Sans régulation	Ecart-type maximal	27,38 s	27,56 s	32,32 s
	Ecart-type moyen	9,88 s	10,78 s	12,92 s
Avec régulation	Ecart-type maximal	41,71 s	41,54 s	44,23 s
	Ecart-type moyen	15,33 s	14,88 s	13,04 s

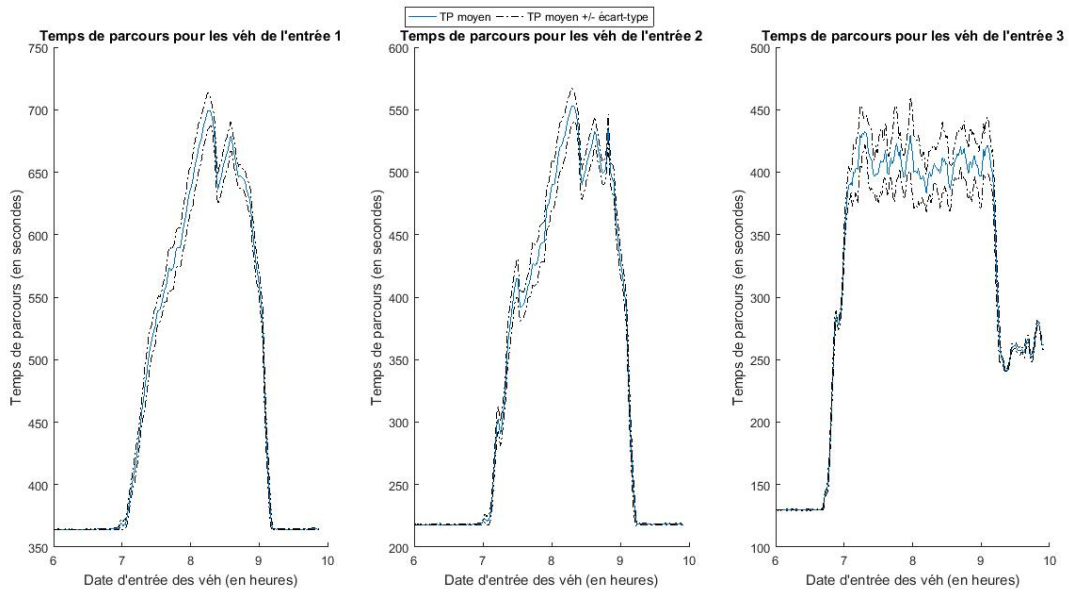


FIGURE I.7 – Moyenne du temps de parcours sur les 6 simulations et écart-type en fonction du temps, sans régulation, lundi 21 mars

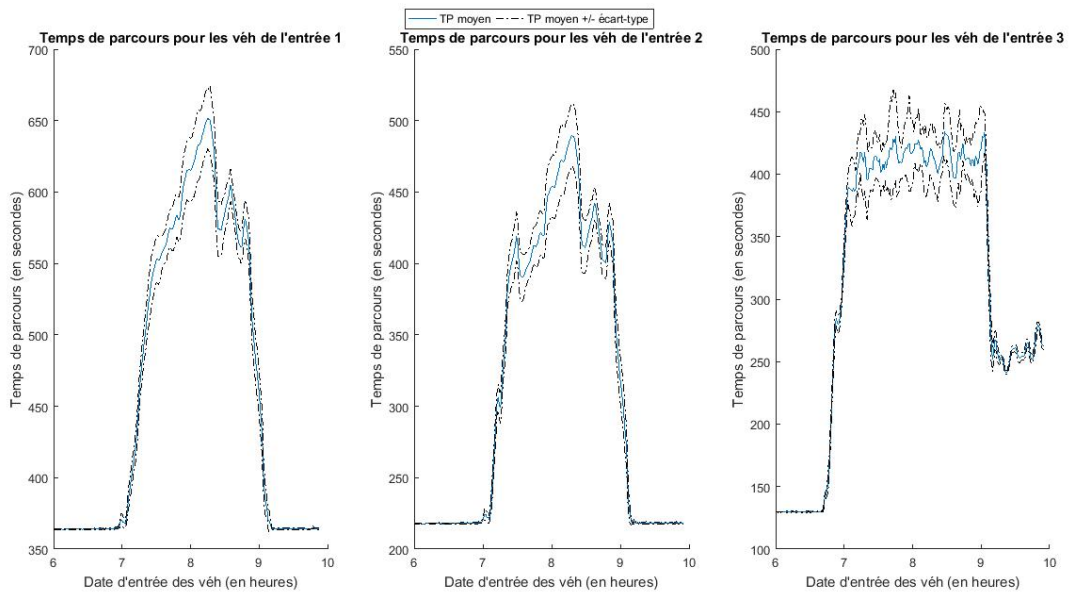


FIGURE I.8 – Moyenne du temps de parcours sur les 6 simulations et écart-type en fonction du temps, avec régulation, lundi 21 mars

TABLE I.4 – Tableau de l'écart-type des temps de parcours des 6 simulations, lundi 21 mars

		Véhicules de l'entrée 1	Véhicules de l'entrée 2	Véhicules de l'entrée 3
Sans régulation	Ecart-type maximal	20,44 s	20,486 s	37,70 s
	Ecart-type moyen	7,41 s	7,43 s	12,55 s
Avec régulation	Ecart-type maximal	25,04 s	25,03 s	41,16 s
	Ecart-type moyen	8,65 s	8,50 s	13,30 s

Bibliographie

- [Abdel-Aty et al., 2008] Abdel-Aty, M., Cunningham, R., Gayah, V., and Hsia, L. (2008). Dynamic variable speed limit strategies for real-time crash risk reduction on freeways. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, (2078) :108–116.
- [Abdel-Aty et al., 2006] Abdel-Aty, M., Dilmore, J., and Dhindsa, A. (2006). Evaluation of variable speed limits for real-time freeway safety improvement. *Accident analysis & prevention*, 38(2) :335–345.
- [Abdel-Aty et al., 2005] Abdel-Aty, M., Uddin, N., and Pande, A. (2005). Split Models for Predicting Multivehicle Crashes During High-Speed and Low-Speed Operating Conditions on Freeways. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 1908 :51–58.
- [Allaby et al., 2007] Allaby, P., Hellinga, B., and Bullock, M. (2007). Variable speed limits : Safety and operational impacts of a candidate control strategy for freeway applications. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, 8(4) :671–680.
- [Boukhniher and Haj Salem, 2010] Boukhniher, M. and Haj Salem, H. (2010). Evaluation Opérationnelle de la Régulation d’Accès sur les Autoroutes de l’IDF Basée sur la Stratégie ALINEA. In *6ème Conférence Internationale Francophone d’Automatique*, page 6p, Nancy, France.
- [Buisson and Lesort, 2010] Buisson, C. and Lesort, J.-B. (2010). *Comprendre le trafic routier : Méthodes et Calculs*. Certu.
- [Carlson et al., 2011] Carlson, R. C., Papamichail, I., and Papageorgiou, M. (2011). Local feedback-based mainstream traffic flow control on motorways using variable speed limits. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, 12(4) :1261–1276.
- [Cassidy and Ahn, 2005] Cassidy, M. and Ahn, S. (2005). Driver Turn-Taking Behavior in Congested Freeway Merges. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 1934 :140–147.
- [Certu, 2013] Certu (2013). La gestion dynamique des voies de circulation sur le pont de Saint-Nazaire. Technical Report Fiche 2.
- [Chang et al., 2007] Chang, H., Wang, Y., Zhang, J., and Ioannou, P. A. (2007). An integrated roadway controller and its evaluation by microscopic simulator VISSIM. pages 2436–2441. IEEE.
- [Chen et al., 2014] Chen, D., Ahn, S., and Hegyi, A. (2014). Variable speed limit control for steady and oscillatory queues at fixed freeway bottlenecks. *Transportation Research Part B : Methodological*, 70 :340–358.
- [Daganzo, 1997] Daganzo, C. F. (1997). A continuum theory of traffic dynamics for freeways with special lanes. *Transportation Research Part B : Methodological*, 31(2) :83–102.

- [Di Gangi et al., 2015] Di Gangi, M., Cantarella, G. E., Di Pace, R., and Memoli, S. (2015). Network traffic control based on a mesoscopic dynamic flow model. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*.
- [Duret, 2010] Duret, A. (2010). *Hétérogénéités du trafic autoroutier Identification, quantification, modélisation et impact sur l'écoulement*. PhD thesis, Vaulx-en-Velin, Rhône, France.
- [Duret, 2014] Duret, A. (2014). A multi-lane capacity model designed for variable speed limit applications. *Transport Research Arena*.
- [Duret et al., 2012] Duret, A., Ahn, S., and Buisson, C. (2012). Lane flow distribution on a three-lane freeway : General features and the effects of traffic controls. *Transportation research part C : emerging technologies*, 24 :157–167.
- [Duret et al., 2010] Duret, A., Bouffier, J., and Buisson, C. (2010). Onset of Congestion from Low-Speed Merging Maneuvers Within Free-Flow Traffic Stream : Analytical Solution. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, (2188) :96–107.
- [Duret and Plantier, 2014] Duret, A. and Plantier, S. (2014). Régulation dynamique des vitesses, Proposition et test d'un algorithme en temps réel. Technical report.
- [Hegyi et al., 2005a] Hegyi, A., De Schutter, B., and Hellendoorn, H. (2005a). Model predictive control for optimal coordination of ramp metering and variable speed limits. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 13(3) :185–209.
- [Hegyi et al., 2005b] Hegyi, A., De Schutter, B., and Hellendoorn, J. (2005b). Optimal coordination of variable speed limits to suppress shock waves. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, 6(1) :102–112.
- [Hegyi et al., 2008] Hegyi, A., Hoogendoorn, S., Schreuder, M., Stoelhorst, H., and Viti, F. (2008). SPECIALIST : A dynamic speed limit control algorithm based on shock wave theory. pages 827–832. IEEE.
- [Jin and Jin, 2015] Jin, H.-Y. and Jin, W.-L. (2015). Control of a lane-drop bottleneck through variable speed limits. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 58 :568–584.
- [Keyvan-Ekbatani, 2015] Keyvan-Ekbatani, M. (2015). Combination of traffic-responsive and gating control in urban networks : Effective interactions.
- [Knoop et al., 2010] Knoop, V. L., Duret, A., Buisson, C., and Van Arem, B. (2010). Lane distribution of traffic near merging zones influence of variable speed limits. pages 485–490. IEEE.
- [Laval et al., 2007] Laval, J., Cassidy, M., and Daganzo, C. (2007). Impacts of lane changes at merge bottlenecks : a theory and strategies to maximize capacity. In *Traffic and Granular Flow'05*, pages 577–586. Springer.
- [Laval, 2009] Laval, J. A. (2009). Effects of geometric design on freeway capacity : Impacts of truck lane restrictions. *Transportation research part B : methodological*, 43(6) :720–728.
- [Laval and Daganzo, 2006] Laval, J. A. and Daganzo, C. F. (2006). Lane-changing in traffic streams. *Transportation Research Part B : Methodological*, 40(3) :251–264.
- [Leclercq et al., 2004] Leclercq, L., Chanut, S., and Lesort, J.-B. (2004). Moving Bottlenecks in Lighthill-Whitham-Richards Model : A Unified Theory. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 1883 :3–13.

- [Lee et al., 2006] Lee, C., Hellinga, B., and Saccomanno, F. (2006). Evaluation of variable speed limits to improve traffic safety. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 14(3) :213–228.
- [Lee and Park, 2010] Lee, J. and Park, B. B. (2010). Lane Flow Distributions on Basic Segments of Freeways Under Different Traffic Conditions.
- [Newell, 1998] Newell, G. F. (1998). A moving bottleneck. *Transportation Research Part B : Methodological*, 32(8) :531–537.
- [Papageorgiou et al., 1991] Papageorgiou, M., Hadj-Salem, H., and Blosseville, J.-M. (1991). ALI-NEA : a local feedback control law for on-ramp metering. *Transportation Research Record*, (1320).
- [Papageorgiou et al., 2008] Papageorgiou, M., Kosmatopoulos, E., and Papamichail, I. (2008). Effects of variable speed limits on motorway traffic flow. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, (2047) :37–48.
- [Wu, 2006] Wu, N. (2006). Equilibrium of lane flow distribution on motorways. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, (1965) :48–59.
- [Yeung et al., 2015] Yeung, J. S., Wong, Y. D., and Secadinigrat, J. R. (2015). Lane-harmonised passenger car equivalents for heterogeneous expressway traffic. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, 78 :361–370.
- [Yuan et al., 2015] Yuan, Y., Duret, A., and Van Lint, H. (2015). Mesoscopic traffic state estimation based on a variational formulation of the LWR model in Lagrangian-space coordinates and Kalman filter. *Transportation Research Procedia*, 10 :82–92.
- [Zackor and Papageorgiou, 1991] Zackor, H. and Papageorgiou, M. (1991). Speed limitation on freeways : Traffic-responsive strategies. *Concise encyclopedia of traffic and transportation systems*, pages 507–511.
- [Zhang et al., 2005] Zhang, J., Boitor, A., and Ioannou, P. (2005). Design and evaluation of a roadway controller for freeway traffic. In *Proceedings. 2005 IEEE Intelligent Transportation Systems, 2005.*, pages 543–548.