



Effets sur le trafic de l'utilisation des bandes d'arrêt d'urgence

**Auswirkungen der Pannestreifenumnutzung auf den
Verkehr**

Effects on traffic using active hard shoulder lane system

**Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
Laboratoire des voies de circulation (LAVOC)
M.-A. Fénart, Ing. EPF
S. Samoili, Dr. ès. sc EPF
A. Founta, Dipl. Ing. NTUA
A.-G. Dumont, Professeur EPF**

**RGR Robert-Grandpierre et Rapp S.A.
P. Maillard, Ing. EPF
J. Chapoton, Ing. EPF
M. Roudy, Ing. UTC**

**Projet de recherche ASTRA 2010/023_OBF sur demande de l'Office
fédéral des routes (OFROU)**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Effets sur le trafic de l'utilisation des bandes d'arrêt d'urgence

**Auswirkungen der Pannestreifenumnutzung auf den
Verkehr**

Effects on traffic using active hard shoulder lane system

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
Laboratoire des voies de circulation (LAVOC)
M.-A. Fénart, Ing. EPF
S. Samoili, Dr. ès. sc EPF
A. Founta, Dipl. Ing. NTUA
A.-G. Dumont, Professeur EPF

RGR Robert-Grandpierre et Rapp S.A.
P. Maillard, Ing. EPF
J. Chapoton, Ing. EPF
M. Roudy, Ing. UTC

**Projet de recherche ASTRA 2010/023_OBF sur demande de l'Office
fédéral des routes (OFROU)**

Impressum

Instance de recherche et équipe de projet

Direction du projet

Laboratoire des Voies de Circulation (LAVOC), EPFL
Prof. André-Gilles Dumont, EPFL-LAVOC

Membres

Prof. André-Gilles Dumont, EPFL-LAVOC
Marc-Antoine Fénart, EPFL-LAVOC
Dr. Sofia Samoili, EPFL-LAVOC
Anastasia Founta, EPFL-LAVOC
Patrick Maillard, RGR S.A.
Jade Chapoton, RGR S.A.
Myriam Roudy, RGR S.A.

Commission de suivi

Président

Heinz Suter

Membres

Prof. Hans Peter Lindenmann
Dominique Blanc
Ueli Zoelly
Franz Gerber

Auteur de la demande

Office fédéral des routes (OFROU)

Source

Le présent document est téléchargeable gratuitement sur <http://www.mobilityplatform.ch>.

Table des matières

Impressum	4
Résumé	9
Zusammenfassung	11
Summary	13
1 Introduction	15
1.1 Problématique	15
1.2 Cadre législatif.....	16
1.3 Description de la recherche	18
1.4 Exemples à l'étranger	18
2 Cadre de l'étude	21
2.1 Zone d'étude	21
2.2 Données et systèmes de récolte.....	24
2.2.1 Equipements de télématique.....	24
2.2.2 Capteurs SMETRA.....	24
2.2.3 Système de vidéosurveillance.....	25
2.2.4 Comptage suisse automatique de la circulation routière (CSACR)	25
2.2.5 Base de données accidents	27
2.2.6 Périodes de référence.....	27
3 Activation du système	31
3.1 Procédure d'activation.....	31
3.2 Heures et durée d'ouverture	33
4 Analyse d'efficacité du système sur les paramètres de trafic	37
4.1 Capacité	37
4.2 Impact sur le débit.....	37
4.2.1 Evolution du débit aux heures de pointe.....	37
4.2.2 Comparaison de l'évolution du débit aux heures de pointe avec l'évolution du TJMO	39
4.2.3 Impact sur la zone d'étude élargie	40
4.2.4 Impact sur le réseau secondaire	45
4.2.5 Synthèse	46
4.3 Impact sur la vitesse	47
4.3.1 Evolution de la vitesse aux heures de pointe.....	47
4.3.2 Analyse de la vitesse des poids lourds	50
4.3.3 Synthèse	52
4.4 Impact sur la densité	52
4.4.1 Evolution de la densité aux heures de pointe	52
4.4.2 Synthèse	55
4.5 Impact sur les conditions de trafic.....	55
4.5.1 Conditions de trafic avant la mise en service de la BAU active.....	55
4.5.2 Congestion	57
4.5.3 Impact de l'ouverture de la BAU sur des conditions de circulation identiques	59
4.5.4 Synthèse	65
4.6 Analyse des diagrammes fondamentaux.....	66
4.6.1 Comparaison 2008 – 2010.....	66
4.6.2 En périodes d'ouverture de la BAU à la circulation, 2013 – 2014	67
4.6.3 Système opérationnel / non opérationnel	70
4.6.4 Synthèse	71
4.7 Synthèse de l'analyse d'efficacité du système BAU active.....	71
5 Comportement des usagers	73
5.1 Perception des usagers	73

5.1.1	Modélisation et évaluation de l'adaptation des utilisateurs au système	76
5.2	Répartition du débit sur les voies	77
5.2.1	Répartition sur les voies en fonction du débit total sur le tronçon	77
5.2.2	Répartition sur les voies selon la position dans le système de BAU active	80
5.3	Comportement à Morges-Est (entrée – sortie du système).....	84
5.3.1	Enregistrements vidéos	84
5.3.2	Direction Lausanne (entrée Morges-Est).....	91
5.3.3	Direction Genève (sortie Morges-Est)	95
5.3.4	Franchissement de la ligne blanche continue.....	98
5.3.5	Synthèse du comportement à Morges-Est	99
5.4	Synthèse du comportement des usagers	101
6	Modélisation et simulations de trafic.....	103
6.1	Cadre du projet	104
6.2	Base de données	105
6.3	Modélisation du réseau et vérification	105
6.4	Calibration	105
6.5	Validation	109
6.6	Scénarios	110
7	Impact sur les temps de parcours	111
7.1	Selon la vitesse moyenne annuelle sur la BAU active	111
7.2	Selon des conditions de circulation identiques	112
7.3	Selon le véhicule de mesure.....	114
7.4	Selon les simulations de trafic	114
7.5	Synthèse des temps de parcours	116
8	Impact sur l'environnement.....	119
8.1	Tendance générale selon rapport de l'OFEV	119
8.2	Prédictions selon les courbes du SETRA	120
8.3	Prédictions sur la base des simulations de trafic.....	122
8.3.1	Modèle de consommation de carburant	122
8.3.2	Modèle d'émission de polluants QUARTET	123
8.3.3	Modèle d'émission de polluants Panis et al.....	123
8.4	Etude d'impact sur la qualité de l'air	124
8.4.1	Evaluation 2009-2010 selon simulations de trafic	125
8.5	Synthèse de l'impact sur l'environnement	126
9	Impact sur la sécurité.....	127
9.1	Analyse des temps intervéhiculaires	127
9.1.1	Comportement des usagers en 2008 (avant la mise en service)	127
9.1.2	Comportement des usagers en 2013 (3 ans après la mise en service)	129
9.1.3	Synthèse de l'analyse des temps intervéhiculaires	130
9.2	Accidentologie.....	130
9.3	Synthèse de l'impact sur la sécurité	135
10	Optimisation de la consigne d'ouverture et fermeture	137
10.1	Impact du respect des consignes automatiques	137
10.2	Effet d'une ouverture anticipée de la BAU sur le temps de parcours	140
10.3	Synthèse de l'impact du respect des consignes automatiques	142
10.4	Méthodologie	142
10.4.1	Algorithme 1 ^{er} niveau : Méthode de regroupement stochastique	144
10.4.2	Algorithme 2 ^{ème} niveau : Méthode de modélisation stochastique.....	146
10.4.3	Algorithme 3 ^{ème} niveau : Optimisation	149
10.5	Synthèse de l'optimisation des consignes	154
11	Conclusions et recommandations	155

Glossaire	159
Bibliographie	161
Clôture du projet	165
Index des rapports de recherche en matière de route	169

Résumé

L'augmentation du trafic sur le réseau des routes nationales nécessite de trouver des solutions afin de garantir la fluidité et la disponibilité du réseau dans le but de répondre à cette demande.

Afin d'améliorer les conditions de circulation sur autoroute, il est proposé d'utiliser la bande d'arrêt d'urgence (BAU) comme voie additionnelle sans pour autant élargir l'infrastructure routière. La mise en place d'un tel système de bande d'arrêt d'urgence active est d'autant plus intéressante dans des zones où la forte densité d'habitation, les ouvrages d'art et les ressources naturelles ne permettent pas un élargissement de l'infrastructure routière.

La première application en Suisse de l'utilisation temporaire de la BAU en périodes de pointe a été mise en service en 2010 sur un tronçon d'environ 3.7 kilomètres entre Morges et Ecublens sur l'autoroute A1 Lausanne-Genève.

La présente recherche a permis d'analyser les effets sur les conditions de trafic de l'utilisation dynamique de la BAU en termes de capacités, débits, vitesses et densités. De plus, la perception, l'acceptabilité et le comportement des usagers du système ont été étudiés. En termes de sécurité routière, l'utilisation de la BAU comme voie de circulation implique un éventuel déficit de sécurité qui a été compensé par des mesures adéquates (places d'arrêt d'urgence, surveillance vidéo, etc).

Sur la base de simulations de trafic, l'impact du système de BAU active sur les temps de parcours et l'impact environnemental ont pu être estimés. Finalement, une étude approfondie a permis d'optimiser l'algorithme de contrôle permettant de gérer, de manière optimisée, l'ouverture respectivement la fermeture de cette 3^{ème} voie à la circulation.

Les différents résultats ont démontré que la mise en service du système de BAU active présente des gains importants en termes de conditions de circulation avec notamment une augmentation du débit, une stabilisation des vitesses, une diminution des congestions et des gains de temps de parcours. En termes d'impact sur la sécurité, une diminution des accidents et incidents a été constatée. Néanmoins, des zones de conflit potentiel (changements de voies) subsistent. Du point de vue environnemental, l'impact d'un tel système se mesure par une diminution importante de la consommation de carburant et des émissions polluantes en raison d'une meilleure stabilité des conditions de circulation (ondes de choc, effets d'accordéon, stop and go, etc).

Le bon fonctionnement du système repose sur la présence d'un algorithme de consignes d'ouverture/fermeture performant. La consigne actuelle proposée dans les évolutions du système donne de bons résultats.

Un potentiel d'amélioration du système a été mis en avant. Il consiste en :

- Une amélioration de l'algorithme de contrôle (ouverture/fermeture de la BAU). Celle-ci peut être effectuée sur la base de l'optimisation proposée de l'algorithme. Toutefois les gains et la fiabilité n'ont pas été évalués.
- Une amélioration de l'utilisation de la BAU comme 3^{ème} voie de circulation par les usagers. Celle-ci peut être envisagée sous la forme d'information aux usagers telle que des campagnes d'information ciblées ou d'amélioration de la signalisation en ajoutant par exemple un complément de signalisation dynamique textuelle.

Sur la base des résultats obtenus, les auteurs préconisent d'envisager la mise en service de tels systèmes sur des tronçons autoroutiers saturés pour lesquels un élargissement de l'infrastructure ne peut être réalisé, l'efficacité de cette alternative permettant de répondre aux besoins ayant été largement démontrée.

Zusammenfassung

Die Zunahme des Strassenverkehrs auf dem Nationalstrassennetz erfordert Lösungen die den Verkehrsfluss und die Verfügbarkeit des Netzes garantieren mit dem Ziel der Verkehrsnachfrage zu genügen.

Um den Verkehrsfluss auf den Autobahnen zu verbessern wird vorgeschlagen, den Pannestreifen als zusätzlichen Fahrstreifen zu benutzen (Pannestreifenumnutzung, PUN), ohne dabei die Anzahl der Fahrstreifen zu erhöhen. Die Bereitstellung eines PUN-Systems ist auf Strecken interessant, wo die Wohndichte hoch ist, die Kunstbauten und die natürlichen Ressourcen keine Erweiterung der Strasseninfrastruktur erlauben.

Die erste Anwendung in der Schweiz der temporären Benutzung des Pannestreifens in den Spitzenzeiten wurde 2010 auf einem Abschnitt von etwa 3.7 Kilometer zwischen Morges und Ecublens auf der Autobahn A1 Lausanne-Genf in Betrieb genommen.

Die vorliegende Forschungsarbeit hat erlaubt, die Wirkungen der dynamischen Benutzung der PUN auf die Verkehrsbedingungen in Bezug auf Leistungsfähigkeit, Verkehrsstärke, Geschwindigkeiten und Verkehrsdichte zu analysieren. Ausserdem wurden die Wahrnehmung, die Akzeptanz und das Verhalten der Benutzer des Systems genau studiert. In Bezug auf die Strassenverkehrssicherheit ist die Benutzung des Pannestreifens als Fahrstreifen ein eventuelles Sicherheitsdefizit, das durch zusätzliche Massnahmen (Pannenbuchten, Videoaufsicht, usw.) ausgeglichen werden kann.

Aufgrund von Verkehrssimulationen wurden die Auswirkungen der PUN auf die Fahrzeiten und die Umweltbelastung geschätzt. Schliesslich hat eine eingehende Analyse erlaubt, den Kontrollalgorithmus zu optimieren, der erlaubt, die Öffnung, bzw. die Schliessung dieses zusätzlichen Fahrstreifens zu verwalten.

Die unterschiedlichen Ergebnisse haben bewiesen, dass die Inbetriebnahme des PUN-Systems wichtige Gewinne in Bezug auf die Verkehrsbedingungen mit sich bringt, besonders die Zunahme der Verkehrsstärke, die Stabilisierung der Geschwindigkeiten, die Verminderung von Staus und der Fahrzeiten. In Bezug auf die Sicherheit ist eine Verminderung von Unfällen und Verkehrsvorfällen festgestellt worden. Trotzdem gibt es Bereiche für potentielle Konflikte (Fahrspurwechseln). Aus der Sicht der Umwelt, wurde eine bedeutende Abnahme des Treibstoffverbrauches und der umweltschädlichen Emissionen aufgrund einer besseren Stabilität der Verkehrsbedingungen (Stosswellen, stockender Verkehr, Stop and go, usw.) festgestellt.

Das gute Funktionieren des Systems beruht auf einen leistungsfähigen Anweisungsalgorithmus für die Öffnung und die Schliessung des Pannestreifens. Die gegenwärtige in den Entwicklungen des Systems vorgeschlagene Anweisung bringt gute Ergebnisse.

Ein Verbesserungspotential des Systems liegt in den folgenden Punkten:

- Eine Verbesserung des Kontrollalgorithmus (Öffnung/Schliessung) des Pannestreifens. Diese kann auf Grund der durch den Algorithmus vorgeschlagenen Optimierung ausgeführt werden. Jedoch sind die Gewinne und die Zuverlässigkeit nicht evaluiert worden.
- Eine Verbesserung der Benutzung des Pannestreifens als 3. Fahrstreifen durch die Verkehrsteilnehmer. Diese kann in der Form von Informationen an die Verkehrsteilnehmer in Erwägung gezogen werden wie gezielte Informationskampagnen oder zum Beispiel Verbesserungen der Fahrstreifensignalisation durch eine zusätzliche Wechseltextanzeige.

Aufgrund der erzielten Ergebnisse befürworten die Verfasser, die Inbetriebnahme solcher Systeme auf den gesättigten Autobahnabschnitten in Betracht zu ziehen wo eine Erweiterung der Infrastruktur nicht realisiert werden kann. Die Wirksamkeit einer solchen Alternative die den Bedürfnissen der Verkehrssicherheit gerecht wird wurde hier bewiesen.

Summary

The increase in traffic on the national road network calls for solutions to be found in order to guarantee the fluidity and availability of the network with the aim of meeting this demand.

In order to improve traffic conditions on motorways, it is proposed to use the hard shoulder (emergency lane) as additional lane without actually widening the road infrastructure. The setting-up of such a system of an active emergency lane is even more attractive in areas where the high residential density, structures (bridges, covered cuts, tunnels, ...) and natural resources do not permit a widening of the road infrastructure.

The first application in Switzerland of the temporary use of the emergency lane in rush hours was put into operation in 2010 on a section of approximately 3.7 kilometres between Morges and Ecublens on the A1 Lausanne-Geneva motorway.

The present research has made it possible to analyse the effects on traffic conditions of the active hard shoulder lane system in terms of capacities, flows, speeds and densities. Furthermore, the perception, acceptance and behaviour on the part of users of the system have been studied. In terms of road safety, the use of the emergency lane as traffic lane entails a potential safety deficiency that has been counterbalanced by appropriate measures (emergency stopping places, video surveillance, etc.).

The impact of the active hard shoulder lane system on journey times and the environmental impact were estimated based on traffic simulations. Finally, thanks to an in-depth study, the control algorithm was optimised, allowing the optimal management of the opening and closing of this third lane to traffic.

The results showed that the implementation of the active hard shoulder lane system offers significant advantages in terms of traffic conditions, particularly with an increase in flow, a stabilisation of speeds, a reduction in traffic jams and shorter journey times. In terms of safety impact, a decrease in accidents and incidents was observed. Nevertheless, there are still potential conflict areas (lane changes). From the environmental point of view, the impact of such a system is measured by a substantial reduction in fuel consumption and harmful emissions owing to a better stability of traffic conditions (shockwaves, stop and go, etc.).

The smooth functioning of the system is based on the presence of an effective algorithm for opening/closing instructions. The instructions currently proposed as part of the development of the system give good results.

A potential improvement of the system has been put forward. This consists of :

- An improvement of the control algorithm for the opening/closing of the third traffic lane. This can be achieved based on the proposed optimisation of the algorithm. However the benefits and reliability have not been evaluated.
- An improvement of the use of the emergency lane as third traffic lane for users. This can be envisaged in the form of information to users such as targeted information campaigns or the improvement of road signs via the use of additional dynamic text-based traffic signs for example.

Based on the results obtained, the authors recommend envisaging the implementation of such systems on saturated motorway sections for which a widening of the infrastructure cannot be undertaken, the effectiveness of this alternative way of fulfilling the demands having been extensively demonstrated.

1 Introduction

1.1 Problématique

L'accroissement du trafic dans certains secteurs du réseau autoroutier nécessite de proposer une augmentation significative de la capacité pour répondre à cette demande. Elargir l'infrastructure en ajoutant des voies étant parfois difficile en zone urbanisée, il peut être proposé de réaffecter la bande d'arrêt d'urgence (BAU) comme voie additionnelle de circulation en période de forte demande de trafic pour optimiser l'utilisation d'une plateforme existante. Ce procédé est généralement désigné par l'affectation variable ou dynamique des voies.

En recourant aux techniques proactives des systèmes de transport intelligents (Intelligent Transportation Systems - ITS), il est possible de réduire la congestion et d'en atténuer les effets. Ainsi, un gain est apporté par l'uniformisation des vitesses des véhicules, la diminution des files d'attente, la réduction des temps de parcours et des coûts de déplacement mais aussi par la diminution de la consommation d'énergie et donc de l'émission de polluants. Les techniques de gestion du trafic contribuent à l'amélioration du réseau routier et de la sécurité routière. Avec une technique de gestion active du trafic (Active Traffic Management - ATM) et avec une méthode adaptative qui anticipe les changements du comportement du système et modifie dynamiquement la stratégie de contrôle, il est possible d'augmenter la capacité du réseau pour supporter une demande de trafic supplémentaire comme rencontrée aux périodes de pointe du matin et du soir.

Le projet présenté ici a pour objet l'analyse de l'efficacité d'un système de gestion du trafic utilisant la BAU comme voie de circulation. On utilisera dès lors le terme de BAU active. En 2010, un tel système a été mis en service sur l'autoroute A1, en Suisse, entre Morges et Ecublens. Les congestions récurrentes, leurs effets sur la fluidité du trafic dans toute l'agglomération Lausanne-Morges et sur l'accidentologie ont conduit à la mise en place de ce système, sur la base d'expériences similaires à travers le monde. En tant que projet pilote à l'échelle suisse, cette expérience a été particulièrement observée et servira de base pour la résolution de problèmes similaires sur l'ensemble du territoire. Néanmoins, cette solution ne peut être valable qu'à moyen terme, des travaux lourds d'infrastructure sont probablement nécessaires à plus long terme. Avant de décider d'appliquer plus largement cette technique, il est nécessaire d'en connaître les avantages, mais surtout les risques et les faiblesses.

Le présent projet se concentre sur l'efficacité de l'utilisation dynamique des BAU, analyse les effets de cette utilisation sur le trafic et propose une stratégie pour optimiser la gestion du trafic. Le terme d'efficacité englobe de nombreux domaines et s'applique également sur des horizons temporels variés. Sont traités dans ce projet :

- L'évolution des paramètres de trafic.
- Les temps de parcours.
- L'accidentologie.

En outre, la recherche vise à répondre aux questions suivantes :

- Quel est l'impact de la BAU active sur les temps de parcours, la sécurité et les émissions des véhicules ?
- Quelle est l'influence de la BAU active sur le comportement des usagers ? Comment perçoivent-ils l'utilisation temporaire de la BAU ? Quel est le niveau d'acceptation ? Comment leur comportement est influencé quand la voie est ouverte ou fermée ?
- Quels sont les paramètres optimaux pour décider de la mise à disposition de la BAU active (débit, vitesse, occupation, densité, etc.) et à quels seuils ? Quelles sont les vitesses à appliquer ? Quelle est la durée minimale d'ouverture de la BAU active et les critères de fermeture ?
- Quelle devrait être la configuration de l'infrastructure pour une utilisation optimale de la BAU ?

- Quelles stratégies d'ATM devraient être intégrées avec l'utilisation temporaire de la BAU pour améliorer les flux de circulation ?

L'analyse est faite par comparaison entre la période précédant la mise en place du système, soit en 2008, jusqu'à fin 2014. Les données fournies par les capteurs installés sur la zone de la BAU active et l'application de procédés de microsimulation ont permis d'analyser et de quantifier plusieurs paramètres déterminants de l'efficacité. De plus, l'optimisation des consignes automatiques d'activation, respectivement de désactivation du système ont fait l'objet d'une thèse de doctorat menée par S. Samoili au sein du Laboratoire des voies de circulation (LAVOC, EPFL [7]).

1.2 Cadre législatif

Réaffectation de la BAU en voie de circulation (R-BAU)

L'utilisation des BAU était auparavant seulement autorisée en cas d'incident majeur. En 2007, l'Office fédéral des routes a publié la première version de la directive OFROU 15 002 [3] concernant la conversion de la BAU en voie de circulation. L'utilisation de la BAU comme une voie additionnelle y est envisagée lorsque la sécurité ou la fluidité du trafic de tronçons de route à grand débit ou aux abords de jonctions présentent de graves lacunes.

En Suisse, le projet de BAU active [31] indique une bande d'arrêt d'urgence dédiée temporairement à la circulation. L'ouverture de la BAU à la circulation est décidée par des opérateurs de trafic aidés d'un algorithme, en prévision de ralentissements importants (p. ex. aux heures de pointe).

Cette mesure fait partie des interventions possibles pour optimiser les flux de trafic sur des tronçons assez longs (plusieurs kilomètres) présentant :

- Des accidents récurrents,
- des ralentissements récurrents,
- des pertes de temps consécutives à des limites de capacité,
- de fortes pentes avec une part importante des poids lourds dans le trafic total,
- des entrées et sorties saturées avec des files d'attente débordant sur les voies principales de circulation,
- de forts débits de pointe dépassant la capacité du tronçon.

Les buts visés par cette mesure sont :

- L'élimination des zones conflictuelles.
- La réduction de la formation de la congestion.
- L'augmentation temporaire de la capacité du tronçon.
- L'amélioration de la sécurité routière.

Pour pouvoir être réalisée, cette conversion doit résoudre les problèmes constatés à court ou à moyen terme. Elle doit être physiquement possible : la largeur des voies doit répondre au minimum aux profils en travers réduits de l'OFROU et les obstacles extérieurs ne doivent pas réduire le gabarit d'espace libre. La perte de sécurité liée à la conversion de la BAU doit être compensée. Ceci peut être notamment réalisé par :

- Une diminution de la limite de vitesse.
- La création de refuges de sécurité en dehors de la BAU.
- La surveillance du trafic.

L'utilisation provisoire de la BAU constitue, avec d'autres mesures, comme la limitation variable de vitesse, la signalisation dynamique de voies, le ramp metering et les panneaux à messages variables (PMV), une méthode de gestion de trafic active.

Gestion du trafic en Suisse (Verkehrsmanagement VM-CH)

En Suisse, la gestion du trafic repose sur quatre piliers [4] :

- L'information routière.
- La gestion de réseau.
- La gestion d'axes.
- La gestion des nœuds.

En fonction du trafic circulant sur les axes des routes nationales, des niveaux d'équipements plus ou moins avancés sont requis. Les 4 niveaux d'équipements (minimal, léger, moyen, haut) décrivent différentes installations et mesures particulières nécessaires à la gestion du trafic. Le tronçon de l'autoroute A1 entre Morges et Ecublens s'est vu attribuer un niveau d'équipement haut (encadré sur la Fig. 1). Les mesures suivantes sont envisagées à ce niveau :

- Régulation des entrées et des sorties. (Gestion des nœuds)
- Régulation des nœuds secondaires. (Gestion des nœuds)
- Mesures éventuelles pour le trafic poids lourd. (Gestion d'axes)
- Conversion de la BAU. (Gestion d'axes)

Afin de pouvoir procéder à la conversion de la BAU en voie de circulation, plusieurs critères de mise en œuvre relatifs au niveau de service et à la sécurité du trafic doivent être respectés.

Sur ce tronçon, c'est la dernière mesure (conversion de la BAU) qui a été réalisée. Suite aux observations menées afin de juger de l'efficacité de ce système, d'autres tronçons dont la problématique est similaire pourront être traités par cette mesure.

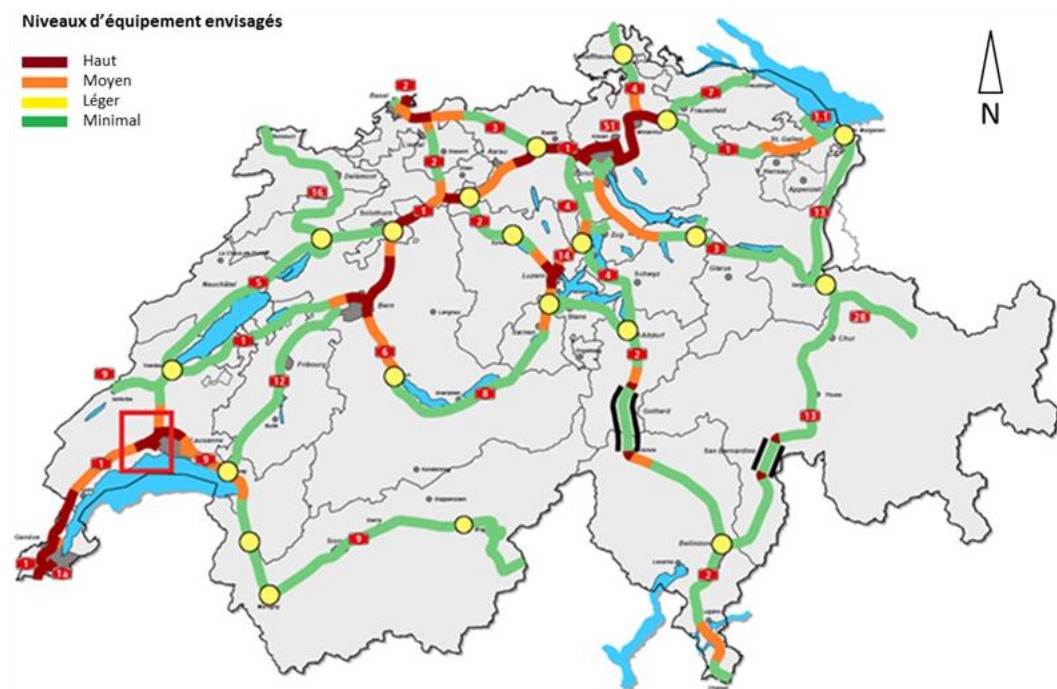


Fig. 1 Niveaux d'équipements envisagés sur les routes nationales, état 2007 [4].

1.3 Description de la recherche

L'autoroute A1 entre Lausanne et Genève est l'une des autoroutes de Suisse les plus anciennes et surchargées. Dimensionnée pour accueillir 15'000 à 20'000 véhicules par jour en 1970 [38], le trafic s'y est accru à près de 89'000 véhicules par jour ouvrable en 2008 [32].

Dans le message relatif au programme d'élimination des goulets d'étranglement du réseau des routes nationales et à l'allocation des moyens financiers nécessaires [39], le degré de surcharge le plus élevé a été attribué au tronçon de la route nationale actuelle A1 entre l'échangeur d'Ecublens et la jonction de Morges-Est. Une congestion récurrente étant constatée le matin et le soir, il a été décidé de prendre des mesures pour obtenir une capacité suffisante sur ce tronçon afin d'absorber le trafic. La nécessité de réduire la congestion et la volonté d'améliorer l'efficacité et la fiabilité du système de transport se sont avérées indispensables et ont conduit à choisir une technique d'utilisation active de la BAU.

Le laboratoire des voies de circulation (LAVOC) de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) a reçu mandat de l'Office fédéral des routes (OFROU) de mener une recherche sur le fonctionnement et l'efficacité du système d'utilisation de la bande d'arrêt d'urgence.

1.4 Exemples à l'étranger

Plusieurs projets similaires à celui introduit entre Morges et Ecublens ont vu le jour et peuvent être donnés en exemple en Europe et aux États-Unis.

Royaume-Uni

Depuis 2002, le tronçon de l'autoroute M42 à Birmingham, Royaume-Uni (contournement sud-est de Birmingham) entre l'échangeur des autoroutes M42-M40 et l'échangeur des autoroutes M42-M6 est équipé d'un système de gestion du trafic autorisant les véhicules à circuler sur la BAU en situation de bouchons (Four lanes Variable Mandatory Speed Limits – 4L-VMSL [52]).

Un algorithme se basant sur la densité du trafic (évaluée par des caméras numériques) détermine la limite de vitesse et une consigne d'ouverture est envoyée à un opérateur du centre régional de gestion du trafic, qui décide d'ouvrir ou non la BAU à la circulation.

Les résultats de ce système sont les suivants :

- Augmentation de 7 à 9% de la capacité.
- Utilisation de la BAU : 12% du flux total.
- Réduction de la consommation de carburant (~4%) ainsi que des principales émissions polluantes (4% pour le CO₂, 5% pour les NO_x).
- Amélioration potentielle de la sécurité routière en raison de l'amélioration des conditions de circulation.

France

En 2005, dans la région Île-de-France, une voie auxiliaire (BAU ouverte à la circulation) a été mise en service sur les autoroutes A4 et A86 offrant ainsi une 5^{ème} voie de circulation. Avant cet aménagement, on pouvait constater, matin et soir, la formation d'un bouchon long de 10 à 15 kilomètres (jusqu'à 10 heures de bouchon) [53].

Sur la base des mesures d'un réseau de capteurs, les conditions d'exploitation du système sont déterminées dynamiquement en fonction de l'état du trafic et validées par un opérateur sécurité trafic à l'aide de caméras de surveillance.

Un système de glissières métalliques mobiles motorisées permet de fermer physiquement la voie auxiliaire en temps voulu.

Les effets de cette mesure sur le trafic sont les suivants :

- Augmentation de 7.5 à 10% de la capacité entre 2003 (situation antérieure) et 2006 (situation avec la voie auxiliaire).
- Amélioration du niveau de service.
- Amélioration de la vitesse moyenne et du temps de parcours à la fois sur le tronçon équipé de la voie auxiliaire et aux abords de celui-ci.
- Diminution de la consommation de carburant (-15% pour l'essence et -1% pour le diesel).

À Grenoble, en France, une voie spécialisée partagée (VSP), longue de 4.5 km, vise à permettre l'utilisation de la BAU par les transports en commun lors de bouchons (vitesse inférieure à 50 km/h) sur l'autoroute A48 afin d'améliorer la vitesse commerciale et la régularité [54]. L'ouverture de la BAU aux transports en commun se fait au moyen d'indications sur les panneaux à messages variables et de panneaux à prisme.

Les résultats constatés sont les suivants :

- Gain de 50 secondes en moyenne sur le temps de parcours.
- Forte diminution de l'amplitude des temps de trajet (avant la VSP: 6 min en moyenne, après la VSP: 3 minutes en moyenne).
- Fréquentation améliorée.

Allemagne

Dans la Hesse, en Allemagne [55], un système de bande d'arrêt d'urgence active est en service. Basé sur des compteurs de trafic et un système de caméras (environ 80 caméras), ce système démontre les résultats suivants :

- Augmentation de la capacité de 20%.
- Amélioration des conditions de circulation (bénéfice économique de 50'000 euros par jour).
- Diminution des accidents induits par la congestion.

En Allemagne également, notamment à Göttingen, d'autres systèmes de circulation sur bande d'arrêt d'urgence sont testés (activation à temps fixe).

Etats-Unis

Aux Etats-Unis, plusieurs systèmes d'utilisation de la bande d'arrêt d'urgence comme voie de circulation sont en service :

- Voie pour bus (Bus on shoulders).
- Voie pour véhicules de transit.
- Désengorgement de jonctions (remontée de file).
- Utilisation comme voie additionnelle pour les véhicules de covoiturage.
- Utilisation comme voie additionnelle pour tous véhicules en cas de congestion.

2 Cadre de l'étude

2.1 Zone d'étude

L'autoroute A1 traverse la Suisse d'Ouest en Est sur plus de 380 kilomètres de la frontière française au niveau de Genève à la frontière autrichienne aux environs de Saint-Gall. Le tronçon Lausanne-Genève a été mis en service en 1964 pour l'Exposition nationale.

Zone avec BAU active

La zone de la BAU active se situe sur l'autoroute A1 dans l'agglomération Lausanne-Morges, plus précisément entre la jonction de Morges-Est et l'échangeur d'Ecublens (Fig. 2).

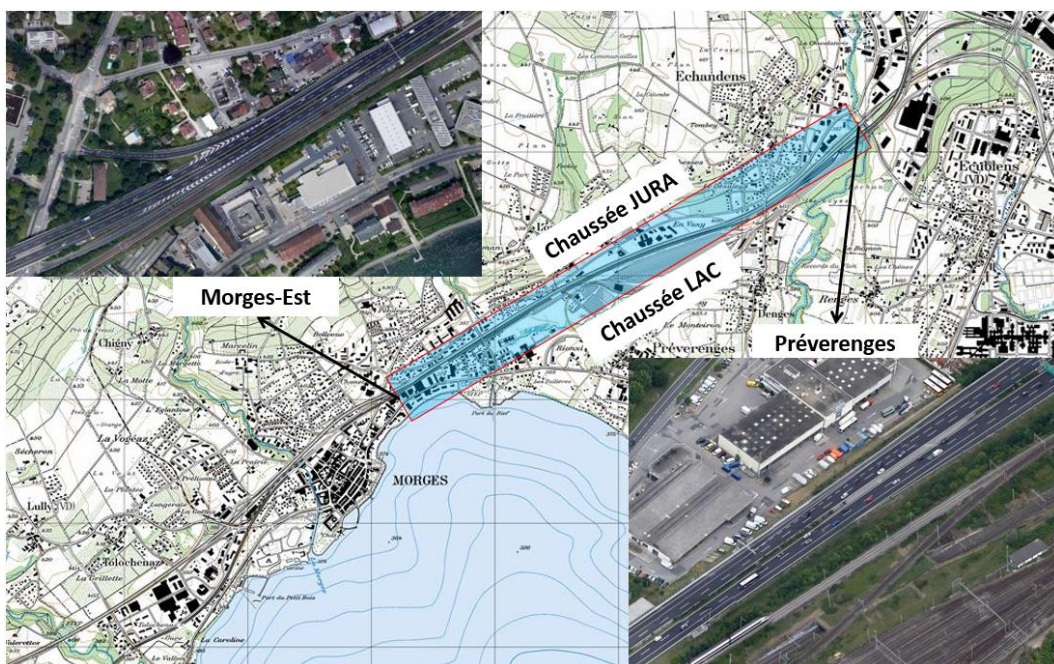


Fig. 2 Localisation de la zone de la BAU active.

Le système de BAU active a été mis en service le 18 janvier 2010 sur le tronçon Morges-Ecublens. Pour ce faire, la largeur des voies de circulation a dû être adaptée sur ce tronçon d'environ 3.7 kilomètres. De deux voies de 4 m de largeur avec une bande d'arrêt d'urgence de 2.5 m, la nouvelle configuration de la plateforme est passée à deux voies de 3.5 m et une bande d'arrêt d'urgence circulaire de 3.5 m (Fig. 3).

Les travaux menés en 2009 ont permis d'ajouter des niches de secours nécessaires à une configuration avec utilisation de la BAU comme voie de circulation. Le revêtement a été remplacé et des portiques et des mâts de support de signalisation ont été disposés à intervalles réguliers.

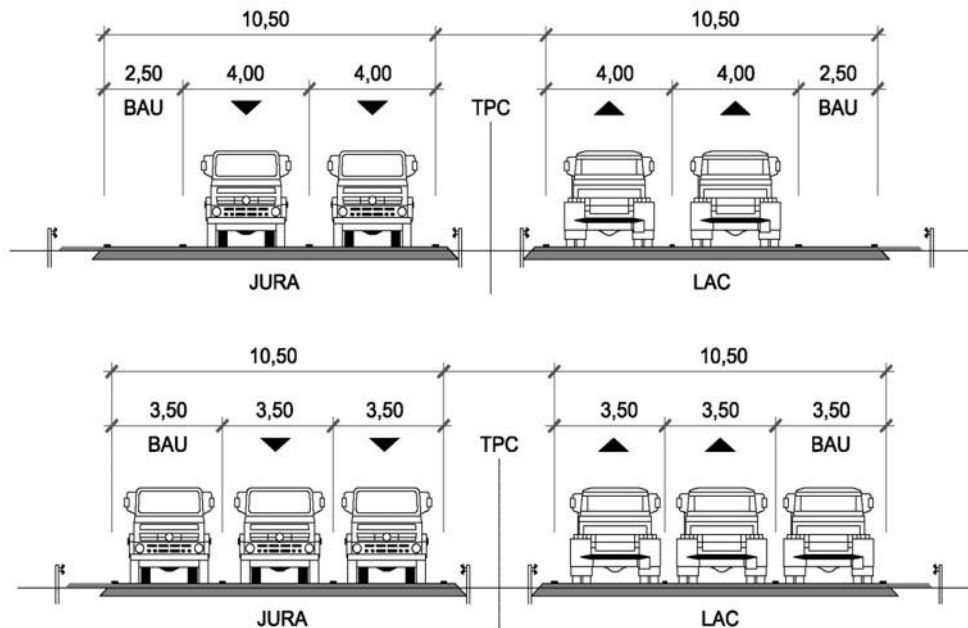


Fig. 3 Profil type sans (2008) et avec (2010) utilisation de la bande d'arrêt d'urgence. Base selon [3].

Etat du système

Lorsque la BAU n'est pas ouverte à la circulation, le système est dit à l'état de repos. Dans ce cas, la vitesse légale est de 120 km/h et la circulation s'effectue sur deux voies.

Lorsque l'activation du système est mise en œuvre, après contrôle visuel de l'opérateur, la vitesse est tout d'abord réduite à 100 km/h puis quelques minutes après, la 3^{ème} voie est ouverte à la circulation.

Tronçons adjacents

L'influence du système de BAU active dépend et impacte fortement les zones situées en amont et en aval. On nomme « Tronçons adjacents » les tronçons situés un kilomètre de part et d'autre de la zone de BAU active.

Zone d'étude élargie

Finalement, afin d'étudier l'étendue de l'impact du système de BAU active sur les conditions de circulation, on considère une zone d'étude élargie qui s'étend de la jonction d'Aubonne à l'Ouest jusqu'à Crisser au Nord-Est (Fig. 4).

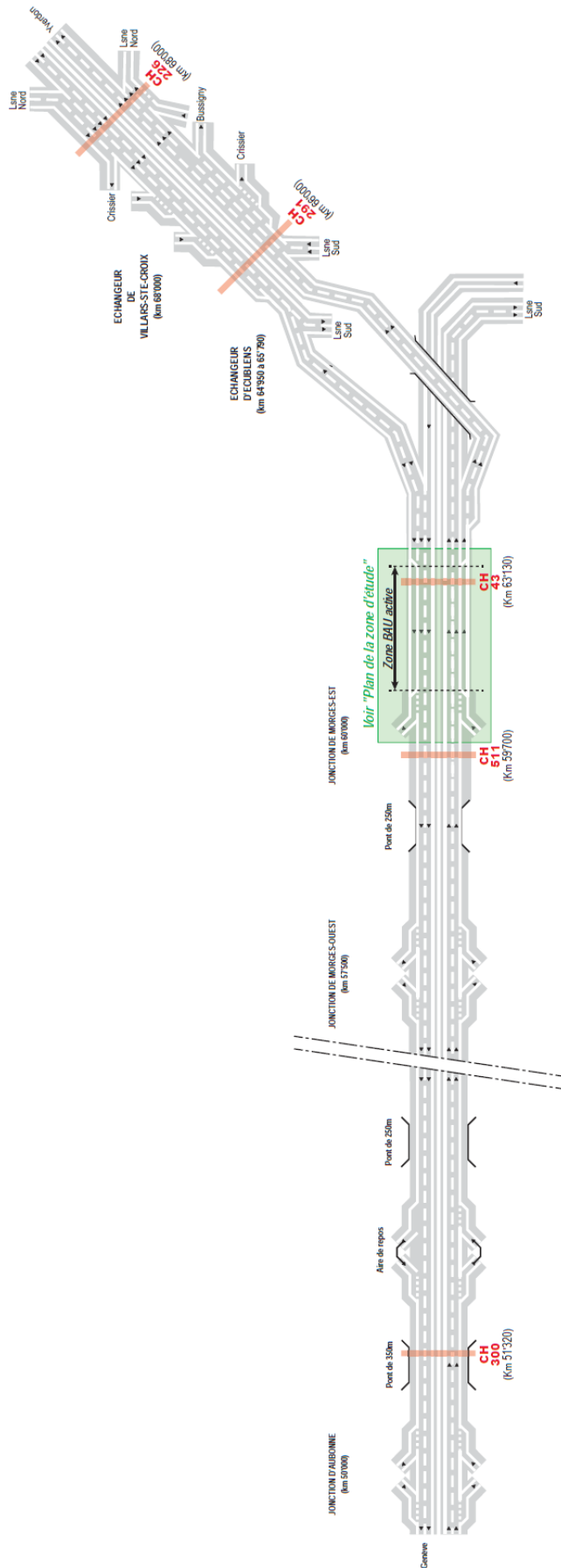


Fig. 4 Plan de la zone d'étude élargie.

2.2 Données et systèmes de récolte

2.2.1 Equipements de télématique

Les phases de transition, ouverture de 2 à 3 voies et de fermeture de 3 à 2 voies, sont gérées par un équipement de télématique comportant des portiques de signalisation supportant les feux indicateurs d'affectation de voie. Les panneaux variables de la vitesse limite et de la géométrie de l'autoroute complètent le système télématique (Fig. 10).

2.2.2 Capteurs SMETRA

Le tronçon de la BAU active est équipé de capteurs qui mesurent les paramètres du trafic tous les 500 mètres (Serveur de Mesure Trafic). Les différents capteurs sont nommés J-(kilomètres) pour la chaussée « Jura » et L-(kilomètres) pour la chaussée « Lac » (Fig. 5).

Ces capteurs disposés sur l'infrastructure fournissent des données de débit et de vitesse moyenne du flux (véhicules légers et véhicules poids lourds) par intervalle de 30 secondes. L'agrégation de ces données par pas de 3 minutes (débit, vitesse, densité et pourcentage de poids lourds) sert à détecter les conditions de trafic.

Sur la base de ces données et d'algorithmes de déclenchement, l'opérateur de la centrale de gestion reçoit une consigne d'ouverture, respectivement de fermeture (Chapitre 3). D'autre part, les données permettent également de transmettre une alerte de formation de bouchon qui pourrait mener à une désactivation du système.

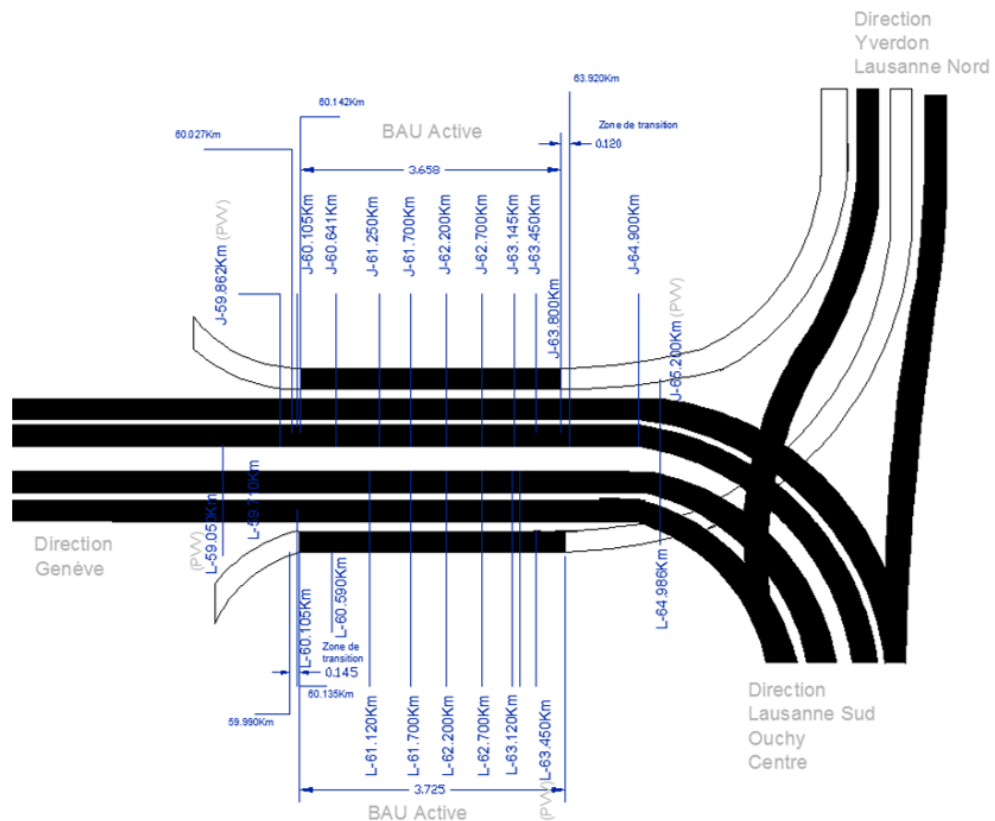


Fig. 5 Système SMETRA sur la zone de la BAU active.

2.2.3 Système de vidéosurveillance

L'ouverture de la BAU à la circulation n'intervient qu'après un examen visuel de la part d'un opérateur de la centrale cantonale de gestion du trafic (Blécherette). Ce contrôle s'effectue sur la base de caméras dotées d'un système infrarouge (conditions nocturnes en hiver lors de l'ouverture) qui couvrent l'entier du tronçon. Le système de vidéosurveillance permet également de visualiser les véhicules en panne, les incidents, les accidents, etc.

2.2.4 Comptage suisse automatique de la circulation routière (CSACR)

Propriétés de l'Office fédéral des routes, les installations du comptage suisse automatique de la circulation routière (CSACR) sont réparties sur l'ensemble du territoire. En mars 2015, on dénombre 538 stations dont 370 sur le réseau de base des routes nationales (Fig. 6).

Les stations CSACR collectent les informations de passage de tous les véhicules à l'aide de capteurs intégrés dans la chaussée. Les journaux d'enregistrement journaliers (*.log) contiennent les informations suivantes :

- Identifiant de l'enregistrement.
- Date et heure (détail au centième de seconde).
- Numéro de voie.
- Numéro de direction.
- Headway (temps entre avant du véhicule précédent et avant du véhicule suiveur) [s].
- Temps intervéhiculaire (entre arrière du véhicule précédent et avant du véhicule suiveur) [s].
- Vitesse [km/h].
- Longueur du véhicule [cm].
- Classe du véhicule (Autocar, moto, voiture de tourisme, voiture de livraison, camion, train routier, tracteur à sellette, etc.) (Swiss 10, Tab. 1).

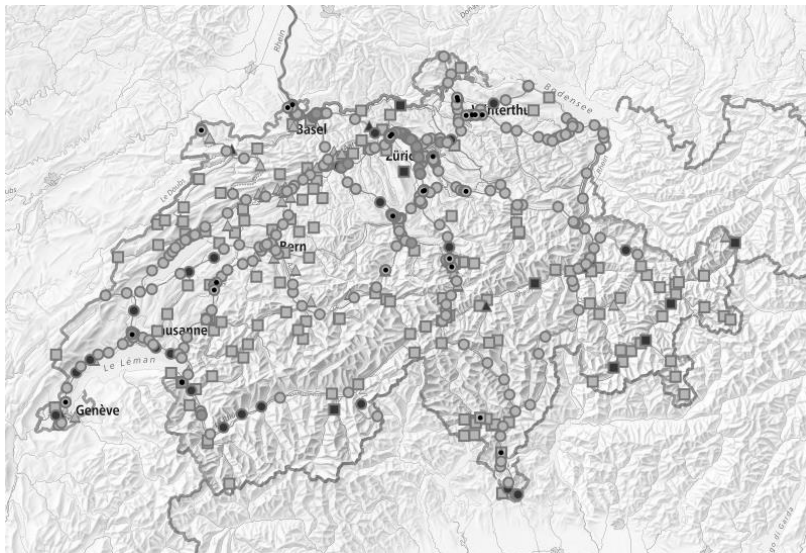


Fig. 6 Stations CSACR, map.geo.admin.ch.

Les stations qui sont utilisées dans le cadre de cette étude sont les suivantes (Fig. 4) :

- CH43 – Préverenges
- CH226 – Crissier
- CH291 – Renens
- CH300 – Etoy
- CH511 – Morges Centre

Classification Swiss 10

Cette classification, définie dans la directive des postes de comptage de trafic [5], permet de distinguer différentes classes de véhicules (Tab. 1).

Tab. 1 Classes de véhicules Swiss 10 [5]

Saisie des classes selon le schéma « Swiss 10 »	Saisie pour le comptage suisse de la circulation routière (CSCR)	Saisie pour la gestion du trafic
2 : Motocycle	2 : Motocycle	1 : Véhicules assimilables à des VT (véhicules < 3.5 t)
3 : Voiture de tourisme	3 : Voiture de tourisme	
4 : Voiture de tourisme avec remorque		
5 : Voiture de livraison	4 : Voiture de livraison	
6 : Voiture de livraison avec remorque		2 : Véhicules assimilables à des camions (véhicules > 3.5 t)
7 : Voiture de livraison avec galerie		
1 : Bus, car	1 : Bus, car	
8 : Camion	5 : Camion	
9 : Train routier	6 : Train articulé + véhicule articulé	
10 : Véhicule articulé		

La fiabilité de la classification Swiss est définie dans la directive des postes de comptage [5]. Le taux d'exactitude (Tab. 2) défini, sur au moins 1000 véhicules par voie, comme étant le rapport entre la somme des véhicules par classe saisis automatiquement et la somme des véhicules de cette classe identifiés par contrôle visuel, est la base sur laquelle on peut déterminer la confiance dans cette classification :

$$\text{Taux d'exactitude de la classe } i = \frac{\sum n_i \text{ enregistrés au CSACR}}{\sum n_i \text{ identifiés visuellement}}, n : \text{ nombre de véhicules.}$$

Cette valeur ne tient pas compte d'éventuels enregistrements faux-positifs (véhicule mal-classé ou véhicule « fantôme »).

Tab. 2 Taux d'exactitude de la classification « Swiss 10 » [5]

Classe	Taux d'exactitude	
	Valeur cible OFROU	Valeur minimale
1 : Bus, car	> 90%	> 75%
8 : Camion	> 95%	> 90%
9 : Train routier	> 95%	> 90%
10 : Véhicule articulé	> 95%	> 90%
Véhicules lourds de transport (Classes 8, 9 et 10)	> 95%	> 95%
Véhicules assimilables à des camions (Classes 1, 8, 9 et 10)	> 95 %	> 95%
Nombre total de véhicules (Classes 1 à 10)	> 99%	> 99%

Deux recherches actuelles utilisant également cette classification [24] [25] ont démontré que les classes Swiss 10 1,9 et 10 sont généralement sous-détectées alors que la classe relative aux camions, Swiss 10 8, est sur-détectée. Cette tendance est également relevée dans la remarque préliminaire du rapport de l'Office fédéral des transports (OFT, [34]). Par comparaison des données des stations de contrôle de la redevance poids lourds liée aux prestations (RPLP) situées aux passages alpins et des données des stations de comptage du CSACR, il est mis en évidence que certains grands véhicules de tourisme de même que certains fourgonnettes sont attribués, à tort, à la classe Swiss 10 8 (camions). Il est également mentionné que la part de tracteurs à sellette est sous-estimée.

Spécificité du capteur CH43 – Préverenges (CSACR)

Ce capteur est situé dans une zone spécifique de conditions de circulation (Fig. 7). A cet emplacement, les zones de changements de voies de l'échangeur d'Ecublens, la jonction de Morges-Est et les extrémités du système de BAU active ont une influence restreinte.

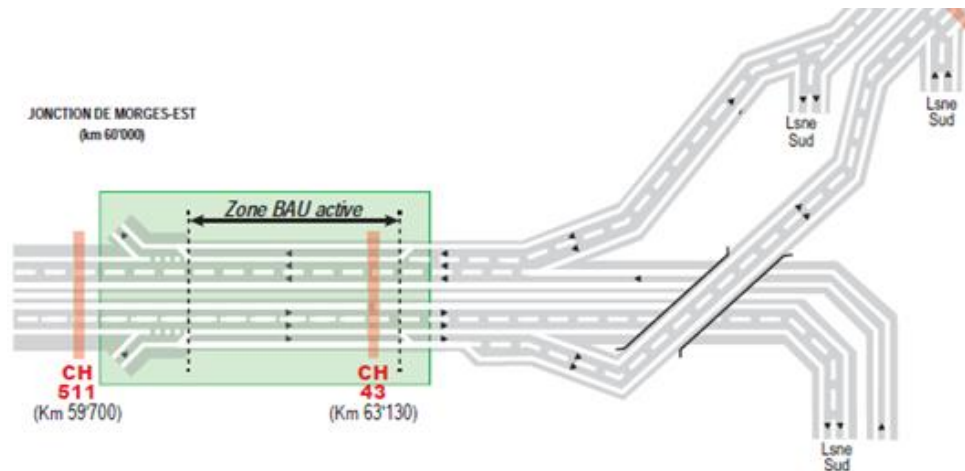


Fig. 7 Emplacement de la station CSACR CH43 – Préverenges.

Le secteur du capteur CH43 n'est pas forcément affecté par des situations de congestion qui concernent soit l'échangeur d'Ecublens (changements de voies) soit la jonction de Morges-Est (Entrée d'autoroute direction Lausanne et début de BAU active, sortie d'autoroute avec remontée de file d'attente et fin de BAU active direction Genève).

Les données de ce capteur sont tout de même utilisées car ce capteur est le seul sur la zone de la BAU active et ses données sont disponibles pour la période étudiée (2007-2013).

2.2.5 Base de données accidents

La base de données utilisée dans le cadre de l'analyse des accidents provient du système d'information pour la gestion des routes et du trafic (Management-Informationssystem Strasse und Strassenverkehr, MISTRA). Les données sont issues de l'application métier « Accidents de la circulation » (Verkehrsunfälle, VU).

2.2.6 Périodes de référence

La méthodologie de traitement des données qui est appliquée se sépare en deux approches distinctes. Une première utilisée afin d'effectuer des comparaisons annuelles globales, une seconde, basée sur le principe des semaines types, ayant pour but la comparaison de certains paramètres sur des périodes restreintes similaires.

Comparaisons annuelles

Les mois de mars à juin sont utilisés pour référence car d'une part les données sont disponibles pour la période étudiée durant ces 4 mois, notamment sur la station CH43, et d'autre part le trafic journalier moyen en jours ouvrés y est le plus important (Fig. 8).

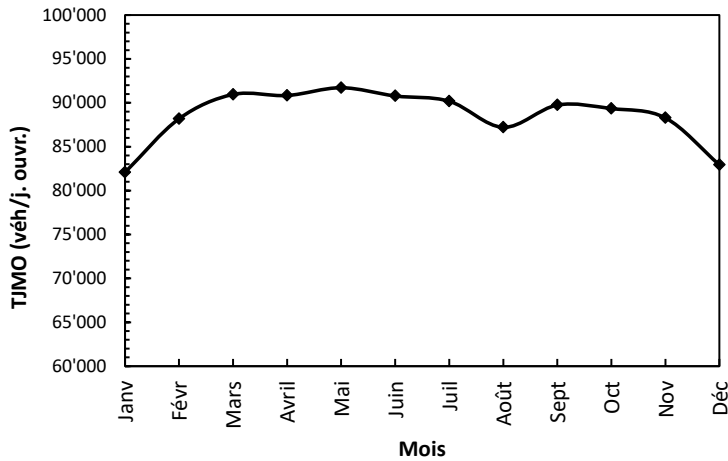


Fig. 8 Trafic journalier moyen, jours ouvrés, 2008, CH43.

Année de référence du système non opérationnel

Les travaux de conversion nécessaires à l'utilisation de la BAU comme voie de circulation ont eu lieu durant l'année 2009. Pour cette raison, les données relatives à cette année ne seront pas utilisées et donc l'année de référence du système non opérationnel sélectionnée est 2008.

Période avec système opérationnel / non opérationnel

En décembre 2010, en raison d'un accident sur une armoire de commande de la signalisation du tronçon, le système a été non opérationnel (inactif) dans les deux directions. La comparaison entre le système opérationnel et non opérationnel pour un trafic similaire (en 2010) permet de mettre en évidence plus précisément le gain, en termes de paramètres de trafic, de l'ouverture de la BAU à la circulation.

Heure de pointe

En termes d'analyses de paramètres de trafic, l'heure de pointe est considérée comme étant la période de 60 minutes durant laquelle le débit cumulé est le plus important. D'un jour à l'autre, l'heure de début et de fin de l'heure de pointe varie.

À des fins de comparaison, par simplification, on considère comme heure de pointe du matin la huitième heure (07:00 – 08:00, HPM) et comme heure de pointe du soir la dix-huitième heure (17:00 – 18:00, HPS) (Fig. 9).

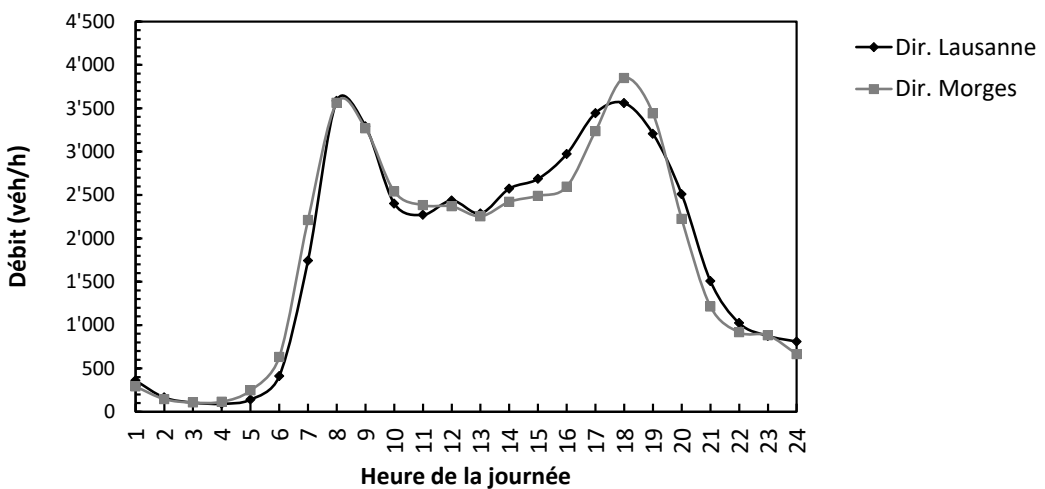


Fig. 9 Répartition horaire du débit, 2008, jours ouvrés, CH43.

Semaine types

Afin de définir les semaines considérées annuellement comme référence, plusieurs critères ont été établis :

- Disponibilité des données sur les années 2008, 2010, 2011, 2012 et 2013.
- Période entre fin février et juin (Fig. 8).
- Hors vacances scolaires.
- Jours sans accidents (données des accidents MISTRA-VU).
- Jours sans évènement spécial (ex : salon international de l'automobile à Genève, festival, jours fériés).
- Situation de trafic représentative (période d'ouverture, débits, vitesses, densités).

Sur la base de ces critères, les semaines suivantes sont retenues :

- 2008 : 01-07.04.2008 et 08-14.06.2008.
- 2010, système opérationnel : 22-26.11.2010 et 06-10.12.2010.
- 2010, système non opérationnel : 13-17.12.2010.
- 2011 : 13-19.03.2011.
- 2013 : 28.02-06.03.2013.
- 2014 : 18.03.2014 (Chapitre 5.3.1).

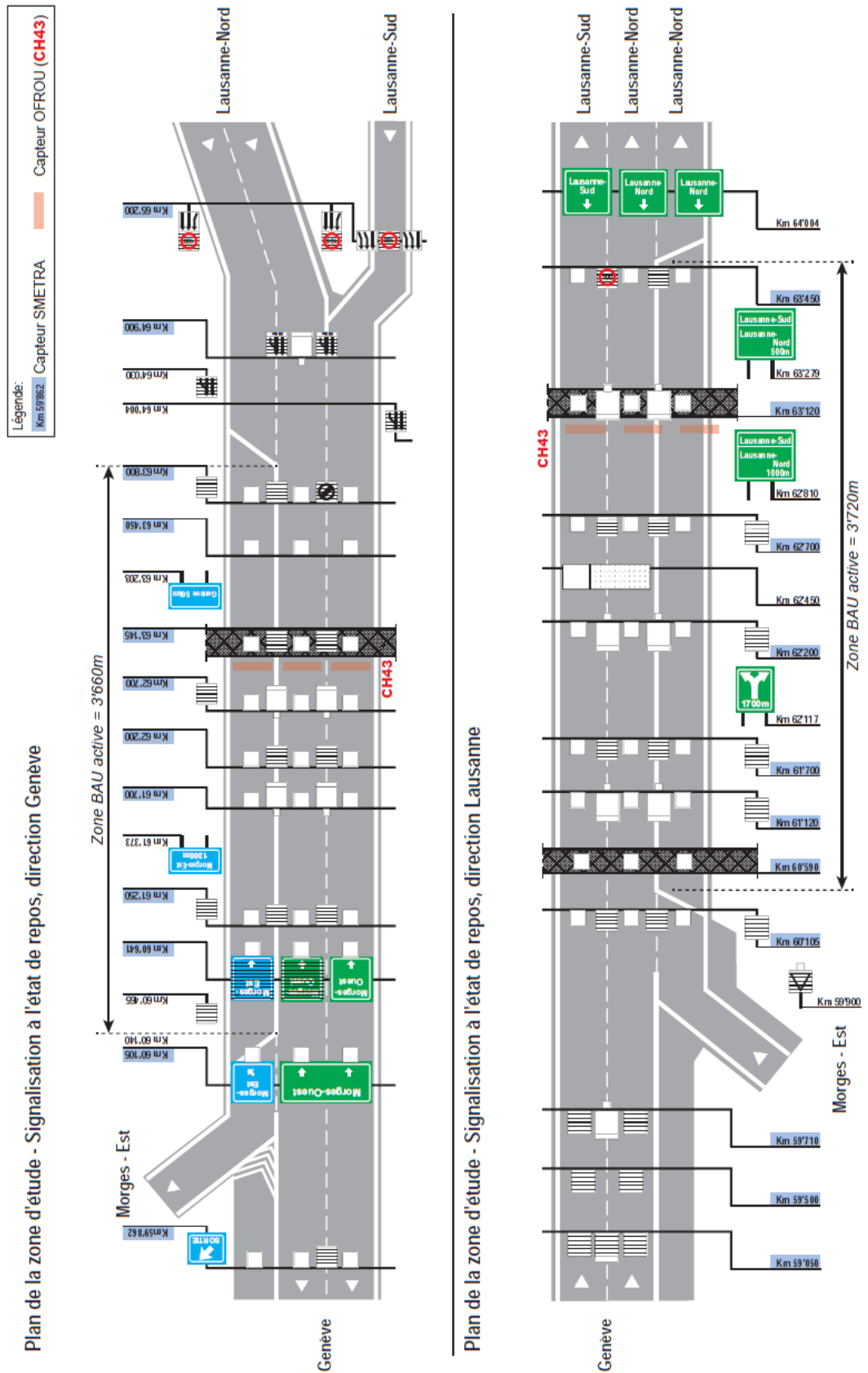


Fig. 10 Plan de la zone d'étude avec signalisation à l'état de repos.

3 Activation du système

3.1 Procédure d'activation

Une fois la décision prise par l'opérateur de la centrale de gestion de procéder à l'ouverture ou à la fermeture de la BAU au trafic, une suite d'étapes prédéfinies est effectuée :

- Abaissement de la limite de vitesse (120 km/h à 100 km/h, voire 80 km/h).
- Annonce en amont de l'ouverture/fermeture de la BAU (signalisation).
- Ouverture/fermeture de la BAU à la circulation de manière progressive sur le tronçon (signalisation).

Comme décrit au chapitre 2.2.2, des capteurs fournissent les informations d'état de trafic par données agrégées en 3 minutes. Ces valeurs sont ensuite moyennées par intervalle de 9 minutes (valeur moyenne lissée) et introduite dans des algorithmes de détection paramétrables.

Diagramme fondamental

Dans la théorie du trafic, la relation qui lie deux paramètres fondamentaux de trafic (vitesse, débit, densité) en un point donné est nommée diagramme fondamental.

Etat de trafic

Pour chaque capteur, représentant un secteur de détection, l'état de trafic est décrit par ces paramètres fondamentaux.



Fig. 11 Etats de trafic [9].

Des valeurs seuils (vitesse, densité) ont été déterminées dans les matrices d'état de trafic obtenues pour différentes configurations de circulation (nombre de voies ouvertes à la circulation). Les valeurs seuils diffèrent que l'on soit dans un passage "ascendant" (AS, Fig. 12 gauche), c'est-à-dire en phase d'augmentation de la densité, ou dans un passage "descendant" (DES, Fig. 12 droite), c'est-à-dire en phase de diminution de la densité afin d'éviter d'éventuelles oscillations intempestives du système.

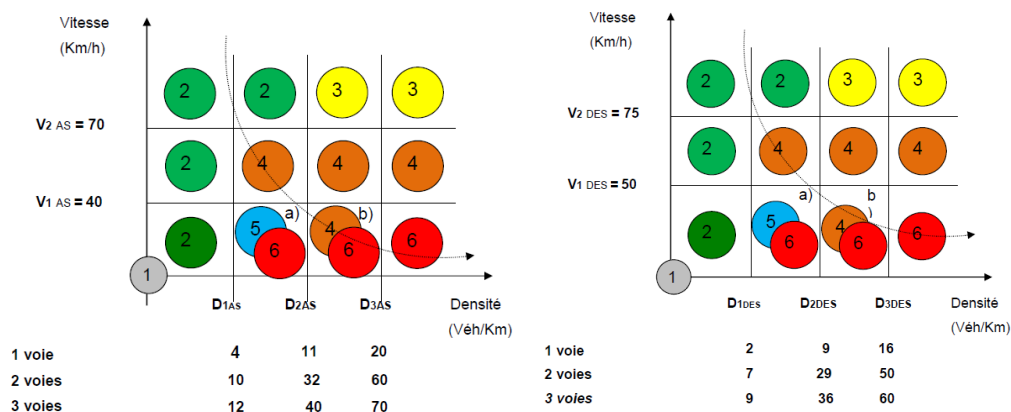


Fig. 12 Diagrammes fondamentaux ascendant (AS) et descendant (DES) [9].

Pour qu'un état de trafic soit attribué à un secteur donné, la valeur seuil doit être atteinte sur N_{AS} respectivement N_{DES} cycles successifs.

Consigne d'ouverture/fermeture

Ces états de trafic permettent de déterminer si une consigne d'ouverture ou de fermeture de la BAU doit être signalée au gestionnaire de trafic. Cette consigne, dépendante des périodes de vacances, est également régie par des diagrammes fondamentaux (Fig. 13).

Pour qu'une consigne soit notifiée, il faut que la valeur seuil soit atteinte pour N cycles consécutifs de 3 minutes. Il suffit qu'une seule section du tronçon respecte ces conditions pour qu'une consigne d'ouverture, concernant le tronçon entier, soit envoyée au gestionnaire. Par contre, la consigne de fermeture est envoyée quand toutes les sections ont donné la valeur de fermeture sur N cycles.

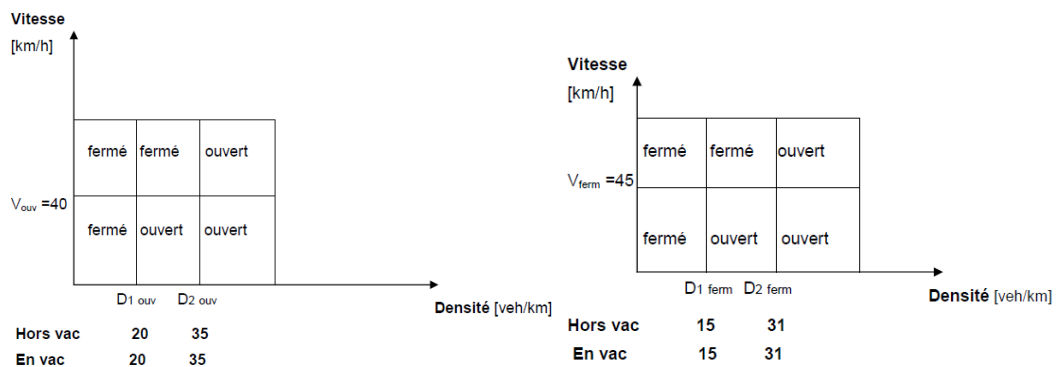


Fig. 13 Diagrammes fondamentaux pour la consigne d'ouverture et de fermeture de la BAU à la circulation [9].

Le système de BAU active entre Morges et Ecublens étant le premier système de ce type en Suisse, les algorithmes d'ouverture et de fermeture ont donc dû être créés avec des valeurs seuils à tester et à valider.

Evolution des seuils

Initialement, pour des vitesses supérieures à 40 km/h, le seuil d'ouverture était atteint pour une densité supérieure à 35 véh/km sur 2 cycles consécutifs de 3 minutes. Ces seuils ont été changés dès le premier mois car ils engendraient une ouverture de la BAU active jugée trop longue. Depuis, ces seuils ont été affinés au fur et à mesure des monitorings effectués sur le tronçon de BAU active.

En 2014, le concept de la pente ascendante de densité a été introduit afin d'éviter la formation d'un bouchon momentané suite à une hausse très rapide du débit en période de pointe. Ce calcul de la pente considère la densité au temps t et t-18 minutes.

La consigne d'ouverture introduite en novembre 2014 (pour $v > 40$ km/h) dépend de 2 conditions. Il suffit qu'une de ces deux conditions soit vérifiée pour que la consigne d'ouverture soit notifiée :

- La densité doit être supérieure à 38 véh/km sur $N = 2$ cycles.
- La densité doit être supérieure à 35 véh/km et la pente de la densité entre t et t-18 supérieure à 12 sur $N = 1$ cycle.

Le seuil de la consigne de fermeture est fixé à une densité de 31 véh/km sur $N = 2$ cycles.

Centrale de gestion du trafic

Une fois que la consigne apparaît, l'opération d'ouverture est sujette à l'appréciation du gestionnaire de trafic (Centrale cantonale de gestion du trafic de la Blécherette, police cantonale vaudoise). Celui-ci procède à un contrôle visuel par vidéo de la BAU afin de vérifier que cette dernière est libre et peut alors ordonner son ouverture à la circulation. L'ordre de fermeture de la BAU à la circulation est également transmis par le gestionnaire de trafic.

Le gestionnaire de trafic a également la possibilité de commander l'ouverture, respectivement la fermeture de la BAU à la circulation avant ou après que la consigne automatique ne lui parvienne. Les impacts de cette approche sont décrits dans les chapitres qui suivent (Chapitres 3.2 et 10).

3.2 Heures et durée d'ouverture

Année 2010 (du 1^{er} mars 2010 au 28 février 2011) [8] [10]

En 2010, première année de mise en service, en période de pointe de matin, dans les deux directions, les horaires d'ouverture sont très réguliers avec en moyenne une ouverture à 07h30. Les horaires de fermeture sont plus fluctuants avec une fermeture entre 08h30 et 09h00. Les durées d'ouverture de la BAU à la circulation sont donc d'environ 1h à 1h30.

En période de pointe du soir, les horaires d'ouverture sont moins réguliers et la durée d'ouverture plus longue dans la direction de Lausanne. L'ouverture de la BAU à la circulation est comprise en moyenne entre 16h30 et 19h00 dans la direction de Lausanne et entre 17h15 et 19h15 dans la direction de Genève. Les durées d'ouverture sont donc de 2h à 2h30.

La durée d'ouverture du vendredi soir est généralement plus longue que celle des autres jours ouvrables. Elle s'étend de 15h00 à 20h00 dans la direction de Lausanne. La durée d'ouverture de la BAU à la circulation peut être encore plus importante dans les cas de jours de départs en vacances.

Année 2011 (du 13 mars au 25 mars 2011)

En 2011, lors de la seconde année d'exploitation, en période de pointe de matin, dans les deux directions, l'ouverture s'effectue en moyenne à 07h20 et la fermeture entre 09h05 et 09h10. La durée d'ouverture est donc comprise entre 1h45 et 1h50, soit une durée d'ouverture plus longue que celle relevée en 2010.

En période de pointe du soir, la période d'ouverture dans la direction de Lausanne est comprise entre 16h20 et 18h45, soit une période d'ouverture de 2h25. Dans la direction de Genève, l'ouverture s'effectue en moyenne à 16h50 et la fermeture à 18h55, soit une durée d'ouverture de 2h05. Dans les deux directions, les durées d'ouverture de la BAU à la circulation sont environ similaires à celles de 2010.

L'ouverture du système le vendredi soir apparaît plus tard qu'en 2010 avec en moyenne une ouverture à 15h10 dans la direction de Lausanne et à 16h25 dans la direction de Genève. La fermeture de la BAU à la circulation se situe en moyenne à 19h45 dans la direction de Lausanne et à 18h15 dans la direction de Genève. Les vendredis, la BAU est donc ouverte à la circulation en moyenne pendant 4h35 dans la direction de Lausanne et 2h50 dans la direction de Genève.

En raison des vérifications effectuées par l'opérateur (Chapitre 3.1), il existe une différence entre le moment où la consigne d'ouverture déclenchée par l'algorithme apparaît et le moment où l'opérateur commande l'ouverture de la BAU à la circulation. De manière générale, l'opérateur respecte la consigne automatique d'ouverture du système. Un décalage de 6 minutes entre le moment où la consigne apparaît et l'ouverture de la BAU à la circulation par l'opérateur est constaté de façon récurrente. Ce décalage est en réalité le temps nécessaire à l'opérateur pour effectuer la vérification de l'état de la chaussée BAU (absence d'obstacle) avant de lancer la commande de l'ouverture.

Pour la fermeture, il arrive que de gros écarts entre la consigne et la fermeture effective de la BAU à la circulation soient observés. Ces écarts peuvent être de quelques minutes jusqu'à une heure. L'opérateur a tendance à allonger la période d'ouverture de la BAU à la circulation en retardant sa fermeture par rapport à l'apparition de la consigne automatique de fermeture.

Année 2013 (du 28 février au 6 mars 2013)

En 2013, en période de pointe de matin, dans les deux directions, l'ouverture s'effectue en moyenne vers 06h45, soit 45 minutes plus tôt que les ouvertures relevées en 2010 et 2011. L'heure de fermeture se situe aux alentours de 09h30, soit 20 minutes plus tard qu'en 2011 et 30 minutes plus tard qu'en 2010. La période d'ouverture de la BAU à la circulation, le matin, s'est donc allongée depuis 2011.

En période de pointe du soir, l'ouverture de la BAU à la circulation a lieu vers 16h30 et la fermeture vers 19h30. La période d'ouverture est également allongée par rapport aux autres années avec une ouverture d'en moyenne 3h le soir. En 2013, il a été relevé, sur une journée, que la BAU peut être ouverte à la circulation pendant 5h45. La fermeture pour le vendredi se déroule désormais vers 20h00.

La différence entre l'apparition de la consigne et l'ouverture de la BAU à la circulation est encore plus marquée pour cette année-là. En période de pointe du matin, l'ouverture a lieu en moyenne 15 minutes avant l'apparition de la consigne d'ouverture. En période de pointe du soir, la consigne d'ouverture est de manière générale bien respectée. En ce qui concerne la fermeture de la BAU à la circulation, elle a souvent lieu bien après que la consigne de fermeture soit apparue, avec presque 20 minutes de différence.

Année 2014 (du 17 mars au 29 mars 2014 et du 12 mai au 19 mai 2014)

En 2014, en période de pointe de matin, dans les deux directions, l'ouverture s'effectue en moyenne vers 06h40, soit encore quelques minutes plus tôt que les ouvertures relevées les années précédentes. Au fil des années, l'ouverture de la BAU à la circulation n'a donc cessé d'être avancée. L'heure de fermeture est située vers 09h20. La période d'ouverture de la BAU à la circulation le matin est en moyenne de 2h40 dans les deux directions. Cette période s'est donc allongée de plus d'une heure depuis 2010.

En période de pointe du soir, dans la direction de Lausanne, l'ouverture de la BAU à la circulation a lieu beaucoup plus tôt que pour les autres années avec une ouverture en moyenne à 15h40. La fermeture a lieu en moyenne à 19h15, ce qui implique une durée d'ouverture d'en moyenne 3h35. La durée d'ouverture du soir s'est donc allongée de 1h par rapport à l'année 2010.

En comparaison avec l'année 2010, la période d'ouverture de la BAU à la circulation sur la journée s'est prolongée en moyenne de plus de 2h en 2014. La période d'ouverture le vendredi soir, dans cette direction, est comprise en moyenne entre 14h00 et 20h35 soit une ouverture d'environ 6h35.

En période de pointe du soir, dans la direction de Genève, l'ouverture de la BAU à la circulation est similaire aux autres années avec une ouverture en moyenne à 16h40. La fermeture a lieu vers à 19h20, ce qui implique une durée d'ouverture d'en moyenne 2h40. La période d'ouverture le vendredi soir, dans cette direction, est comprise en moyenne entre 15h40 et 19h40 soit une ouverture d'environ 4h.

L'ouverture de la BAU à la circulation a lieu entre 15 et 20 minutes avant l'apparition de la consigne pour la période de pointe du matin dans les deux directions. En période de pointe du soir, la consigne d'ouverture est, de manière générale, toujours bien respectée. En ce qui concerne la fermeture de la BAU à la circulation, elle a, comme pour l'année 2013, souvent lieu bien après que la consigne de fermeture soit apparue, avec presque 15 à 20 minutes de différence.

Synthèse

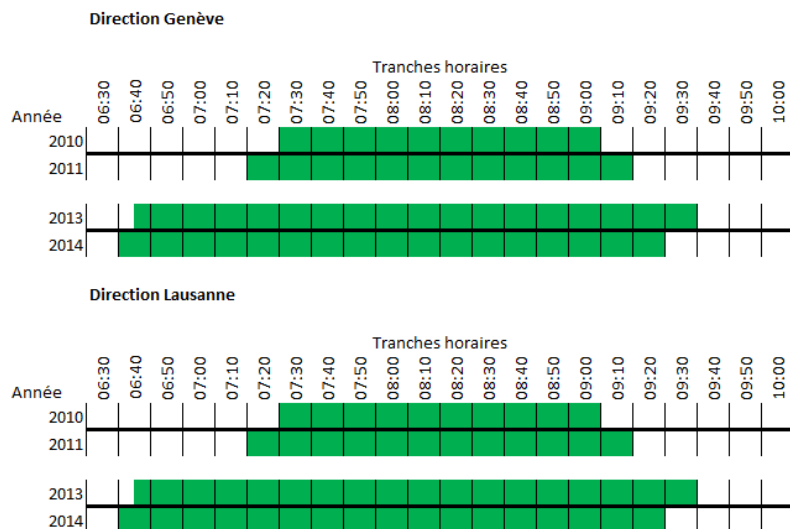


Fig. 14 Périodes d'ouverture moyennes de la BAU à la circulation le matin.

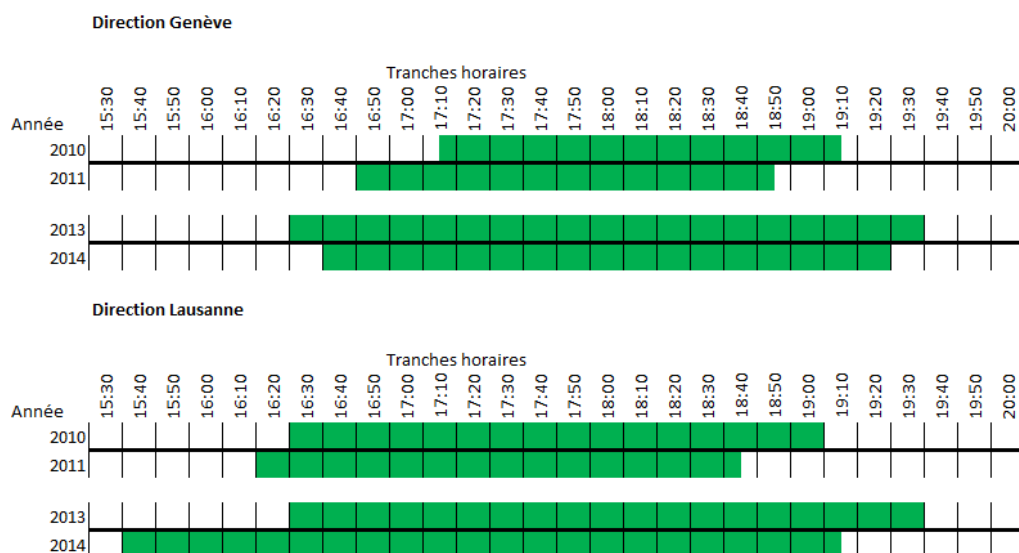


Fig. 15 Périodes d'ouverture moyennes de la BAU à la circulation le soir.

Respect des consignes automatiques

Au fil des années de service de la BAU active, les opérateurs ont tendance à ouvrir plus tôt la BAU à la circulation sans attendre l'apparition de la consigne en période de pointe du matin. En effet, il arrivait que des bouchons se forment avant l'ouverture de la BAU à la circulation dus à une augmentation rapide du débit. Les opérateurs ont donc pris l'habitude d'ouvrir la BAU à la circulation selon leur expérience, et donc souvent plus tôt que l'apparition de la consigne pour éviter cette formation de bouchon momentanée.

En période de pointe du soir, les opérateurs respectent assez bien les consignes. En ce qui concerne la fermeture, les opérateurs ont tendance à laisser la BAU ouverte à la circulation plus longtemps que ce que la consigne ne préconise. En analysant l'année 2014, il apparaît même que les opérateurs attendent de pouvoir fermer les deux chaussées en même temps pour lancer la commande de fermeture simultanée des deux chaussées. La période d'ouverture effective de la BAU à la circulation est donc beaucoup plus longue que la période d'ouverture nécessaire donnée par l'algorithme.

L'impact de ces décisions sur le système est analysé au chapitre 10.

4 Analyse d'efficacité du système sur les paramètres de trafic

La conversion temporaire de la bande d'arrêt d'urgence en 3^{ème} voie de circulation, durant les périodes de forte densité de trafic, a pour but d'améliorer les conditions de circulation et de sécurité.

Cette étude s'intéresse à l'efficacité de ce système et son évolution durant ses premières années de fonctionnement. L'analyse de l'efficacité du système sera effectuée sur les paramètres de trafic suivants : capacité, débit, vitesse et densité. Ces paramètres sont directement mesurables sur la base des données collectées (Comparaisons annuelles sur 4 mois, chapitre 2.2.6). D'autres paramètres seront évalués sur la base de simulations de trafic établies sur la zone d'étude (Chapitre 6).

4.1 Capacité

Le tronçon sur lequel le système de BAU active a été implanté a la capacité théorique d'un tronçon à 2 voies de circulation de 4'000 véh/h¹ [6].

Lorsque la BAU est ouverte à la circulation, ce tronçon ne peut pas être assimilé à un tronçon à 3 voies classiques avec une capacité théorique de 5'800 véh/h. En effet, en raison de la configuration particulière de la zone de BAU active, potentiellement due au marquage au sol en trait continu et à la présence d'obstacle latéral proche de la voie de circulation (absence de bande d'arrêt d'urgence), la capacité de ce tronçon est réduite. La capacité du tronçon de la BAU active a été estimée à environ 5'000 véh/h [8], soit un gain de capacité de 1'000 véh/h.

Afin de déterminer le débit maximal que peut supporter le système et donc sa capacité, une analyse des diagrammes fondamentaux est réalisée (Chapitre 4.6).

4.2 Impact sur le débit

Variable déterminante dans l'étude de l'efficacité d'un système de transport, le débit représente la demande sur le réseau. Durant les heures les plus chargées de la journée, la BAU peut être ouverte à la circulation. Cette augmentation temporaire de la capacité de l'infrastructure permet de répondre à un débit et donc une demande plus importants.

4.2.1 Evolution du débit aux heures de pointe

L'évolution du débit entre 2007 et 2013, aux heures de pointe, a été analysée à partir des données du capteur CH43 (CSACR, Chapitre 2.2.4) (Fig. 16, Fig. 17).

¹ Taux de véhicules lourds ≤ 5%, vitesse maximale autorisée de 120 km/h, rampe de 2%.

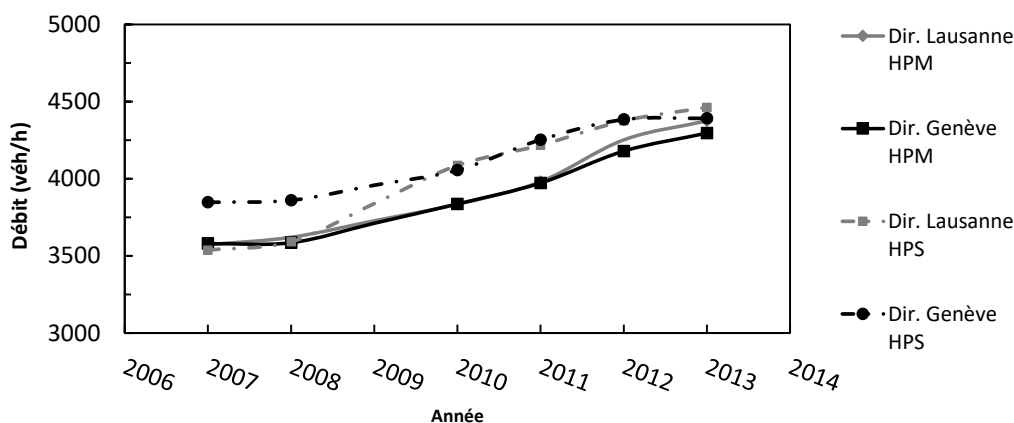


Fig. 16 Evolution annuelle du débit moyen par direction, HP, mars-juin, jours ouvrés, CH43.

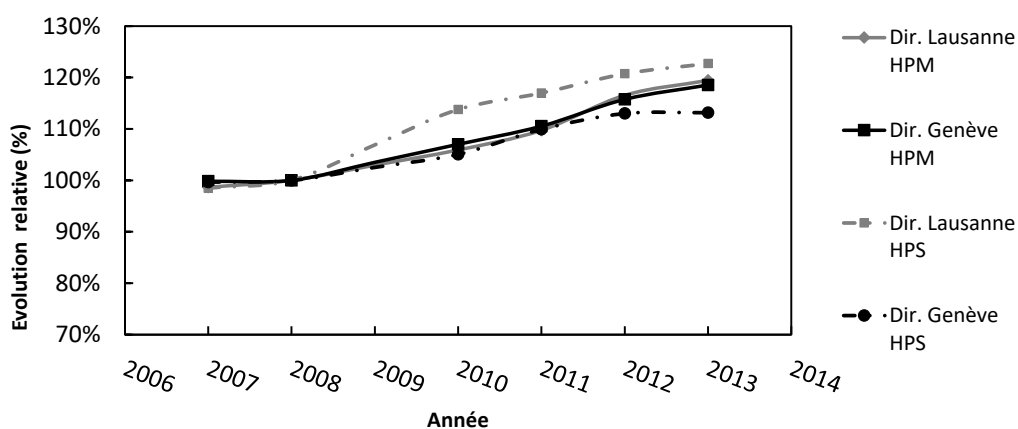


Fig. 17 Evolution annuelle relative du débit moyen par direction, HP, mars-juin, jours ouvrés, année de référence : 2008, CH43.

Entre 2007 et 2008, tant dans la direction de Lausanne que la direction de Genève, on ne constate pas d'évolution significative. En HPM, les deux directions supportent un débit similaire d'environ 3'600 véh/h. Pour l'HPS, le tronçon dans la direction de Genève semble supporter un débit plus élevé (~3'850 véh/h) que dans l'autre direction. La capacité théorique étant proche d'être atteinte (97% : direction Genève ; 90% direction Lausanne), le tronçon semble donc avoir atteint sa capacité limite.

La mise en service de la BAU active en 2010 semble avoir un réel effet sur l'augmentation du débit sur le tronçon. Pour l'HPM, l'évolution du débit entre 2008 et 2010 est de +6% (soit environ 3% par année) pour la direction de Lausanne et de +7% (environ 3.5% par année) pour la direction de Genève. Pour l'HPS, l'évolution est également bien visible avec +14% (environ 7% par année) d'augmentation de débit pour la direction de Lausanne et 5% (environ 2.5% par année) pour la direction de Genève.

Cette tendance d'augmentation des débits sur le tronçon se confirme l'année suivante, entre 2010 et 2011, avec des augmentations qui restent comprises entre 3% et 5% par année. A partir de 2012, l'augmentation de débit commence à diminuer, +3% d'augmentation pour les deux directions en HPM, voire à se stabiliser en HPS avec +2% d'augmentation pour la direction de Lausanne et 0% pour la direction de Genève. En 2013, les débits se situent entre 4'250 véh/h et 4'500 véh/h en heure de pointe.

Synthèse

Aux heures de pointe, l'impact de l'ouverture du système de BAU active a pu être mis en évidence. De 3'850 véh/h en 2008, le débit maximum est passé à environ 4'500 véh/h en 2013. Une telle évolution n'aurait pas été possible en conservant uniquement deux voies de circulation (capacité théorique de 4'000 véh/h).

La question qui se pose est alors de savoir si le système de BAU active a engendré une augmentation de trafic seulement sur les heures de pointe ou si cela a également impacté de manière générale le trafic sur l'autoroute. Pour cela, une comparaison entre l'évolution du débit aux heures de pointe avec l'évolution du trafic journalier moyen en jours ouvrés (TJMO) est effectuée (Chapitre 4.2.2).

4.2.2 Comparaison de l'évolution du débit aux heures de pointe avec l'évolution du TJMO

L'évolution du TJMO entre 2007 et 2013 (mois de mars à juin) est également analysée à partir des données du capteur CH43 (Fig. 18, Tab. 3).

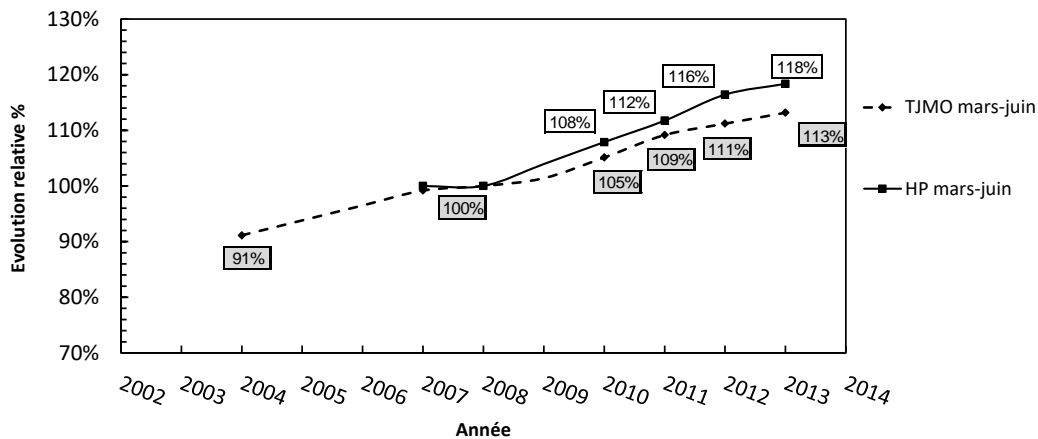


Fig. 18 Evolution annuelle relative des débits moyens, HP-TJMO, mars-juin, jours ouvrés, année de référence : 2008, CH43.

Tab. 3 Evolution du TJMO, CH43.

Année	TJMO [véh/j]	TJMO mars-juin [véh/j]
2004	80'227	83'593
2005	-	-
2006	-	-
2007	87'705	90'327
2008	88'499	91'069
2009	-	-
2010	92'094	95'739
2011	97'276	99'592
2012	98'595	101'632
2013	100'262	103'634

Entre 2004 et 2007, le trafic journalier moyen est passé de 80'200 véh/j à 87'700 véh/j sur ce tronçon (Tab. 3). Distribué, cela représente une augmentation annuelle d'environ 3%.

De même que pour l'analyse aux heures de pointe (Fig. 16, Fig. 17), on constate entre 2007 et 2008 une très faible augmentation du TJMO. En 2010, on note une augmentation

de 5% sur le TJMO et 8% en heures de pointe. Entre 2011 et 2013, le TJMO progresse de manière régulière à 2%. En heures de pointe, l'augmentation est plus marquée entre 2011 et 2012 (4%) puis rejoint celle du TJMO entre 2012 et 2013 (2%).

Synthèse

La courbe de la répartition horaire des débits ne s'est pas déplacée de manière proportionnelle. La mise en service du système de BAU active a eu pour conséquence directe une plus forte augmentation du trafic entre 2008 et 2010 (+8%) aux heures de pointe que de manière globale (+5%). L'évolution globale suit une tendance qui était d'ores et déjà présente avant la mise en place du système (2004-2007). On peut donc conclure que l'autoroute n'est pas devenue globalement plus attractive grâce au système de BAU active. Celui-ci permet cependant d'absorber la demande aux heures de pointe.

4.2.3 Impact sur la zone d'étude élargie

Le système de BAU active permet une augmentation temporaire de la capacité du tronçon entre l'échangeur d'Ecublens et la jonction de Morges-Est. Ce gain de capacité permet d'atteindre des débits sur le tronçon supérieurs à ceux relevés avant la mise en service de ce système. Les tronçons en amont et aval du système de BAU active n'ayant pas subi d'interventions, leur capacité est restée identique. À infrastructure constante, ces tronçons ne peuvent pas supporter des augmentations de trafic aussi importantes que celles relevées sur le tronçon de la BAU active.

L'analyse des débits sur le périmètre élargi permet de déterminer l'impact éventuel de l'augmentation du débit du tronçon de la BAU active sur ces tronçons en amont et en aval. Pour cela, le capteur CH291 situé à Crissier et le capteur CH300 situé à Aubonne ont été étudiés.

Direction Lausanne

Dans la direction de Lausanne, le capteur CH300 est en amont du tronçon de la BAU active et le CH291 en aval.

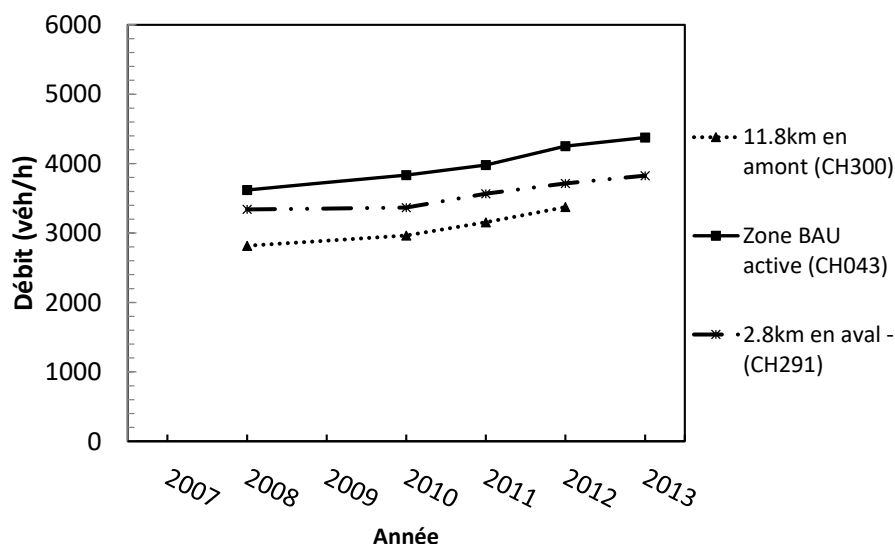


Fig. 19 Evolution annuelle des débits moyens, HPM, mars-juin, jours ouvrés, direction Lausanne.

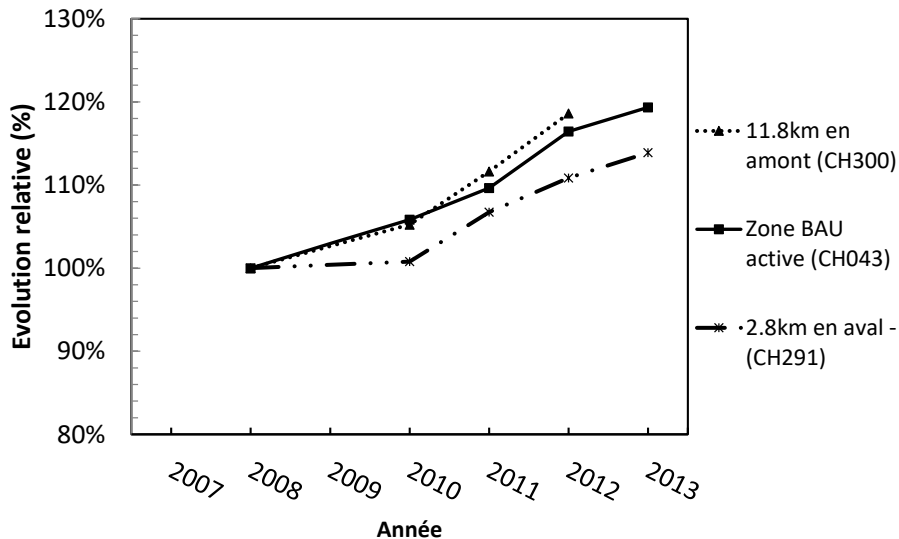


Fig. 20 Evolution annuelle relative des débits moyens, HPM, mars-juin, jours ouvrés, année de référence : 2008, direction Lausanne.

En HPM, entre 2008 et 2010, alors que le tronçon aval démontre une stagnation, le tronçon en amont suit une augmentation de débit identique à celui de la zone de la BAU active. Une fois la BAU active mise en service, les trois tronçons montrent une tendance similaire (Fig. 19, Fig. 20). L'impact de la mise en service de la BAU active est visible après 2010 avec une augmentation du débit annuelle plus rapide (+6-7%, Fig. 20).

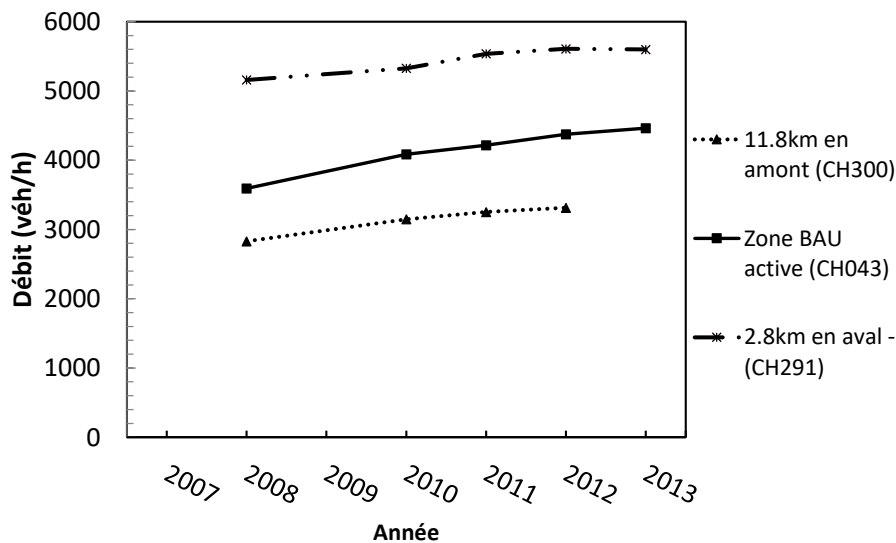


Fig. 21 Evolution annuelle des débits moyens, HPS, mars-juin, jours ouvrés, direction Lausanne.

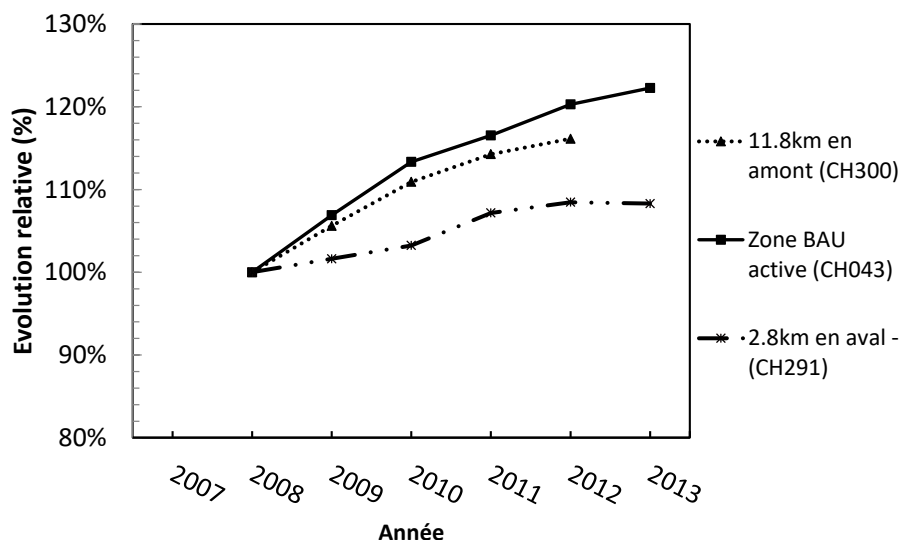


Fig. 22 Evolution annuelle relative des débits moyens, HPS, mars-juin, jours ouvrés, année de référence : 2008, direction Lausanne.

En HPS, le débit sur le tronçon amont suit la même tendance d'augmentation qu'avant la mise en service de la BAU active (Fig. 21). Il ne semble pas y avoir un effet significatif de l'ouverture de la BAU active sur l'augmentation du débit dans cette zone. Depuis 2010, il semble que cette augmentation a tendance à diminuer (Fig. 22).

A l'aval, on note une augmentation du débit plus importante entre 2010 et 2011 (+4% contre +1% précédemment) puis à partir de 2011 une stagnation.

Les conditions de circulation du tronçon aval, l'échangeur de Crissier, sont également fortement liées au trafic provenant de Lausanne Sud mais surtout des conditions de circulation en direction d'Yverdon et du Valais (Echangeur de Villars-Ste-Croix). En HPS, le débit sur ce secteur (~5'600 véh/h en 2012 et 2013) est tel que la limite de capacité est atteinte et l'on y constate fréquemment des ralentissements voire des embouteillages. De plus, ce tronçon est composé de trois voies de circulation non-standard. En effet, la voie de droite indique la direction « Valais » tandis que la voie centrale et la voie de gauche la direction « Yverdon ».

À l'amont, à Aubonne, les conditions de circulation sont largement dépendantes du trafic sur la zone de la BAU active et des mouvements tournants à la jonction de Morges-Ouest et à la demi-jonction de Morges-Est. En 2012, le débit en HPM y est d'environ 3'400 véh/h (3'300 véh/h en HPS) soit 85% de sa capacité théorique, s'agissant d'un tronçon à 2 voies de circulation. En raison de l'inactivité du capteur CH300 dès septembre 2012, il n'est pas possible de connaître la situation de ce secteur en 2013. Toutefois, au vu de la tendance de l'évolution sur ce secteur, des situations de congestions pourraient rapidement apparaître et ce également entre les deux entrées de Morges-Ouest et Morges-Est.

Direction Genève

Dans la direction de Genève, le capteur CH300 est en aval du tronçon de la BAU active et le CH291 en amont.

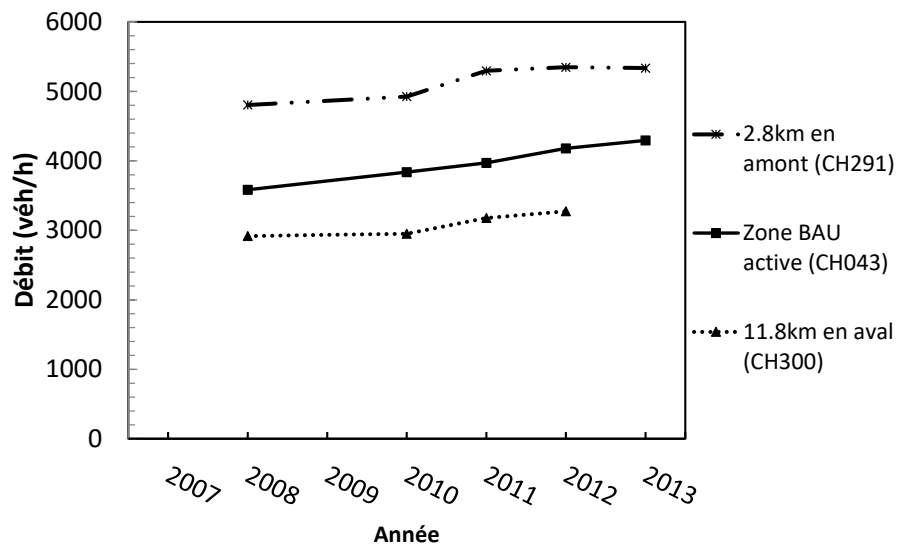


Fig. 23 Evolution annuelle des débits moyens, HPM, mars-juin, jours ouvrés, direction Genève.

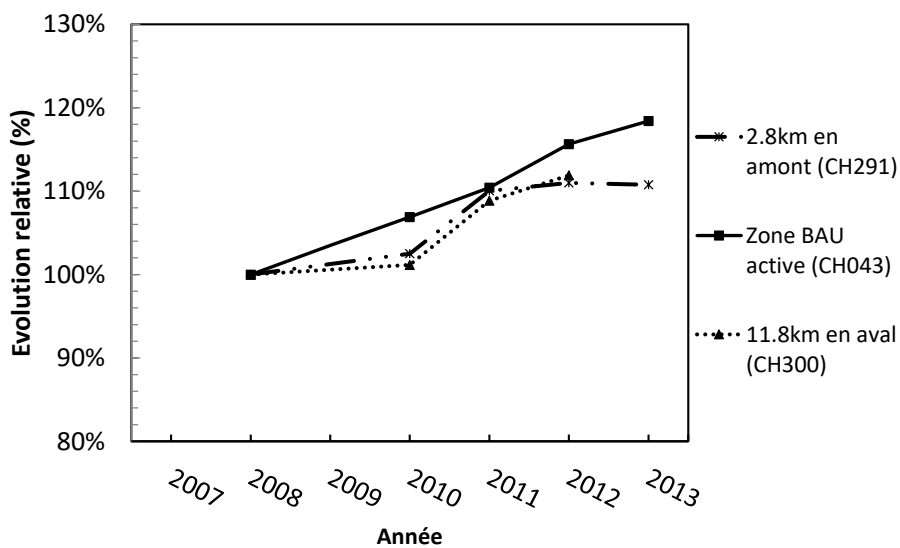


Fig. 24 Evolution annuelle relative des débits moyens, HPM, mars-juin, jours ouvrés, année de référence : 2008, direction Genève.

En HPM, entre 2008 et 2010, on constate une stagnation du débit sur les deux tronçons adjacents. Dès la mise en service de la BAU active, on relève une augmentation des débits de l'ordre de +8% entre 2010 et 2011. À partir de 2011, la tendance est à une stabilisation sur les tronçons adjacents alors que l'évolution du débit est continue sur le tronçon de la BAU active (Fig. 23, Fig. 24).

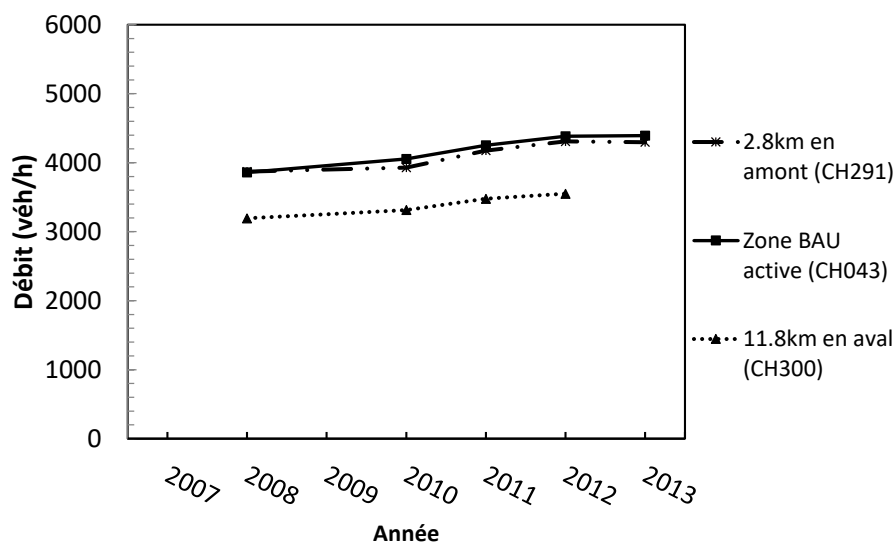


Fig. 25 Evolution annuelle des débits moyens, HPS, mars-juin, jours ouvrés, direction Genève.

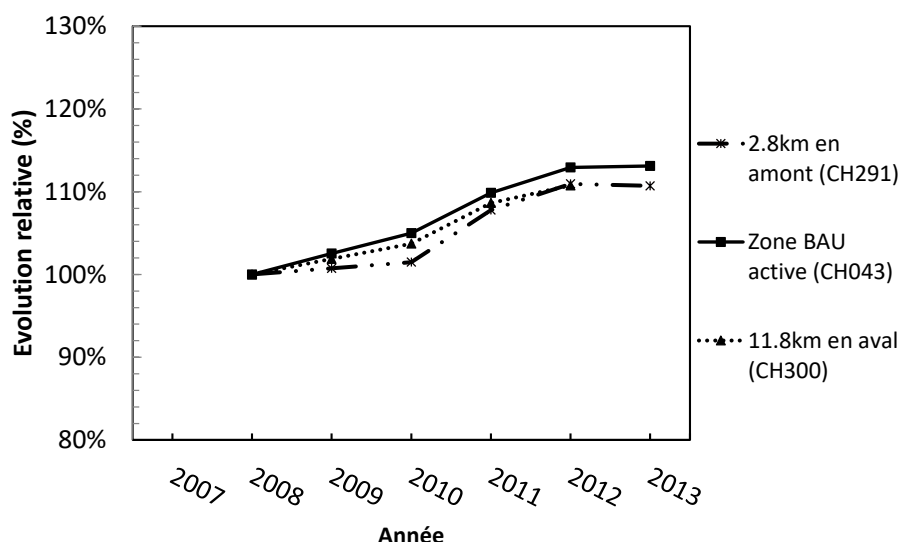


Fig. 26 Evolution annuelle relative des débits moyens, HPS, mars-juin, jours ouvrés, année de référence : 2008, direction Genève.

En HPS, l'évolution du débit dans les trois zones est très similaire. Dès la mise en service de la BAU active, on constate une augmentation des débits de +5% pour le tronçon en aval (CH300) et +6% pour le tronçon en amont (CH291). À nouveau à partir de 2011, la tendance est à une stabilisation des débits, mais contrairement à l'HPM, cette fois-ci sur les trois zones (Fig. 25, Fig. 26).

Dans la direction de Genève, la tendance HPM/HPS est inverse à celle de la direction de Lausanne. Alors que les débits dans la direction de Lausanne sont légèrement plus élevés en HPM à Aubonne (3'400 véh/h en HPM contre 3'300 véh/h en HPS, en 2012), ils sont inférieurs à l'HPS dans la direction de Genève (3'300 véh/h en HPM contre 3'600 véh/h en HPS, en 2012). Par contre, à Crissier, alors que dans la direction de Lausanne le débit est très important en HPS (5'600 véh/h contre 3'850 véh/h en HPM, 2013), le débit en HPM est supérieur dans la direction de Genève (5'350 véh/h contre 4'300 véh/h en HPS, 2013).

À Aubonne, les débits sont plus importants en HPS dans la direction de Genève et à Crissier en HPS en direction de Lausanne.

4.2.4 Impact sur le réseau secondaire

Afin de mettre en évidence l'impact de l'ouverture de la BAU active sur le réseau secondaire, on analyse les résultats de comptages périodiques des transports individuels (TI) et transports collectifs (TC) [30]. Ces comptages ont été réalisés en 2010 lors de la première année de mise en service de la BAU active. A l'aide de l'analyse de cordons et d'écrans répartis dans l'agglomération Lausanne-Morges, l'évolution des charges de trafic entre 2005 et 2010 est présentée avec une distinction des évolutions selon si les charges sur l'autoroute ont été prises en compte ou non.

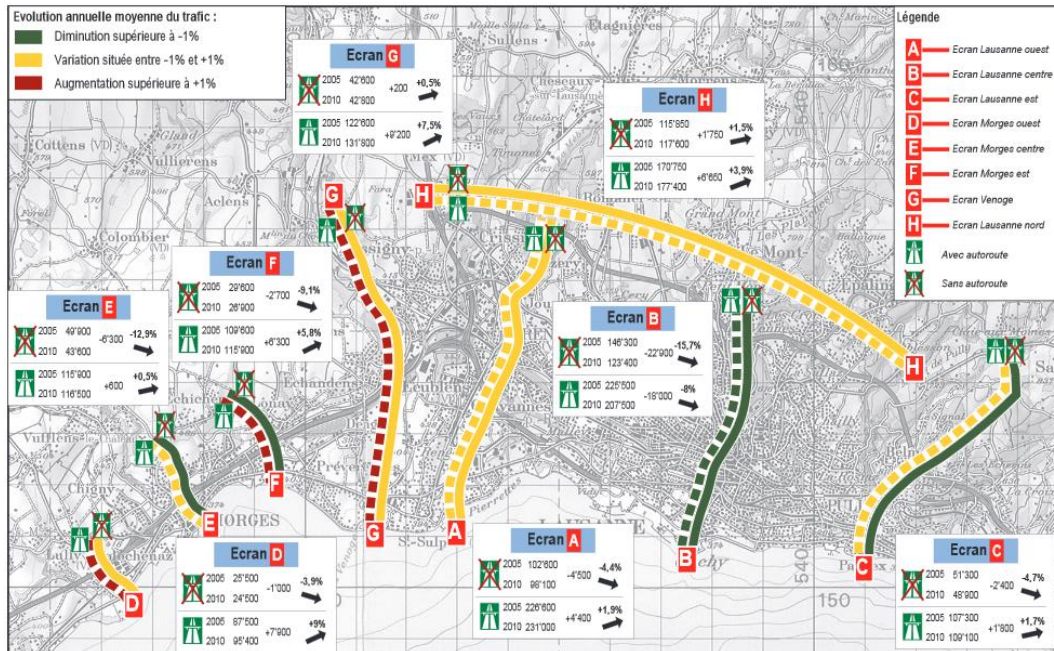


Fig. 27 Evolution du trafic journalier moyen, 2005 – 2010 aux écrans [30].

Pour cette étude, l'analyse des écrans « Morges-Est », situé sur le tronçon de la BAU active vers la demi-jonction de Morges-Est, et « Venoge », situé également sur le tronçon de la BAU active à proximité de l'échangeur d'Ecublens, sont les plus intéressants (Fig. 27).

Il a ainsi été mis en évidence qu'il existe une diminution du trafic entre 2005 et 2010 au niveau de l'écran de Morges-Est (Ecran F) de l'ordre de -9.1%, lorsque les charges sur l'autoroute ne sont pas considérées. Cette diminution concerne donc uniquement les charges présentes sur le réseau secondaire. Elle est opposée à la tendance observée dans l'analyse de l'évolution des charges sur la période précédente 2000 et 2005. En effet, il a été mis en évidence que les charges du réseau secondaire sur cet écran étaient caractérisées par une croissance entre 2000 et 2005 de +0.9% par année.

Lorsque les charges sur l'autoroute sont prises en compte, le trafic a une augmentation marquée de +5.8% entre 2005 et 2010, soit +1.1% par année sur l'écran de Morges-Est. Ces fortes hausses confirment les tendances observées lors de l'analyse de l'évolution des charges (autoroute comprise) sur la période précédente 2000 et 2005.

Sur l'écran de Venoge (Ecran G), il n'existe pas d'évolution significative lorsque l'autoroute n'est pas considérée. En prenant en compte les charges autoroutières, le trafic traversant l'écran a fortement augmenté avec +7.5% entre 2005 et 2010, soit +1.5% par année.

Toutes ces observations laissent à penser que l'ouverture de la BAU active a eu un réel impact sur les charges du réseau secondaire. Cependant, les résultats de comptages n'ont pas été distingués selon les années. Il n'est donc pas possible de distinguer si la diminution de charges sur le réseau secondaire a eu lieu avant ou après la mise en service de la BAU active en janvier 2010.

L'analyse de la période qui suivra, probablement 2010-2015, permettra sans doute d'apporter de plus amples renseignements sur l'impact réel de la mise en service de la BAU active sur le réseau secondaire.

4.2.5 Synthèse

Avant la mise en service du système de BAU active, la capacité limite du tronçon était atteinte avec des débits conséquents et une tendance ne montrant plus de signes d'évolution. En raison de ces débits importants, les conditions de circulation étaient souvent difficiles avec de fréquents bouchons notamment en période de pointe du soir.

L'effet de l'ouverture de la 3^{ème} voie en période de pointe, à partir de 2010, est visible avec une reprise de l'augmentation des débits. Ainsi, en heures de pointe, l'ouverture de la BAU à la circulation permet, en 2013 :

- Dans la direction de Lausanne, de faire passer en moyenne 810 véh/h de plus qu'en 2008 avec un débit total moyen en HP de 4'420 véh/h, soit + 23%.
- Dans la direction de Genève, de faire passer en moyenne 620 véh/h de plus qu'en 2008 avec un débit total moyen en HP de 4'350 véh/h, soit + 17%.

L'évolution du TJMO montre que l'ouverture de la BAU au trafic n'a pas rendu plus attractif ce tronçon puisque son évolution globale continue de suivre l'évolution moyenne annuelle observée avant la mise en service du système de BAU active. Celui-ci permet de faire néanmoins de faire passer une demande plus importante en période de pointe, qui existait déjà avant sa mise en place, dans de meilleures conditions de circulation.

Sur les tronçons adjacents, les débits de circulation avant la mise en service du système de BAU active étaient déjà importants. Aujourd'hui, ces tronçons sont saturés et les conditions de circulation souvent difficiles, notamment lors de la période de pointe du soir. Dans la direction de Lausanne, le tronçon de Crissier se comporte comme goulet d'étranglement. Dans la direction de Genève, le tronçon situé après la demi-jonction de Morges-Est, réduit à deux voies de circulation, amplifie la saturation. Les congestions formées sur ces tronçons adjacents peuvent alors remonter sur le tronçon de la BAU active. Des interventions futures sont étudiées avec notamment la suppression du goulet d'étranglement de l'échangeur de Crissier ou encore le prolongement du système de BAU active entre la demi-jonction de Morges-Est et la jonction d'Aubonne.

Finalement, les informations récoltées sur le réseau secondaire laissent à penser que la mise en service du système de BAU active a eu un impact sur celui-ci. Toutefois, la prochaine analyse de ces données (à priori 2010-2015) permettra de confirmer cette hypothèse.

4.3 Impact sur la vitesse

Une des particularités du système de BAU active est que les limitations de vitesse sur le tronçon sont variables selon l'état du système. Ainsi, à l'état de repos, la limitation de vitesse est de 120 km/h, soit celle d'un tronçon classique d'autoroute en Suisse. Pendant la période d'ouverture de la BAU active, la limitation de vitesse est abaissée à 100 km/h pour des raisons de sécurité. Il est également possible de baisser la limitation de vitesse à 80 km/h pour des raisons de gestion et de régulation du trafic lors de cas de congestion, ou pour des raisons de sécurité, s'il y a un danger sur le tronçon.

4.3.1 Evolution de la vitesse aux heures de pointe

Cette analyse a été effectuée à partir des données du capteur CH43. En raison de son emplacement spécifique (Chapitre 2.2.4) et de l'important échantillon de données traitées (moyenne de mars à juin de chaque année), les chutes de vitesses très importantes dues aux congestions observées en 2008 ne sont pas visibles à ce niveau macroscopique d'analyse.

Direction Lausanne

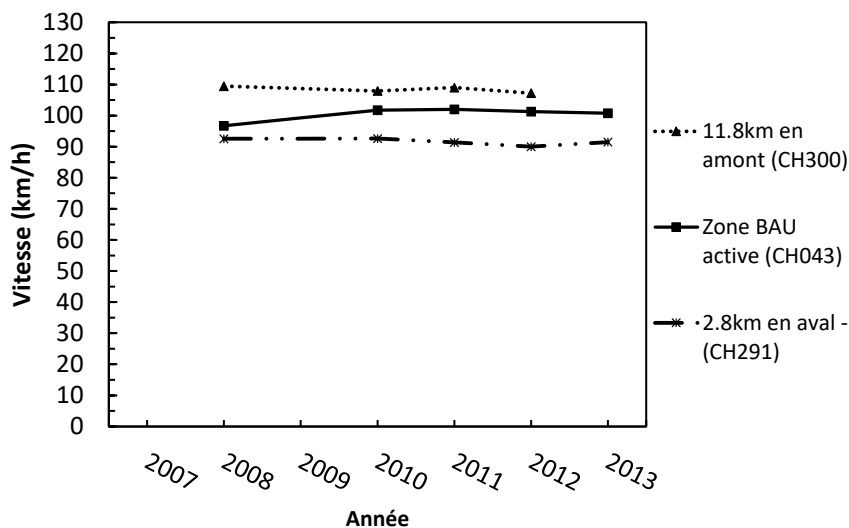


Fig. 28 Evolution de la vitesse moyenne, HPM, mars-juin, jours ouvrés, direction Lausanne.

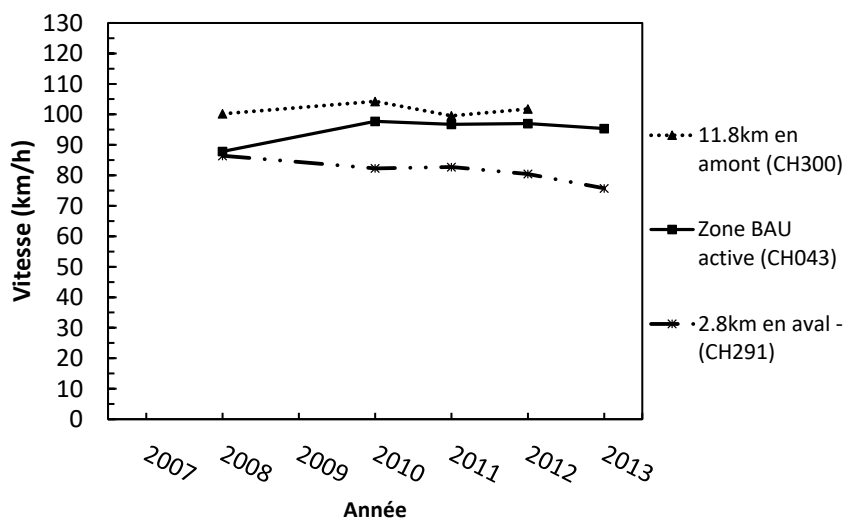


Fig. 29 Evolution de la vitesse moyenne, HPS, mars-juin, jours ouvrés, direction Lausanne.

En 2008, sur le tronçon de la BAU active, dans la direction de Lausanne, la vitesse était inférieure à 100 km/h (Fig. 28), voire inférieure à 90 km/h en HPS (Fig. 29), pour une limitation à 120 km/h. A partir de la mise en service de la BAU active, la situation s'améliore et les vitesses restent situées, en HPM, autour de 100 km/h, soit à la limitation de vitesse du tronçon. En HPS, les vitesses sont légèrement plus basses qu'en HPM mais l'effet de l'ouverture de la BAU active y est le plus visible. En effet entre 2008 et 2010, une amélioration de +11% des vitesses pratiquées sur le tronçon pendant cette période s'est produite.

Au niveau des tronçons adjacents dans cette direction, en 2008, les vitesses étaient déjà inférieures à la limitation de vitesse du tronçon au niveau du capteur CH300 (120 km/h). Au niveau du capteur CH291, en HPS, les congestions au niveau de Crissier sont visibles avec des vitesses moyennes d'environ 75 km/h en 2013. Pour rappel, la limitation de vitesse au niveau de ce capteur dans cette direction est de 80 km/h.

Direction Genève

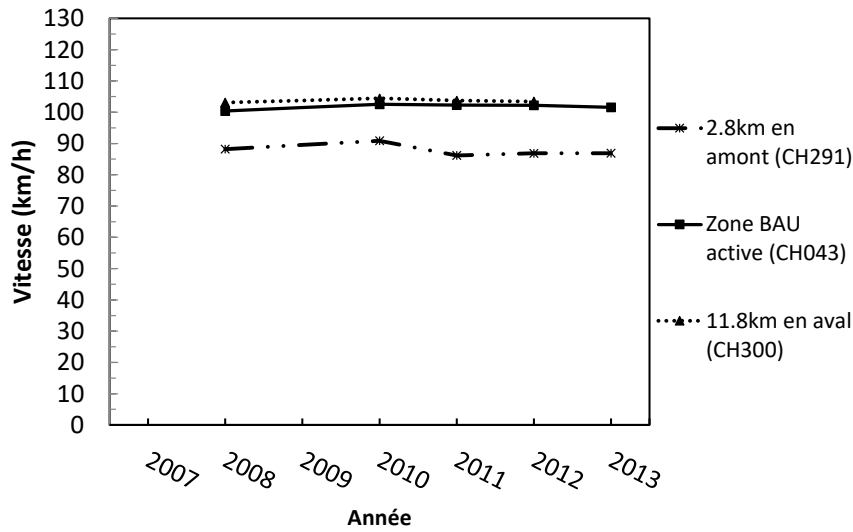


Fig. 30 Evolution de la vitesse moyenne, HPM, mars-juin, jours ouvrés, direction Genève.

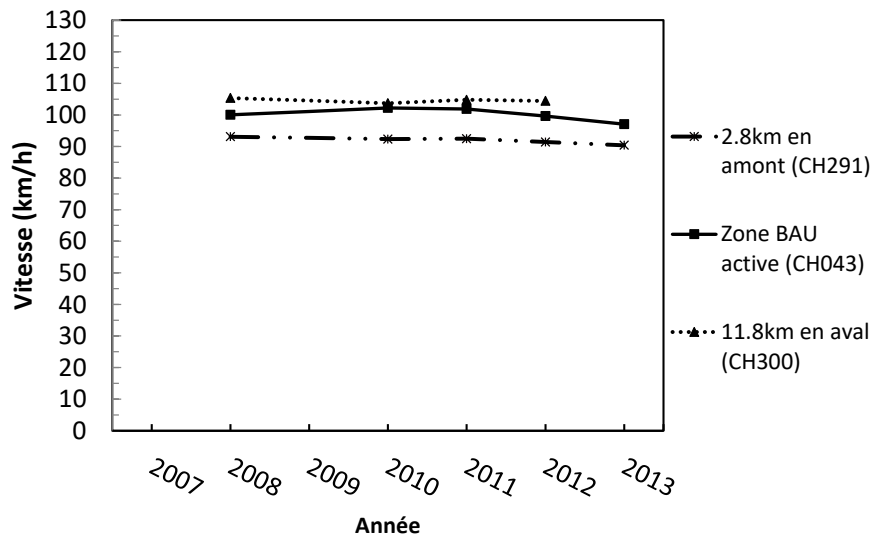


Fig. 31 Evolution de la vitesse moyenne, HPS, mars-juin, jours ouvrés, direction Genève.

En 2008, dans la direction de Genève, la vitesse sur le tronçon de la BAU active était de 100 km/h pour une vitesse limite de 120 km/h (Fig. 30, Fig. 31). A partir de la mise en service de la BAU active, en HPM, les vitesses sont stables autour de 100 km/h. En HPS, la vitesse se stabilise également autour de 100 km/h après l'année d'ouverture de la BAU mais a tendance à légèrement diminuer depuis 2011.

Sur les tronçons adjacents, les vitesses moyennes restent stables au cours des années aux environs de 100 km/h à Aubonne (vitesse limite de 120 km/h) et à 88 km/h le matin et 92 km/h le soir à Crissier (vitesse limite de 100 km/h).

De manière générale, les vitesses sont plus élevées et stables depuis la mise en place du système de BAU active. La fluidité sur le tronçon s'est donc améliorée. Les usagers respectent correctement la vitesse limite affichée de 100 km/h. Les vitesses restent semblables à celles observées en 2008 avant la mise en place de la BAU active dans la direction de Genève. Dans la direction de Lausanne, la saturation de l'échangeur de Crissier est visible avec une diminution de la vitesse de plus en plus importante.

Relation débit / vitesse moyenne

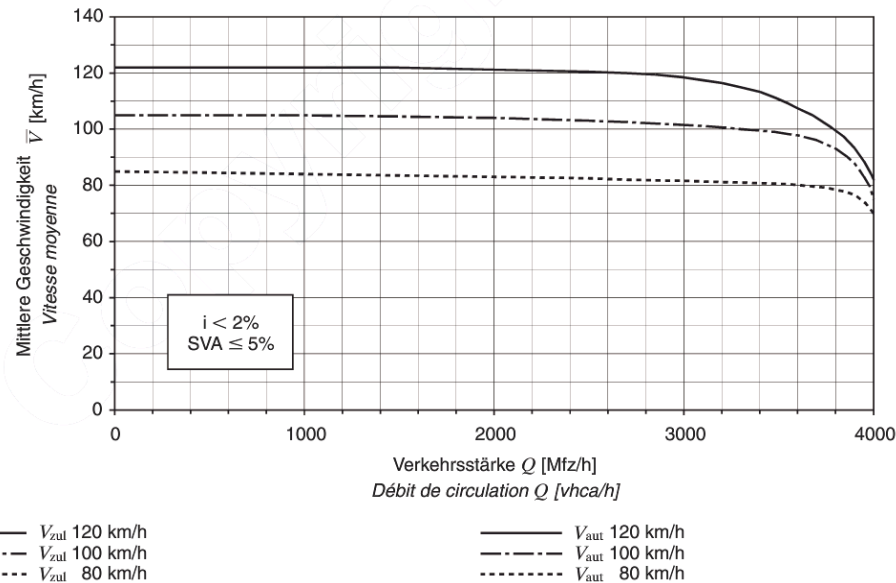


Fig. 32 Diagramme débit / vitesse moyenne pour une autoroute à deux voies de circulation, SN 640 018a (Fig. 2). [6]

À Aubonne (capteur CH300), la capacité théorique de l'autoroute est de 4'000 véh/h. Avec un débit d'environ 3'400-3'600 véh/h en 2012, la cohérence des vitesses selon le diagramme ci-dessus (Fig. 32) est effectivement remarquée (vitesse moyenne d'environ 105 km/h). Comme on peut le constater, la fluidité de ce secteur ne va pas aller en s'améliorant. Les mesures relevées se situent déjà sur la courbe descendante des vitesses, courbe dont la chute est exponentielle. Une probable augmentation du débit entraînera donc des vitesses moyennes de plus en plus faibles si aucune mesure n'est prise sur ce tronçon.

À Crissier (capteur CH291), la configuration théorique est celle d'une autoroute à deux fois trois voies. Toutefois, dans la direction Genève, le capteur est situé après l'entrée d'autoroute de Crissier et avec des voies directionnelles. Dans la direction de Genève, les usagers peuvent emprunter la voie de droite ou la voie centrale, dans la direction de Lausanne-Sud, celles du centre et la voie de gauche.

Dans la direction de Lausanne-Nord, le capteur se situe à proximité de la bretelle de sortie pour Lausanne-Crissier-Renens et avec des voies directionnelles. Dans la direction de Vevey-Valais, les usagers peuvent emprunter la voie de droite (y.c. ceux sortant à Bussigny et Lausanne-Crissier) et ceux circulant en direction d'Yverdon les voies centrale et de gauche.

Le capteur de Crissier se situe donc dans une zone où de multiples changements de voies peuvent intervenir et en raison des utilisations des voies directionnelles, la capacité maximale (5'800 véh/h) ne peut être pleinement atteinte.

On constate un comportement différent suivant la direction considérée. En HPM, la direction de Genève présente un débit important tandis que dans la direction de Lausanne, un débit encore plus important est constaté en HPS. La vitesse moyenne de ce secteur se situe aux environs de 90 km/h mais l'on peut constater l'effet de la congestion (HPS en direction de Lausanne) avec une chute de la vitesse moyenne à 75 km/h.

De manière analogue aux constatations du secteur d'Aubonne, les vitesses mesurées à Crissier indiquent également que l'on se situe sur la courbe de chute des vitesses.

4.3.2 Analyse de la vitesse des poids lourds

Les recherches menées dans le cadre du travail de master de J. Chapoton, effectué au LAVOC et intitulé « Analyse et positionnement de poids lourds dans le trafic » [20], de même que la pré-étude de ce projet [21] servent de base à ce chapitre.

Législation

Les poids lourds ont des réglementations de vitesse différentes de celles des véhicules légers. Selon l'Ordonnance sur les règles de la circulation routière (OCR, [2]), article 5, alinéa 1a :

« La vitesse maximale est limitée à 80km/h pour les voitures automobiles lourdes, à l'exception des voitures de tourisme lourdes, pour les trains routiers, pour les véhicules articulés, ... »

Pour les autocars, selon l'article 5 de l'OCR [2], alinéa 2a :

« La vitesse est limitée, sur les autoroutes et semi-autoroutes, à 100km/h pour les autocars, ... »

Il y a une ambiguïté légale entre le fait que, de manière générale pour les poids lourds, exceptions décrites, la vitesse maximale autorisée et la vitesse « minimale » sont identiques. En effet, selon l'article 35, alinéa 1 de l'OCR [2] :

« Seuls les véhicules automobiles avec lesquels il est possible et permis de rouler à 80 km/h emprunteront les autoroutes et semi-autoroutes. ... »

Analyse des vitesses

L'analyse des vitesses a été effectuée sur les données du capteur CH43 (Chapitre 2.2.4) en périodes de pointe (de 6h00 à 9h00 pour le matin et de 16h30 à 19h30 pour le soir) des jours ouvrables du mois de juin 2013. Les poids lourds y représentent 3.85% du trafic total.

Les vitesses des poids lourds, selon les différentes catégories, et des véhicules légers sont indiquées en fonction de la position du véhicule sur les voies. Les résultats sont exprimés par la médiane qui correspond à la valeur pour laquelle l'échantillon de données est séparé en deux parties égales (la moitié de l'échantillon de données possède une vitesse plus faible et l'autre moitié une vitesse plus élevée que la valeur médiane). Le fait de considérer pour les analyses les médianes permet de réduire l'influence des valeurs extrêmes, notamment celles des cas de congestion, qui peuvent influencer de manière importante les valeurs moyennes.

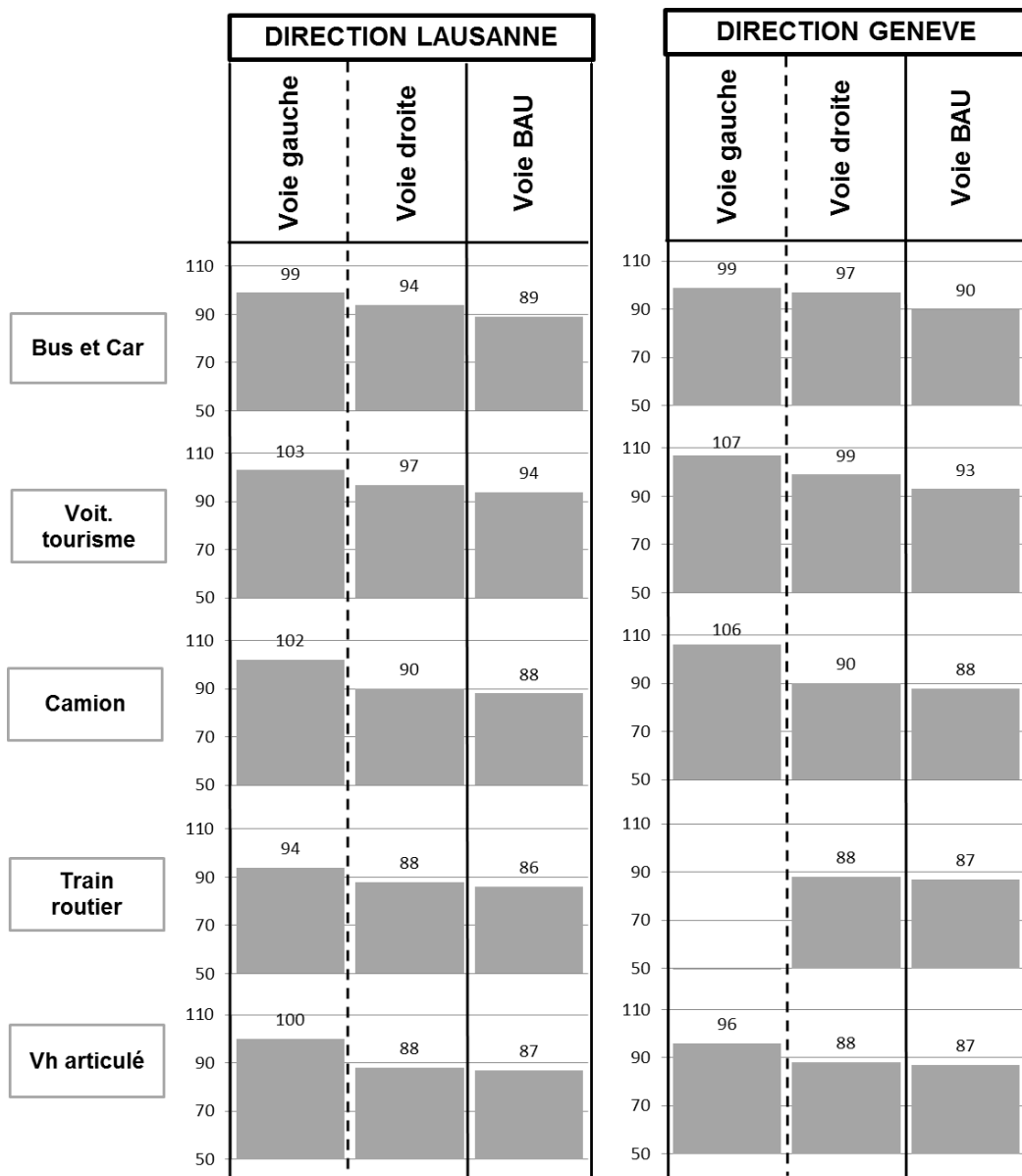


Fig. 33 Médianes des vitesses (km/h), périodes de pointe, juin 2013, jours ouvrés, CH43.

Selon la Fig. 33, lorsque la BAU est ouverte à la circulation, les voitures de tourisme respectent bien la réglementation de vitesse sur la BAU ainsi que sur la voie de droite mais dépassent la limitation de vitesse de 100 km/h sur la voie de gauche. Concernant les poids lourds, les médianes sont toutes supérieures aux 80 km/h fixés dans la loi même lorsqu'ils sont positionnés sur la BAU. La médiane de la vitesse des poids lourds (exceptés autocars, bus, cars) sur la voie de droite atteint une vitesse de 88-90 km/h, également relevée dans [24]. Les vitesses sur la voie de gauche sont encore plus importantes avec une médiane à près de 100 km/h (véhicules poids lourds probablement « plus légers »). Seule la catégorie « Bus et car » respecte la limitation de vitesse fixée à 100 km/h sur les 3 voies.

Dans les deux directions, les poids lourds enregistrés sur la voie de gauche ne représentent qu'une faible part du trafic poids lourds. En période de pointe et de trafic dense, il est rare que ceux-ci tentent des manœuvres de dépassement sur la voie de gauche.

Tab. 4 Répartition des poids lourds, période de pointe, juin 2013, jours ouvrés, CH43

Direction	Voies de circulation		
	Voie gauche	Voie droite	BAU
Lausanne	6%	35%	59%
Genève	6%	34%	60%

La majorité des poids lourds circulent sur la BAU (Tab. 4). Leur vitesse est plus faible que celle des autres véhicules, mais supérieure à leur limite légale de vitesse de 80 km/h. Les vitesses dans d'autres secteurs de la BAU active peuvent être légèrement différentes que celles enregistrées sur le CH43, capteur utilisé pour effectuer cette analyse. Dans le chapitre 5, il est mis en évidence que ce différentiel de vitesse entre les poids lourds et les véhicules légers a un impact sur le choix de cette voie pour les utilisateurs et donc sur le taux d'utilisation de cette voie. De plus, un différentiel de vitesses important entre véhicules peut également avoir un effet sur son accidentologie (Chapitre 9).

4.3.3 Synthèse

Depuis la mise en place du système de BAU active, sur le tronçon permettant la circulation sur la BAU, les vitesses sont plus stables qu'auparavant pour une limitation de vitesse plus basse (100 km/h quand la BAU est ouverte à la circulation au lieu de 120 km/h). Cette limitation de vitesse est globalement respectée par les véhicules légers. Pour la catégorie poids lourds, ces derniers roulent principalement sur la BAU et à une vitesse plus élevée de 7 à 8 km/h que leur vitesse limite légale de 80 km/h.

Toutefois, on notera qu'après un regain dû à l'ouverture de la BAU active, les vitesses moyennes sur le secteur de la BAU active sont en diminution. Toute augmentation du débit sur ce secteur sera probablement accompagnée d'une nouvelle diminution de la vitesse moyenne. On peut toutefois espérer une meilleure appréhension du système par les usagers qui permettrait ainsi une répartition plus homogène du débit entre les voies et ainsi une amélioration de la fluidité (Chapitre 5.2).

On peut également conclure que les tronçons adjacents se situent sur la courbe de chute des vitesses, les débits étant proches des capacités théoriques à certaines heures de la journée. Toute augmentation supplémentaire de débit impliquera une chute prononcée des vitesses moyennes et les congestions deviendront alors de plus en plus fréquentes sur ces tronçons adjacents.

4.4 Impact sur la densité

La densité (véh/km) est un paramètre de trafic, lié au débit et à la vitesse, qui se veut déterminant au niveau du fonctionnement du système de BAU active. En effet, c'est sur ce paramètre que les seuils d'ouverture et de fermeture de la BAU active ont été déterminés (Chapitre 3.1).

4.4.1 Evolution de la densité aux heures de pointe

L'analyse de l'efficacité du système de BAU active en termes de densité recoupe donc les analyses sur le débit (Chapitre 4.2) et la vitesse (Chapitre 4.3) effectuées précédemment. L'évolution de la densité entre 2008 et 2013 est traitée afin de mettre en évidence l'effet de la BAU active sur la densité du tronçon. Une augmentation du débit depuis la mise en fonction du système a été constatée. En ce qui concerne les vitesses, elles sont relativement stables excepté pour la direction de Lausanne, en HPS, où elles ont tendance à diminuer. D'après l'équation fondamentale, la densité sur le tronçon devrait donc être plus importante après la mise en service de la BAU active.

Direction Lausanne

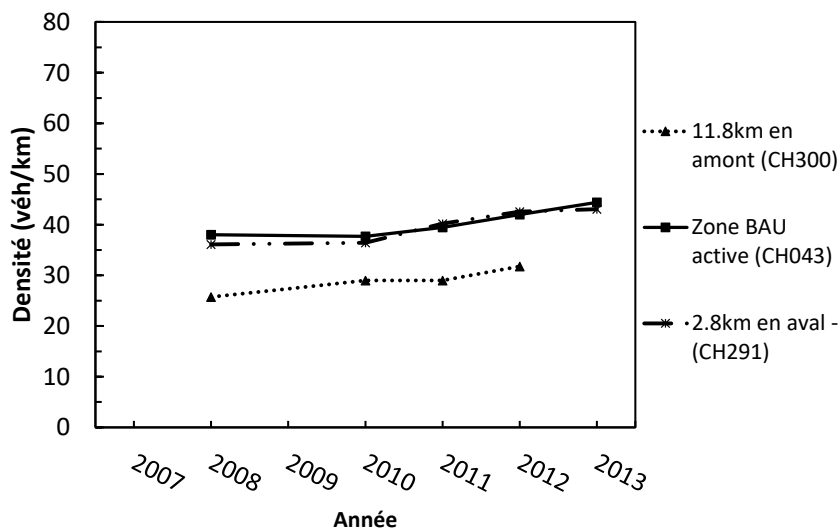


Fig. 34 Evolution de la densité moyenne, HPM, mars-juin, jours ouvrés, direction Lausanne.

Dans la direction de Lausanne, en HPM, avant la mise en service de la BAU active, la densité sur le tronçon n'évoluait plus (Fig. 34). A partir de 2010, l'évolution de la densité a repris avec une augmentation d'environ +5%/an. En 2013, la densité sur le tronçon de la BAU active en HPM est de 44 véh/km. L'évolution de la densité sur le tronçon de la BAU active est similaire à celle du tronçon adjacent situé en aval (CH291).

En ce qui concerne le tronçon en amont, sa densité augmente également entre 2008 et 2010. Après une stabilisation de la densité à une valeur de 29 véh/km entre 2010 et 2011, une augmentation de +10% est visible entre 2011 et 2012.

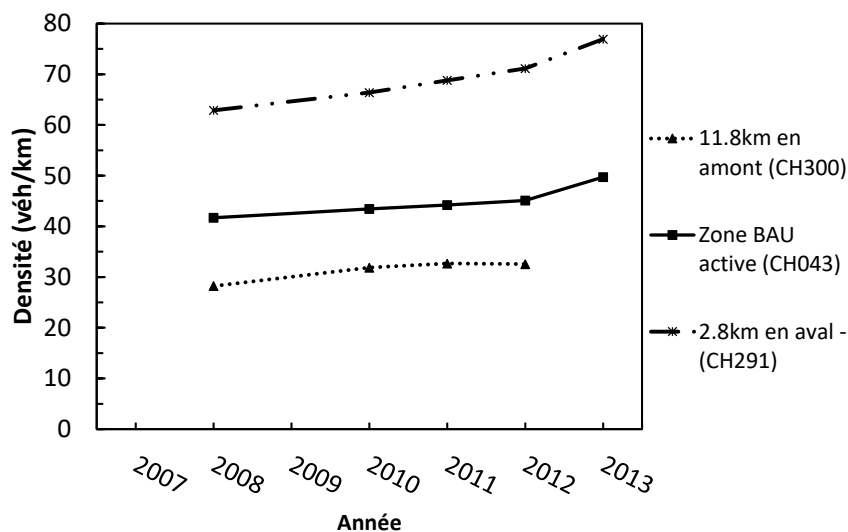


Fig. 35 Evolution de la densité moyenne, HPS, mars-juin, jours ouvrés, direction Lausanne.

En HPS, sur le secteur de la BAU active, l'évolution de la densité entre 2010 et 2012 suit la tendance d'augmentation déjà observée avant la mise en service de la BAU active, à savoir de +2%/an. Entre 2012 et 2013, une augmentation plus importante est visible avec +10%. En 2013, la densité sur le tronçon de la BAU active en HPS est de 50 véh/km (Fig. 35).

En ce qui concerne le tronçon en aval, au niveau de Crissier, la densité est déjà élevée en 2008 avec 63 véh/km. En 2013, elle atteint une valeur de 77 véh/km. Cette valeur traduit bien le niveau de saturation présent sur les échangeurs d'Ecublens et de Villars-Ste-Croix. En ce qui concerne le tronçon en amont, la densité s'est stabilisée depuis 2011 à une valeur de 33 véh/km.

Direction Genève

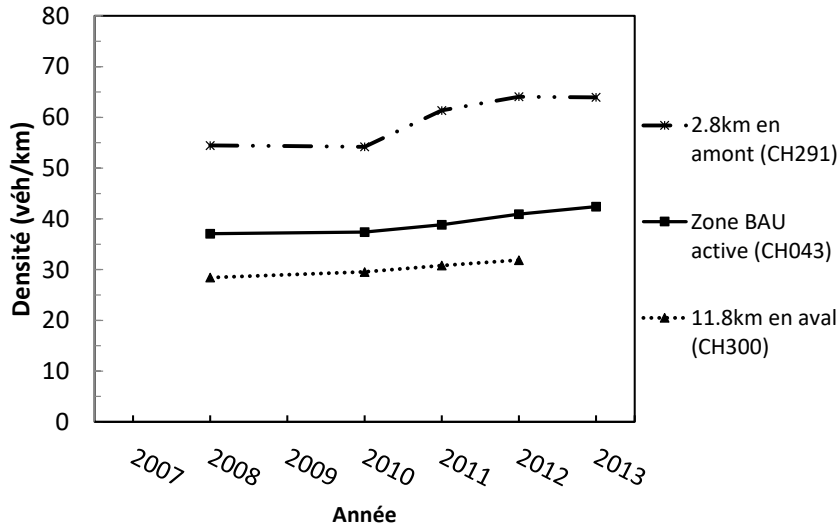


Fig. 36 Evolution de la densité moyenne, HPM, mars-juin, jours ouvrés, direction Genève.

En HPM, les densités du tronçon de la BAU active et des tronçons adjacents n'évoluaient plus depuis 2008 (Fig. 36). Avec la mise en service de la BAU active, les densités augmentent à nouveau. En 2013, la densité moyenne sur le tronçon de la BAU active pour l'HPM est de 42 véh/km.

Pour le tronçon en amont (CH291), un pic d'augmentation est visible après la mise en place de la BAU active avec +13% entre 2010 et 2011. Cette densité a tendance à se stabiliser après 2011 jusqu'à atteindre une valeur de 64 véh/km en 2013.

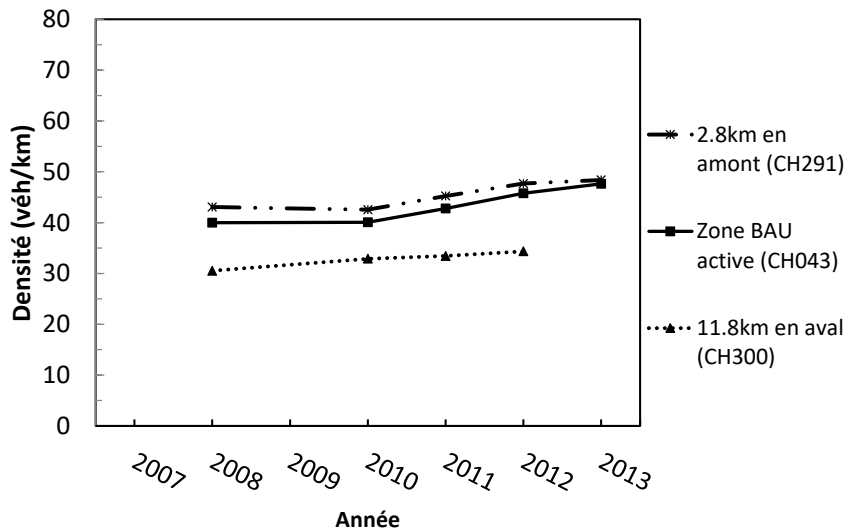


Fig. 37 Evolution de la densité moyenne, HPS, mars-juin, jours ouvrés, direction Genève.

En HPS, les densités du tronçon de la BAU active et des tronçons adjacents n'évoluaient également plus depuis 2008 (Fig. 37). Avec la mise en service de la BAU active, la densité recommence à augmenter sur le tronçon et atteint, en 2013, 48 véh/km.

Pour le tronçon en amont (CH291), la tendance est similaire à celle du tronçon de la BAU active. Sur le tronçon en aval, pour une densité de 31 véh/km en 2008, elle est de 34 véh/km en 2012, soit +12% d'augmentation par rapport à 2008.

4.4.2 Synthèse

L'augmentation du trafic sur le tronçon de la BAU active en HP, avec la mise en service de ce système, a pour conséquences une augmentation de la densité sur le tronçon. En ce qui concerne les vitesses, elles restent globalement stables en HP. Ainsi, une densité aussi élevée en période de pointe, avec des vitesses qui restent aussi stables implique une utilisation soutenue de l'infrastructure. En termes d'efficacité, cela a donc un impact positif.

4.5 Impact sur les conditions de trafic

Les paramètres fondamentaux du trafic que sont la vitesse, le débit et la densité révèlent les conditions de trafic qui prévalent sur un tronçon de route donné.

4.5.1 Conditions de trafic avant la mise en service de la BAU active

Depuis sa mise en service en 1964, jusqu'à la mise en service du système de BAU active, cette autoroute n'a pas subi de travaux majeurs d'augmentation de capacité.

La situation du trafic à l'année de référence (2008) peut se décrire ainsi (données du capteur CH43, voir chapitre 2.2.4) :

- Au moins deux heures par jour ouvrable, la circulation est ralentie ou bloquée (niveau de service E). Les matinées des jours ouvrables les moins chargées sont celles du lundi et du vendredi. La pointe de trafic du matin, pour les jours ouvrables, se situe entre 7h et 8h. Celle du soir se situe entre 16h30 et 17h30 sauf pour le vendredi soir où elle est avancée d'environ une demi-heure (Fig. 38, Fig. 40).
- Les vitesses moyennes varient entre 80 km/h et 100 km/h, pour une limite légale à 120 km/h (Chapitre 4.3.1). En soirée, spécialement le mercredi et le vendredi soir la vitesse moyenne peut descendre jusqu'à 70 km/h (Fig. 39, Fig. 41).

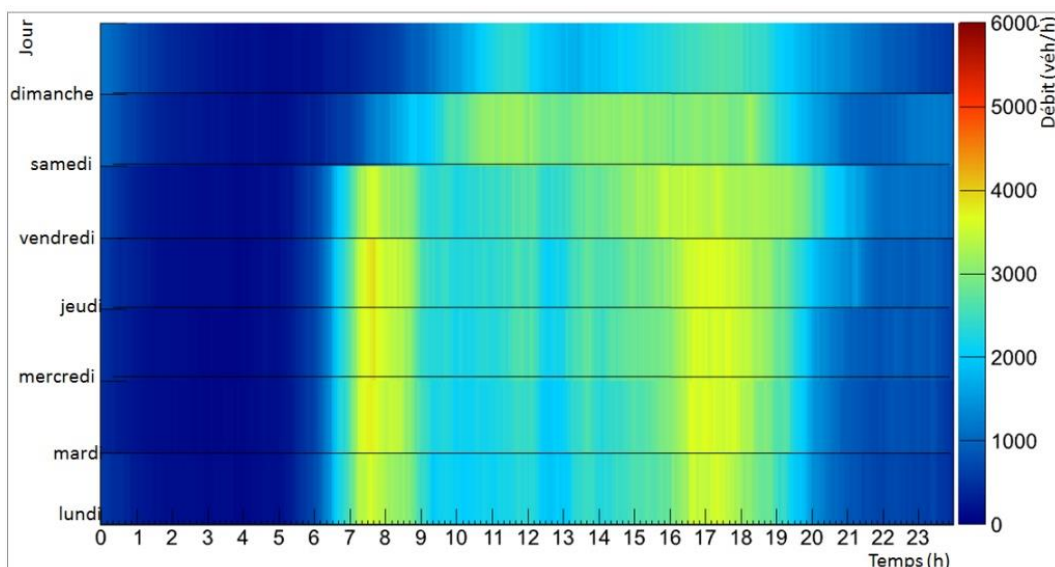


Fig. 38 Débit moyen en fonction du temps, semaine type 2008, direction Lausanne, CH43.

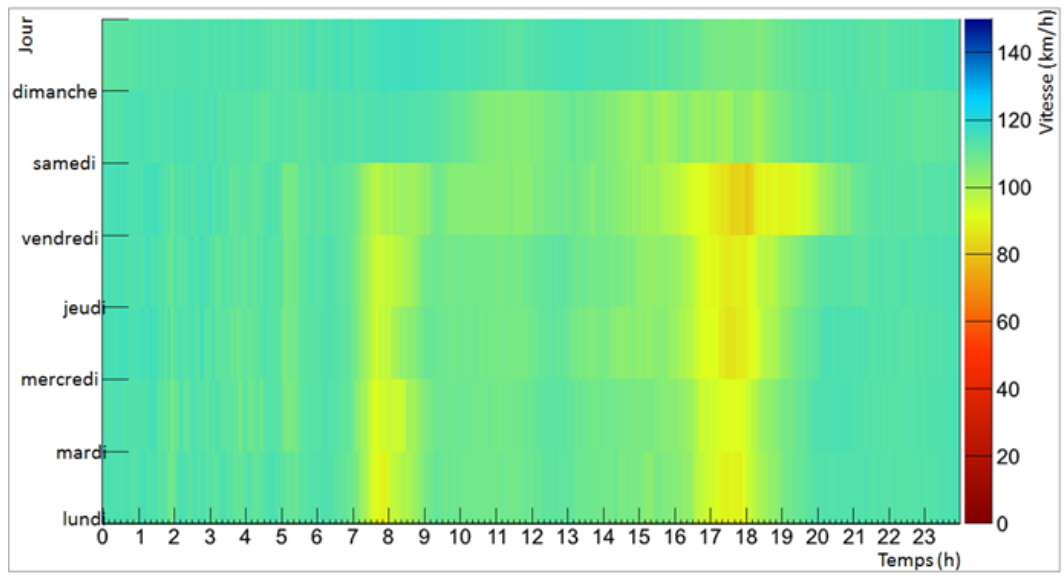


Fig. 39 Vitesse moyenne en fonction du temps, semaine type 2008, direction Lausanne, CH43.

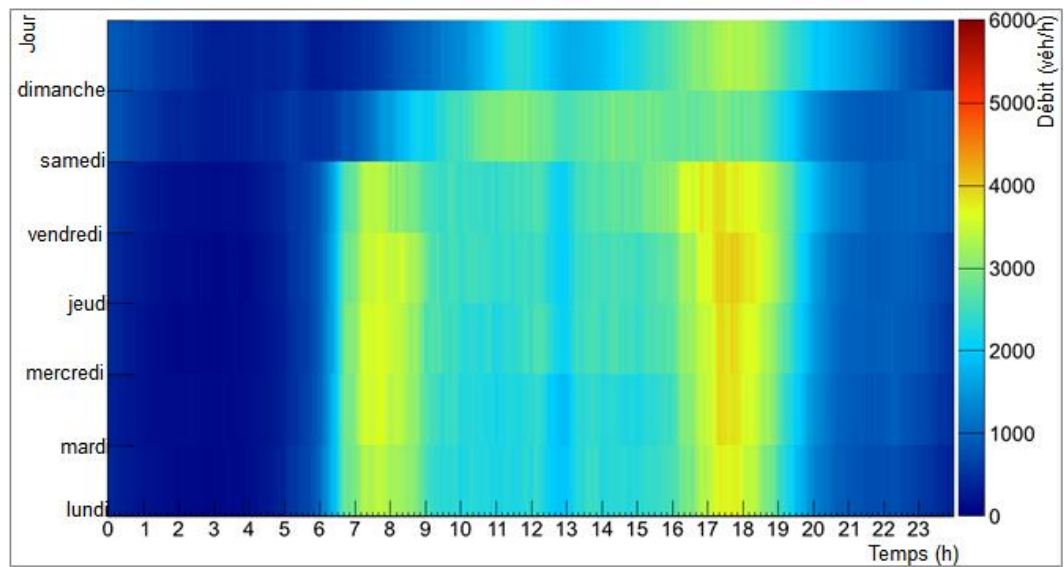


Fig. 40 Débit moyen en fonction du temps, semaine type 2008, direction Genève, CH43.

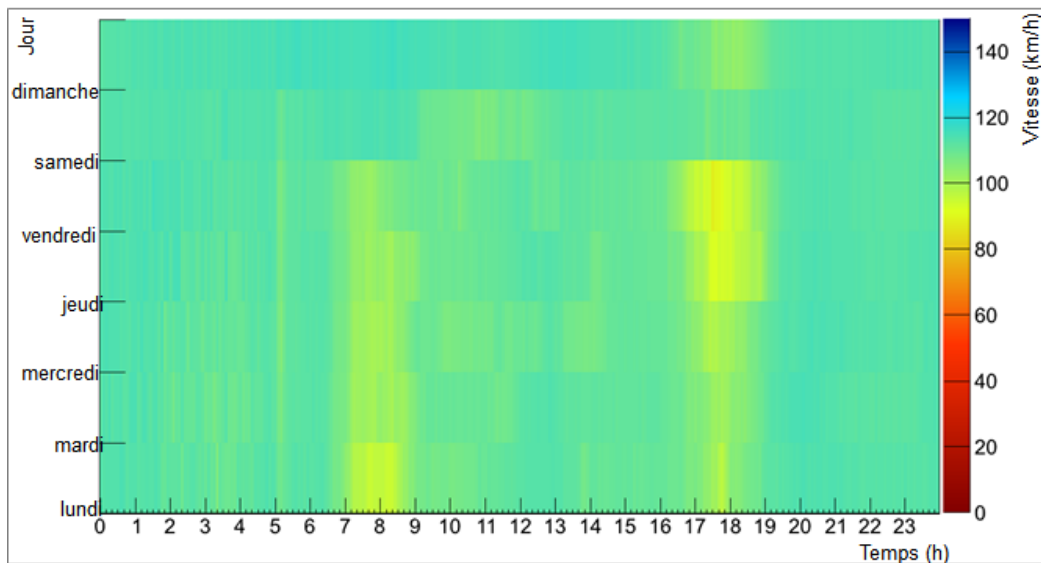


Fig. 41 Vitesse moyenne en fonction du temps, semaine type 2008, direction Lausanne, CH43.

4.5.2 Congestion

En 2014, l'Office fédéral de la statistique relevait, en Suisse, 21'541 heures d'embouteillage sur le réseau des routes nationales suisses. Un chiffre qui représente près du double de celui mesuré en 2008 (Fig. 42, [35]). La part la plus importante de ces bouchons, comme on les appelle couramment, est due aux surcharges de trafic.

Ampleur des embouteillages sur le réseau des routes nationales

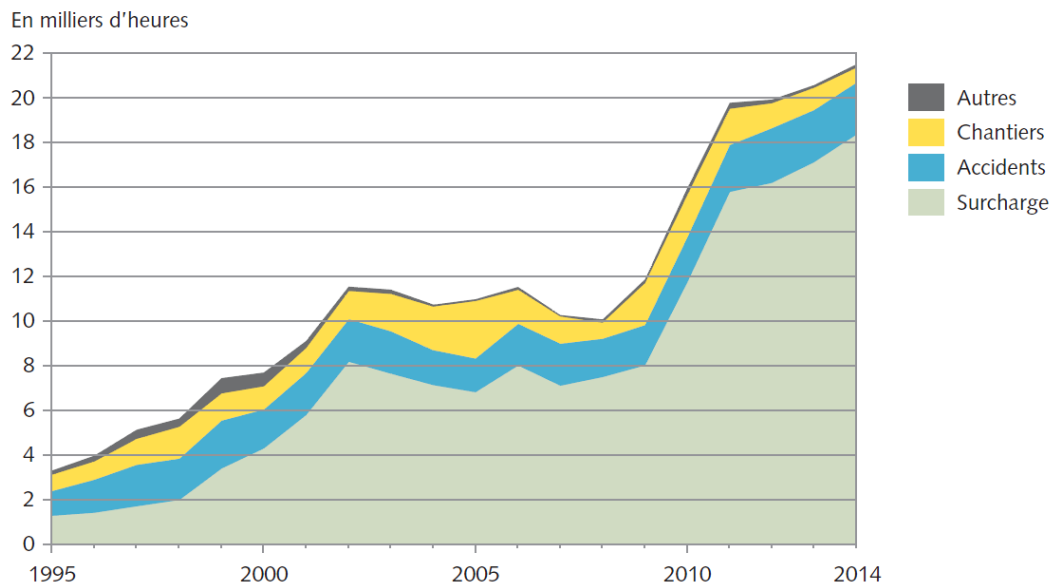


Fig. 42 Heures d'embouteillage en Suisse, OFS [35].

D'après le rapport annuel de l'Office fédéral des routes sur le trafic et la disponibilité des routes nationales, l'autoroute A1 arrive d'ailleurs en tête des autoroutes les plus encombrées (Fig. 43, [33]).

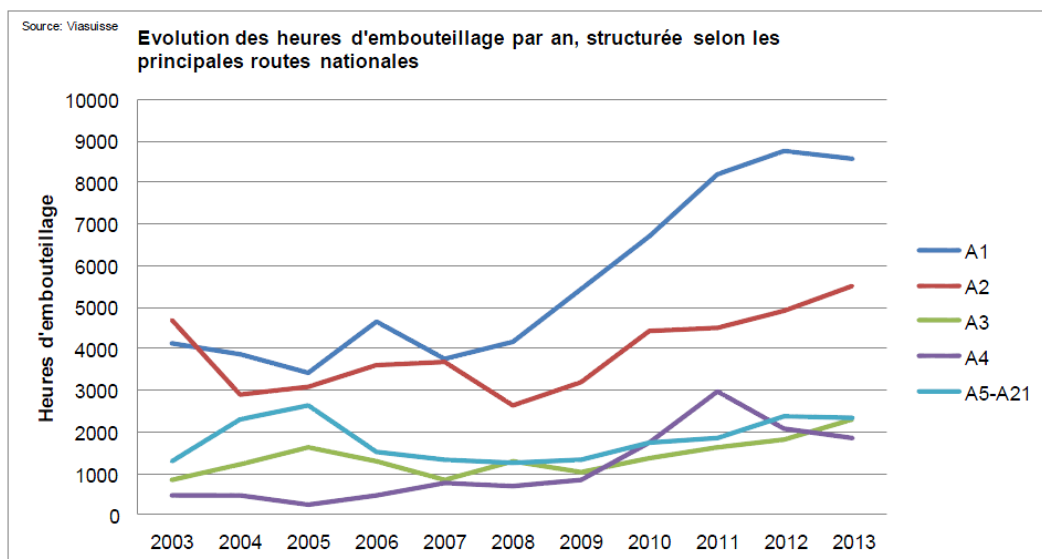


Fig. 43 Embouteillages sur les principales routes nationales, OFROU [33].

Avant la mise en service du système de BAU active, comme décrit aux chapitres 4.2, 4.3 et 4.4, l'axe Lausanne-Genève montrait également des situations récurrentes de congestion. Sur cet axe, les contournements de Lausanne et de Genève sont cités dans [33] comme points noirs en nombre de jours d'embouteillage avec près de 260 jours par an.

Il existe plusieurs causes de congestion sur le tronçon de la BAU active dont notamment :

- Les congestions qui se forment car la capacité maximale du tronçon est en passe d'être atteinte.
- Les congestions dues aux remontées de file en raison de la saturation du premier élément d'influence d'une sortie d'autoroute (système de feux, giratoire, ...)
- Les congestions qui remontent sur le tronçon de la BAU active en raison d'un débit important sur le tronçon en aval.
- Congestions en raison d'incident, d'accident ou pour des raisons météorologiques.

L'utilisation de la bande d'arrêt d'urgence comme voie de circulation a permis d'augmenter temporairement la capacité de ce tronçon et a eu un impact notable sur les débits, les vitesses et les densités. Cet impact positif du système de BAU active induit de manière directe un impact sur les congestions. Ne nous intéressant qu'aux effets de l'ouverture de la BAU à la circulation sur les paramètres de trafic, le premier cas de congestion, atteinte de la capacité maximale est étudié (Chapitre 4.5.3).

4.5.3 Impact de l'ouverture de la BAU sur des conditions de circulation identiques

Comme décrit au chapitre 2.2.6, en décembre 2010, un accident a endommagé le système du tronçon de la BAU active. La BAU est donc restée fermée au trafic pendant une durée de 12 jours.

Cet accident a permis de mesurer comparativement l'effet de l'ouverture de la BAU au trafic sur le débit et les vitesses sur le tronçon. Pour cette analyse, les jours sélectionnés pour la situation sans système opérationnel sont les jours du lundi 13 décembre 2010 au vendredi 17 décembre 2010.

La comparaison avec la situation où le système est opérationnel a été effectuée avec les jours de la semaine du lundi 22 novembre au vendredi 26 novembre 2010 et ceux de la semaine du lundi 6 décembre au vendredi 10 décembre 2010. Ces semaines ont été choisies pour leur proximité avec les jours où le système était non opérationnel, afin d'avoir des conditions de trafic les plus similaires possibles.






L'avantage de cette comparaison est qu'elle permet de se rendre compte, en analysant en détail les courbes de vitesses et de débits, l'influence de la BAU sur le système au moment de son ouverture et également pendant toute la période où cette dernière reste ouverte.

Cette analyse a été effectuée au niveau de plusieurs zones du système. Les capteurs analysés, dans un premier temps, sont les capteurs SMETRA (Fig. 5) placés au milieu de la zone de BAU active (L-62200 et J-62200) afin d'éviter les effets de bords que peuvent engendrer la configuration du début et de la fin du système sur les vitesses et les densités relatives par voies. Puis, une analyse en différents secteurs, notamment au niveau de l'entrée du système dans les deux directions a été effectuée en utilisant le capteur L-60590 pour la direction de Lausanne et le capteur J-63800 pour la direction de Genève.

Les graphiques du jeudi 25 novembre 2010 par comparaison au jeudi 16 décembre 2010 sont pris pour exemple pour décrire les phénomènes constatés. Les tendances des autres jours étudiés sont ensuite comparées.

La légende des graphiques est la suivante :

Tab. 5 Légendes des graphiques de comparaison du système opérationnel – non opérationnel

Élément graphique	Définition
	Tendance - Système non opérationnel
	Tendance - Système opérationnel
	Point de mesure - BAU ouverte à la circulation (système opérationnel)
	Point de mesure - BAU fermée à la circulation (système opérationnel)
	Point de mesure - Système non opérationnel

Direction Lausanne

Lorsque le système est non opérationnel, la congestion commence à se former entre l'entrée de Morges-Est et le début du système (Km 59'050). Cette congestion se poursuit ensuite sur le système et se traduit par une baisse de la vitesse à ce niveau (Chapitre 4.3.1). Des phénomènes de congestion sont également remarqués en deçà, entre les entrées de Morges-Ouest et Morges-Est voire au-delà.

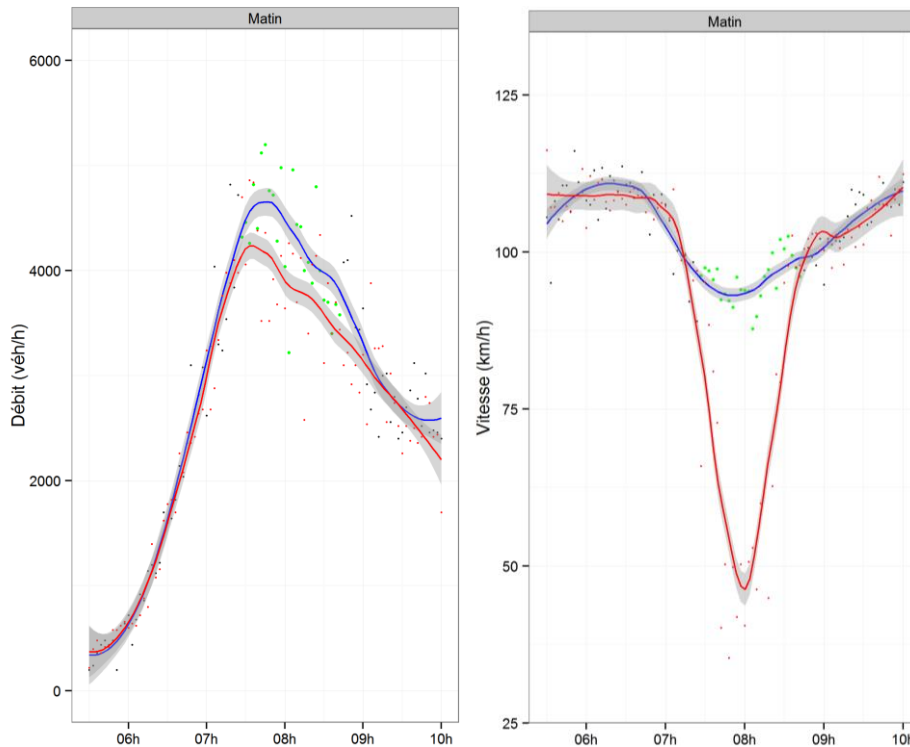


Fig. 44 Débit et vitesse moyenne, système opérationnel et non opérationnel, jeudi 25.11.2010 – jeudi 16.12.2010 matin, direction Lausanne, L-60105. Base : [7] [18] [19].

Dans la zone d'entrée, au commencement de la BAU active, le débit suit tout d'abord une augmentation semblable entre le jour où le système est non opérationnel et le jour où le système est opérationnel. On constate que le système de BAU active permet de faire passer une demande plus importante au pic de débit (Fig. 44, gauche).

En termes de vitesses, avec l'ouverture de la BAU à la circulation, la vitesse moyenne ne chute pas sous 90 km/h alors que dans le cas non opérationnel, une chute à 50 km/h est constatée durant plusieurs minutes (Fig. 44, droite).

Cette congestion s'étale ensuite sur le tronçon de la BAU active. Cependant, la chute des vitesses n'est pas aussi importante que celle observée au niveau de l'entrée (Km 60'105). Plus la zone analysée est loin de la zone d'entrée (Morges-Est), moins la chute de vitesse est visible. En se plaçant quelques centaines de mètres plus loin (Km 60'590), la congestion est visible mais les vitesses sont légèrement plus élevées (Fig. 45). On constate également le même phénomène lorsque le système est opérationnel.

Cela s'explique, pour le système opérationnel, par une meilleure répartition des véhicules sur les trois voies ouvertes, alors qu'à l'entrée du système (Km 60'105), la majorité des véhicules empruntant la voie la plus à droite sont ceux entrant à Morges-Est. Pour le système non opérationnel, cet effet s'explique par le fait que les véhicules entrant à Morges-Est doivent s'insérer dans le flux de circulation provenant de Morges-Ouest et des ralentissements locaux apparaissent (compression locale du flux) et qu'ensuite, le flux se détend.

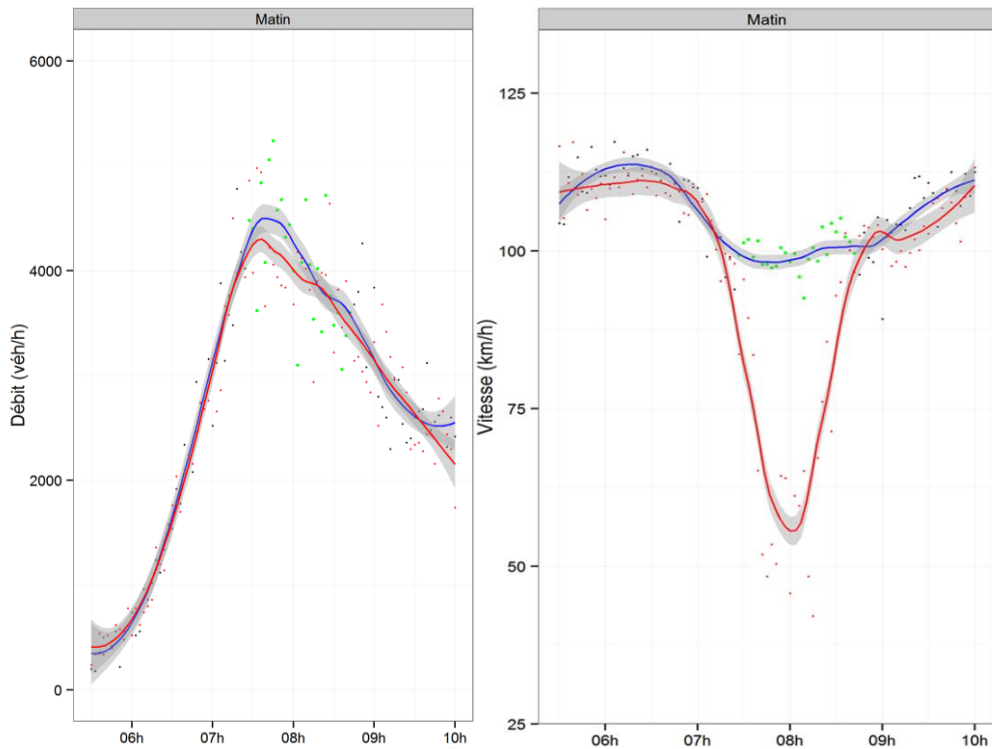


Fig. 45 Débit et vitesse moyenne, système opérationnel et non opérationnel, jeudi 25.11.2010 – jeudi 16.12.2011 matin, direction Lausanne, L-60590. Base : [7] [18] [19].

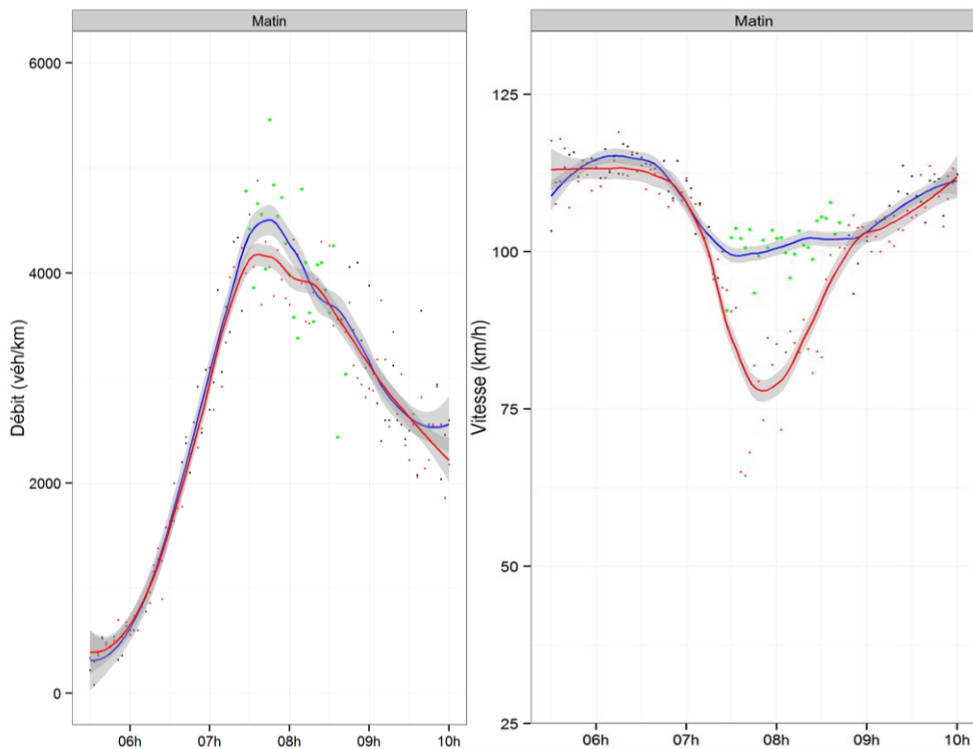


Fig. 46 Débit et vitesse moyenne, système opérationnel et non opérationnel, jeudi 25.11.2010 – jeudi 16.12.2011 matin, direction Lausanne, L-62200. Base : [7] [18] [19].

En analysant les vitesses au milieu du tronçon (Km 62'200, Fig. 46), la congestion est encore moins importante. Les vitesses chutent, dans le cas du système non opérationnel, aux environs de 75 km/h contre 50 km/h en début de système. C'est ce phénomène qui explique notamment la spécificité des données du capteur CH43 (Chapitre 2.2.4).

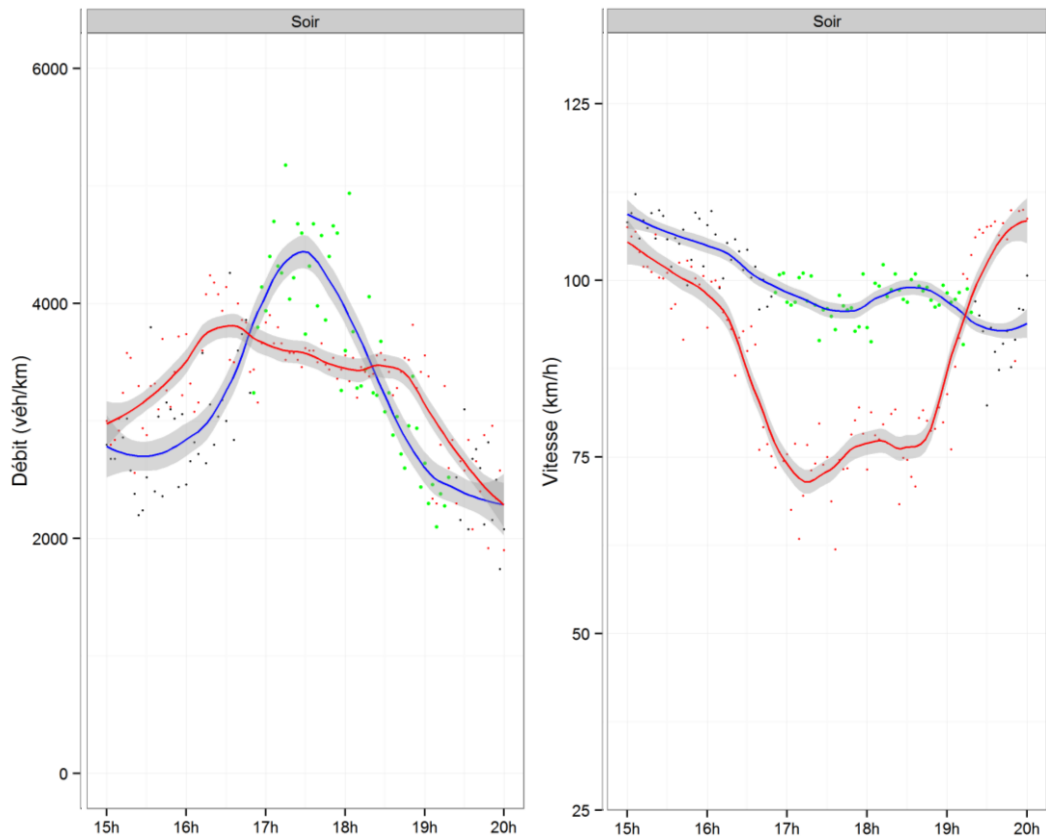


Fig. 47 Débit et vitesse moyenne, système opérationnel et non opérationnel, jeudi 25.11.2010 – jeudi 16.12.2011 soir, direction Lausanne, L-62200. Base : [7] [18] [19].

En période de pointe du soir, lorsque le système est non opérationnel, le débit est moins important qu'en période de pointe du matin mais s'étend sur une plus longue période. La vitesse est également plus faible que le matin.

La mise en service du système de BAU active a pour conséquence une pointe de débit moins étendue et des vitesses qui certes diminuent avec l'augmentation du débit mais ne marquent pas de chute importante.

Synthèse direction Lausanne

Sans système de BAU active, une congestion se forme au niveau de l'entrée d'autoroute (Morges-Est). Plus la zone est éloignée de la zone d'entrée, plus les conditions de circulation s'améliorent, avec des vitesses plus élevées. Ainsi, il est possible d'estimer que la vitesse moyenne augmente d'environ 10 km/h dans les 500 premiers mètres du système de BAU active puis d'environ 6 km/h pour chaque 500 mètres.

A débit semblable, lorsque le système est opérationnel, les conditions de circulation sont meilleures sur toute la longueur du système de BAU active. Aucune congestion ne se forme, même lorsque le débit atteint sa valeur maximale. De plus, le système de BAU active permet de faire passer un pic de débit sur une période moins étendue que lorsque le système est non opérationnel.

Direction Genève

Lors de la semaine où le système n'était pas opérationnel, aucune perturbation majeure n'a été observée dans la direction de Genève, tant en période du matin que du soir. Les vitesses moyennes relevées sont supérieures à 90 km/h. Lorsque le système est opérationnel, les débits et les vitesses moyennes sont tout de même plus élevés (Fig. 48, Fig. 49).

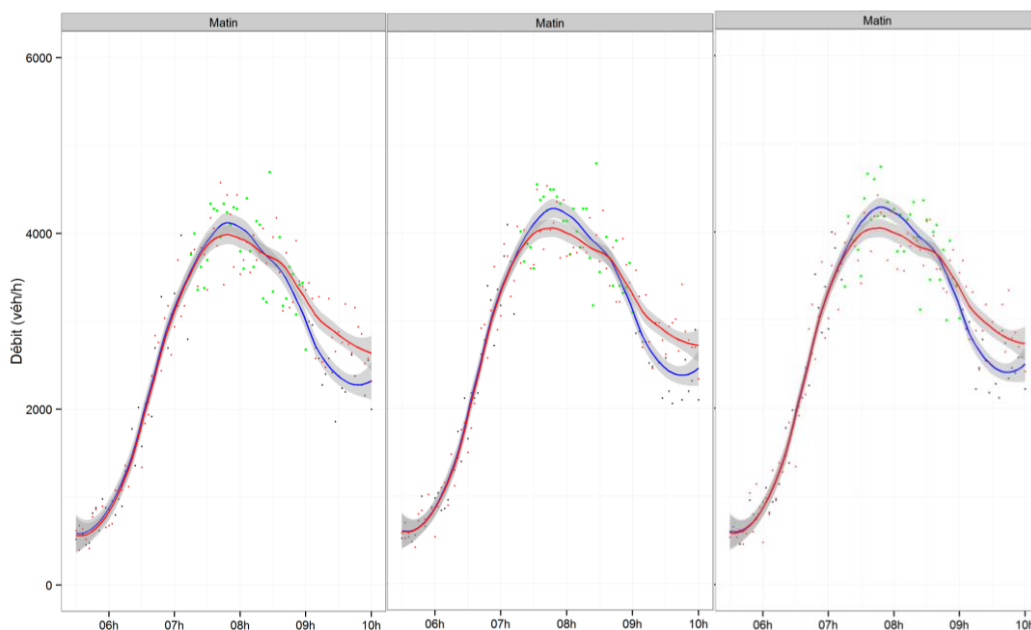


Fig. 48 Débit, système opérationnel et non opérationnel, jeudi 25.11.2010 – jeudi 16.12.2011 matin, direction Genève, J-63800, J-63145, J-62200. Base : [7] [18] [19].

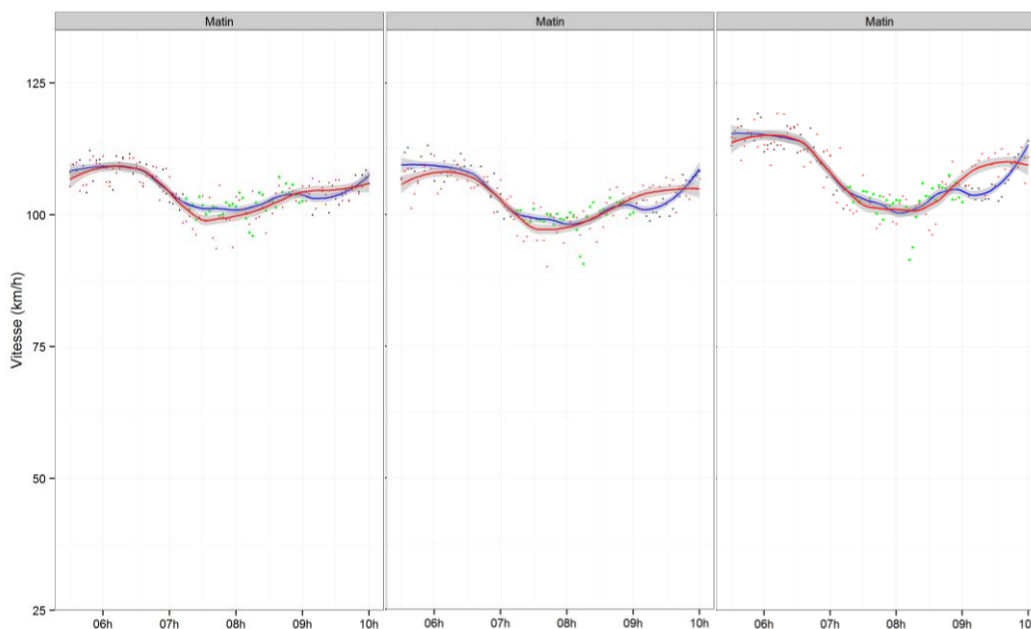
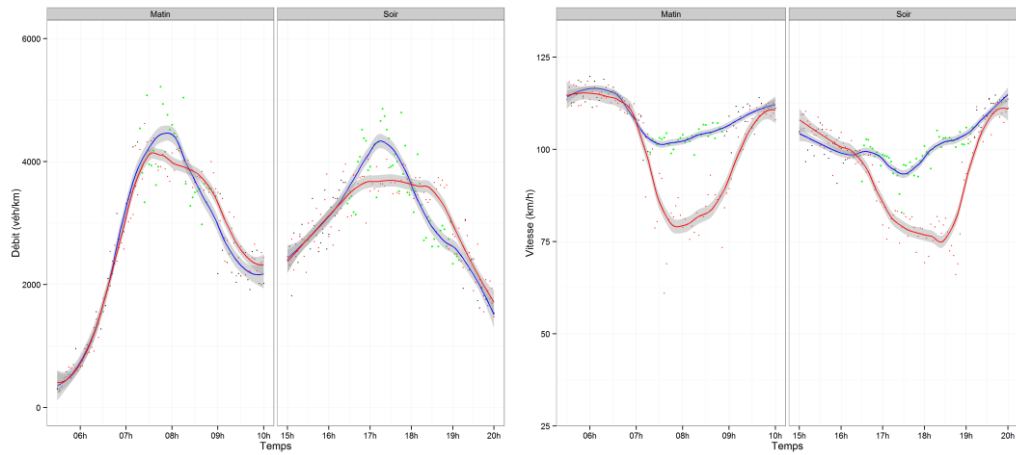


Fig. 49 Vitesse moyenne, système opérationnel et non opérationnel, jeudi 25.11.2010 – jeudi 16.12.2011 matin, direction Genève, J-63800, J-63145, J-62200. Base : [7] [18] [19].

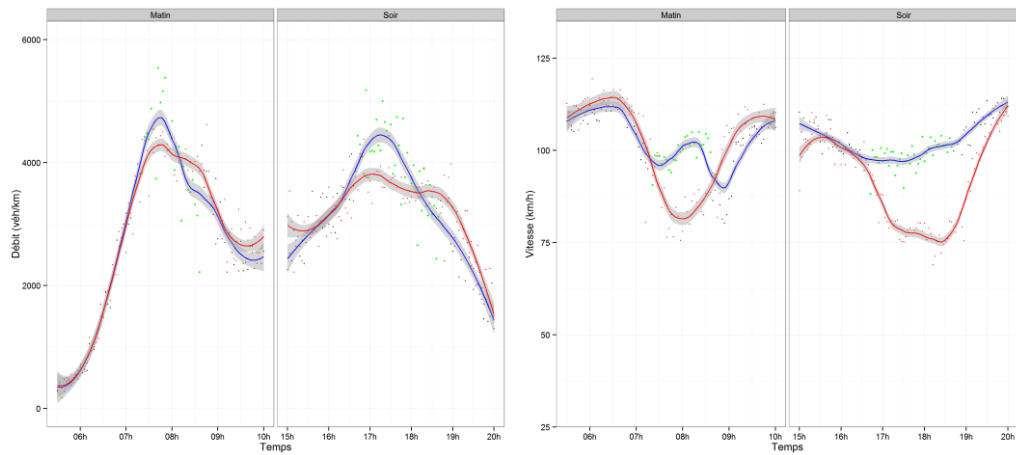
Comparaisons journalières

Direction Lausanne – J62200

Lundi



Mardi



Mercredi

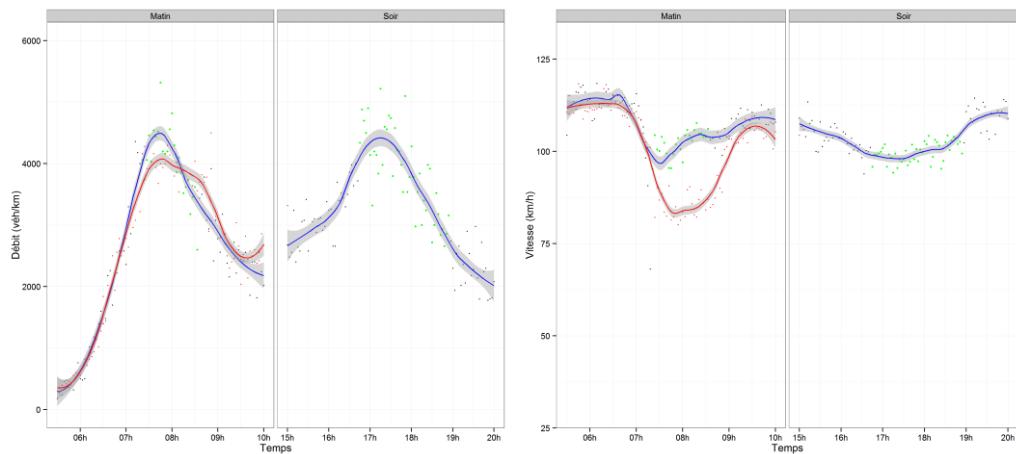


Fig. 50 Débit et vitesse moyenne, système opérationnel et non opérationnel, semaine du 22 au 26.11.2010 comparée à la semaine du 13 au 17.12.2010, direction Lausanne, J-62200. Base : [7] [18] [19].

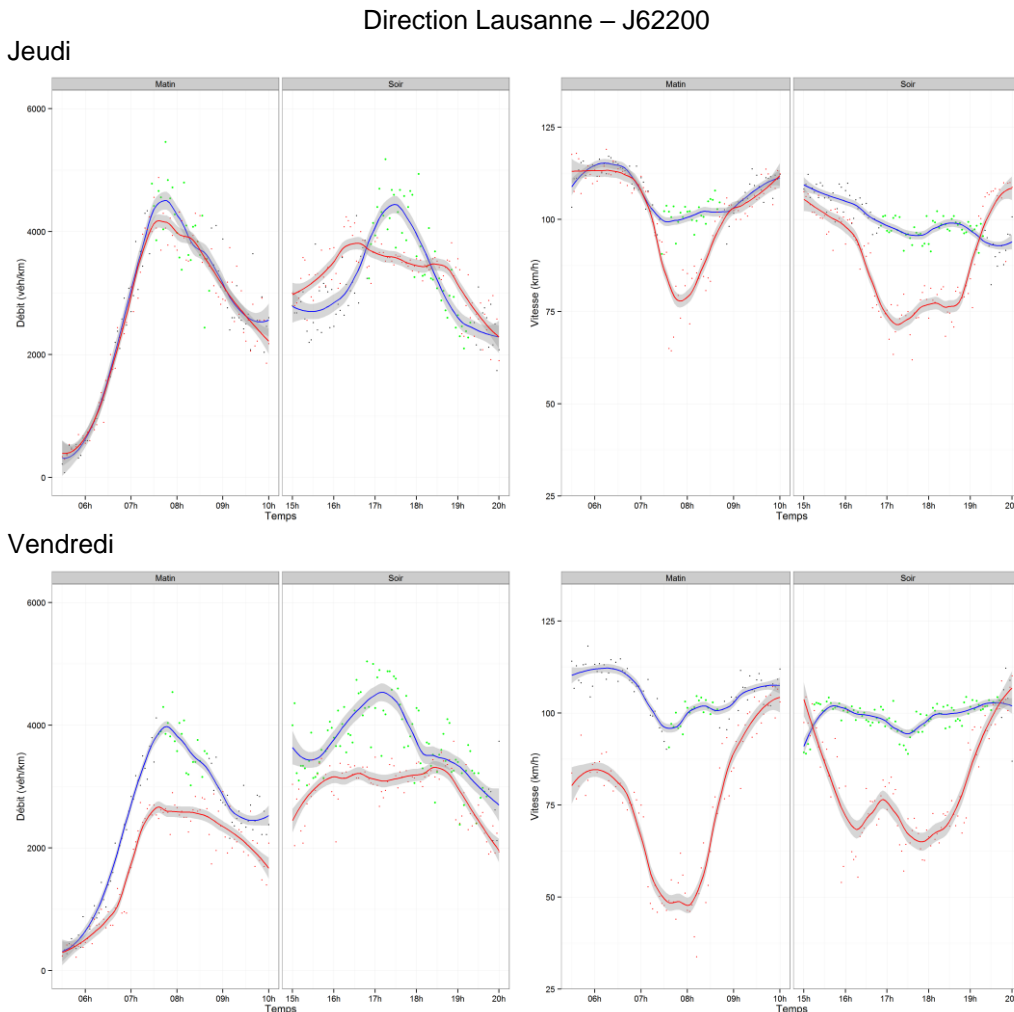


Fig. 51 Débit et vitesse moyenne, système opérationnel et non opérationnel, semaine du 22 au 26.11.2010 comparée à la semaine du 13 au 17.12.2010, direction Lausanne, J-62200. Base : [7] [18] [19].

Comme on le constatait précédemment en 2008 (Fig. 38, Fig. 39), certaines tendances sont toujours visibles. Le lundi et le vendredi, en matinée, présentent les pics de débit les plus faibles. Toutefois, l'étendue de la période de pointe provoque une chute des vitesses également plus étendue qui atteint des vitesses moyennes parfois inférieures à des jours où le débit de pointe est pourtant plus important.

On constate un phénomène particulier ; plus les périodes de pointe sont étendues (ex. : soir, vendredi matin), plus les chutes de vitesses sont importantes. En effet, si le débit présente une pointe nette (débit ascendant – pic – débit descendant), la congestion sera rapidement dissipée. Par contre, si le débit forme un plateau en lieu et place d'une pointe, avec une partie descendante retardée, la congestion peut perdurer et s'amplifier, même si le débit « en plateau » est moins important que le débit « en pointe ».

4.5.4 Synthèse

Le gain de l'ouverture de la BAU active a été mis en évidence en comparant, pour des conditions de trafic similaires en périodes de pointe, des jours où le système était non opérationnel, avec des jours où le système était opérationnel. Les bénéfices de l'utilisation de la BAU active sont surtout visibles pour la direction Lausanne. L'ouverture de la BAU active permet de faire passer une charge de trafic plus importante, sur une période de pointe plus réduite. La formation de congestion est évitée et des vitesses plus élevées sont constatées grâce à l'augmentation de la capacité du tronçon pendant ces périodes de pointe.

4.6 Analyse des diagrammes fondamentaux

L'analyse des diagrammes fondamentaux du tronçon permet de mettre en évidence les débits maximaux observés sur le tronçon dans des conditions fluides de circulation. Les valeurs de ces débits maximaux sont fortement dépendantes de la période d'agrégation des données [41]. Ces débits maximaux ne correspondent pas à la capacité théorique du secteur mais juste au débit maximal observé sur un intervalle de temps donné en un point spécifique du tronçon étudié.

4.6.1 Comparaison 2008 – 2010

Dans un premier temps, une comparaison des diagrammes fondamentaux entre 2008 et 2010 est effectuée en utilisant les données du capteur CH43 (Chapitre 2.2.4). Les points de données correspondent à une agrégation de données de 3 minutes. Cette analyse a été effectuée sur 247 jours en 2008 et 334 jours en 2010. Les jours comprenant des événements spéciaux menant à la formation d'une congestion sont pris en compte. On rappelle que les données de ce capteur ne sont pas entièrement représentatives du comportement global du système de BAU active (Chapitre 2.2.4).

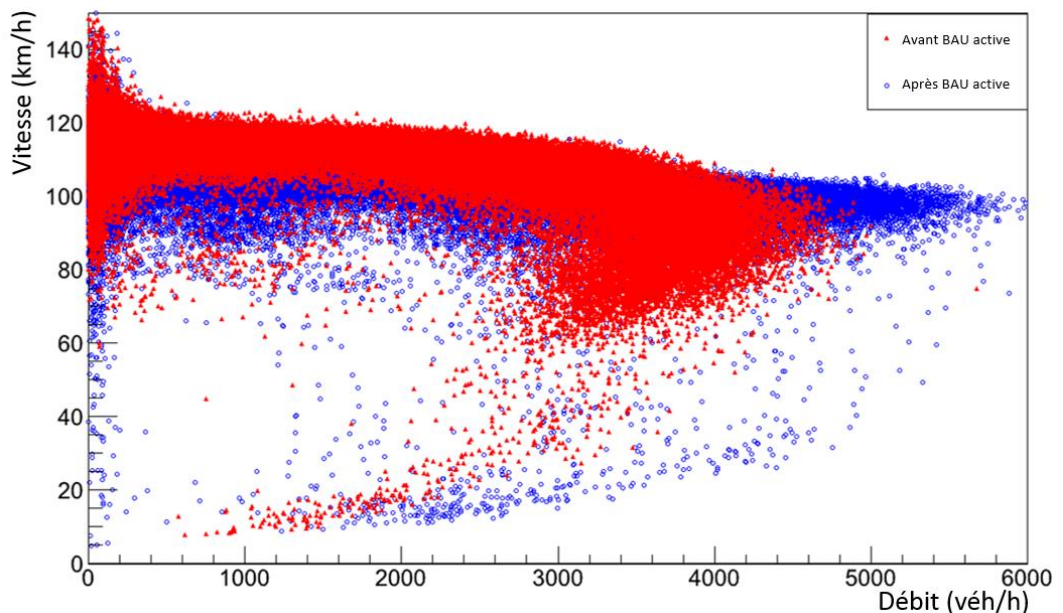


Fig. 52 Diagramme fondamental débit-vitesse, avant (rouge) et après (bleu) mise en service du système de BAU active, 2008-2010, direction Lausanne, CH43. Base : [7] [14] [16] [17].

Dans la direction Lausanne, on atteint des débits maximaux plus importants en 2010 (Fig. 52, bleu). En 2008 (Fig. 52, rouge), la moyenne des 10 points maximaux était de 4'880 véh/h. En 2010, cette moyenne s'élève à 5'805 véh/h. Ainsi, la mise en service du système de BAU active a permis une augmentation de +19% sur les valeurs maximales de débits avec un gain de 925 véh/h.

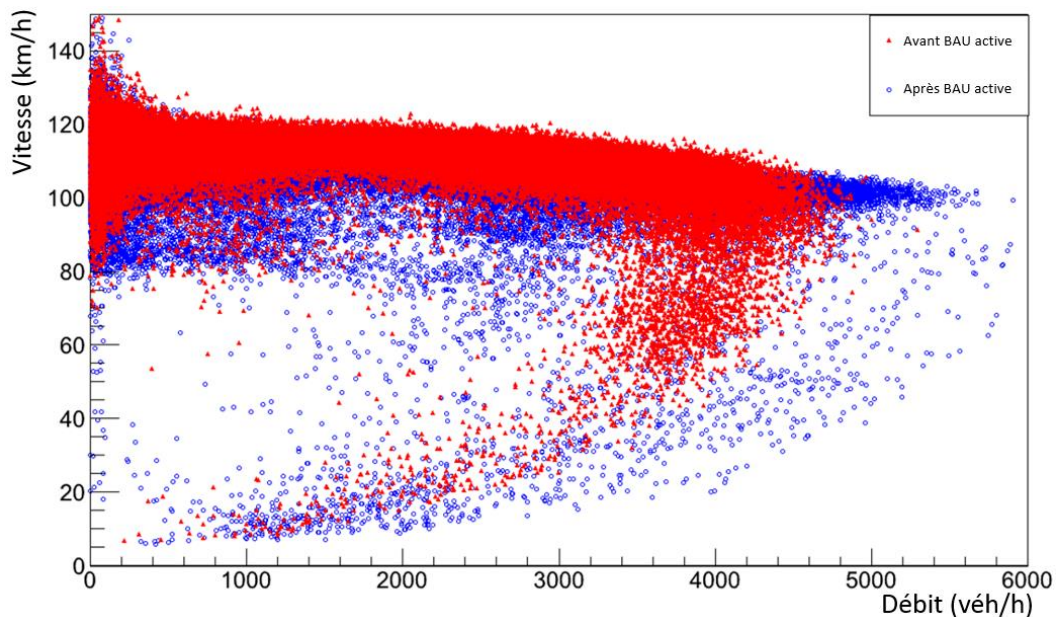


Fig. 53 Diagramme fondamental débit-vitesse, avant (rouge) et après (bleu) mise en service du système de BAU active, 2008-2010, direction Genève, CH43. Base : [7] [14] [16] [17].

Dans la direction de Genève, les observations sont similaires (Fig. 53). Les débits maximaux ont des valeurs plus élevées en 2010. Ces valeurs sont toutefois plus faibles que celles relevées dans la direction Lausanne. La moyenne des 10 points maximaux est de 4'860 véh/h en 2008 pour 5'700 véh/h en 2010. Ainsi, la mise en service de la BAU active a permis une augmentation de +17% avec un gain de 840 véh/h sur la valeur maximale des débits.

Il est à noter que les débits maximaux en 2008, pour les deux directions, sont quasiment identiques avec une valeur aux alentours de 4'870 véh/h.

La zone de points située sous une vitesse de 80 km/h correspond à des situations potentielles de congestion et de ralentissement selon [4]. Cette zone est beaucoup plus dense en 2008 qu'en 2010, pour les deux directions. La direction de Lausanne se trouvait dans une situation plus critique, avec la formation de congestions plus fréquentes, d'où une zone plus dense pour cette direction. La situation en 2010, après la mise en service du système de BAU active, est meilleure avec des congestions potentielles moins fréquentes.

4.6.2 En périodes d'ouverture de la BAU à la circulation, 2013 – 2014

Les diagrammes fondamentaux suivants ont été établis sur les heures d'ouverture de la BAU à la circulation, pour les mois de février-mars 2013 et 2014, afin de déterminer plus précisément la valeur des débits maximaux que supporte actuellement le tronçon de la BAU active.

Les données utilisées sont celles des capteurs SMETRA situés au milieu du système (Chapitre 2.2.2), zone la plus représentative du tronçon de la BAU active avec un effet le plus réduit possible de la jonction de Morges-Est et de l'échangeur d'Ecublens aux extrémités du système. Les jours de congestion sont pris en compte.

Le pas d'agrégation des données utilisé est celui recommandé dans le Highway Capacity Manual [9] pour déterminer la capacité d'un tronçon, à savoir une agrégation de 15 minutes.

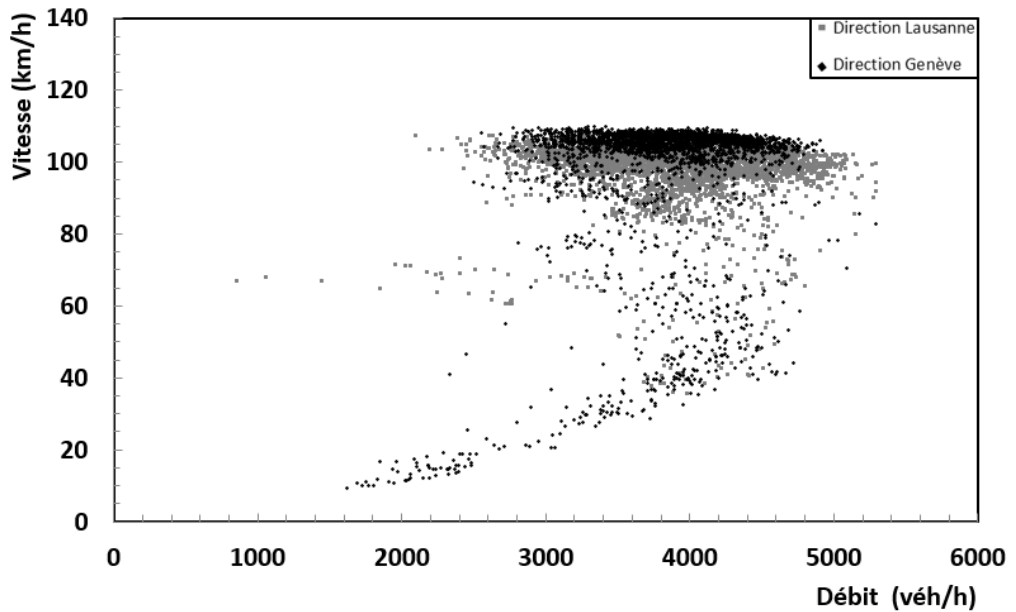


Fig. 54 Diagramme fondamental débit-vitesse, février-mars 2013, BAU ouverte à la circulation, L-62200, J-62200. Base : [7] [14] [16] [17].

En 2013 (Fig. 54), les conditions de circulation sont plus stables dans la direction de Genève que dans celle de Lausanne. En effet, avec la saturation de l'échangeur de Crissier le soir, les congestions sur ce tronçon sont plus fréquentes (Chapitre 4.3).

En tenant compte des 10 points maximaux de débit avec une vitesse supérieure à 80 km/h, la moyenne des débits maximums est de 5'200 véh/h pour une vitesse de 95 km/h dans la direction de Lausanne et de 4'950 véh/h pour une vitesse de 97 km/h dans la direction de Genève. La direction de Lausanne supporte donc une charge plus importante que la direction de Genève pour des vitesses moyennes similaires.

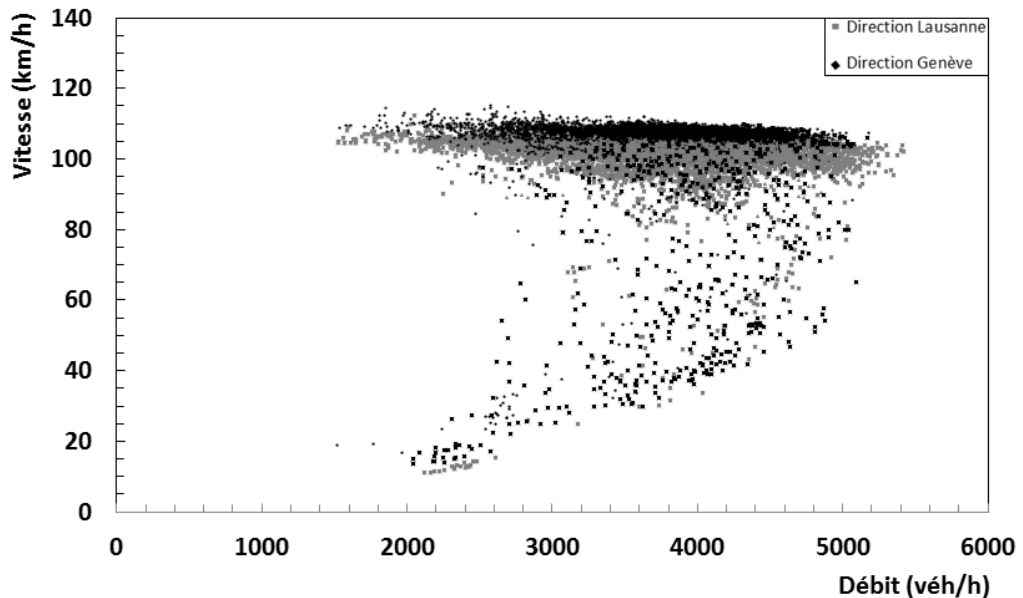


Fig. 55 Diagramme fondamental débit-vitesse, février-mars 2014, BAU ouverte à la circulation, L-62200, J-62200. Base : [7] [14] [16] [17].

En 2014, en tenant compte des 10 points maximaux, la moyenne de débit est de 5'350 véh/h pour une vitesse de 100 km/h dans la direction de Lausanne et de 5'050 véh/h pour une vitesse de 102 km/h dans la direction de Genève. Entre 2013 et 2014, la moyenne des 10 points maximums de débit a augmenté de +3% dans la direction de Lausanne et de +2% dans la direction de Genève.

Ces chiffres donnent une notion du débit maximal que peut supporter le tronçon avec le système de BAU active actuellement sous des conditions fluides de circulation (vitesses supérieures à 80 km/h). Ces valeurs ne sont cependant pas représentatives de la capacité maximale du tronçon de la BAU active ; Pour tenter d'approximer la capacité maximale du tronçon, il faut isoler les jours où une congestion s'est formée en raison d'un manque de capacité du tronçon de la BAU active et analyser pour quelle valeur de débit et de vitesse la congestion a commencé à se former.

Etant donné que le débit sur le tronçon de la BAU active est fortement lié à la limite de capacité des tronçons adjacents, aucun jour de congestion due à l'atteinte de la capacité maximale de la BAU active n'a pu être observé (Fig. 56, Fig. 57). Il n'est donc pas possible de définir le point critique avant l'apparition de la congestion sur ce tronçon.

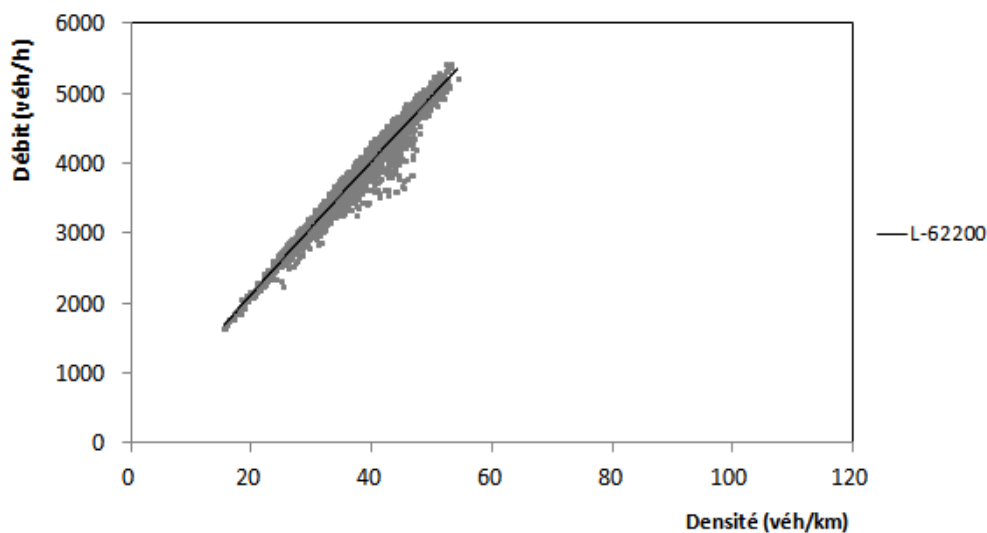


Fig. 56 Diagramme fondamental densité-débit, février-mars 2013, BAU ouverte à la circulation, sans congestion due au tronçon aval, direction Lausanne, L-62200.

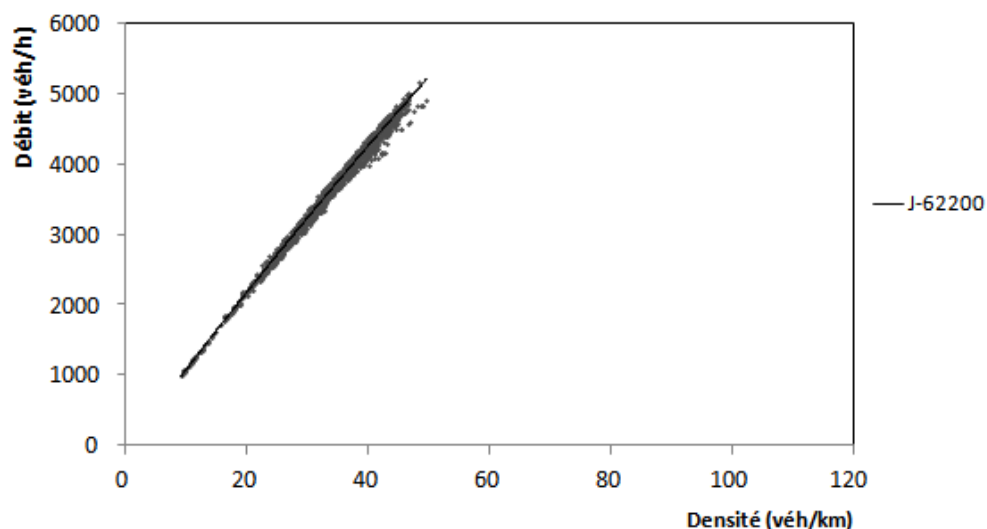


Fig. 57 Diagramme fondamental densité-débit, février-mars 2013, BAU ouverte à la circulation, sans congestion due au tronçon aval, direction Genève, J-62200.

Les densités, relativement les débits atteints étant plus élevés dans la direction Lausanne, on peut émettre l'hypothèse que dans un système sans influence extérieure (entrées, sorties d'autoroute, congestions dues à un échangeur ou à une capacité plus faible d'un tronçon adjacent), c'est cette direction qui atteindrait de prime à bord la capacité maximale du système.

La capacité maximale estimée à 5'000 véh/h (Chapitre 4.1) est dépassée, notamment dans la direction de Lausanne (Fig. 56, moyenne des 10 points maximaux : 5'340 véh/h).

4.6.3 Système opérationnel / non opérationnel

Une comparaison similaire peut être menée sur l'évolution du débit et de la densité en considérant les jours opérationnels avec ceux où le système était hors service suite à un accident (Chapitre 4.5.3).

On retient les capteurs L-62200 et J-62200 situés au centre de la zone d'étude pour cette comparaison. Les jours opérationnels sont considérés du 22 au 26 novembre 2000 et les jours non opérationnels du 12 au 17 décembre 2000.

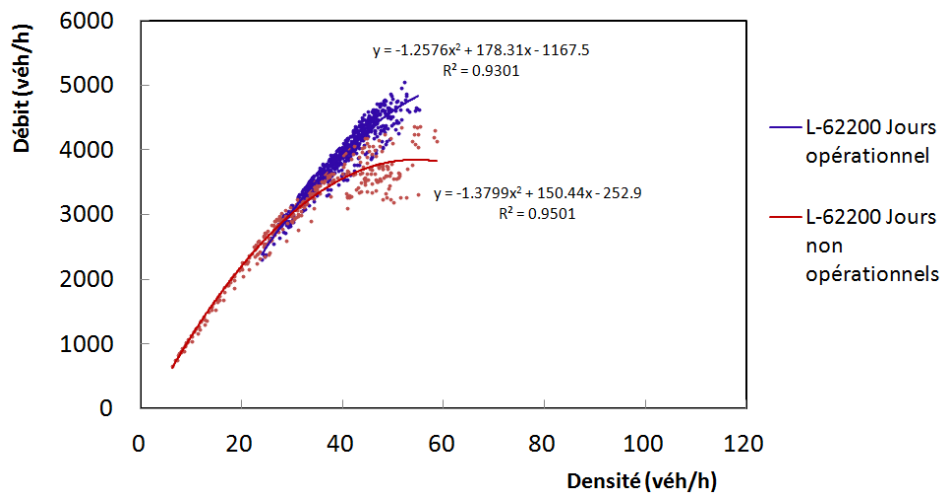


Fig. 58 Diagramme fondamental densité-débit, système opérationnel / non opérationnel, direction Lausanne, L-62200. Base : [7].

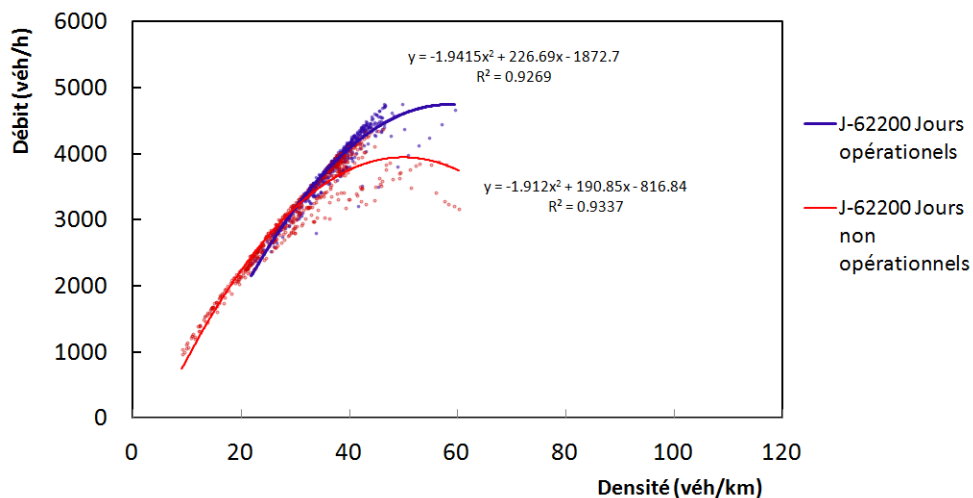


Fig. 59 Diagramme fondamental densité-débit, système opérationnel / non opérationnel, direction Genève, J-62200. Base : [7].

On constate un gain d'environ 1'000 véh/h si le système est opérationnel avec un débit maximum proche de 5'000 véh/h. Dans le cas du système non opérationnel, on remarque plus de points de mesures situés hors de la droite de tendance du régime fluide indiquant un régime congestionné. Les constatations sont sensiblement les mêmes dans les deux sens de circulation (Fig. 58, Fig. 59).

4.6.4 Synthèse

L'analyse des diagrammes fondamentaux entre 2008 et 2010 a permis de mettre en évidence le gain en termes de débits maximaux (moyenne des 10 points maximaux) de l'ouverture de la BAU à la circulation. Ainsi, entre 2008 et 2010, le débit maximal a augmenté de 925 véh/h pour la direction de Lausanne et de 840 véh/h pour la direction de Genève².

En 2014, avec une agrégation de 15 minutes, les débits maximaux sont d'environ 5'350 véh/h pour la direction de Lausanne et de 5'050 véh/h pour la direction de Genève. Ces débits ont été mesurés sans congestion sur le tronçon. Cela laisse à penser que la capacité du tronçon est supérieure à ces valeurs. Pour la mesurer plus exactement, il aurait fallu trouver les points critiques (débit-vitesse) lors de la formation d'une congestion due à la saturation du tronçon même de la BAU active. Aucun jour représentatif n'a été identifié pour effectuer cette analyse en raison de l'interaction de ce secteur avec les tronçons adjacents.

4.7 Synthèse de l'analyse d'efficacité du système BAU active

Avant la mise en place du système de BAU active, les conditions de circulation était souvent difficiles en raison d'un manque de capacité du tronçon.

L'ouverture de la BAU à la circulation n'a pas eu pour effet une attractivité globale plus importante de l'autoroute ; En termes de TJMO, l'impact de la mise en service du système a un impact réduit puisque le TJMO conserve son évolution observée avant 2008. En périodes de pointe, le système a néanmoins permis de faire passer un débit plus important dans de meilleures conditions de trafic.

Les vitesses sur le tronçon de la BAU active sont plus stables et plus élevées que celles relevées avant 2010. Les augmentations de débit et de vitesse ont pour conséquence une augmentation de la densité sur le tronçon.

Avec l'analyse des diagrammes fondamentaux, il a été mis en évidence que le tronçon pouvait supporter sans congestion un débit maximal de 5'350 véh/h dans la direction de Lausanne et de 5'050 véh/h dans la direction de Genève. La capacité du tronçon de la BAU active semble donc supérieure à ces valeurs, la phase de congestion n'ayant pas pu être établie uniquement par manque de capacité du tronçon même de la BAU active.

La comparaison du cas où le système de BAU active est opérationnel avec celui où le système est non opérationnel sur des conditions de circulation similaires a montré qu'avec l'ouverture de la BAU à la circulation, les débits de pointe et les vitesses sont plus élevés sur une période de pointe réduite. Le tronçon de la BAU active absorbe donc plus rapidement la forte demande dans de meilleures conditions de circulation.

Les principales congestions qui sont observées sur le tronçon sont le résultat d'une saturation au niveau des tronçons adjacents.

Le système de BAU active a donc des résultats positifs en termes d'efficacité.

² Agrégation de données sur 3 minutes.

5 Comportement des usagers [7] [13]

Le comportement des usagers est un paramètre qui influence directement l'efficacité d'un système de transport. Sur une infrastructure routière, il a un impact sur des paramètres comme la sécurité, la capacité utilisée, la répartition du trafic sur les voies ou encore les émissions polluantes. Le système de BAU active présente des particularités uniques pour ses usagers, dans le cas où la BAU est ouverte à la circulation :

- Franchissement d'une ligne blanche continue.
- Changements de limitation de vitesse en fonction de l'état du système (Chapitre 2.1).
- Autoroute sans bande d'arrêt d'urgence (niches de secours).
- Proximité de la glissière (obstacle latéral).
- Bretelle de sortie d'autoroute, respectivement bretelle d'entrée, continues à la bande d'arrêt d'urgence circulaire.
- Dimensions de voies réduites.

Le tronçon de la BAU active entre Morges et Ecublens est le premier projet de conversion temporaire de bande d'arrêt d'urgence à voir le jour en Suisse. Les usagers ont dû découvrir et s'habituer aux particularités de ce système. Ce chapitre contient les différents sondages et études qui ont permis de mieux cerner leur comportement sur ce tronçon.

5.1 Perception des usagers

Afin de connaître l'avis des usagers sur le système, un sondage a été mené auprès d'eux en février 2013, soit 3 ans après la mise en service du système de BAU active. Le sondage, sous forme de questionnaire, a eu lieu le jeudi 14.02.2013 de 16h à 20h ainsi que le samedi 16.02.2013 de 10h à 14h. Au total, 584 réponses ont été récoltées. Ces plages horaires ont été sélectionnées afin que le système y soit actif durant la plus grande partie du temps, dans le but de maximiser la taille de l'échantillon d'utilisateurs de la BAU active.

Ce sondage a été réalisé sur l'aire d'autoroute du relais de la Côte à Bursins ainsi qu'à IKEA dans la zone industrielle d'Aubonne. Ces deux lieux avaient été sélectionnés afin d'interroger deux catégories d'usagers différentes. Le but était d'obtenir un échantillon d'habitues à emprunter ce tronçon à IKEA, tandis que les usagers interrogés à l'aire d'autoroute (située à 40 km de la zone de la BAU active) devaient représenter un échantillon d'usagers qui n'ont pas forcément l'habitude d'emprunter le tronçon de la BAU active.

Au vu des réponses récoltées, les deux sites ne représentent pas les sous-ensembles souhaités. En effet, les usagers empruntant le tronçon de la BAU active tous les jours ou quelques fois par semaine, soit les usagers fréquents du système, représentent 36% de l'échantillon total à la Côte et 33% à IKEA. Puisque les distinctions attendues sur l'échantillon entre les deux sites n'ont pas pu être relevées, l'ensemble des données a été traité comme un seul et unique groupe.

Catégories de l'échantillon

66% des personnes interrogées sont de sexe masculin contre 34% de sexe féminin.

La répartition des âges des sondés est la suivante :

- 18 – 30 ans : 17%
- 31 – 45 ans : 50%
- 46 – 60 ans : 25%
- > 60 ans : 8%

Utilisation de la BAU ouverte à la circulation

Roulez-vous sur la bande d'arrêt d'urgence lorsqu'elle est ouverte à la circulation ? Sur toute la longueur ou partiellement ?

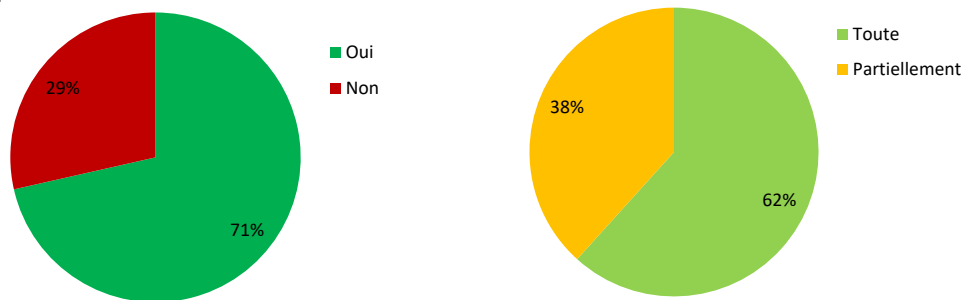


Fig. 60 Utilisation du système de BAU active.

Les usagers de toutes catégories ont globalement une attitude positive envers le système avec 71% des usagers qui déclarent utiliser la BAU lorsque cette dernière est ouverte à la circulation (Fig. 60). Parmi ces usagers, 62% roulent sur la BAU sur la totalité du tronçon.

En ce qui concerne les 38% qui ne roulent que partiellement sur la BAU, la principale raison à ce comportement est qu'ils agiraient en fonction de leur destination (54%). La destination d'un usager est donc un paramètre influent dans l'utilisation de la BAU. Les autres raisons abordées pour justifier une utilisation uniquement partielle de la BAU sont une sensation de ne pas être à l'aise sur cette voie (36%) ou à cause de la vitesse sur celle-ci (10%) qui est, en moyenne, inférieure à la vitesse des autres voies.

Configuration particulière de la BAU

Comme décrit en introduction au chapitre 4, la circulation sur la BAU présente des particularités qui peuvent diminuer le sentiment de sécurité de l'utilisateur ou représenter une gêne telle que le franchissement d'une ligne blanche continue, la largeur de voie réduite, la faible distance aux glissières de sécurité ou l'absence de bande d'arrêt d'urgence.

Le franchissement de la ligne blanche continue vous gêne-t-il ?

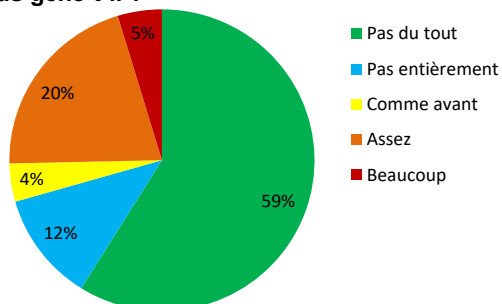


Fig. 61 Gêne due au franchissement d'une ligne blanche continue.

On constate (Fig. 61) que 25% des usagers ressentent effectivement une gêne due à la configuration particulière de la signalisation routière horizontale.

Sécurité

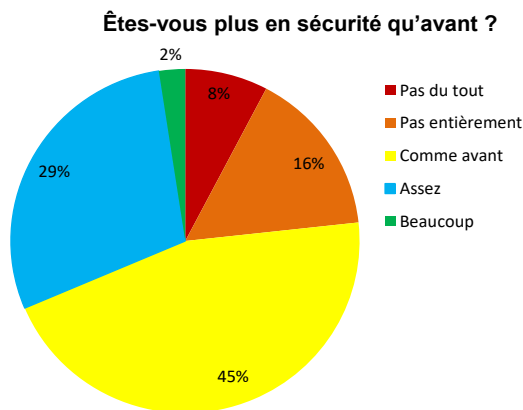


Fig. 62 Sentiment de sécurité.

En termes de sécurité, 31% des usagers se sentent plus en sécurité qu'avant, tandis que 45% des usagers ne perçoivent pas de changement (Fig. 62).

Fluidité du trafic

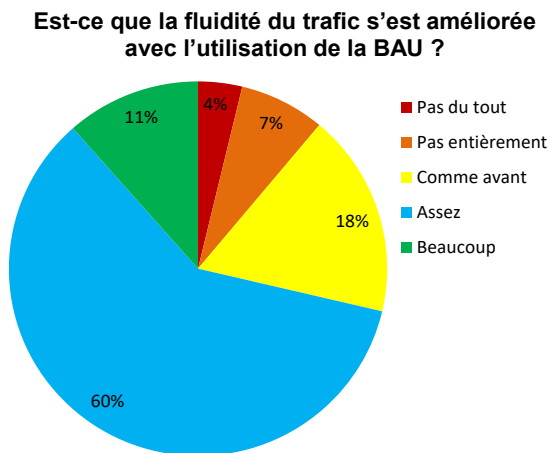


Fig. 63 Fluidité du trafic.

En ce qui concerne la fluidité du trafic, 71% affirment que les conditions de trafic se sont améliorées grâce à l'utilisation de la BAU comme 3^{ème} voie aux périodes de pointe (Fig. 63).

Satisfaction des usagers face au système de BAU active

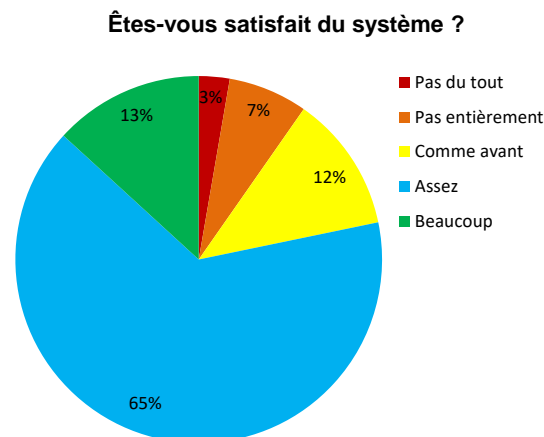


Fig. 64 Satisfaction globale des usagers.

De manière générale, une majorité des utilisateurs (78%) est satisfaite du système (Fig. 64).

Comportement des usagers fréquents

Les usagers fréquents (38%), catégorie utilisant tous les jours ou quelques fois par semaine le tronçon de la BAU active, sont analysés séparément, pour révéler des modèles de comportement potentiels, qui pourront servir comme base à l'optimisation du système.

Cette évaluation révèle deux éléments différenciateurs, qui se situent au niveau de la satisfaction et du dérangement des usagers.

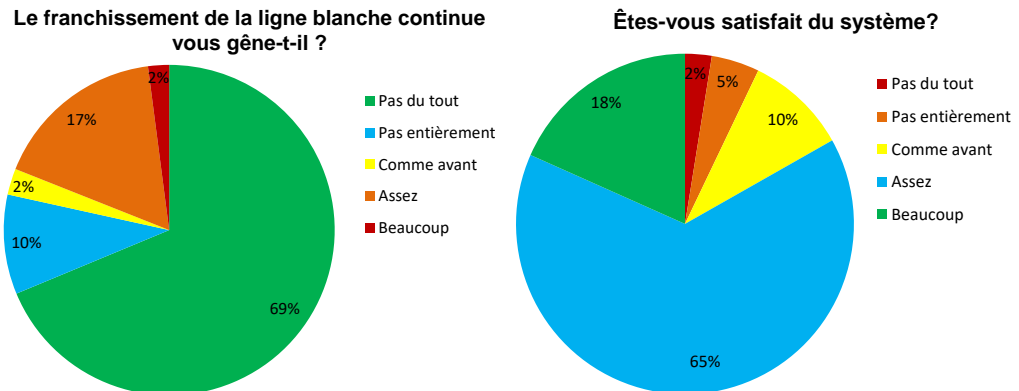


Fig. 65 Dérangement et satisfaction des usagers fréquents.

5% de plus de ces usagers que l'ensemble des répondants, apprécient fortement ce système. En termes de dérangement, 69% déclarent être en aucun cas gênés par la ligne blanche continue soit 10% de plus que les usagers de toutes catégories confondues (Fig. 65).

5.1.1 Modélisation et évaluation de l'adaptation des utilisateurs au système

L'adaptation des utilisateurs au système est analysée sur la base des informations fournies par les répondants. Dans [7], des modèles probit ordonnés ont été développés afin de mettre en relation la satisfaction des usagers (variable latente) en fonction d'une combinaison linéaire de variables explicatives (âge des usagers, perception de la sécurité, perception des conditions de trafic, désagrément lié au franchissement de la ligne blanche continue, fréquence d'utilisation du système et circulation sur la BAU lorsque celle-ci est ouverte).

Les résultats obtenus sont les suivants :

- Le niveau de confiance dans les modèles est élevé (99%).
- Le sexe du sondé (féminin, masculin) n'a pas d'influence sur les relations entre le niveau de satisfaction et les variables explicatives. Le même modèle peut être utilisé, et donc les résultats sont valables pour ces deux catégories d'usagers.
- Les conducteurs de moins de 30 ans sont plus satisfaits par le système, moins hésitants à franchir la ligne blanche continue et ne ressentent pas d'insécurité liée au système.
- La satisfaction des usagers augmente avec l'augmentation de leur fréquence d'utilisation du système.
- La satisfaction des usagers augmente avec la diminution de leur gêne à franchir la ligne blanche continue.
- La perception d'une amélioration du niveau de service (conditions de circulation) induit une augmentation du niveau de satisfaction.

- La perception d'une amélioration de la sécurité révèle une augmentation du niveau de satisfaction.
- L'âge et la fréquence d'utilisation du système sont les deux paramètres les plus importants qui influencent la satisfaction des usagers par rapport au système.

Un tableau croisé relatif à l'utilisation du système par rapport à la fréquence d'utilisation et à l'âge de l'utilisateur est réalisé ([7], Fig. 66). Par catégorie d'âge, le nombre d'utilisateurs empruntant la BAU lorsqu'elle est ouverte à la circulation pour chaque catégorie de fréquence d'utilisation est rapporté au nombre de sondés de sa catégorie d'âge puis normalisé sur l'ensemble du panel.

Fréquence d'utilisation	Age			
	18 - 30	31 - 45	46 - 60	> 60
Première fois	0.41%	0.13%	0.50%	0.95%
Annuelle	4.95%	7.35%	7.28%	8.57%
Mensuelle	8.25%	7.48%	7.28%	11.43%
Hebdomadaire	6.19%	6.17%	4.52%	3.81%
Journalière	7.43%	3.28%	4.02%	0.00%

Utilisation du système selon fréquence et âge

- faible
- moyenne
- forte

Fig. 66 Utilisation du système en l'âge de l'utilisateur et de sa fréquence d'utilisation. Base : [7].

Avant de procéder aux conclusions issues de ce tableau croisé, il est important de relever que certaines catégories présentent peu de sondés et peuvent amener à des résultats très faibles (ex : plus de 60 ans empruntant tous les jours la BAU : 1 sondé qui ne circule pas sur la BAU lorsqu'elle est ouverte à la circulation, ce qui implique 0 utilisateur de la BAU).

On remarque que les usagers fréquents (utilisation de quelques fois par semaine à tous les jours) ainsi que globalement la catégorie d'âge 46 – 60 ans ont tendance à moins utiliser la BAU lorsque celle-ci est ouverte à la circulation. Une campagne d'information ciblée sur ces catégories afin de leur démontrer les bénéfices d'un tel système d'infrastructure pour les usagers pourrait être efficace.

D'autre part, on constate que les usagers empruntant pour la première fois ce tronçon sont peu nombreux à oser circuler sur la BAU alors que celle-ci est ouverte à la circulation. Un panneau à message variable pourrait être placé en amont du système afin d'informer les usagers sur la possibilité de circuler sur la 3^{ème} voie (Chapitre 5.4).

5.2 Répartition du débit sur les voies

L'analyse de la répartition du débit sur les voies permet de mieux appréhender la manière dont les usagers utilisent l'infrastructure. Cette analyse est d'autant plus pertinente dans le cas de la zone de la BAU active qui, de par ses singularités, peut présenter des particularités dans cette répartition du débit sur les voies par rapport à un tronçon classique d'autoroute à trois voies.

5.2.1 Répartition sur les voies en fonction du débit total sur le tronçon

La distribution des véhicules sur les voies d'un tronçon est fonction du débit total circulant. La part de véhicules par voie sera abrégée LFDR dans les graphiques qui suivent (Lane Flow Distribution Ratio).

Autoroute classique à 2 voies de circulation

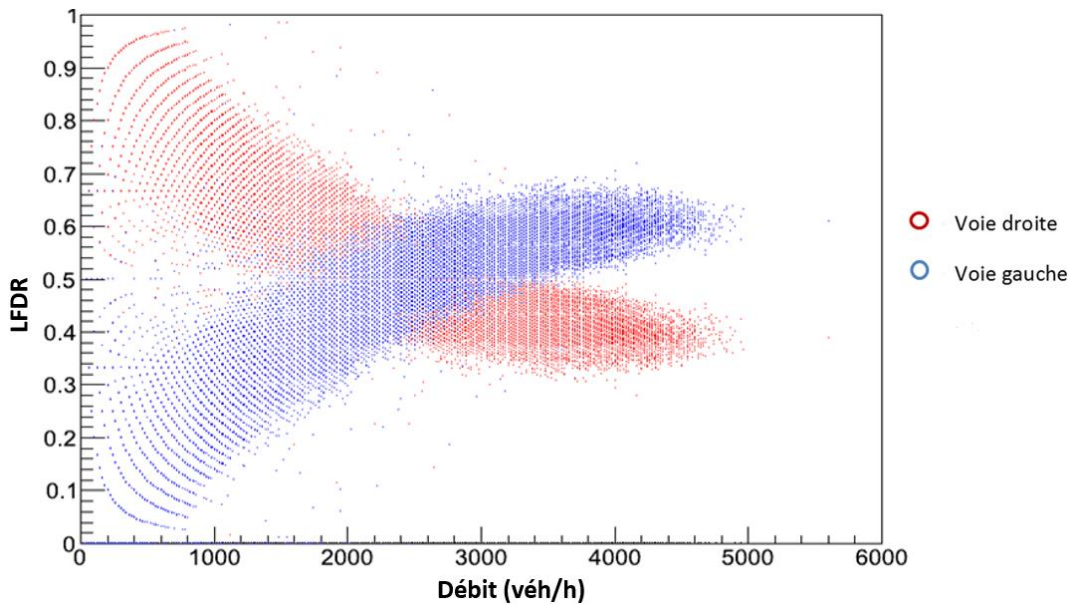


Fig. 67 Répartition des véhicules par voie. Autoroute à 2 voies, vitesse limite légale 120 km/h, 2008, direction Genève, CH43. Base : [7] [19].

Aux alentours d'un débit total de 2'200 véh/h, on constate une inversion dans la répartition voie de gauche – voie de droite (Fig. 67). Dans le cas des véhicules poids lourds, aucune tendance d'évolution de la répartition entre les voies en fonction du débit total n'est constatée. Au niveau du capteur CH43, dans la direction de Genève, en juin 2008, on constate :

- 91% des véhicules poids lourds circulent sur la voie de droite.
- 9% des véhicules poids lourds circulent sur la voie de gauche.

Autoroute classique à 3 voies de circulation

Les appellations des voies dans un tronçon d'autoroute classique à 3 voies sont normalement voie de gauche, voie centrale et voie de droite. Dans le cas présent, afin de rester cohérent avec la dénomination du tronçon de la BAU active, la voie de droite sera nommée 3^{ème} voie, la voie centrale sera nommée voie de droite et la voie de gauche conservera sa dénomination.

Afin de déterminer la répartition sur une autoroute à 3 voies de circulation, on utilise les données du capteur CSACR 543 « Lausanne Blécherette », en direction de Vevey. Ce capteur est situé environ 800 mètres après la sortie de l'échangeur de Villars-Sainte-Croix et n'est pas influencé par la sortie de la Blécherette.

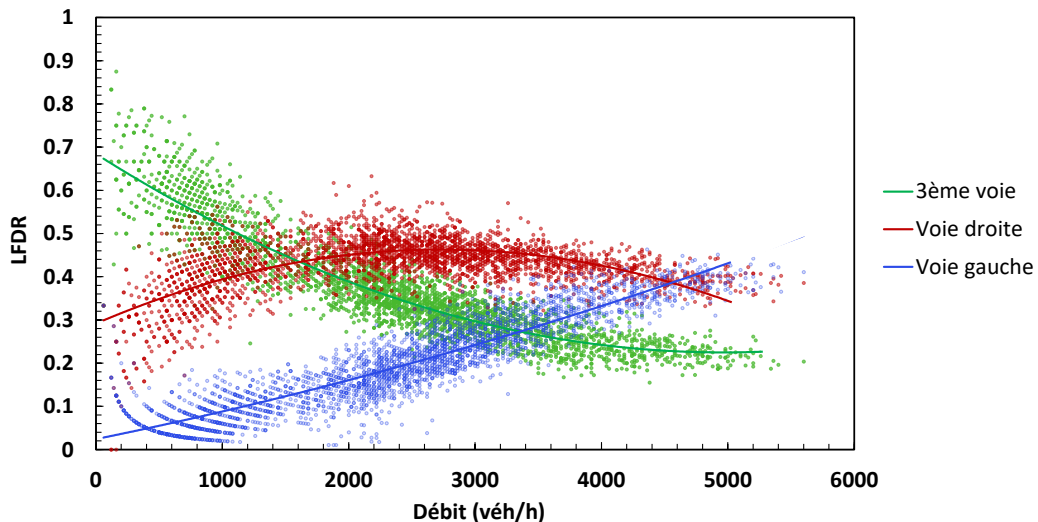


Fig. 68 Répartition des véhicules par voie. Autoroute à 3 voies, vitesse limite légale 120 km/h, 2013, direction Vevey, CH534. Base : [7] [19].

Jusqu'à un débit de 1'700 véh/h, la 3^{ème} voie est la plus utilisée (Fig. 68). A ce stade, alors que le débit sur la voie de gauche est en constante augmentation, une inversion de l'utilisation des voies de droite et de la 3^{ème} voie apparaît. La voie de droite est alors la plus utilisée.

Pour un débit total de 3'500 véh/h, le débit sur la voie de gauche croise celui de la 3^{ème} voie. Finalement, pour des valeurs de débit supérieures à 4'500 véh/h, la 3^{ème} voie n'est utilisée que par 22% du débit total. Une inversion a également lieu à ce stade entre la fréquentation de la voie de gauche et de la voie de droite.

Sur un tronçon d'autoroute classique à 3 voies, la répartition des véhicules sur les voies (3^{ème} voie / voie de droite / voie de gauche) de nuit est de 60%/35%/5% contre une répartition en HP de 22%/35%/43%.

Tronçon de la BAU active

La distribution du trafic sur les voies du tronçon de la BAU active peut être envisagée comme une combinaison des deux cas précédents. La BAU n'est ouverte à la circulation que pendant les périodes de pointe de la journée soit lorsque le débit total sur le tronçon est le plus important. Tant que la BAU n'est pas ouverte à la circulation, le tronçon de la BAU active s'apparente ainsi à un tronçon classique d'autoroute à 2 voies.

De manière générale, la BAU est active pour des valeurs de débits supérieures à 2'000 véh/h. Ainsi, juste avant que la BAU ne soit ouverte à la circulation, le nombre de véhicules circulant sur la voie de gauche commence à dépasser le nombre de véhicules circulant sur la voie de droite (comportement classique 2 voies de circulation, Fig. 67).

Cette remarque peut être pertinente dans des propositions d'amélioration de l'algorithme de consigne d'ouverture actuel. En effet, il serait ainsi possible d'envisager une condition dans la consigne d'ouverture qui intègre une comparaison de la répartition du débit entre ces deux voies. Toutefois, on a également remarqué que le débit peut être supérieur à 2'000 véh/h entre les deux périodes de pointe (Fig. 9).

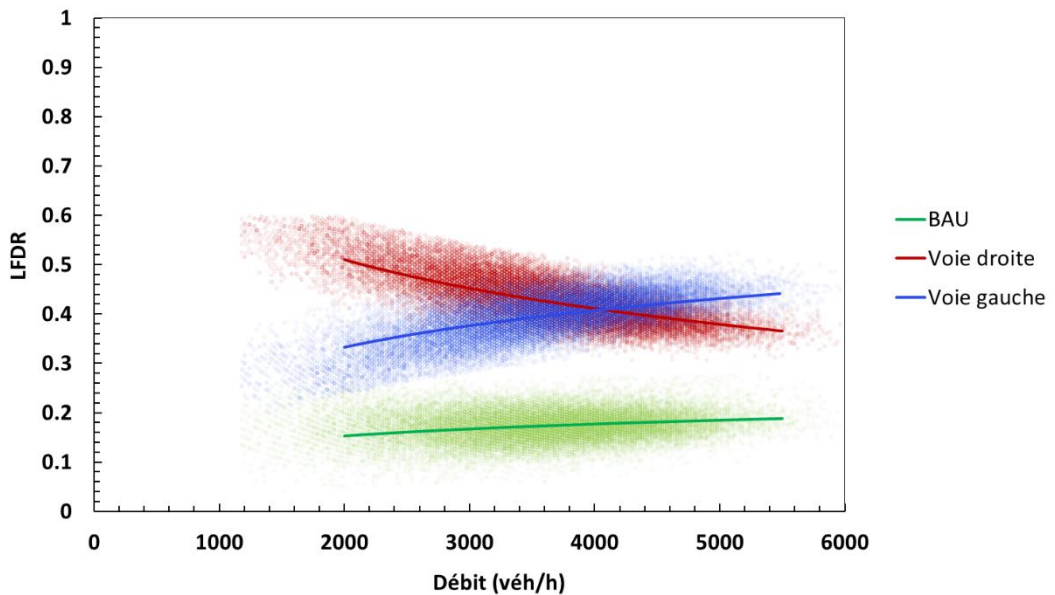


Fig. 69 Répartition des véhicules par voie. Tronçon de la BAU active, vitesse limite légale 100 km/h, 2011-2013-2014, J-62200 et L-62200. Base : [7] [19].

Les données correspondant à un débit total inférieur à 1'200 véh/h ne sont pas conservées car elles ne sont pas représentatives du tronçon avec la BAU ouverte à la circulation.

Lorsque le système est actif et que le débit total du tronçon est inférieur à 4'000 véh/h, la voie de droite supporte le plus de véhicules. A ce stade, la voie de gauche devient alors la voie la plus empruntée (Fig. 69).

Contrairement à un tronçon classique d'autoroute à 3 voies (Fig. 68), le trafic circulant sur la BAU ne dépasse que rarement 20% du trafic total. Cela peut être dû à la gêne liée au franchissement de la ligne blanche continue ou encore à une vitesse de circulation plus réduite que sur les autres voies. En effet, les résultats du sondage sur la perception des usagers du système de BAU active (Chapitre 5.1), avaient permis de mettre en évidence que certains usagers peuvent se montrer réticents à emprunter cette voie pour ces deux raisons.

En ce qui concerne la consigne de fermeture de l'algorithme du système de BAU active, l'évolution de la répartition des véhicules sur les voies selon le débit total pourrait également être une piste d'amélioration de la consigne actuelle. La voie déterminante dans ce cas pourrait être la voie de droite avec une augmentation du LFDR sur cette voie à mesure que le débit sur le tronçon diminue.

5.2.2 Répartition sur les voies selon la position dans le système de BAU active

Pour un même instant t , la distribution du débit sur les voies varie selon la position sur le tronçon. Ainsi, la distribution des véhicules sur les voies peut être différente entre le début du système et la fin du système ainsi qu'entre les deux directions.

Des différences constatées entre les deux périodes de pointe peuvent être dues au fait que ce ne sont pas les mêmes usagers qui empruntent le tronçon de la BAU active dans un sens donné entre le matin et le soir. Ces usagers peuvent avoir des destinations différentes et donc une répartition sur les voies différente. La présence de l'échangeur d'Ecublens et de la demi-jonction de Morges-Est aux extrémités du système ont également un impact direct sur la répartition du débit sur les voies et l'utilisation de la BAU.

2011

La répartition du trafic en heure de pointe en 2011 dans le système de BAU active a été déterminée en utilisant les données des capteurs SMETRA pour la semaine du 14 mars 2011 (Fig. 70, Fig. 71). Les périodes de congestion ont été exclues.

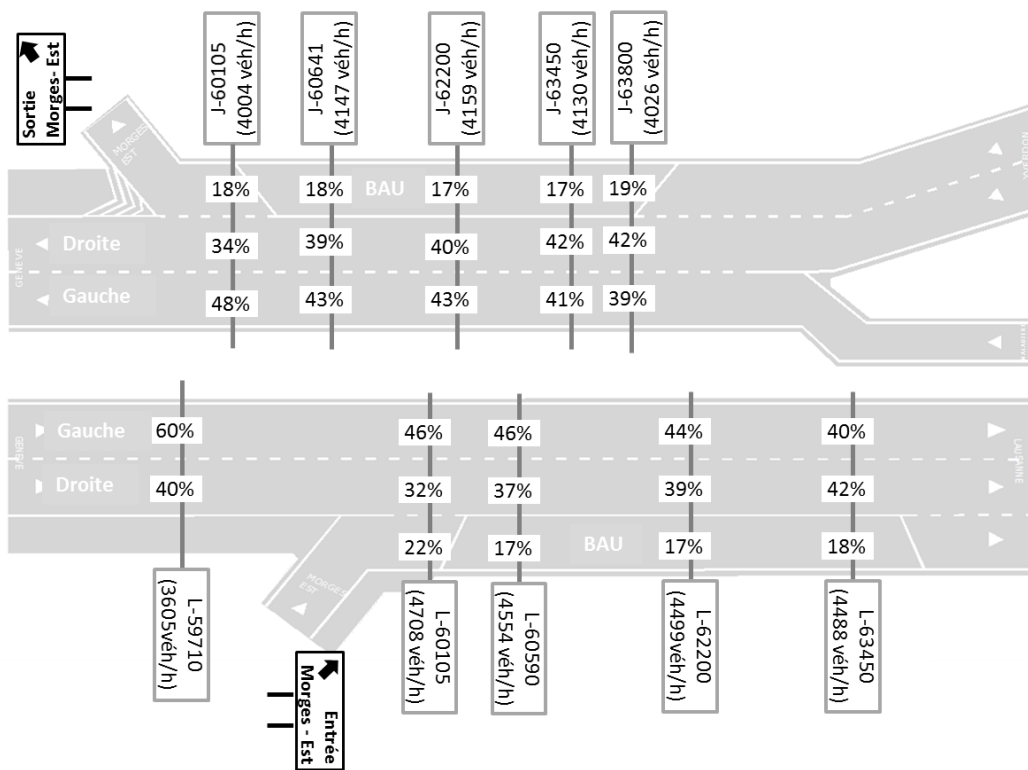


Fig. 70 Répartition des véhicules par voie. Tronçon de la BAU active, vitesse limite légale 100 km/h, 14-18.03.2011, HPM, capteurs SMETRA.

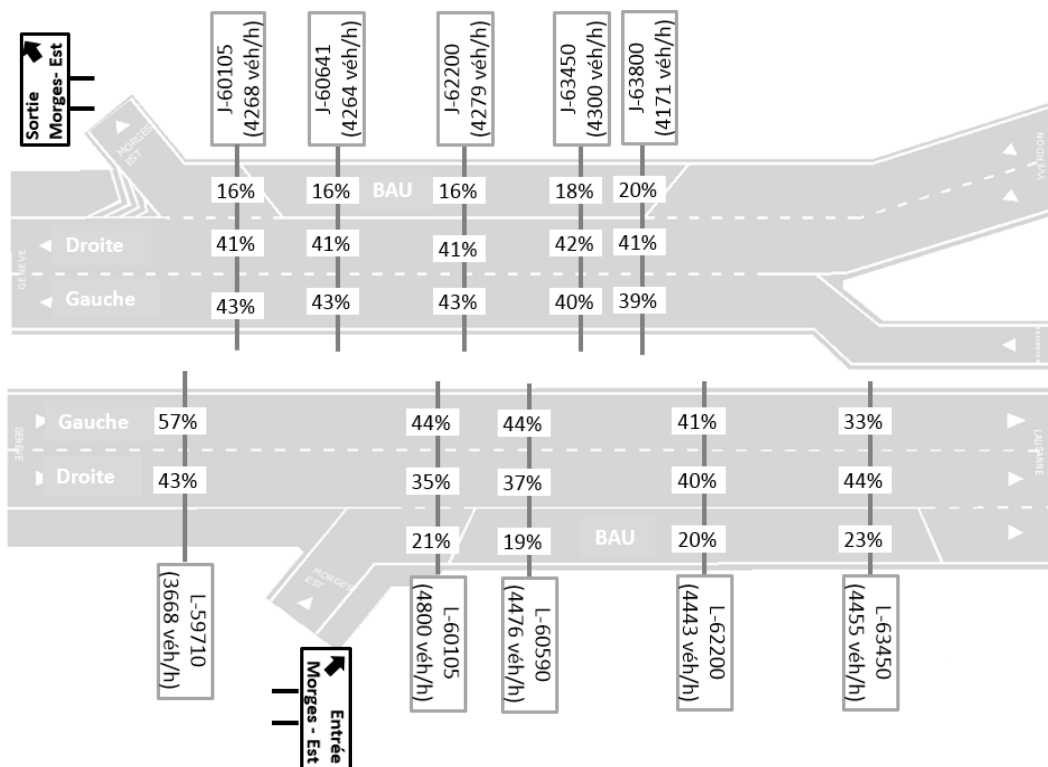


Fig. 71 Répartition des véhicules par voie. Tronçon de la BAU active, vitesse limite légale 100 km/h, 14-18.03.2011, HPS, capteurs SMETRA.

Direction Lausanne

Dans la direction de Lausanne, l'entrée dans le système se situe au niveau de l'entrée de la demi-jonction de Morges-Est. La BAU est dans la continuité de la rampe d'insertion de la jonction. Les véhicules provenant de Morges-Ouest et qui désirent emprunter la BAU doivent donc changer de voie. L'utilisation de la BAU au début du tronçon est plus faible que la part de trafic qui entre à Morges-Est. Cela implique qu'un certain nombre de véhicules qui entrent à Morges-Est changent directement de voie sans emprunter la BAU (Fig. 70, Fig. 71).

Le LFDR augmente cependant tout au long du système avec un LFDR de 17% en HPM et de 20% en HPS au milieu du tronçon (L-62200).

La fin du système se situe au niveau de l'échangeur d'Ecublens. A cet endroit, la 3^{ème} voie indique la direction de Vevey, la voie de gauche la direction de Lausanne-Sud tandis que la voie de droite (centrale) offre les deux possibilités. Les premiers panneaux directionnels liés à l'échangeur d'Ecublens sont situés avant la fin du tronçon de la BAU active. Les véhicules se présélectionnent donc déjà en fonction de leur destination. A la fin du système de BAU active, la voie correspondant à la BAU a un LFDR qui augmente encore à 18% en HPM et 23% en HPS et le LFDR de la voie de droite suit également une augmentation à 42% en HPM et 44% en HPS.

Direction Genève

Dans la direction de Genève, le début du système se situe juste après l'échangeur d'Ecublens dans la continuité des 3 voies de ce dernier. Les voies de droite proviennent de Vevey et la voie de gauche de Lausanne-Sud. Le LFDR sur la BAU en entrée de système est mesurée à 19% en HPM et 20% en HPS, soit sa valeur la plus élevée du tronçon.

Le LFDR de la voie de droite à l'entrée du système est plus important que celui de la voie de gauche car les véhicules arrivant de Vevey n'ont pas encore changé de voie. Tout au long du système, un certain nombre de véhicules vont passer sur la voie de gauche, voie la plus utilisée à débit élevé (Fig. 69).

Au niveau de la sortie du système, à la demi-jonction de Morges-Est, la rampe de sortie est dans la continuité de la BAU et les panneaux directionnels liés à cette sortie sont situés environ 500 m avant celle-ci. Les véhicules sont déjà présélectionnés sur les voies avec un LFDR sur la BAU à la fin du système qui correspond quasiment à la part de trafic sortant à Morges-Est.

2014

À des fins de comparaison, la même analyse a été effectuée sur la semaine du 17 mars 2014 (Fig. 72, Fig. 73)

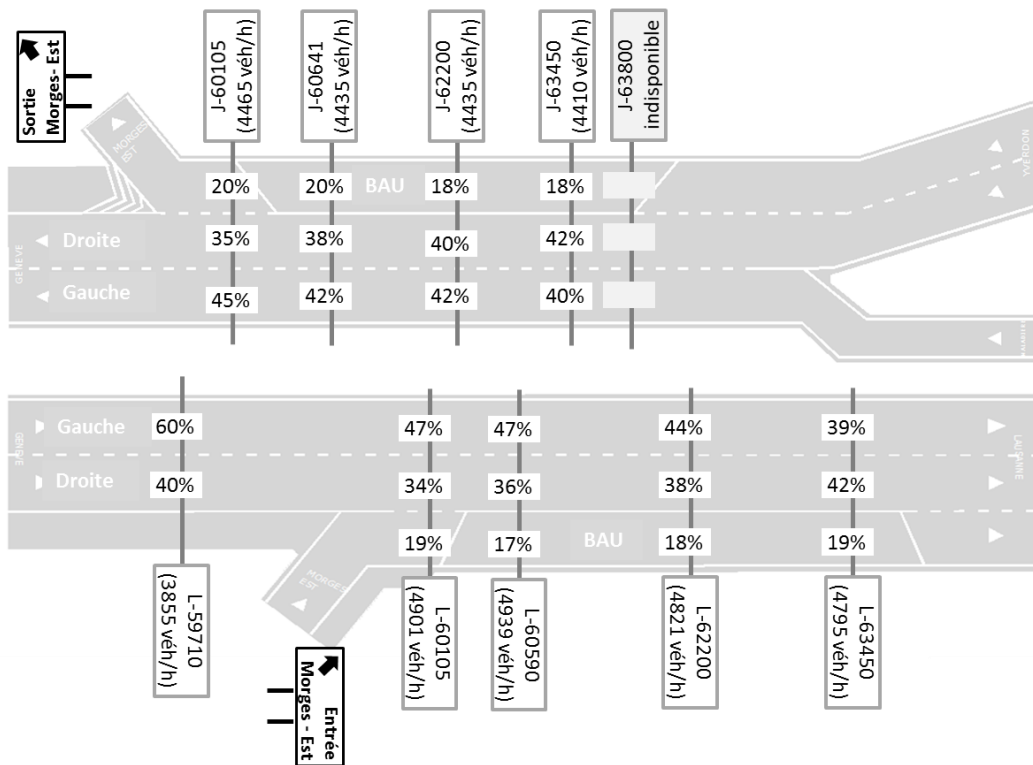


Fig. 72 Répartition des véhicules par voie. Tronçon de la BAU active, vitesse limite légale 100 km/h, 17-21.03.2014, HPM, capteurs SMETRA.

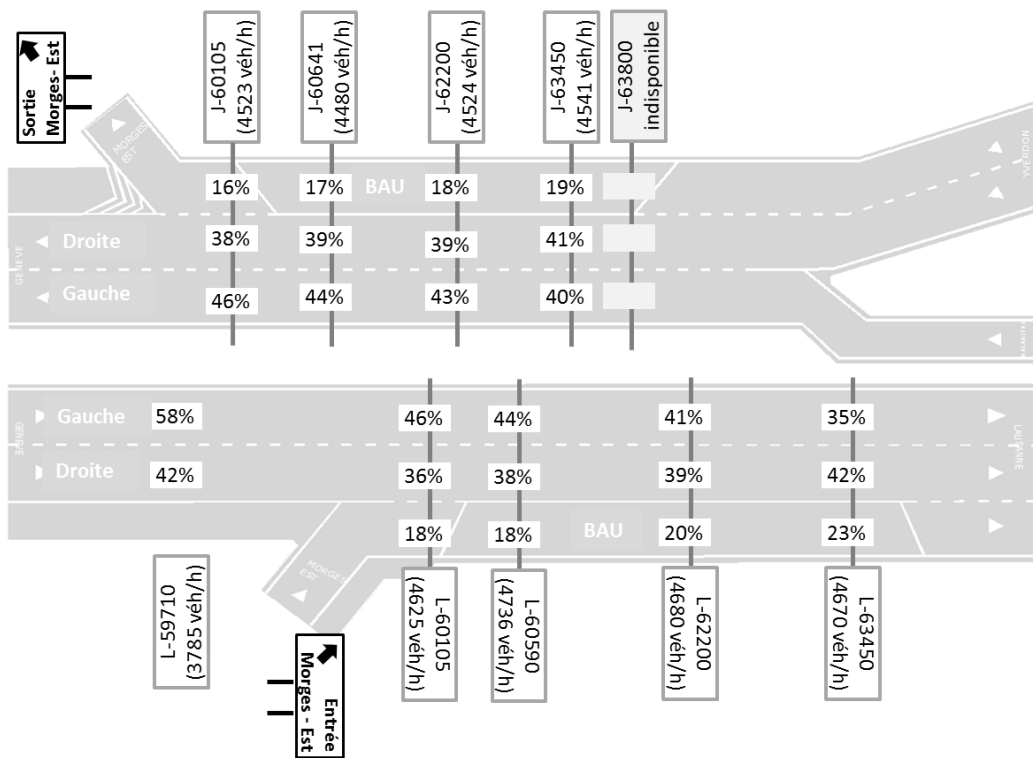


Fig. 73 Répartition des véhicules par voie. Tronçon de la BAU active, vitesse limite légale 100 km/h, 17-21.03.2014, HPS, capteurs SMETRA.

Direction Genève

En comparaison à l'année 2011, sur la chaussée JURA, la BAU est globalement plus empruntée sur toute sa longueur. Cela est probablement dû au fait que le débit sortant à Morges-Est a également augmenté par rapport à 2011 en HPM. Plus d'utilisateurs choisissent donc la BAU comme voie de circulation car elle est en continuité avec la sortie.

Une analyse plus précise des changements de voies dans cette zone est effectuée (Chapitre 5.3.2).

Direction Lausanne

Sur la chaussée LAC, la BAU est légèrement plus empruntée au niveau du milieu du tronçon en HPM (+1%) qu'en 2011. En HPS, aucune différence n'est constatée. Globalement, le comportement sur le tronçon reste donc identique.

Une analyse plus détaillée de l'évolution du comportement des usagers à l'entrée de Morges-Est est effectuée (Chapitre 5.3.3).

5.3 Comportement à Morges-Est (entrée – sortie du système)

Le comportement des usagers a été analysé de manière détaillée au niveau de l'entrée et de la sortie de la demi-jonction de Morges-Est.

Dans la direction de Lausanne, ce site correspond à l'entrée dans le système de BAU active tandis que dans la direction de Genève, il correspond à la sortie du système. L'analyse des changements de voies de ces zones permettra donc de comprendre le comportement des usagers, de noter si ce comportement s'est modifié depuis le début de la mise en service du système ainsi que de définir d'éventuelles mesures d'amélioration.

En 2011, une analyse basée sur des comptages visuels (enregistrement vidéo) a été effectuée [8]. D'une durée de trois heures en période de pointe du matin et également de trois heures en période de pointe du soir, ces comptages ont été effectués les 16, 17, 22 et 23 février 2011. Bien que la méthode employée dans le cadre de cette étude soit différente de celle employée en 2011 (durée d'enregistrement et matériel), des comparaisons entre ces deux états sont effectuées (Chapitres 5.3.2 et 5.3.3).

Au vu du matériel, de la méthodologie et des durées d'analyse prises en considération, il est possible que certains résultats diffèrent quelque peu de ceux déjà énoncés (Chapitres 1 et 5.2).

En termes de sécurité, il est important de relever que les zones dans lesquelles des manœuvres de changement de voies s'effectuent peuvent être potentiellement critiques. Pour cela, une analyse de sécurité est également menée (Chapitre 9).

Les analyses de comportement sont issues de [20], [21] et sont également utilisées dans le cadre d'un projet AGB (groupe de travail recherche en matière de ponts) sur les indices de performance structurale [24].

5.3.1 Enregistrements vidéos

Afin de réaliser ces analyses, des enregistrements réalisés à l'aide de caméras numériques installées par le LAVOC sur le pont « Route de la Gracieuse » (Medium Zoom et High Zoom) ainsi que des vidéos mises à disposition par la police cantonale vaudoise ont été utilisés. De plus, le même jour, l'enregistrement vidéo par drone a été testé (Geodetic Engineering Laboratory, TOPO, EPFL).

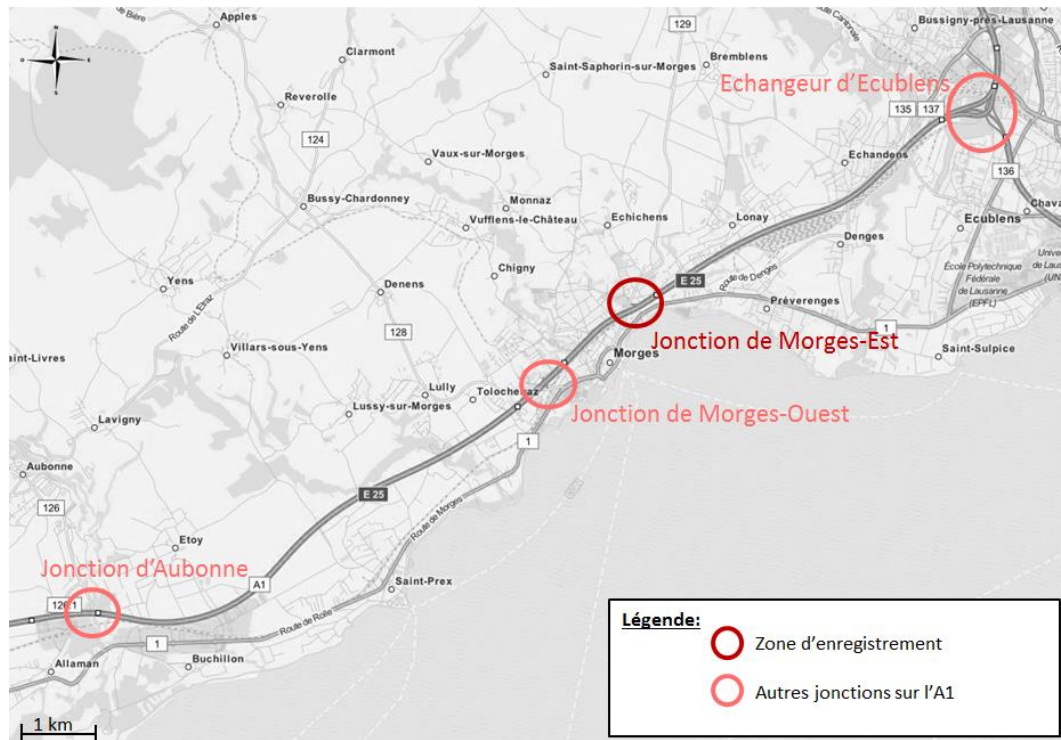


Fig. 74 Emplacement de la zone d'enregistrement [20].

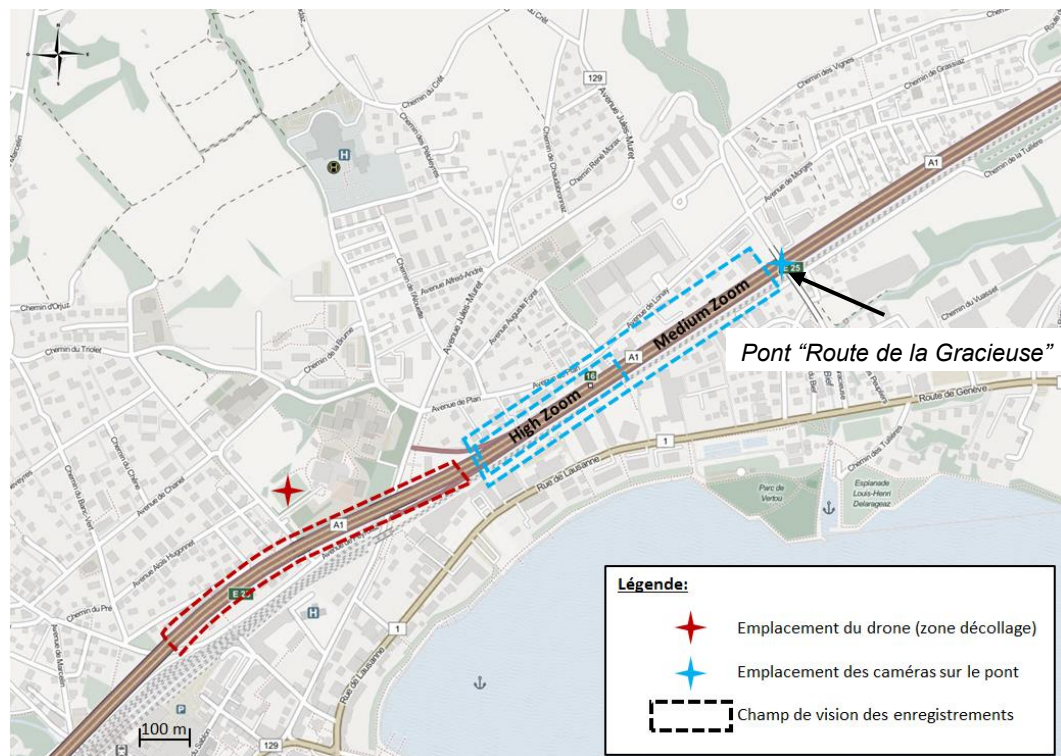


Fig. 75 Champs de vision des caméras (Caméras LAVOC et drone) [20].

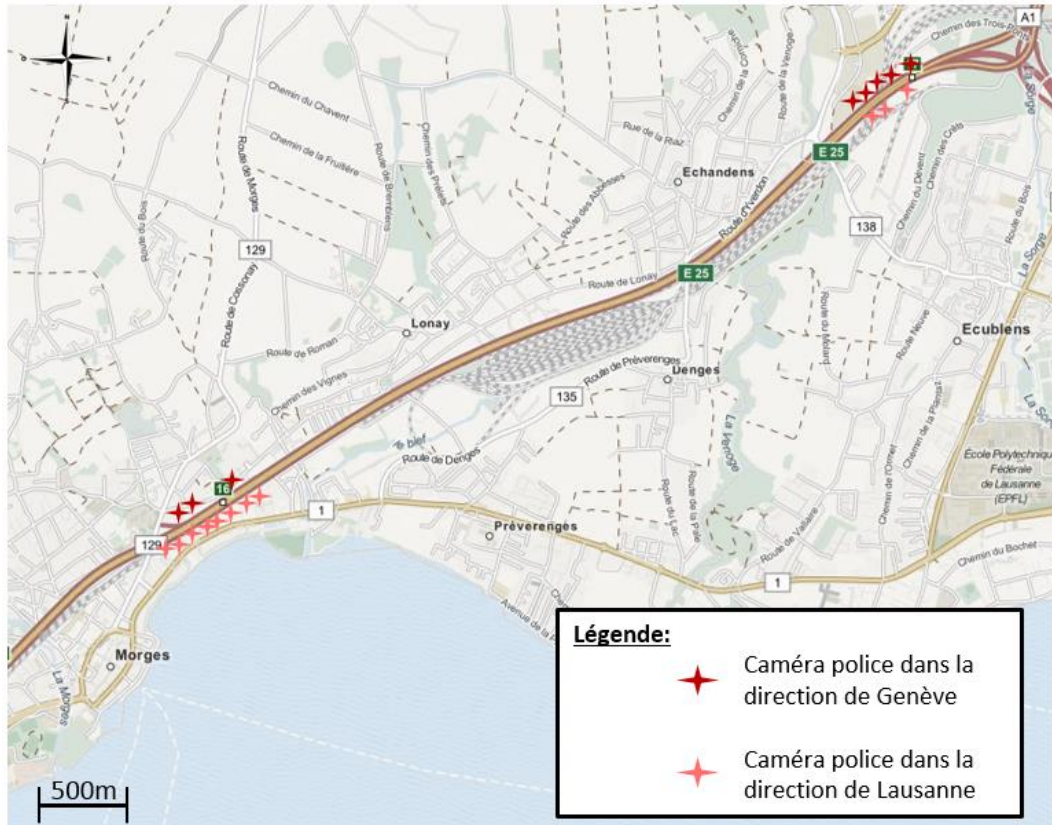


Fig. 76 Emplacement des caméras de la police cantonale vaudoise [20].

Direction Lausanne

Dans la direction de Lausanne, une zone d'environ 775 m, comprenant l'entrée de Morges-Est, est couverte par les différents systèmes d'acquisition vidéos (Fig. 77), de gauche à droite :

- Caméra n° 101 de la police cantonale vaudoise (zone précédant l'entrée).
- Caméra n° 101 de la police cantonale vaudoise (115 m après l'entrée).
- Caméra High Zoom.
- Caméra Medium Zoom.

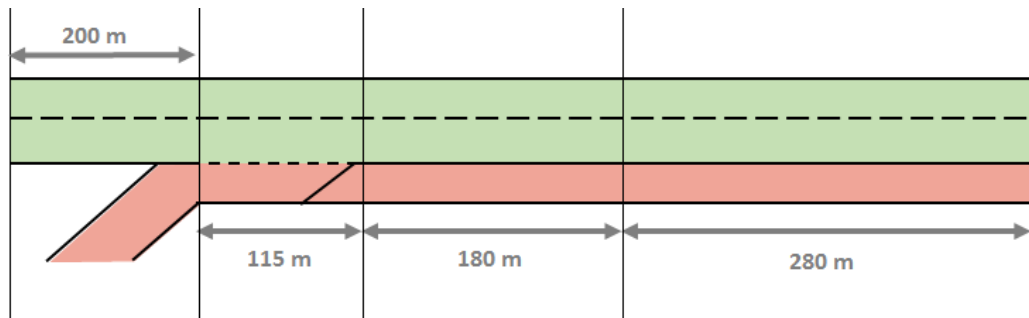


Fig. 77 Entrée de Morges-Est direction Lausanne [20].

Direction Genève

Dans la direction de Genève, une zone d'environ 805 m, comprenant la sortie de Morges-Est, est couverte par les différents systèmes d'acquisition vidéos (Fig. 78), de gauche à droite :

- Caméra n° 175 de la police cantonale vaudoise (zone suivant la sortie).
- Caméra n° 175 de la police cantonale vaudoise (50 m de sortie).
- Caméra n° 173 de la police cantonale vaudoise.
- Caméra High Zoom.
- Caméra Medium Zoom.

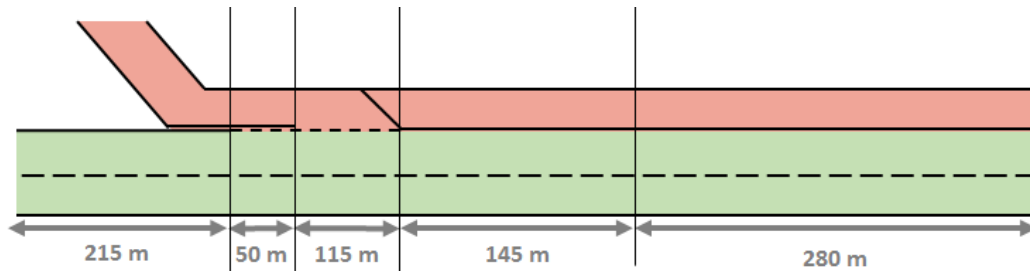


Fig. 78 Sortie de Morges-Est direction Genève [20].

Synchronisation des vidéos

Les différents champs de visions des systèmes d'acquisition vidéos se recouvrant, une synchronisation des enregistrements a été effectuée sur la base de véhicules spécifiques identifiés visuellement (notamment de véhicules poids lourds).

Période d'analyse

Les enregistrements vidéos ont été réalisés le mardi 18 mars 2014 de 7h30 à 9h00 et de 16h00 à 17h30, heures durant lesquelles la BAU était ouverte à la circulation.

Conditions de trafic

Les conditions de trafic ont un effet sur la répartition des véhicules par voie (Chapitre 5.2) et donc également sur les manœuvres de changement de voies. Les conditions de trafic durant la période d'analyse sont donc mesurées (Tab. 6).

Tab. 6 Conditions de trafic au milieu du tronçon de la BAU active, 18.03.2014

Direction Lausanne (L-62200)		
Paramètre	HPM	HPS
Heure de pointe déterminée	07h21 – 08h21	16h39 – 17h39
Débit [véh/h]	4'924	4'605
Vitesse moyenne [km/h]	101.8	100.2
Densité [véh/km]	48.4	46.1
Direction Genève (J-62200)		
Paramètre	HPM	HPS
Heure de pointe déterminée	07h15 – 08h15	17h12 – 18h12
Débit [véh/h]	4'387	4'444
Vitesse moyenne [km/h]	106.9	106.7
Densité [véh/km]	41.1	41.7

Images d'enregistrements



Fig. 79 Enregistrement vidéo « High zoom » [20].



Fig. 80 Enregistrement vidéo « Medium zoom » [20].



Fig. 81 Caméras de la police cantonale vaudoise, direction Lausanne [20].



Fig. 82 Caméras de la police cantonale vaudoise, direction Genève [20].

Drone – Tracking

En parallèle des analyses vidéos, une étude expérimentale de détection et de tracking des véhicules a été effectuée par le laboratoire Geodetic Engineering Laboratory (TOPO, EPFL).

Les résultats des analyses vidéos (LAVOC – police cantonale vaudoise) étant probants (Chapitres 5.3.2 et 5.3.3), l'analyse par tracking numérique n'a pas été utilisée dans le cadre de ce projet. Toutefois, sa méthodologie pourrait être utile à d'autres projets similaires, c'est pourquoi on la décrit.

Le but d'une telle approche est d'analyser et de déterminer, à moindres coûts, un modèle de circulation des usagers d'un système tel que celui de la BAU active.

Au vu de l'étendue du système à analyser (plusieurs centaines de mètres), une seule caméra statique ne permettrait pas d'avoir un champ de vision suffisant. La mise en place d'un système de multiples caméras serait plus onéreux et ferait sans doute face à des contraintes de législation ou spécifiques à la zone étudiée. Pour cette étude, il a été choisi d'utiliser un drone (UAV, DraganFly) transportant une caméra (GoPro Hero 3+) à environ 150-200 mètres au-dessus du sol.

Dans un premier temps, l'image enregistrée doit être stabilisée (mouvement du drone, stabilisation, vent, ...) à l'aide d'un algorithme ([42]) qui détecte des points fixes d'image (angle d'un bâtiment, panneaux d'affichage sur l'autoroute, ...).

Un second algorithme permet de détecter, sur cette continuité d'images stabilisées (vidéo), les objets en mouvement ([43]. Fig. 83, miniature gauche). Cet algorithme permet de détecter les véhicules sur l'autoroute mais sur des routes de moindre importance, il permettrait également de détecter des cycles ou des piétons.

Afin de détecter les véhicules et d'estimer leur vitesse, un algorithme de plus court chemin (K-Shortest Path tracking algorithm, KSP, [44]) est utilisé. Sur cette base, une grille tridimensionnelle est construite sur la zone d'étude afin de projeter les différentes positions de détection (Fig. 83, miniature centre).

Sur la base de cette grille tridimensionnelle et de ces algorithmes, les trajectoires des véhicules peuvent alors être projetées et leurs vitesses et positions estimées (Fig. 83, miniature droite).

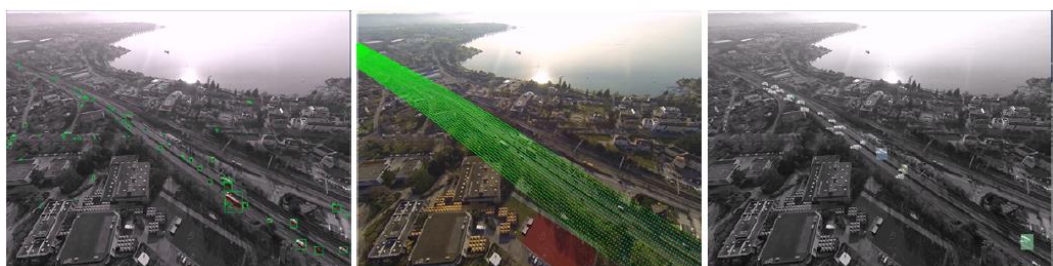


Fig. 83 Enregistrement du drone et tracking des véhicules, TOPO-EPFL.

5.3.2 Direction Lausanne (entrée Morges-Est)

Les véhicules entrant sur l'autoroute au niveau de la demi-jonction de Morges-Est ont la possibilité de directement s'insérer sur la BAU, qui est dans la continuité de la rampe d'accès. Cela implique le franchissement de la ligne continue au début du système de BAU active.

Mouvement entrant

2011

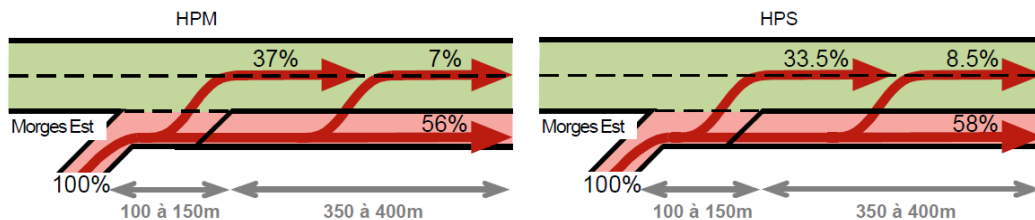


Fig. 84 Destination des véhicules entrants, Morges-Est, direction Lausanne, HPM – HPS, 2011 [8].

2014

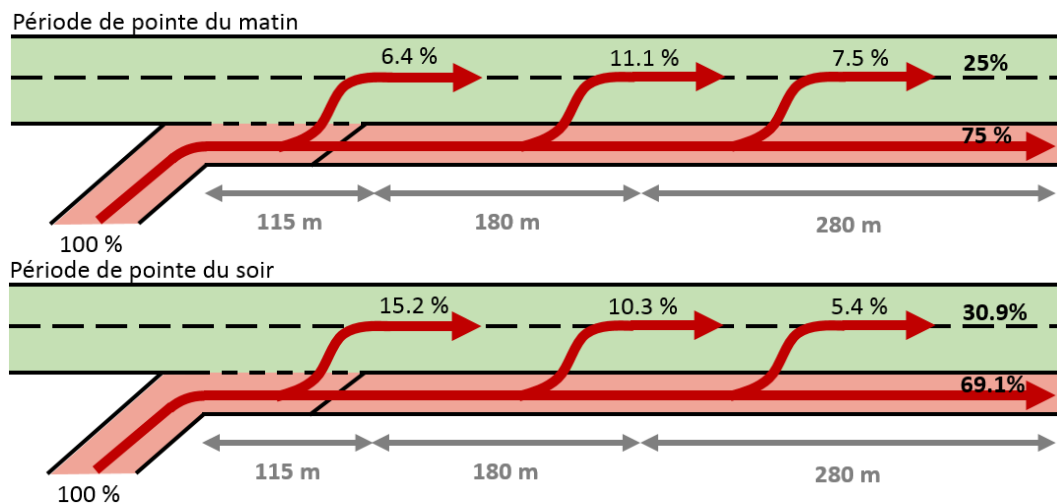


Fig. 85 Destination des véhicules entrants, Morges-Est, direction Lausanne, matin (100% = 940 véh/h) – soir (100% = 820 véh/h), 2014.

Une majorité des véhicules entrant à Morges-Est s'insère directement sur la BAU. Il existe cependant une partie des véhicules qui, en entrant sur l'autoroute, passe directement sur la voie de droite, de la même manière que lorsque la BAU est fermée à la circulation.

En comparaison au comportement relevé en 2011 (Fig. 84, Fig. 85), on constate, en 2014, que le nombre de véhicules en provenance de Morges-Est s'insérant directement sur la BAU est en augmentation (+30% le matin et +18% le soir). Cela représente une meilleure utilisation du système et une amélioration en termes de sécurité car le nombre de changements de voies, de la BAU vers la voie de droite, effectués dans les 600 m après l'entrée a diminué.

En période de pointe du soir, le basculement de véhicules de la BAU directement sur la voie de droite reste important (2.4 fois la valeur du matin). Ces usagers correspondent soit à des personnes voulant dépasser le plus vite possible des véhicules lents, soit à des personnes n'ayant pas compris que l'usage de la BAU était possible, ou qui n'osent pas l'utiliser.

Poids lourds

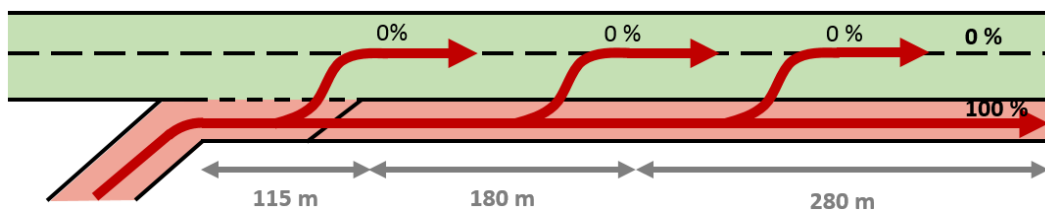


Fig. 86 Destination des véhicules lourds entrants, Morges-Est, direction Lausanne, 2014.

Les véhicules poids lourds en provenance de Morges-Est restent directement dans la BAU, quelle que soit la période analysée (Fig. 86). Le comportement de ces chauffeurs professionnels est donc adéquat.

Mouvement de rabattement après la zone d'entrée

Le rabattement des véhicules en provenance de Morges-Ouest, soit des véhicules circulant déjà sur l'autoroute avant la demi-jonction de Morges-Est, est traité en considérant les deux périodes de pointe confondues (Fig. 87, Fig. 88).

2011

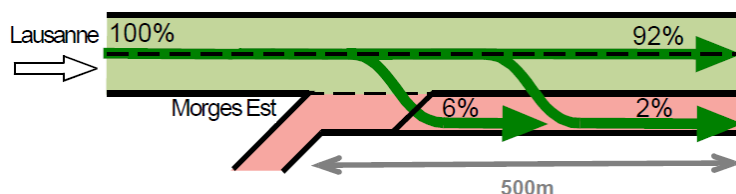


Fig. 87 Rabattement de véhicules, Morges-Est, direction Lausanne, 2011 [8].

2014

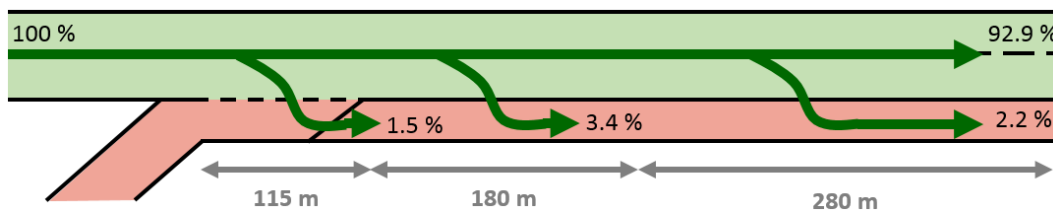


Fig. 88 Rabattement de véhicules, Morges-Est, direction Lausanne, (100% = 3'900 véh/h), 2014.

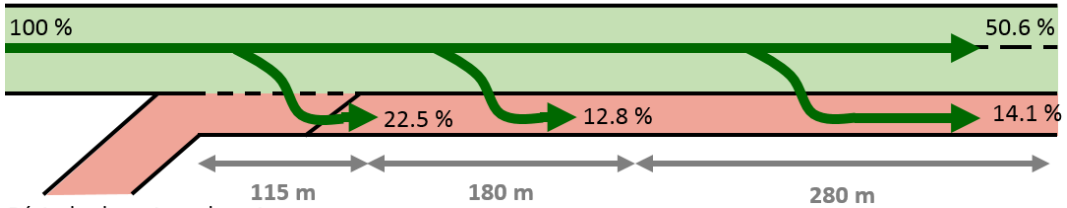
La majorité des véhicules se situant déjà sur l'autoroute maintiennent globalement leur voie et n'empruntent que peu la BAU (2.2 % à plus de 300 m après l'entrée). En comparaison au comportement relevé en 2011, la proportion de véhicules conservant leur voie sans changer vers la BAU n'a pas significativement changé en 2014 (+1%).

En 2011, les usagers qui empruntaient la BAU changeaient de voie directement au niveau de l'entrée alors qu'en 2014, ces changements de voies s'effectuent surtout dans les 180 m après le début de la BAU active. Le rabattement au niveau de la zone de transition, en amont de la BAU active, a ainsi diminué de -75% entre 2011 et 2014.

Ces évolutions dans le comportement des usagers sont expliquées par le fait qu'une plus grande proportion de véhicules entrant à Morges-Est s'insère directement sur la BAU (Fig. 84, Fig. 85). La possibilité pour les autres véhicules de changer de voie vers la BAU est donc plus réduite.

Poids lourds

Période de pointe du matin



Période de pointe du soir

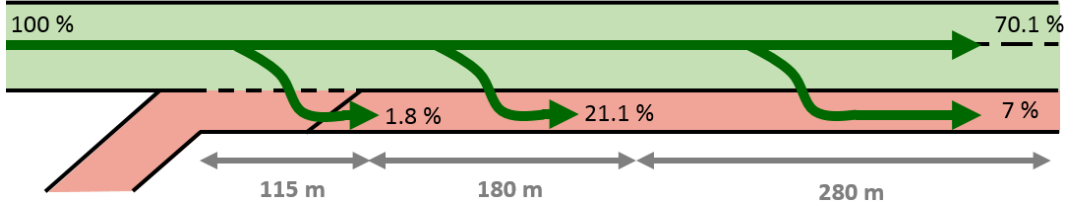


Fig. 89 Rabattement de véhicules lourds, Morges-Est, direction Lausanne, matin (100% = 140 véh/h) – soir (100% = 120 véh/h), 2014.

Le comportement des poids lourds diffère entre le matin et le soir (Fig. 89). La zone présentant le plus fort taux de changements de voies n'est pas identique. Le matin, cette zone correspond à la zone de transition, avant le début de la BAU active, alors que le soir, cette zone est située dans les 180 premiers mètres après le début de la BAU active.

Le mouvement de la voie d'entrée vers la voie de droite au niveau de la zone de transition étant plus important le soir que le matin (Fig. 85), les véhicules désirant se rabattre, le soir, ont moins la possibilité de le faire dans cette zone (1.8%). Leur rabattement s'effectue alors plus loin (Fig. 89).

Origine des véhicules circulant sur la BAU

Les véhicules circulant sur la BAU peuvent soit s'être insérés directement depuis l'entrée de Morges-Est, soit avoir effectué un changement de voies depuis la voie de droite si ces derniers proviennent de l'autoroute (Morges-Ouest). Les schémas de synthèse de ces origines sont donnés ci-dessous (Périodes de pointe regroupées, Fig. 90, Fig. 91).

2011

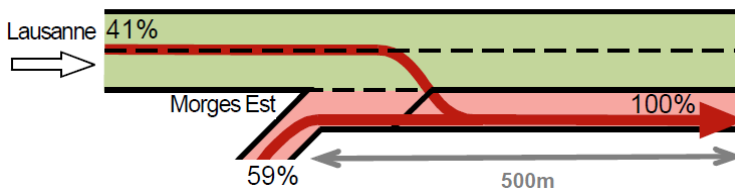


Fig. 90 Origine des véhicules circulant sur la BAU, Morges-Est, direction Lausanne, 2011 [8].

2014

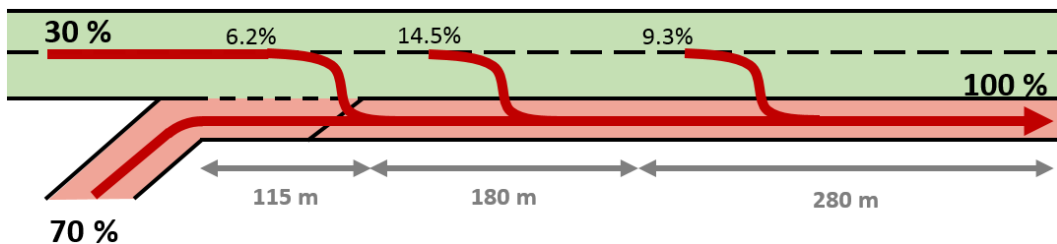


Fig. 91 Origine des véhicules circulant sur la BAU, Morges-Est, direction Lausanne, (100% = 910 véh/h), 2014.

Taux de répartition et mouvements

2011

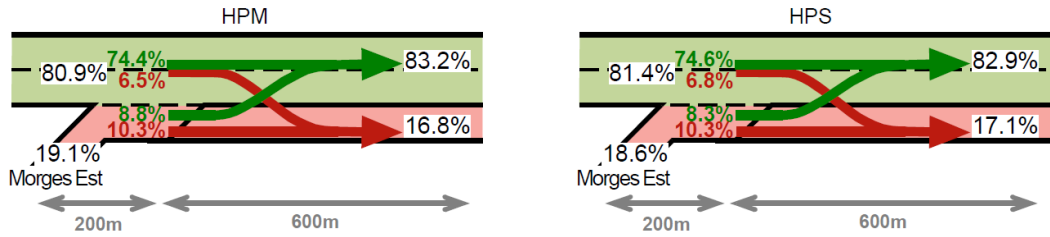


Fig. 92 Taux de répartition et mouvements, Morges-Est, direction Lausanne, 2011 [8].

2014

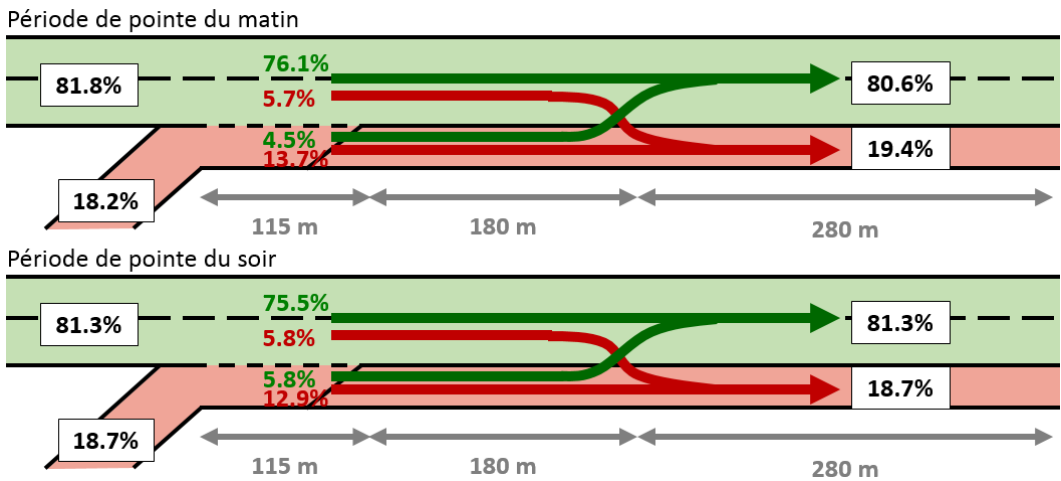


Fig. 93 Taux de répartition et mouvements, Morges-Est, direction Lausanne, 2014.

Environ 460 m après la zone de transition, l'utilisation de la BAU a augmenté de 2.6% le matin et 1.6% le soir.

5.3.3 Direction Genève (sortie Morges-Est)

Les véhicules désirant sortir de l'autoroute au niveau de la demi-jonction de Morges-Est en direction de Genève ont la possibilité d'emprunter directement la rampe de sortie, qui est dans la continuité de la fin de la BAU.

Mouvement de présélection pour rester sur l'autoroute

La première signalisation annonçant la sortie de Morges-Est étant située environ 500 m avant la fin du système de BAU active, les usagers sont déjà avertis de la sortie de Morges-Est au niveau de la zone où les analyses par traitement vidéo ont été effectuées.

2011

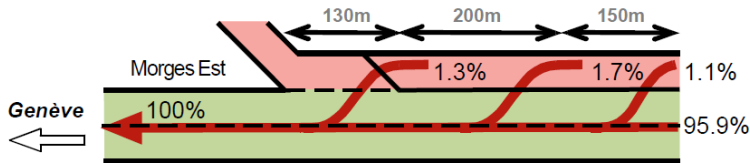


Fig. 94 Origine des véhicules continuant sur l'autoroute, Morges-Est, direction Genève, 2011 [8].

2014

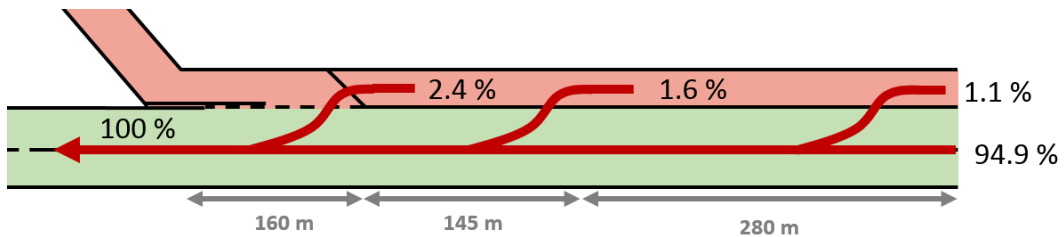


Fig. 95 Origine des véhicules continuant sur l'autoroute, Morges-Est, direction Genève, (100% = 3'800 véh/h), 2014.

En analysant l'origine des véhicules continuant sur l'autoroute (Fig. 95), il est possible de constater que la majorité d'entre eux sont déjà présélectionnés sur les deux voies qui continuent en direction de Genève et qu'ainsi très peu de changements de voies sont effectués dans les 400 derniers mètres avant la sortie.

Une légère augmentation est observée sur le mouvement qui quitte la BAU dans la zone de transition, après la fin de la BAU active, avec 2.4% en 2014 (Fig. 95) contre 1.3% en 2011 (Fig. 94). Ce changement de voies au dernier moment peut amener à des situations conflictuelles (Chapitre 9).

Poids lourds

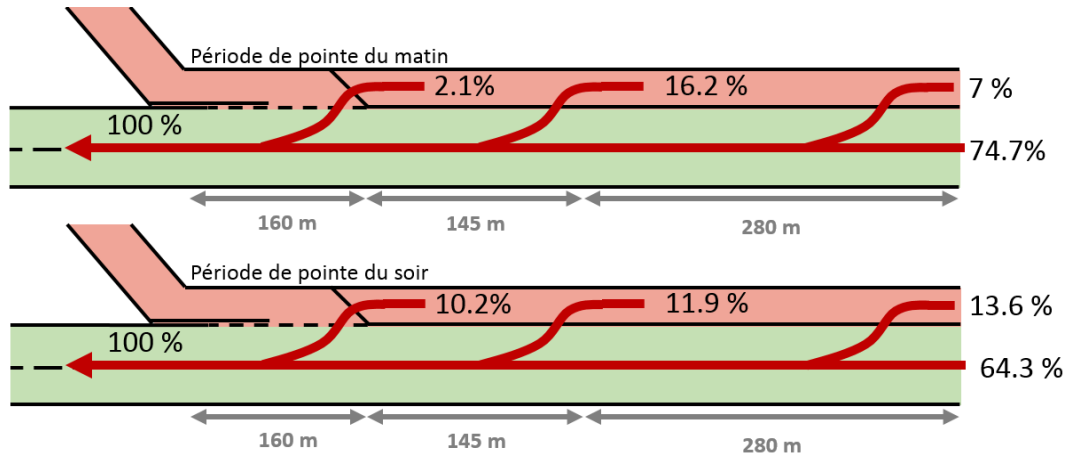


Fig. 96 Origine des véhicules lourds continuant sur l'autoroute, Morges-Est, direction Genève, matin (100% = 280 véh/h) – soir (100% = 120 véh/h), 2014.

On constate qu'une majorité des véhicules lourds a déjà effectué le changement de voies pour se présélectionner plus de 400 m avant la fin de la BAU active (Fig. 96). Ceux encore présents sur la BAU dans cette zone changent de voie majoritairement dans les 145 derniers mètres du système. En période de pointe du soir, on note une proportion importante (10.2%) de poids lourds qui attendent la zone de transition pour effectuer le changement de voies.

Le fait d'avoir une majorité de poids lourds qui se présélectionnent plus de 400 m avant la fin de la zone de BAU active permet d'améliorer les conditions de trafic et de sécurité du tronçon. Les poids lourds, qui empruntent en grand nombre la 3^{ème} voie, anticipent suffisamment la fin du système et réalisent leur changement de voies dans des conditions de sécurité adéquates. Cela permet ainsi de limiter les changements de voies à la dernière minute qui peuvent se révéler plus dangereux.

Mouvement sortant

2011

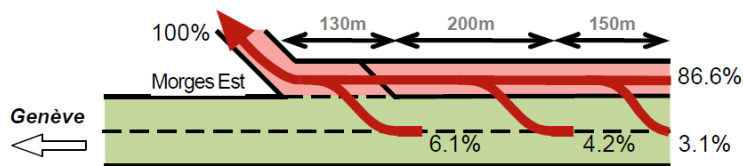


Fig. 97 Mouvement sortant, Morges-Est, direction Genève, 2011 [8].

2014

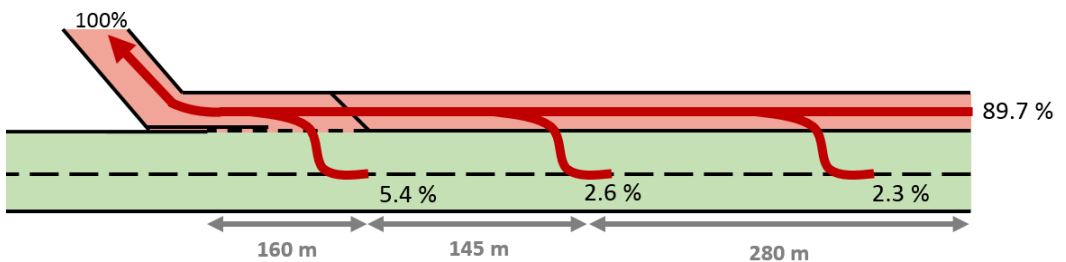


Fig. 98 Mouvement sortant, Morges-Est, direction Genève, (100% = 660 véh/h), 2014.

On constate que la majorité des véhicules empruntant la sortie de Morges-Est sont déjà présélectionnés plus de 425 m avant la fin de la BAU active (Fig. 98).

Dans les derniers 400 m, la proportion la plus importante de véhicules effectuant un changement de voies vers la sortie se situe dans la zone de transition après la fin de la BAU active, comme dans le cas où la BAU est fermée à la circulation. Cette proportion semble tout de même avoir légèrement diminué par rapport à 2011 (Fig. 97, -0.7%).

Dans la zone de transition, au droit de la rampe de sortie, il existe toujours un entrecroisement avec des changements de voies tardifs entre les véhicules qui désirent sortir à Morges-Est (Fig. 98) et ceux qui souhaitent continuer sur l'autoroute (Fig. 95, Fig. 96). Cet entrecroisement peut se révéler dangereux (Chapitre 9.2).

Poids lourds

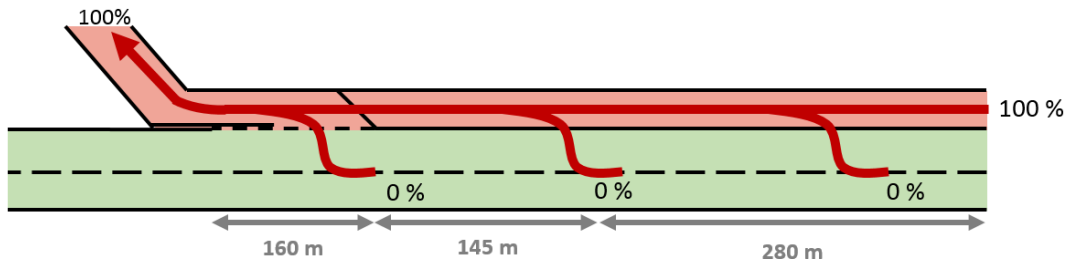


Fig. 99 Mouvement sortant, Morges-Est, direction Genève, 2014.

L'ensemble des poids lourds sortant à Morges-Est sont d'ores et déjà présélectionnés plus de 425 m avant la sortie.

Taux de répartition et mouvements

2011

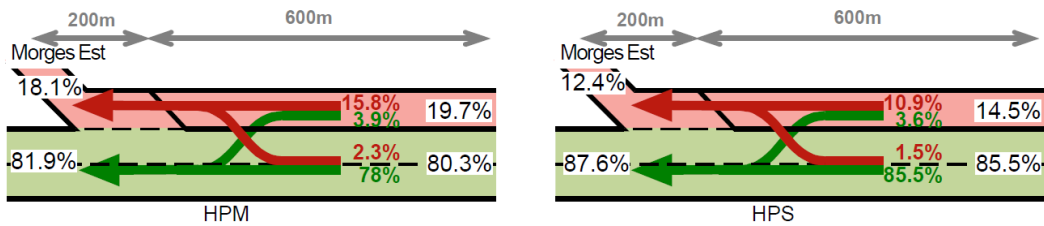


Fig. 100 Taux de répartition et mouvements, Morges-Est, direction Genève, 2011 [8].

2014

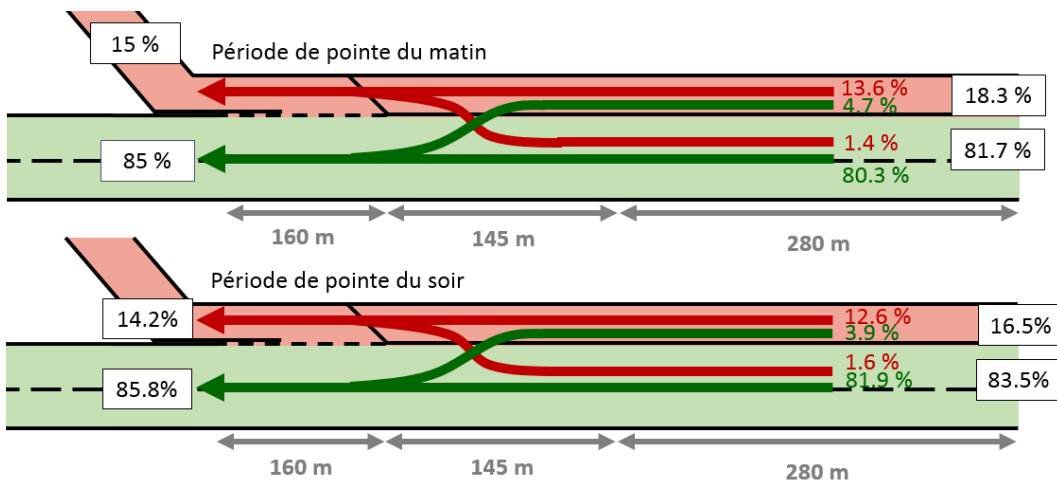


Fig. 101 Taux de répartition et mouvements, Morges-Est, direction Genève, 2014.

Au niveau de la sortie de Morges-Est, l'emploi de la BAU dans les 400 m avant la sortie du système dépend de la destination des véhicules. Cela a pour conséquences un taux d'utilisation différent de la BAU entre le matin et le soir. Globalement, le taux de véhicules empruntant la BAU 425 m avant la sortie est supérieur de 3% au taux de véhicules sortants (Fig. 101).

Par rapport à 2011 (Fig. 100), il semble que l'utilisation de la BAU active, 600 m avant sa fin, a diminué le matin mais a augmenté le soir.

En 2014 (Fig. 101), dans les 400 derniers mètres du système, la BAU est surtout empruntée par les véhicules sortant à Morges-Est. Toutefois, dans ces 400 derniers mètres, un pourcentage non négligeable d'usagers effectue des changements de voies soit pour emprunter la sortie de Morges-Est ou pour sortir de la BAU afin de continuer sur l'autoroute. Comme mentionné précédemment, ces entrecroisements peuvent amener à des situations conflictuelles potentiellement accidentogènes et ces changements de voies peuvent provoquer des ondes de choc qui peuvent avoir un effet négatif sur la fluidité du trafic.

5.3.4 Franchissement de la ligne blanche continue

L'analyse du franchissement de la ligne continue entre 2010, 2011 et 2014 indique une amélioration de la compréhension du système (Fig. 102, Fig. 103).

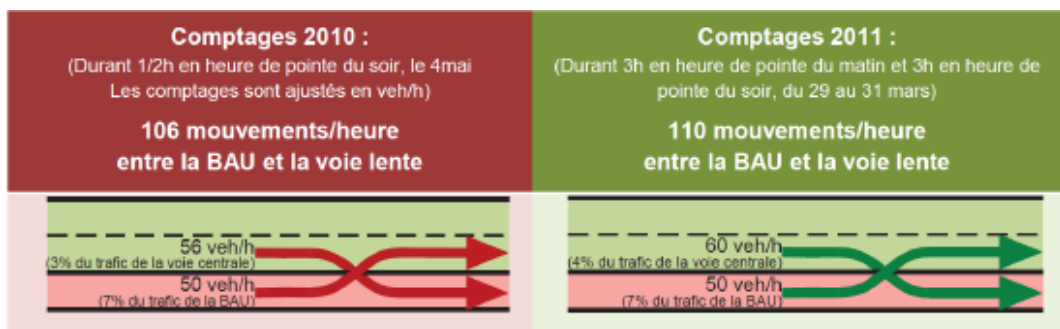


Fig. 102 Franchissement de la ligne blanche continue, Morges-Est, direction Lausanne, 2010 - 2011 [8].

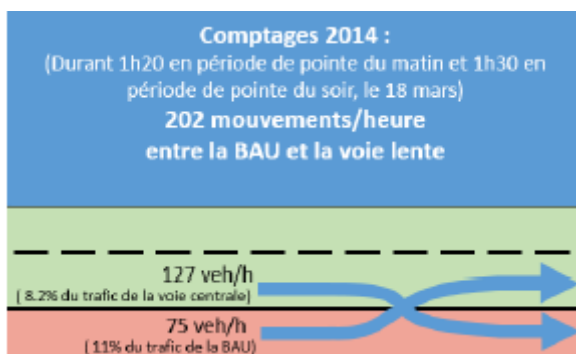


Fig. 103 Franchissement de la ligne blanche continue, Morges-Est, direction Lausanne, 2014.

Entre 2010 et 2011, très peu de changements vis-à-vis du franchissement de la ligne continue sont à noter (Fig. 102). Entre 2011 et 2014, on constate une augmentation du nombre de véhicules franchissant la ligne continue, +84% sur le nombre de mouvements par heure. Une augmentation du franchissement de la ligne implique une augmentation du nombre de changements de voies dans cette zone. L'augmentation des changements de voies peut toutefois avoir un impact négatif sur la sécurité du tronçon malgré l'impact positif que cela représente en termes d'efficacité, d'acceptabilité et de compréhension du système.

5.3.5 Synthèse du comportement à Morges-Est

La comparaison entre le comportement des usagers actuels et celui relevé en 2011 [8] montre globalement une meilleure adaptation du comportement des usagers au système de BAU active.

Direction Lausanne

Le tableau suivant (Tab. 7) contient les chiffres clés de cette évolution dans la direction de Lausanne.

Tab. 7 Evolution du comportement des usagers (moyenne matin-soir) à l'entrée du système, Morges-Est, direction Lausanne

Année	2011	2014	Evolution 2011 / 2014
Origine des véhicules qui roulent sur la BAU par rapport au débit total sur BAU après 600 m			
Origine : entrée Morges-Est	59%	70%	Positive
Changement de voies de la voie de droite vers la BAU par rapport au débit sur l'autoroute avant l'entrée de Morges-Est			
Effectué dans la zone de transition	6%	1.5%	Positive
Effectué ~400 m après la zone de transition	2%	5.6%	Positive
Changement de voies de la BAU vers la voie de droite par rapport au débit qui entre à Morges-Est			
Effectué dans la zone de transition	35.3%	10.5%	Positive
Effectué ~400 m après la zone de transition	7.8%	17.2%	Négative
Répartition du débit sur la BAU par rapport au débit total du tronçon			
Répartition de débit par voie 600 m après l'entrée.	17.0%	19.1%	Positive

La principale évolution entre 2011 et 2014 au niveau du comportement à l'entrée de Morges-Est est le fait que plus de véhicules entrant à Morges-Est circulent directement sur la BAU sans changer de voie. La réticence des usagers à franchir une ligne blanche continue a donc diminué (ligne diagonale de fin de voie d'accélération).

Dans ce sens, en novembre 2014, une modification de la face avant du signal à prisme a été effectuée pour afin de permettre une meilleure compréhension du début du système.

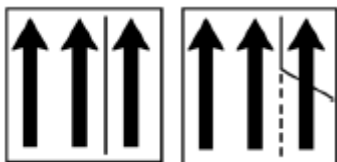


Fig. 104 Face avant du signal à prisme, entrée du système de BAU active. Gauche : avant modification du signal. Droite : nouveau signal depuis novembre 2014 [11].

Dans cette direction, le système de BAU active semble être mieux compris aujourd'hui avec notamment une réduction de la proportion de changements de voies au niveau de la rampe d'accès et une meilleure utilisation de la BAU à la circulation. Les usagers semblent donc s'être habitués aux particularités du système dans cette direction et emploient de mieux en mieux le système de BAU active.

Direction Genève

Le tableau suivant (Tab. 8) contient les chiffres clés de cette évolution dans la direction de Genève.

Tab. 8 Evolution du comportement des usagers (moyenne matin-soir) à la sortie du système, Morges-Est, direction Genève

Année	2011	2014	Evolution 2011 / 2014
Mouvement de la BAU vers la voie de droite avant la sortie de Morges-Est, rapport au débit total sur autoroute après la sortie			
Effectué dans la zone de transition	1.3%	2.4%	Négative
Effectué ~400 m avant la zone de transition	2.8%	2.7%	Positive
Mouvement de la voie de droite sur la sortie de Morges-Est, rapport au débit total sortant			
Effectué dans la zone de transition	6.1%	5.4%	Positive
Effectué ~400 m avant la zone de transition	7.3%	4.9%	Positive
Origine des véhicules sortant à Morges-Est			
Origine : BAU	86.6%	89.7%	Positive

Au niveau de la sortie de Morges-Est, les véhicules sont déjà, pour la majorité, présélectionnés plus de 400 m avant la fin du système de BAU active. Ainsi, les véhicules circulant sur la BAU sont principalement des véhicules désirant sortir à Morges-Est d'où une fréquentation plus faible de cette voie dans cette direction.

On constate néanmoins des changements de voies au dernier moment, au niveau de la zone de transition, tant de la continuité de la BAU vers la voie de droite que de la voie de droite vers la sortie. Une mesure d'amélioration a été mise place en novembre 2014 afin de clarifier la zone de sortie de la BAU active à la sortie de Morges-Est. Un nouveau signal de disposition de voie à prisme a ainsi été placé à 250 m de la sortie.

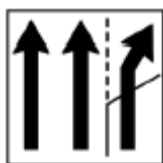


Fig. 105 Nouveau signal à prisme, sortie du système de BAU active. Novembre 2014 [11].

Le monitoring de ce signal a déjà été effectué par l'entreprise RGR S.A. en décembre 2014 [12]. Toutefois, l'efficacité de ce signal sur les changements de voies tardifs n'a pas pu être démontrée.

Une nouvelle mesure a été testée afin d'évaluer son impact sur ces changements de voies tardifs. Elle consiste à éteindre les systèmes de feux de fermeture temporaire des voies (FTV) sous les panneaux directionnels et sur la dernière position (excepté croix rouge sur la BAU, Fig. 106). L'efficacité de cette mesure n'a pas non plus été démontrée.

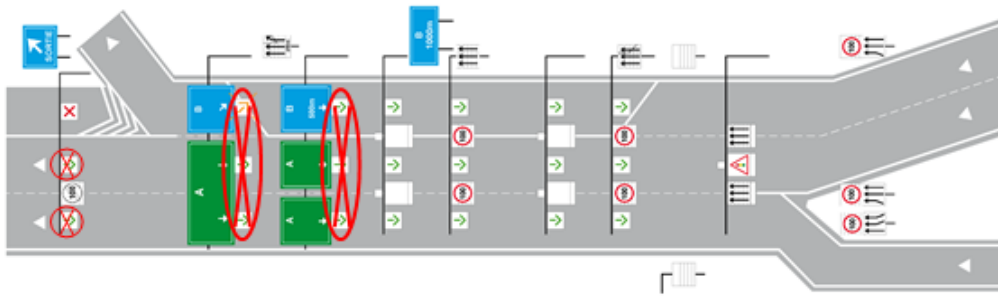


Fig. 106 Extinction des FTV sur les dernières positions, sortie du système de BAU active, Morges-Est, direction Genève [11].

Poids lourds

Les chauffeurs poids lourds adoptent un comportement globalement adéquat au système dans les deux directions.

5.4 Synthèse du comportement des usagers

Trois ans après la mise en service du système, les usagers du tronçon étaient déjà, dans l'ensemble, satisfaits du système. En termes de sécurité et d'efficacité, ils reconnaissent une amélioration par rapport à la situation passée. Une partie des usagers reste cependant dérangée par la présence de la ligne blanche continue à franchir. Cette réticence de certains usagers mais également la destination des usagers et le débit total sur le tronçon ont une influence sur l'utilisation de la BAU lorsqu'elle est ouverte à la circulation.

En 2014, on constate le ratio de débit total (LDFR) maximum sur la BAU dans la direction de Lausanne en fin du tronçon en heure de pointe du soir (23%). Globalement, le LDFR ne semble pas avoir évolué depuis 2011 malgré une augmentation du débit total sur le tronçon, quelle que soit la direction considérée.

A l'entrée du système, direction Lausanne, le comportement des usagers a évolué de manière positive depuis 2011 avec un nombre plus important de véhicules entrant sur l'autoroute à Morges-Est qui s'insèrent directement sur la BAU. Le nombre de changements de voies, après la zone de transition, de la voie de droite vers la BAU a également augmenté. Cela met bien en évidence, qu'aujourd'hui, les usagers sont plus enclins à franchir la ligne blanche continue qu'auparavant.

A la sortie du système, direction Genève, plus de 400 m avant la fin de la BAU active, les véhicules sont déjà en majorité présélectionnés selon leur destination. Une zone d'entrecroisements tardifs subsiste néanmoins entre la voie de droite et la BAU au droit de la sortie. Des mesures pour réduire ces entrecroisements potentiellement risqués ont été testées mais aucune n'a abouti à des résultats concluants. Les véhicules effectuant un changement de voie tardif sont des usagers habitués qui le font en connaissance de cause. Aucune mesure supplémentaire n'est donc préconisée.

Propositions de mesures complémentaires

Afin de faciliter la compréhension du système par les usagers et ainsi éventuellement augmenter l'utilisation de la BAU lorsqu'elle est ouverte à la circulation, plusieurs propositions de mesures sont envisagées.

Une première mesure consisterait à placer une indication de l'état de la BAU (ouverte/fermée) plus en amont que la signalisation existante. En plaçant par exemple, en amont de l'entrée dans le système, un PMV d'indication actif toute la journée (Fig. 107).



Fig. 107 Proposition de PMV en amont de l'entrée dans le système de BAU active.

Une autre solution consisterait en la mise en place de panneaux à messages variables (information textuelle simplifiée, Fig. 108) sur la voie de la BAU uniquement afin d'informer les usagers de la possibilité de circuler sur cette 3^{ème} voie. On propose, au vu des informations récoltées (Chapitre 5.1), une information bilingue (langue locale : français pour la zone de la Morges-Ecublens ainsi qu'en langue internationale : anglais).



Fig. 108 PMV, bande d'arrêt d'urgence, Royaume-Uni. Référence : ITS international, <http://www.itsinternational.com/>.

Une autre proposition de mesure éventuelle afin de faciliter la compréhension du système serait de placer les indications de vitesse variable au-dessus de chacune des 3 voies et non entre deux voies comme actuellement. Cela permettrait de renforcer le fait que la BAU peut être utilisée comme voie de circulation lorsque le système est actif (Fig. 109).

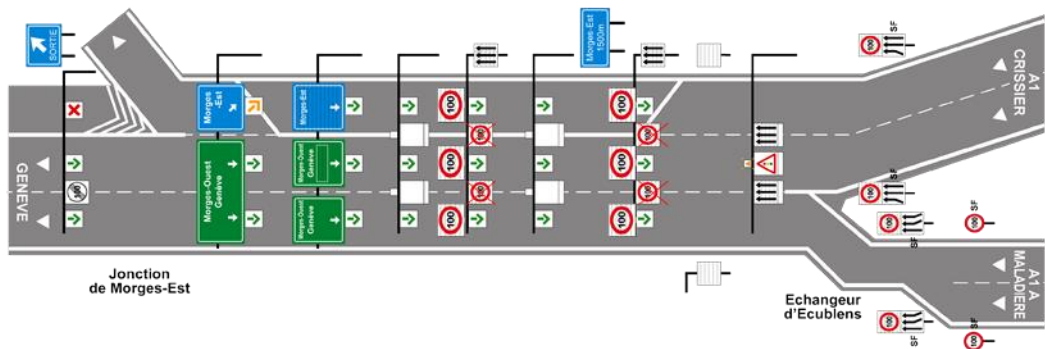


Fig. 109 Proposition de panneaux de vitesse variable au-dessus de chaque voie.

6 Modélisation et simulations de trafic

Comme décrit au chapitre 1, certains paramètres de trafic ne peuvent être directement évalués sur la base des données statistiques récoltées. L'impact du système de BAU active sur les temps de parcours et sur les émissions de polluants permet de quantifier son efficacité mais pour cela, le recours à des simulations de trafic est nécessaire.

De plus, les logiciels de simulations de trafic permettent l'implantation de scénarios représentant le réseau autoroutier avant la mise en place du système de BAU active (référence 2008) qui peuvent être comparés à d'autres scénarios relatifs à la situation actuelle (2013-2014).

Le guide de la Federal Highway Administration (Etats-Unis d'Amérique) propose une méthodologie pour l'application de simulations de trafic dans des logiciels spécialisés [45]. C'est sur cette base que sont abordées les simulations de trafics liées à la présente recherche.

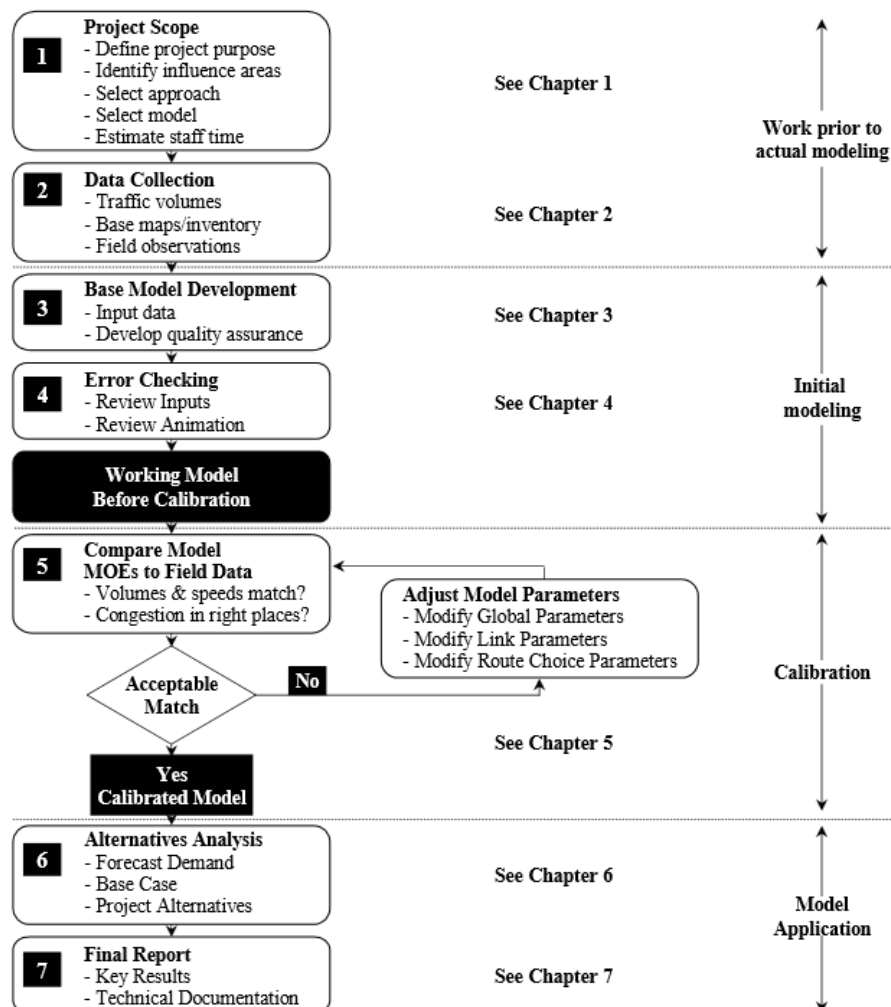


Fig. 110 Démarche pour l'application de simulations de trafic [45].

6.1 Cadre du projet

Le cadre du projet s'articule autour de 4 points principaux :

- Définition des objectifs à atteindre et des résultats attendus.
- Identification de la zone d'étude.
- Sélection d'une approche méthodologie.
- Sélection d'un outil de simulation (modèle).

Objectifs

Comme décrit en introduction au chapitre 1, le but de ces simulations de trafic est d'obtenir une évaluation de l'impact du système de BAU active sur les temps de parcours ainsi que sur les émissions de polluants.

Zone d'étude

La zone d'étude a été définie au chapitre 2.1. Le réseau modélisé correspond à la zone d'étude élargie (Fig. 111).

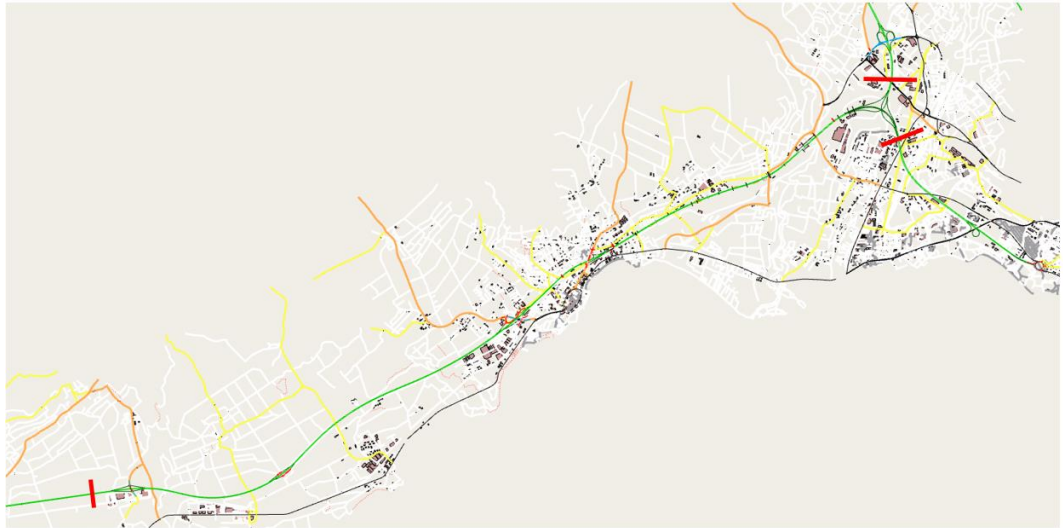


Fig. 111 Zone d'étude élargie et limites sur autoroute (en rouge) du réseau modélisé.

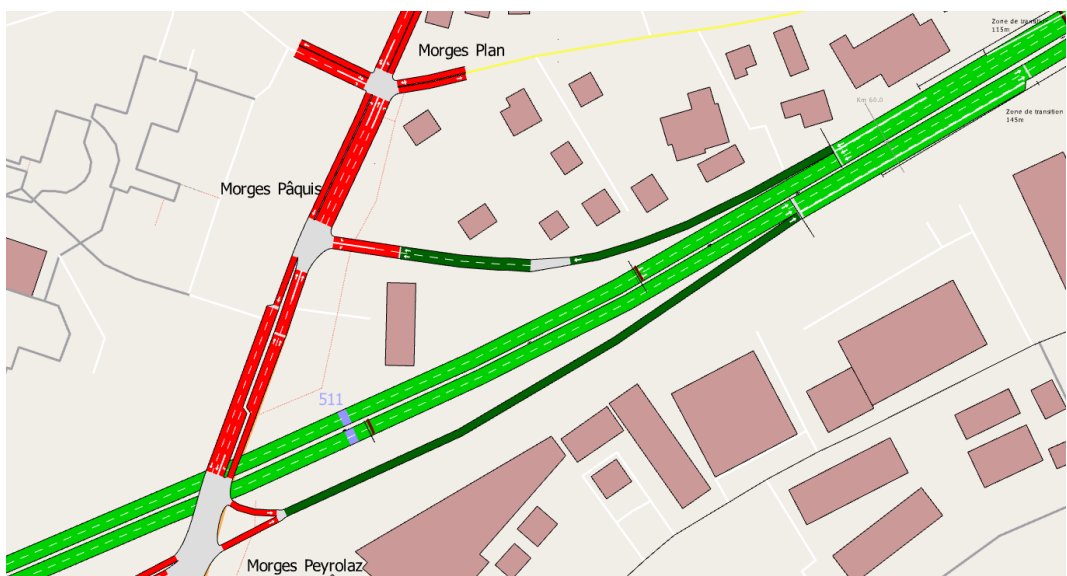


Fig. 112 Demi-jonction de Morges-Est.

Sont également modélisés (Fig. 112) :

- Les détecteurs (Ex : CSACR 511).
- Les panneaux à messages variables (en brun).
- Les premiers éléments d'influence hors autoroute (système de feux, signalisation, giratoire, ...).

Approche méthodologique

L'approche méthodologique globale sélectionnée est celle présentée précédemment (Fig. 110).

Sélection d'un outil de simulation

L'expérience de l'équipe de recherche sur l'outil de simulation de trafic AIMSUN (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks) développé par la société TSS (Transport Simulation Systems) a amené à choisir ce logiciel ([24] [26] [27] [28] [29]).

6.2 Base de données

Les bases de données utilisées dans le cadre de ces simulations de trafic sont décrites au chapitre 2.2.

6.3 Modélisation du réseau et vérification

La modélisation géométrique du réseau est effectuée par importation de cartes géospatiales OpenStreetMap (OSM). Les infrastructures routières y sont répertoriées, cartographiées et sont ainsi automatiquement modélisées. Toutefois, il est nécessaire de procéder à un contrôle et à une éventuelle correction de ces informations importées (géométrie de l'axe routier, largeur et nombre de voies, marquage, vitesses par tronçon, etc). Les éléments de signalisation, PMV et autres systèmes de feux doivent être modélisés.

Une fois le réseau modélisé, on insère les données de trafic déterminées (caractéristiques du parc automobile, comportement des usagers, états de trafic, mouvements tournants, etc) afin d'effectuer une première simulation de trafic. Cette simulation initiale, représentant une situation réaliste, permet de procéder à la vérification de la modélisation. D'éventuels comportements particuliers constatés sont analysés et, le cas échéant, la modélisation du réseau est corrigée (Ex : véhicules perdus en raison de l'oubli d'une jonction de deux éléments de tracé, congestions imprévues dues à une mauvaise configuration de la signalisation ou des marquages, etc).

Une fois cette vérification effectuée, on peut procéder à la calibration de la simulation de trafic.

6.4 Calibration

La calibration d'un modèle est un processus qui permet d'identifier, de sélectionner et finalement d'estimer les paramètres modifiables ou influents sur ce modèle afin d'obtenir une simulation reproduisant dans les meilleures conditions un comportement réel.

En fonction du nombre de paramètres et de leurs influences intrinsèques, ce processus itératif peut s'avérer chronophage voir infini. C'est pourquoi on définit qu'à partir de certains seuils, ou sous certaines hypothèses, le modèle représente suffisamment le comportement réel souhaité et alors l'opération de calibrage peut prendre fin.

Test statistique

La cohérence entre le modèle et le comportement réel, soit entre les données simulées et les données collectées, peut être déterminée sur la base de tests statistiques.

Dans le cadre de ce projet, on choisit d'effectuer le test de Kolmogorov-Smirnov, KS-Test. Ce test statistique permet de déterminer si deux échantillons distincts de données suivent la même loi statistique.

De plus, les caractéristiques du parc automobile (dimensions des véhicules, consommation, émissions, etc) et celles liées au comportement des usagers (vitesse choisie, acceptation de la vitesse légale, changements de voies, accélération, décélération, répartition sur les voies) sont vérifiées sur la base d'analyses de données collectées ([20] [21] [24]).

Calibration des débits

Afin de réaliser le calibrage du réseau, on utilise les données du mardi type 2008 (01.04.2008, chapitre 2.2.6) ainsi que du mardi type 2013 (05.03.2013) de 06h00 à 10h00 et de 15h00 à 20h00. Le pas d'agrégation des données a été fixé à 3 minutes, soit 80 points de mesures pour 4 heures de données et 100 points de mesures pour 5 heures de données.

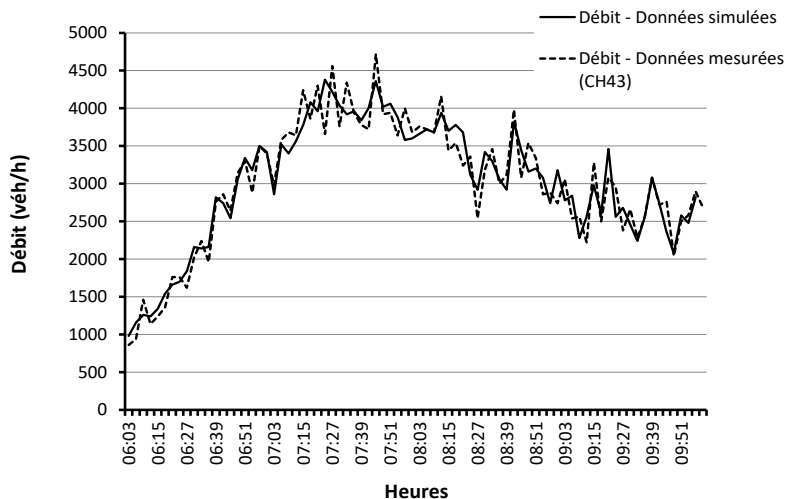


Fig. 113 Comparaison des débits mesurés et simulés, matin, 01.04.2008, direction Genève, CH43.

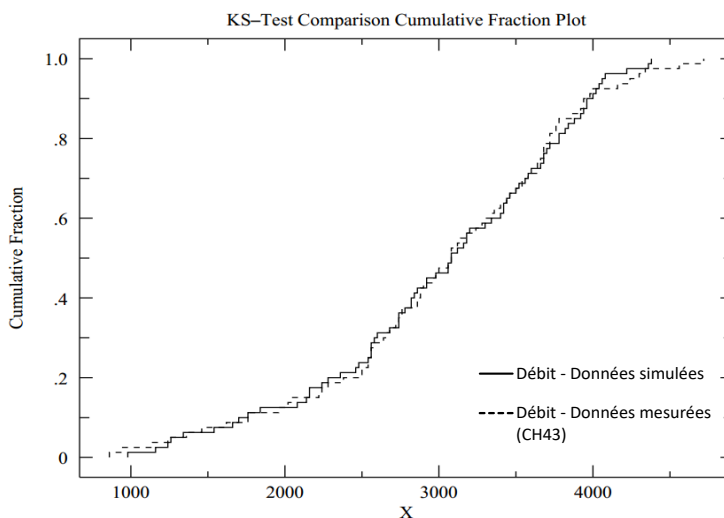


Fig. 114 Comparaison des débits mesurés et simulés, KS-Test, matin, 01.04.2008, direction Genève, CH43.

Le KS-Test consiste à mesurer sur la fonction de fréquence relative cumulée des débits ordonnés la différence maximale D_{max} entre les deux échantillons de données (Fig. 114 sur la base de Fig. 113).

On définit un niveau de confiance α à partir duquel la valeur D_{max} mesurée est supérieure à la valeur seuil $D(\alpha)$ et ainsi que l'hypothèse que les deux échantillons suivent une même loi statistique est rejetée. Dans le cadre de cette étude, on fixe le niveau de confiance à 5%, soit $\alpha = 0.05$.

Le seuil $D(\alpha)$ est défini comme suit :

$$D(\alpha) = C(\alpha) \cdot \sqrt{\frac{n_1 + n_2}{n_1 \cdot n_2}}$$

où :

- $C(\alpha)$ est un facteur défini (Tab. 9).
- n_1 et n_2 sont les nombres d'éléments des deux échantillons.

On obtient ainsi, à tailles d'échantillons identiques :

Tab. 9 Distances seuil $D(\alpha)$ et facteur $C(\alpha)$

α	$C(\alpha)$	$D(\alpha)$, $n = 80$	$D(\alpha)$, $n = 100$
0.05	1.36	0.215	0.192

Les résultats du KS-Test, effectué dans les deux directions, sont les suivants :

Tab. 10 KS-Test, $n = 80$ le matin, $n = 100$ le soir, CH43 – CH291 – CH300

Paramètre	Direction Lausanne				Direction Genève			
	2008		2013		2008		2013	
	Matin	Soir	Matin	Soir	Matin	Soir	Matin	Soir
D_{max} (CH43)	0.059	0.060	0.089	0.070	0.050	0.080	0.053	0.090
Hypothèse (CH43)	Valide	Valide	Valide	Valide	Valide	Valide	Valide	Valide
D_{max} (CH291)	0.075	0.130	0.089	0.110	0.038	0.040	0.042	0.070
Hypothèse (CH291)	Valide	Valide	Valide	Valide	Valide	Valide	Valide	Valide
D_{max} (CH300)	0.075	0.177	0.046	0.060	0.075	0.100	-	-
Hypothèse (CH300)	Valide	Valide	Valide	Valide	Valide	Valide		

Le 5 mars 2013, les données direction Genève du capteur CH300 n'étaient pas disponibles.

On peut conclure (Tab. 10), qu'en termes de débits, les modèles sont convenablement calibrés.

Calibration des vitesses

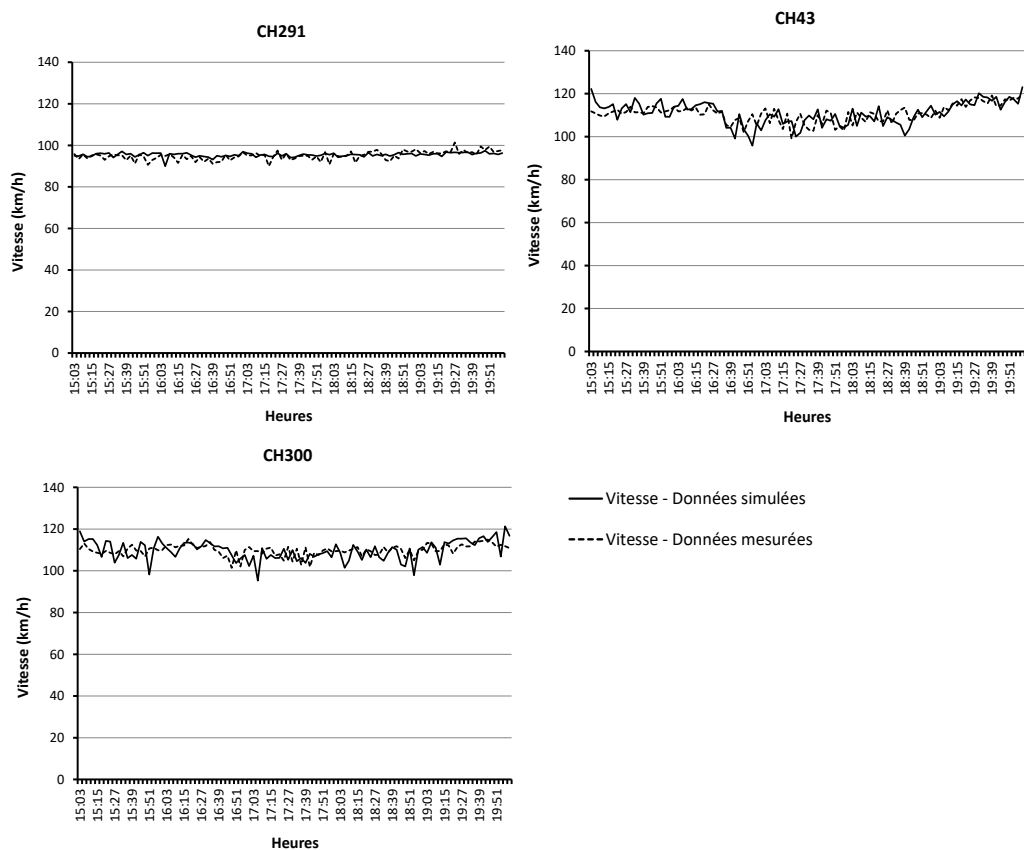


Fig. 115 Comparaison des vitesses mesurées et simulées, soir, 01.04.2008, direction Genève, CH291 – CH43 – CH300.

Les différences des vitesses moyennes étant faibles durant les périodes de calibration (Fig. 115), entre autre dues à la position particulière de ces capteurs (Chapitre 2.2.4), on compare uniquement de manière globale les comportements des vitesses mesurées et simulées.

Sur l'ensemble des situations calibrées, les tendances des deux échantillons de données sont cohérentes.

Répartition du débit sur les voies

Comme constaté précédemment (Chapitre 5.2.1), la répartition du débit sur le tronçon de la BAU active ne s'apparente pas à la répartition d'une autoroute à trois voies de circulation traditionnelle (Fig. 68, Fig. 69).

Ce comportement particulier doit être inséré dans le logiciel de simulation de trafic. Ce phénomène a été étudié de manière détaillée dans [20] et les solutions qui ont été proposées ont été appliquées à la présente étude.

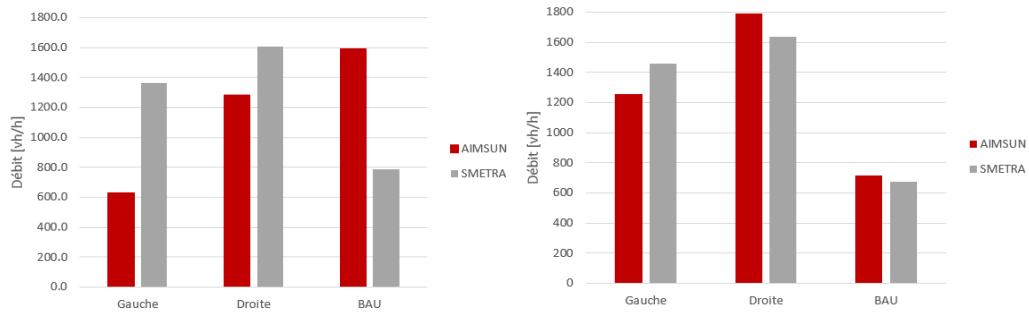


Fig. 116 Répartition des débits – situation simulée en 3 voies classiques – situation simulée avec comportement particulier, 08.06.2010, direction Genève, J-63800 [20].

Bien qu'il soit compliqué d'atteindre le comportement réel de ce tronçon particulier (Fig. 116), les solutions d'adaptation du modèle apportent satisfaction (Fig. 117).

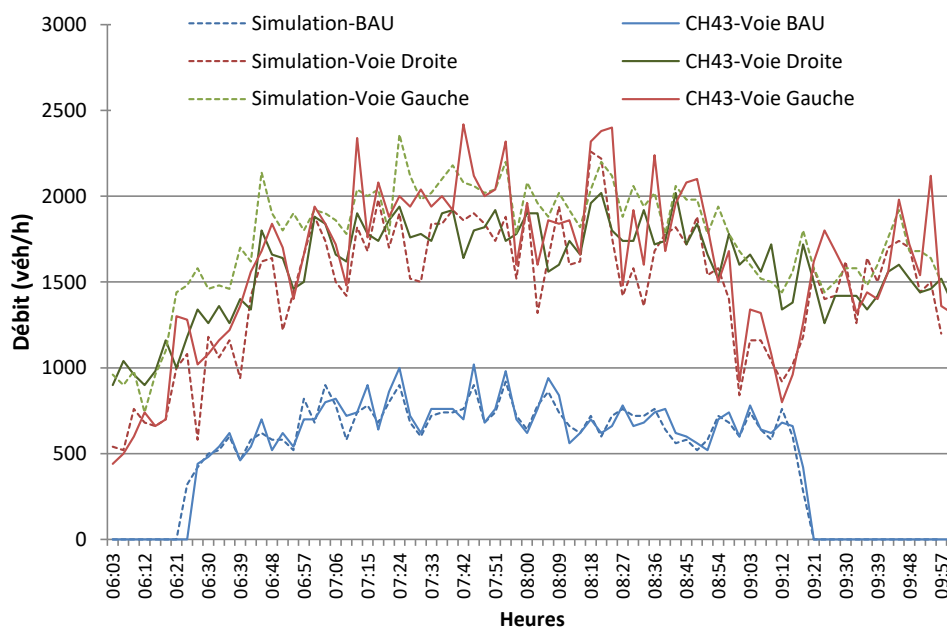


Fig. 117 Comparaison des débits mesurés et simulés, matin, 05.03.2013, direction Genève, CH43.

Synthèse

Sur la base des paramètres étudiés et des résultats obtenus, les niveaux de confiance dans le modèle sont bons et le modèle est calibré.

6.5 Validation

Une fois la calibration du modèle effectuée, une validation de cette calibration doit être fournie. Cette étape s'effectue sur la base d'un échantillon de données indépendant du premier échantillon utilisé pour la calibration.

On admet que les paramètres de trafic pour une période de la journée sont indépendants des paramètres mesurés sur une autre période de la journée suffisamment espacée (exemple : indépendance des périodes de pointe du matin et du soir).

Lors de l'étape de calibration, les données mesurées et simulées sur ces deux périodes ont été analysées séparément (Tab. 10). De par les résultats obtenus sur ces jeux de données indépendants, on peut admettre que le modèle est validé.

6.6 Scénarios

Le modèle étant validé, différents scénarios de simulation peuvent être appliqués. Dans le cadre de cette étude, on souhaite déterminer l'impact du système de BAU active sur :

- Les temps de parcours.
- Les émissions de polluants.

Pour cela, on effectue une comparaison entre les scénarios suivants :

- Etat 2008 sans ouverture à la circulation de la BAU active.
- Etat potentiel 2013 sans ouverture à la circulation de la BAU active.
- Etat 2013 avec ouverture à la circulation de la BAU active.

Les résultats issus de ces scénarios sont décrits dans les chapitres 7 et 1.

7 Impact sur les temps de parcours

Selon les relevés de l'Office fédéral de la statistique, en Suisse en 2013, 9 personnes actives sur 10 font partie de la catégorie des pendulaires [36]. Bien que les déplacements pour le travail représentent le second motif de déplacement en termes de distance moyenne journalière parcourue (50% pour les loisirs, 21% pour le travail), une majorité des usagers empruntent les systèmes de transport aux mêmes heures, ce qui implique les périodes de pointe constatées (Fig. 9).

En raison de cette forte demande, des congestions peuvent apparaître et comme discuté au chapitre 4.5.2, le temps passé dans les embouteillages en Suisse ne cesse d'augmenter.

Le système de BAU active permet de faire passer cette demande élevée en période de pointe (Chapitre 4.2), améliore les conditions de circulation et a ainsi un impact sur les temps de parcours, qui font l'objet de ce chapitre.

Les données mesurées à disposition n'étant pas suffisantes afin d'établir des temps de parcours (étendue du réseau de comptage, identification individuelle des véhicules), plusieurs approches sont explorées.

7.1 Selon la vitesse moyenne annuelle sur la BAU active

Sur la base de la vitesse moyenne annuelle (Chapitre 4.3), on effectue une première approche des temps de parcours moyens sur le tronçon de la BAU active.

Tab. 11 Approche des temps de parcours basée sur la vitesse moyenne annuelle

Paramètre	Direction Lausanne				Direction Genève			
	2008		2013		2008		2013	
	HPM	HPS	HPM	HPS	HPM	HPS	HPM	HPS
Vitesse moyenne (CH43) [km/h]	96.7	87.8	100.8	95.3	100.4	100.0	101.5	97.0
Rapport à 2008 [%]			-4.2%	-8.5%			-1.1%	+3.0%

Globalement, le système de BAU active a un impact positif en termes de temps de parcours dans la direction de Lausanne, tant en HPM qu'en HPS. Dans la direction de Genève, cette appréciation globale est contrastée avec un impact moyen positif en HPM et un impact négatif en HPS.

Comme spécifié au chapitre 4.3.1, la notion de vitesse moyenne utilisée ne permet pas de constater les congestions visibles en 2008 et donc d'en estimer l'effet sur les temps de parcours.

Il est également important de noter que l'on compare deux situations à 5 ans d'intervalle. La demande (débit) comparée n'est pas identique de même que la limitation légale de vitesse sur le tronçon (120 km/h en 2008, 100 km/h en 2013 en HP). Afin d'obtenir une évaluation dans les mêmes conditions de demande, on effectue l'approche suivante en 2010, lorsque le système a été inactif durant une semaine (Chapitre 7.2).

Les gains réels sur les temps de parcours sont donc bien plus importants que ceux obtenus (Tab. 11) et il est donc proposé de considérer les temps de parcours en conditions de trafic identiques (Chapitre 7.2), les temps de parcours de véhicules de mesure (Chapitre 7.3) ou encore des temps de parcours basés sur les simulations de trafic (Chapitre 7.4).

7.2 Selon des conditions de circulation identiques

Comme décrit dans les chapitres 2.2.6 et 4.5.3, le système de BAU active a été inactif durant 12 jours en décembre 2010. Cette période de fermeture peut être comparée à des périodes durant lesquelles le système était actif et les conditions de circulation identiques du point de vue de la demande de trafic.

Afin d'effectuer cette comparaison, on évalue le temps de trajet sur le tronçon de la BAU active en fonction des vitesses mesurées sur les capteurs SMETRA (Chapitre 2.2.2). On définit pour heure de pointe du matin 07:30 à 08:30 en raison des résultats obtenus précédemment (Chapitre 4.5.3).

Direction Lausanne

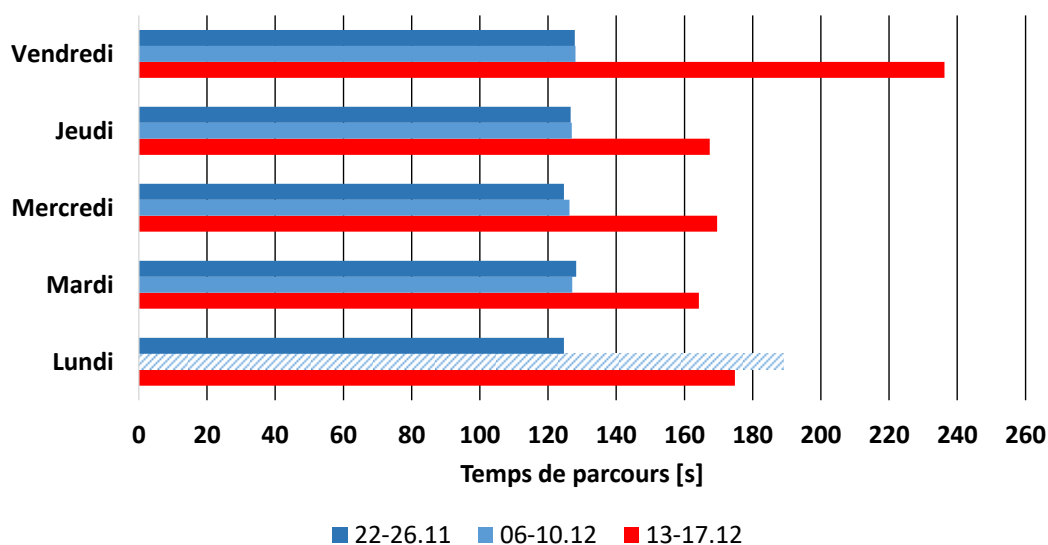


Fig. 118 Comparaison des temps de parcours, HPM, système opérationnel (bleu) / non opérationnel (rouge), direction Lausanne (06.12.2010 : système inactif).

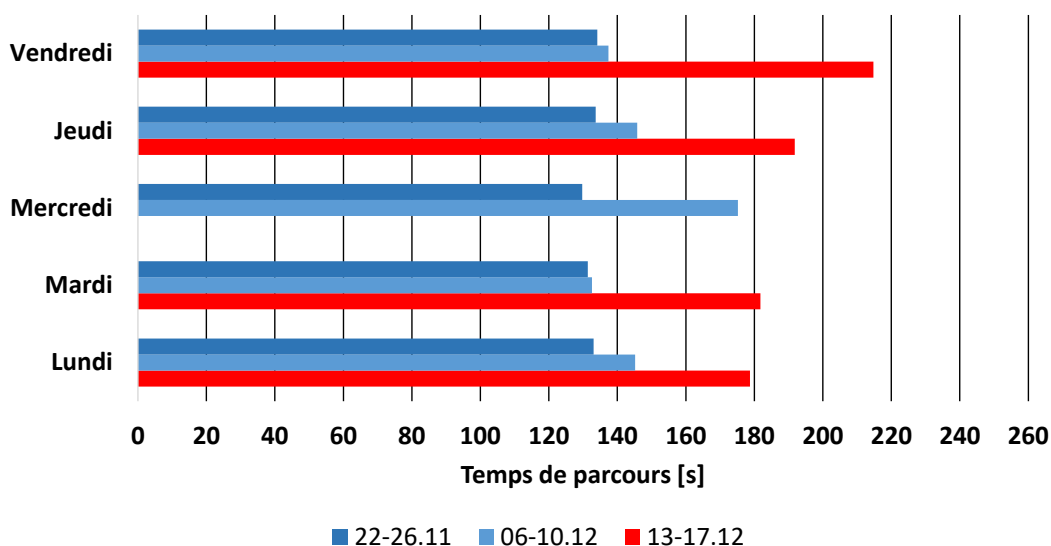


Fig. 119 Comparaison des temps de parcours, HPS, système opérationnel (bleu) / non opérationnel (rouge), direction Lausanne.

Dans la direction de Lausanne, le tronçon de la BAU active mesure 3.725 km et peut être parcouru, à la vitesse légale (100 km/h lorsque le système est actif), en environ 134 secondes.

En moyenne, on constate un gain sur les temps de parcours de 35% tant en HPM qu'en HPS (vendredi non-compris). Le vendredi est la journée où l'on relève la plus grande différence sur les temps de parcours dans la direction de Lausanne avec un gain moyen de 52% (Fig. 118, Fig. 119).

Direction Genève

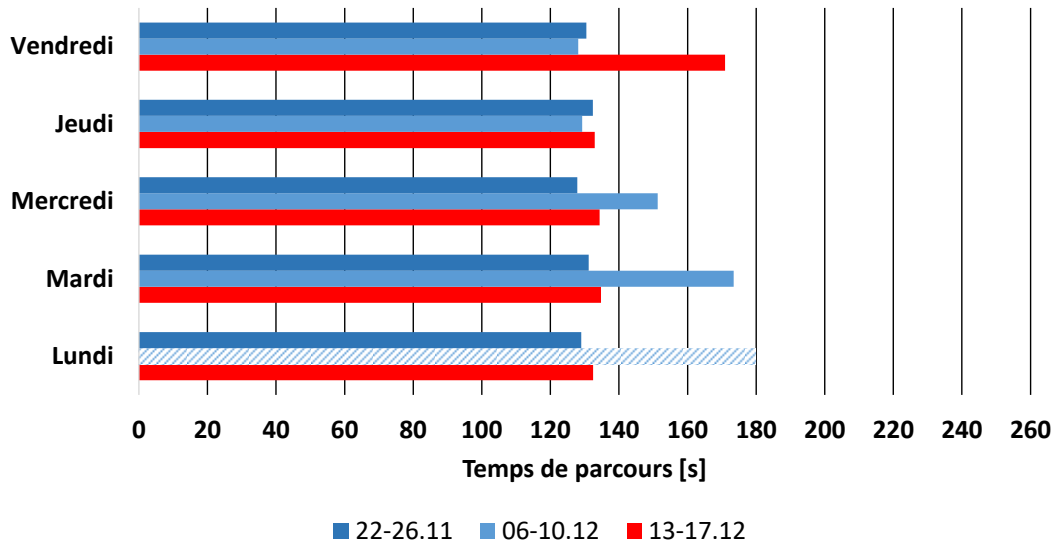


Fig. 120 Comparaison des temps de parcours, HPM, système opérationnel (bleu) / non opérationnel (rouge), direction Genève (06.12.2010 : système inactif).

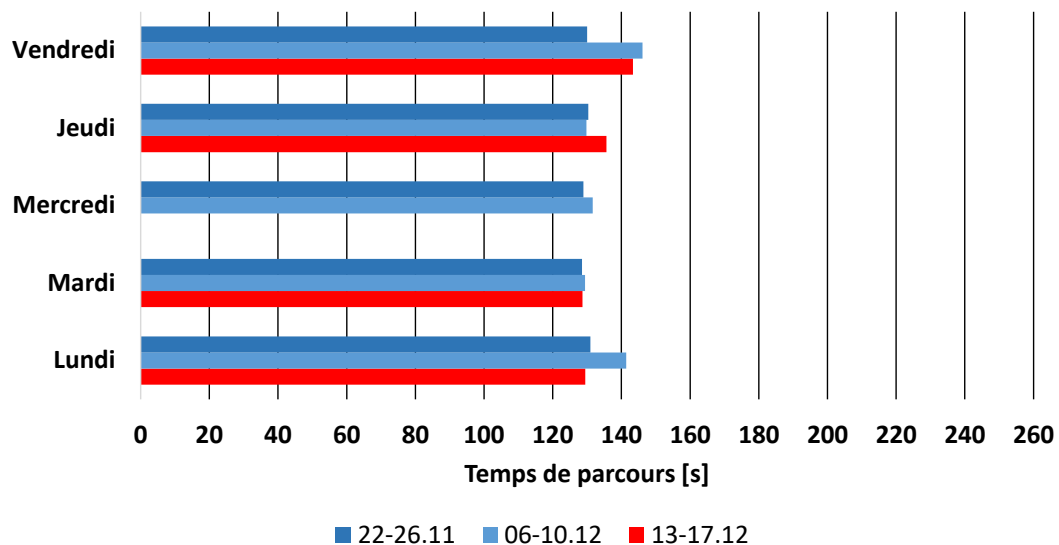


Fig. 121 Comparaison des temps de parcours, HPS, système opérationnel (bleu) / non opérationnel (rouge), direction Genève.

Dans la direction de Genève, le tronçon de la BAU active mesure 3.658 km et peut être parcouru, à la vitesse légale (100 km/h lorsque le système est actif), en environ 132 secondes.

Comme constaté au chapitre 4.5.3 ainsi que sur la base des vitesses moyennes (Tab. 11), il n'est pas possible d'estimer l'effet du système de BAU active dans cette direction, aucune congestion n'étant apparue lorsque le système était non opérationnel.

7.3 Selon le véhicule de mesure

Sur la base de navettes réalisées entre Aubonne et Ecublens en 2010, par comparaison à 2009, les constatations suivantes sont décrites [10] :

- Temps de parcours stables sur la chaussée Jura (Direction Genève), peu de congestions constatées.
- Diminution du temps de parcours sur la chaussée Lac (Direction Lausanne) de 5 minutes en HPM et 5 à 15 minutes en HPS.

Ces constatations sont cohérentes avec les résultats obtenus (Chapitre 7.2).

7.4 Selon les simulations de trafic

Sur la base des simulations de trafic, on effectue une mesure des temps de parcours pour les 3 scénarios établis (Chapitre 6.6).

Tab. 12 Approche des temps de parcours par simulations de trafic, tronçon de la BAU active

Année	2008	2013	Evolution 2008 / 2013	
Débits de la semaine type, jours ouvrés (HPM) [véh/h]				
Direction Genève	3'674	4'468	+21.6%	
Direction Lausanne	3'896	4'449	+14.2%	
Débits de la semaine type, jours ouvrés (HPS) [véh/h]				
Direction Genève	3'967	4'385	+10.5%	
Direction Lausanne	3'739	4'530	+21.2%	
Débits mars-juin, jours ouvrés (HPM) [véh/h]				
Direction Genève	3'585	4'295	+19.8%	
Direction Lausanne	3'620	4'375	+20.9%	
Débits mars-juin, jours ouvrés (HPS) [véh/h]				
Direction Genève	3'860	4'391	+13.8%	
Direction Lausanne	3'591	4'462	+24.3%	
Année	2008	2013	Débit 2013 avec infrastructure 2008	Evolution relative Débit 2013
Temps de parcours simulés de la semaine type, jours ouvrés (HPM) [s]				
Direction Genève	135.3	135.5	147.2	-7.9%
Direction Lausanne	151.5	140.6	Rem.	
Temps de parcours simulés de la semaine type, jours ouvrés (HPS) [s]				
Direction Genève	132.1	133.7	138.2	-3.3%
Direction Lausanne	147.9	143.9	Rem.	
Temps de parcours simulés mars-juin, jours ouvrés (HPM) [s]				
Direction Genève	135.0	133.5	146.7	-9.0%
Direction Lausanne	146.0	139.0	Rem.	
Temps de parcours simulés mars-juin, jours ouvrés (HPS) [s]				
Direction Genève	136.9	133.7	146.8	-8.9%
Direction Lausanne	140.2	142.0	Rem.	

Direction Lausanne

Remarque du Tab. 12 :

Selon les simulations de trafic, l'infrastructure 2008 sans système actif, ne permet pas d'absorber, en fonction de sa configuration, plus de 4'200 véh/h en HP. Pour ce débit, le temps de parcours sur le tronçon du système de BAU active est d'environ 156 secondes sans congestion importante. Toutefois, le système est à la limite de basculer dans un régime saturé et congestionné. Une demande équivalente à celle de 2013, n'aurait donc pu être absorbée sans le système de BAU active et les congestions formées auraient été importantes.

Comme constaté dans le chapitre 4.5.3, une congestion se forme au début du système de BAU active puis celle-ci a tendance à se « détendre ». Cette compression locale (ondes) du flux est due au débit important provenant de Genève qui est amplifié localement par le flux d'entrée de Morges-Est. Dans les simulations de trafic, ce phénomène est également constaté (Fig. 122).

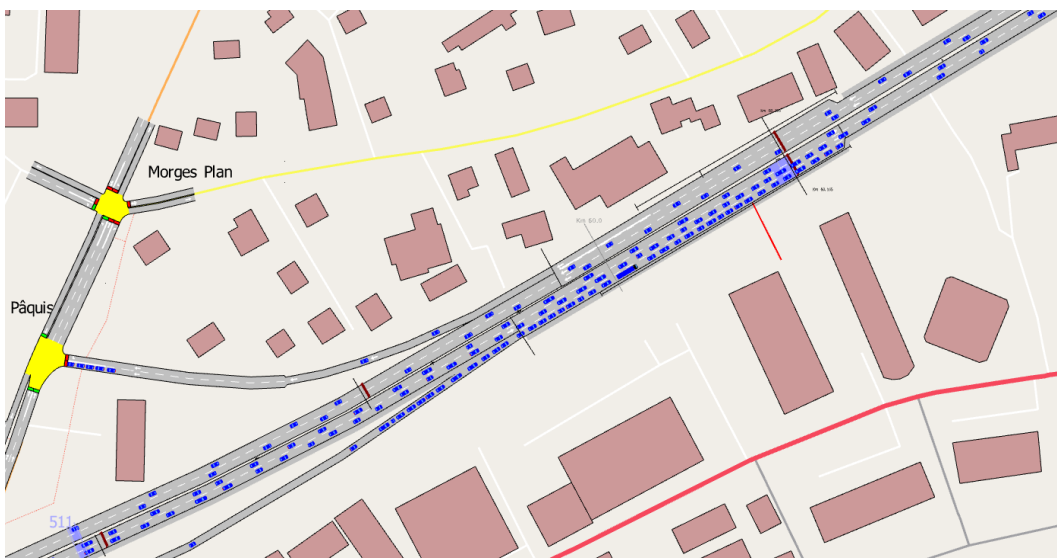


Fig. 122 Compression – détente du flux à l'entrée de Morges-Est, direction Lausanne.

Dans cette direction, il est donc important de s'intéresser non seulement au temps de parcours sur le tronçon du système de BAU active mais également sur la zone d'étude élargie (Chapitre 2.1).

Direction Lausanne – Zone élargie

Sur la zone élargie, entre Aubonne et Crissier (~15 km) on compare pour scénario de base une simulation de trafic avec un débit sur le secteur de la BAU active d'environ 3'700 véh/h (scénario à 100% représentatif de l'année 2008) à un scénario à 122% (soit l'équivalent potentiel d'environ 4'500 véh/h, 2013). Toutefois, comme décrit précédemment, le tronçon de la BAU active ne peut absorber un débit supérieur à 4'200 véh/h, raison pour laquelle le débit mesuré sur le tronçon est plus faible qu'attendu.

Tab. 13 Approche des temps de parcours par simulations de trafic, Aubonne - Crissier

Année	2008	2013	Evolution 2008 / 2013	
Scénario [%]				
Direction Lausanne	100%	122%	+22%	
Année	2008	2013	Débit 2013 avec infrastructure 2008	Evolution relative Débit 2013
Débits simulés CH43 [véh/h]				
Direction Lausanne	3'737	4'498	4'110	
Temps de parcours simulés [s]				
Direction Lausanne	558.5	541.7	749.5	-27.7%

On démontre (Tab. 13) qu'il y a non seulement un gain relatif important sur les temps de parcours d'environ 28% mais que la situation 2013 démontre une amélioration par rapport à la situation 2008 d'environ 3% alors que les débits ont vu une augmentation notable.

Ces résultats suivent la même tendance que celle obtenue à l'aide du véhicule de mesure (Chapitre 7.3).

Direction Genève

Le temps de parcours moins important en HPS pour la semaine type s'explique par le fait que, malgré un débit plus important qu'en HPM, la sortie Morges-Est est plus empruntée le matin ce qui provoque temporairement des remontées de file depuis la sortie sur le tronçon de la BAU active. Cette tendance est notamment visible lors de la semaine type sélectionnée.

On constate dans cette direction une tendance identique à celle mesurée à l'aide du véhicule de mesure, à savoir que les temps de parcours sont stables entre la situation sans système de BAU active et la situation avec le système de BAU active.

De par les simulations de trafic, on estime qu'un gain sur les temps de parcours de 8-9% a été réalisé grâce à la mise en service du système de BAU active comparativement à l'infrastructure sans système actif.

7.5 Synthèse des temps de parcours

Tout d'abord, il est important de mentionner que les gains sur les temps de parcours sont cohérents que l'on considère les temps de parcours en conditions de trafic identiques (Chapitre 7.2), les temps de parcours de véhicules de mesure (Chapitre 7.3) ou encore les temps de parcours basés sur les simulations de trafic (Chapitre 7.4).

Dans la direction de Genève, l'effet du système de BAU active sur les temps de parcours reste peu important (gain de 8-9%) voir nul. Toutefois, l'ouverture de la BAU à la circulation permet de « gérer » le phénomène de remontée de file depuis la sortie de Morges-Est, phénomène visible sur les simulations de trafic et dans la réalité du terrain qui aurait impliqué des congestions conséquentes et une diminution de la sécurité (flux à l'arrêt sur la voie de droite) (Fig. 123).

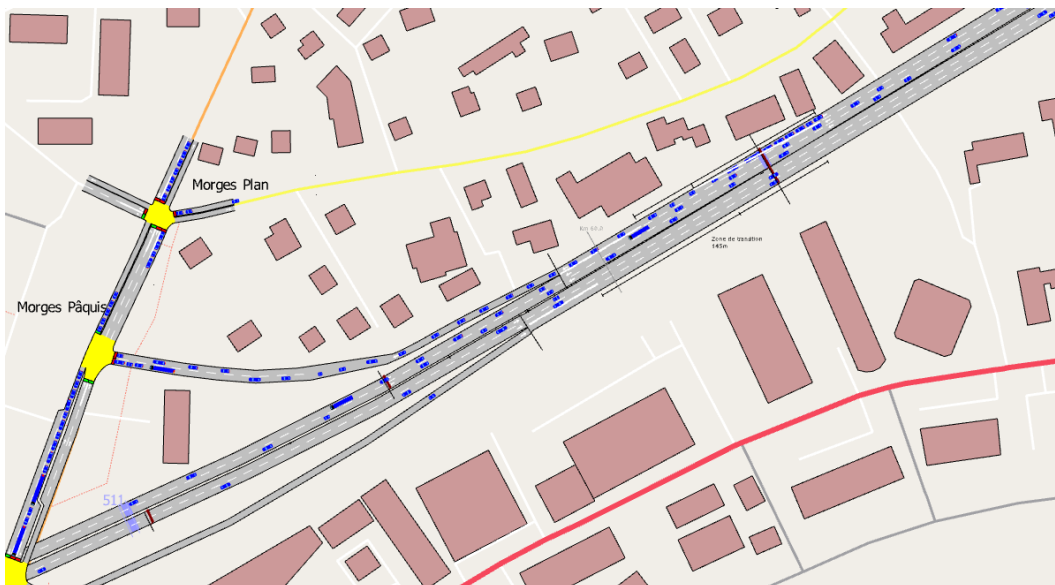


Fig. 123 Formation de remontée de file de la sortie Morges-Est, direction Genève.

Dans la direction de Lausanne, l'effet du système de BAU active sur les temps de parcours est conséquent. L'infrastructure sans système actif n'aurait pas permis d'absorber la demande en HP et des congestions de plus en plus importantes auraient été constatées. Les gains sur les temps de parcours estimés dans cette direction se montent à environ 25-50% en fonction des jours considérés (globalement ~30%).

8 Impact sur l'environnement

La combustion de l'essence ou du diesel dans le moteur d'un véhicule implique le rejet de gaz d'échappement. Bien que certaines des substances générées par ce processus de combustion soient non-toxiques (inoffensives) telle la vapeur d'eau, d'autres substances émises sont nocives telles le monoxyde de carbone (CO), les oxydes d'azote (NO_x), les particules fines (PM), les composés organiques volatils (COV), etc.

On parle également de gaz d'échappement dans le cas du dioxyde de carbone (CO₂), principal gaz à effet de serre. Celui-ci n'est pas directement toxique pour l'être humain mais est une des causes principales des changements climatiques.

La gestion dynamique du trafic appliquée dans le cas présent par un système de BAU active permet d'améliorer les conditions de trafic, a un effet sur les émissions de polluants et donc un impact environnemental.

L'impact environnemental ne pouvant être calculé sur la base des données à disposition, plusieurs approches sont effectuées.

8.1 Tendence générale selon rapport de l'OFEV

L'Office fédéral de l'environnement (OFEV) a publié en 2010 un rapport concernant les émissions polluantes du trafic routier entre 1990 et 2035 [37].

Fig. A > Evolution des émissions de 1990 à 2035 par catégories de véhicules

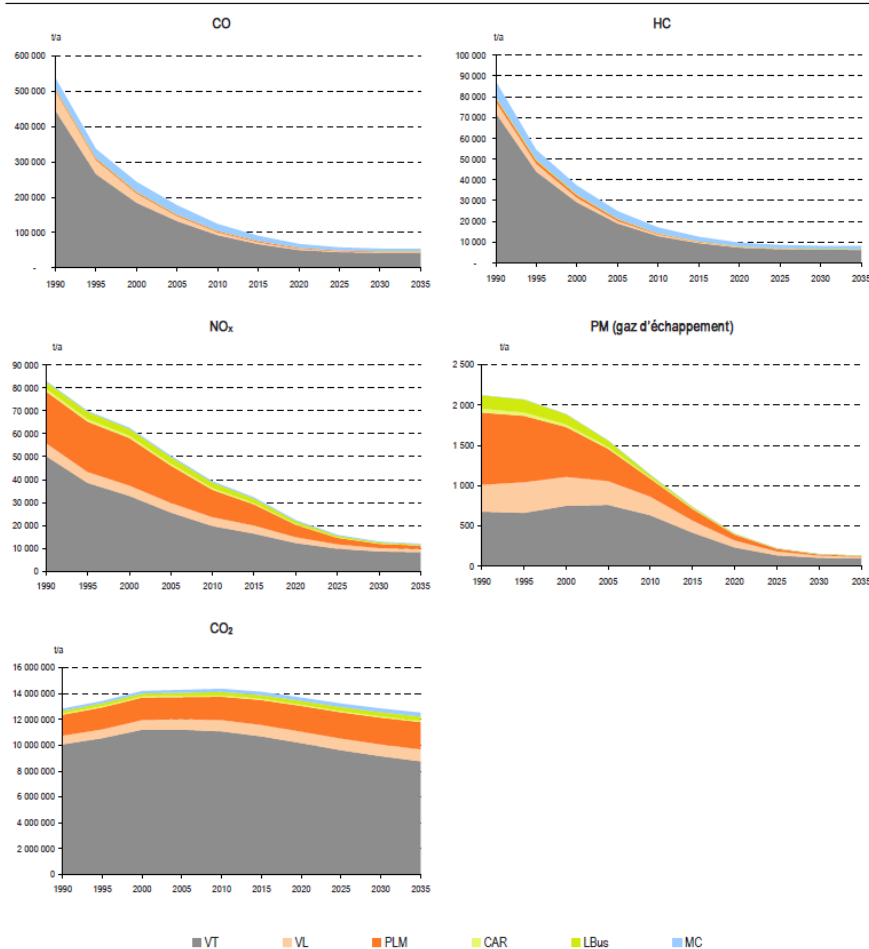


Fig. 124 Principales émissions polluantes du trafic routier par catégories de véhicules [37].

Malgré une croissance du trafic prévisionnelle, les tendances des émissions de polluants sont à la baisse (Fig. 124). Cela provient principalement des diminutions des valeurs limites fixées sur les véhicules.

Concernant les émissions de CO₂, on constate une tendance particulière liée d'une part à l'augmentation du parc automobile et d'autre part à la diminution de consommation de carburant par véhicule (efficacité).

Dans le cadre de ce rapport de l'OFEV, les calculs d'émissions ont été effectués sur la base du modèle MICET (Manuel informatisé des coefficients d'émission du trafic routier, INFRAS, Berne). Ce modèle permet de déterminer, en fonction de conditions de circulation, d'une catégorie de véhicule et d'un type de route, les coefficients d'émissions de polluants.

L'évolution du parc automobile n'est pas considérée dans le cadre la présente étude. En effet, les tendances étudiées ci-après ont pour but de comparer l'impact environnemental direct de l'ouverture de la BAU à la circulation.

8.2 Prédications selon les courbes du SETRA

Le service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements (Sétra), regroupé dans le CEREMA a publié en 2009 une note d'information sur les émissions routières de polluants atmosphériques [47]. Ce document contient notamment des courbes d'émissions de polluants en fonction du type de véhicule (véhicule léger, poids lourds), de sa vitesse et de l'année du parc automobile considéré (Fig. 125, Fig. 126, Fig. 127).

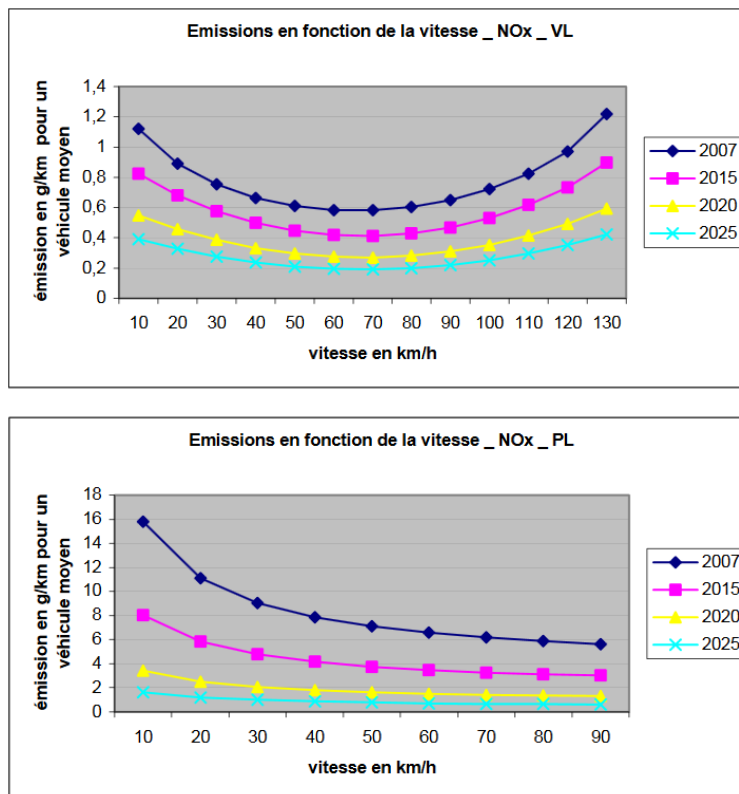


Fig. 125 Emissions de NO_x en fonction de la vitesse (VL / PL) [47].

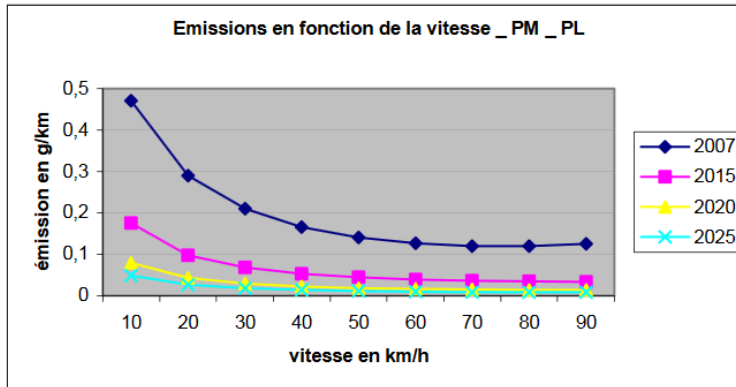
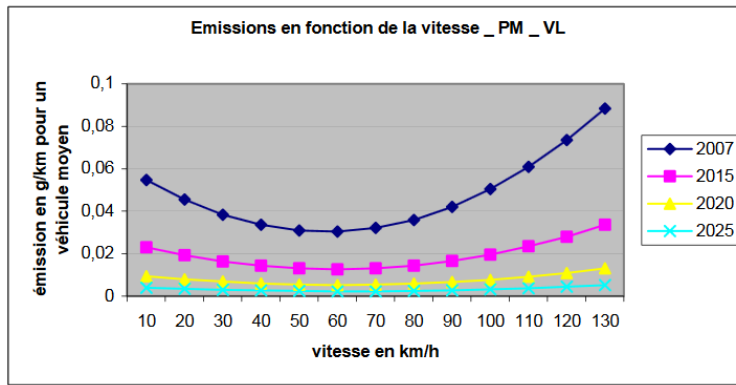


Fig. 126 Emissions de PM en fonction de la vitesse (VL / PL) [47].

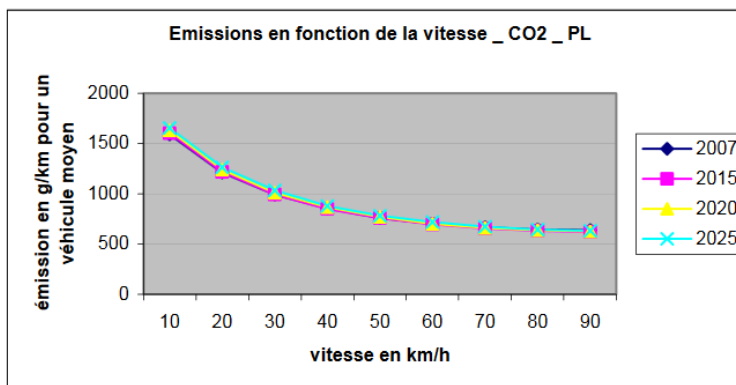
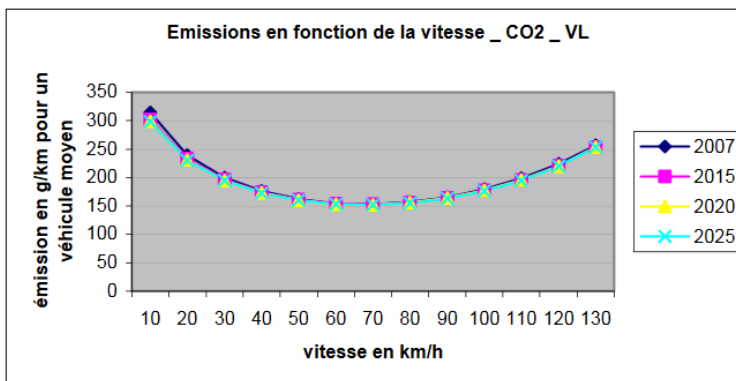


Fig. 127 Emissions de CO₂ en fonction de la vitesse (VL / PL) [47].

Comme on peut le constater sur les Fig. 125, Fig. 126 et Fig. 127, la vitesse optimale du point de vue des émissions de polluants des véhicules légers se situe aux alentours de 60-70 km/h. Ce qui signifierait, en termes purs de vitesses, que les vitesses moyennes obtenues en 2008, plus faibles que celles de 2013 (Chapitres 4.3 et 7.4), auraient un effet positif sur l'impact environnemental.

Toutefois, il est important de constater qu'il est considéré dans ces courbes, à haute vitesse, que la circulation est en régime fluide, c'est-à-dire sans phases d'accélération respectivement de décélération marquées. Dans le cas de congestion, ces phases sont présentes et ont donc un impact conséquent sur les émissions de polluants.

Pour cette raison, il n'est donc pas judicieux d'effectuer une comparaison de l'impact environnemental en considérant uniquement les vitesses de circulation. Pour cela, on propose donc d'effectuer les prédictions de l'impact environnemental sur la base des simulations de trafic (Chapitre 8.3).

8.3 Prédications sur la base des simulations de trafic

Sur la base des simulations de trafic (Chapitre 6), on effectue trois approches sur les semaines types en heure de pointe en fonction des trois modèles environnementaux implémentés dans le logiciel AIMSUN soit :

- Modèle de consommation de carburant.
- Modèle d'émission de polluants QUARTET.
- Modèle d'émission Paris et al.

Les résultats des modélisations sont présentés sous la forme d'une comparaison relative rapportée au débit entre :

- Débit 2013 avec système actif.
- Débit 2013 sur infrastructure 2008 (sans système actif).

Les débits introduits dans la zone de la BAU active étant limités notamment dans la direction de Lausanne (Chapitre 7.4), on effectue également des comparaisons sur la zone d'étude élargie (Chapitre 2.1) :

- Direction Genève : scénario moyen potentiel 2013 à 116% (4'380 véh/h).
- Direction Lausanne : scénario moyen potentiel 2013 à 122% (4'500 véh/h).

Les scénarios potentiels 2013 sont rapportés à un débit référence 2008 de 100% (3'770 véh/h dans la direction Genève, 3'700 véh/h dans la direction Lausanne). Les débits sont indiqués pour le capteur CH43 situé dans la zone de la BAU active.

8.3.1 Modèle de consommation de carburant

Ce modèle est basé sur les consommations de carburant en fonction des conditions de circulation du véhicule (véhicule au pas, phases d'accélération, phases de décélération, consommation à 90 km/h, à 120 km/h). Dans le cas présent, on utilise les valeurs directement proposées dans le logiciel AIMSUN.

Tab. 14 Comparaison de consommation de carburant

Evolution relative 2013 / 2013 avec infrastructure 2008	
Semaine type, jours ouvrés (HPM), zone BAU active	
Direction Genève	-55.6%
Semaine type, jours ouvrés (HPS), zone BAU active	
Direction Genève	-54.3%
Zone d'étude élargie	
Direction Genève	-28.3%
Direction Lausanne	-40.1%

On constate tout d'abord que l'impact sur la zone de la BAU active est plus marqué (d'environ 2 fois) que sur la zone d'étude élargie (Tab. 14). En effet, l'ouverture de la BAU à la circulation a permis, entre Ecublens et Morges-Est, de diminuer la consommation de carburant par des conditions plus fluides tandis que les tronçons adjacents et la zone d'étude élargie présentent des conditions de circulation moins favorables.

Sur la zone de la BAU active, le gain est important. Si l'infrastructure en 2x2 voies avait été conservée, en 2013, la consommation de carburant aurait été en tous cas 2 fois plus élevée qu'avec la mise en service du système de BAU active. La direction de Lausanne n'a pu être évaluée sur la zone de la BAU active (Chapitre 7.4) mais laisse présager un gain encore plus important (Estimation du gain global : ~65%).

8.3.2 Modèle d'émission de polluants QUARTET

Ce modèle est basé sur les résultats du projet « Quadrilateral Advanced Research on Telematics for Environment and Transport, QUARTET » du Service Communautaire d'Information sur la Recherche et le Développement CORDIS.

Il tient compte des émissions de monoxyde de carbone (CO), des oxydes d'azote (NO_x) et des hydrocarbures imbrûlés (HC), un composé organique volatil.

Les données de ce modèle d'émissions proposées dans le logiciel de simulations conviennent bien aux situations urbaines et extra-urbaines jusqu'à une vitesse légale de 80 km/h. Dans le cas présent, sur autoroute, on ne considérera pas ce modèle.

8.3.3 Modèle d'émission de polluants Panis et al.

Ce modèle est basé sur les résultats d'une recherche intitulée « Modelling instantaneous traffic emission and the influence of traffic speed limits » [50].

Sont considérées dans ce modèle les émissions de dioxyde de carbone (CO₂), les oxydes d'azotes (NO_x), les composés organiques volatils (COV) ainsi que les particules fines (PM).

Tab. 15 Comparaisons d'émissions polluantes

Evolution relative 2013 / 2013 avec infrastructure 2008				
	CO ₂	NO _x	PM	COV
Semaine type, jours ouvrés (HPM), zone BAU active				
Direction Genève	-44.7%	-37.2%	-75.4%	-16.9%
Semaine type, jours ouvrés (HPS), zone BAU active				
Direction Genève	-41.0%	-40.9%	-73.5%	-11.6%
Zone d'étude élargie				
Direction Genève	-25.5%	-16.1%	-52.4%	-21.9%
Direction Lausanne	-33.4%	-15.7%	-77.1%	-21.7%

Sur la zone d'étude élargie, seules sont considérées les statistiques relatives aux véhicules ayant parcouru l'entier du chemin Crissier – Aubonne, raison pour laquelle les tendances obtenues peuvent différer de celles de la zone de la BAU active et également entre les directions en raison des caractéristiques des véhicules et des conditions locales de circulation (Tab. 15).

On constate que pour toutes les émissions polluantes considérées, la mise en service du système de BAU active a eu un effet bénéfique.

8.4 Etude d'impact sur la qualité de l'air

Le service des routes du Canton de Vaud a donné mandat à la société SEDE SA (Société d'Étude et d'Environnement) d'effectuer une étude d'impact sur la qualité de l'air dans la zone de la BAU active [51].

Cette étude a été effectuée par comparaison des périodes suivantes :

- Mars à août 2009 (période d'observation réduite aux mois d'avril et mai 2009 en raison des travaux).
- Mars à août 2010.

Les résultats suivants sont constatés :

- Diminution des concentrations de dioxyde d'azote par véhicule à proximité immédiate de l'autoroute de l'ordre de 19% impliquée par la mise en service du système de BAU active.
- Estimation d'une diminution de NO_x de l'ordre de 23% en périodes de pointe due à la suppression de congestion.
- Diminution de l'impact de NO₂ par véhicule de 25% sur la base des immissions mesurées en considérant uniquement l'impact de l'autoroute.
- L'impact sur les particules fines n'a pu être déterminé (aucune mesure, diversité des particules).

Il est également constaté que par comparaison des capteurs situés à proximité immédiate de la zone de la BAU active entre 2009 et 2010, les différences mesurées du côté « JURA » sont plus importantes que celles mesurées côté « LAC », ces dernières étant de plus positives (augmentation de la concentration de NO₂) (Fig. 128).

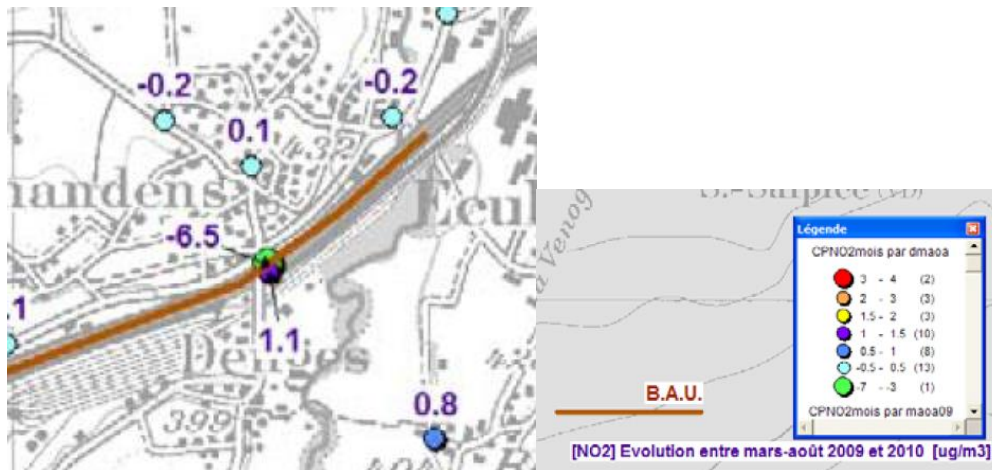


Fig. 128 Concentrations moyennes de NO_2 , période mars-août, comparaison 2009-2010, à proximité du capteur CH43 [51].

8.4.1 Evaluation 2009-2010 selon simulations de trafic

Afin de vérifier la concordance des estimations basées sur les simulations de trafic avec les données analysées et mesurées dans l'étude d'impact sur la qualité de l'air, une comparaison des scénarios suivants sur la zone de la BAU active est effectuée :

- Débit moyen mars-juin 2009. Infrastructure sans système de BAU active.
- Débit moyen mars-juin 2010. Infrastructure avec système de BAU active.

Tab. 16 Comparaisons d'émissions polluantes

	Evolution relative 2010 / 2009			
	CO_2	NO_x	PM	COV
Mars-juin, jours ouvrés (7h30 – 09h00), zone BAU active				
Direction Genève	-40.3%	-35.1%	-75.5%	-12.1%
Direction Lausanne	-27.8%	-15.8%	-83.9%	-1.4%
Mars-juin, jours ouvrés (17h00 – 19h00), zone BAU active				
Direction Genève	-37.9%	-32.4%	-69.5%	-12.1%
Direction Lausanne	-25.5%	-12.7%	-77.8%	-0.7%
Mars-juin, jours ouvrés (07h30 – 09h00 et 17h00 – 19h00), zone BAU active				
Global	-33.2%	-25.0%	-76.0%	-6.7%

Les résultats obtenus (Tab. 16) sont proches de ceux de l'étude d'impact réalisée à proximité du secteur de la BAU active (Chapitre 8.4). Sur cette base, le modèle de simulation d'émissions peut donc être considéré comme valide (pour les concentrations d'oxydes d'azote tout du moins).

8.5 Synthèse de l'impact sur l'environnement

Il est tout d'abord intéressant de relever que les estimations fournies sur la base des simulations de trafic produisent les mêmes tendances que celles obtenues par l'étude d'impact de la qualité de l'air portant sur les années 2009-2010 (Chapitre 8.4, [51]).

Par comparaison d'un débit 2013 sur une infrastructure 2x2 voies à une infrastructure 2x3 voies en périodes de pointe (avec système de BAU active), on obtient les résultats suivants qui représentent une borne inférieure de gain sachant que la direction de Lausanne n'a pu être simulée pour le trafic en 2x2 voies (Chapitre 7.4, résultats uniquement basés sur la direction Genève) :

Sur la zone de la BAU active :

- Diminution de moitié de la consommation de carburant (estimation deux directions : ~65%).
- Diminution d'environ 40% des émissions de CO₂ et de NO_x.
- Diminution d'environ 75% des particules fines (PM).
- Diminution d'environ 13% des composés organiques volatils (VOC).

Sur la zone élargie :

- Diminution d'environ 28 – 40% de la consommation de carburant.

La mise en service du système de BAU active a donc eu un effet conséquent sur la consommation de carburant ainsi que sur les émissions polluantes de par l'amélioration des conditions de circulation.

9 Impact sur la sécurité

En termes de sécurité, la réaffectation d'une BAU en voie de circulation supplémentaire implique des éventuels déficits de sécurité qui doivent alors être compensés par des mesures adéquates (places d'arrêt d'urgence, surveillance vidéo, etc.) (Chapitre 2.1, [3]). Malgré ces éventuels déficits, il a été remarqué que seuls 24% des usagers se sentent moins en sécurité qu'avant la mise en place du système (Chapitre 5.1).

Le but de ce chapitre est de mettre en évidence l'impact du système de BAU active sur la sécurité du tronçon.

9.1 Analyse des temps intervéhiculaires

Le temps intervéhiculaire est un paramètre du comportement des usagers qui joue un rôle important dans la sécurité d'un tronçon. En effet, si les véhicules se suivent de trop près, en cas de freinage ou de modification de trajectoire, la probabilité d'accident et notamment de tamponnement augmente.

Selon la loi sur la circulation routière (LCR, [1]), article 34 al. 4, le conducteur observera une distance suffisante envers tous les usagers de la route, notamment pour croiser, dépasser et circuler de front ou lorsque les véhicules se suivent. Selon l'article 12 al. 1 de l'OCR [2], lorsque les véhicules se suivent, le conducteur se tiendra à une distance suffisante du véhicule qui le précède, afin de pouvoir s'arrêter à temps en cas de freinage inattendu. La notion de distance de sécurité ou de temps intervéhiculaire n'est donc pas définie légalement en termes de chiffres. Toutefois, selon un arrêt du Tribunal fédéral (ATF 131 IV 133), il est reconnu que les minima standards sont :

- La règle des deux secondes.
- La règle du « demi compteur », soit 1.8 secondes.

Le temps intervéhiculaire a été analysé en distinguant les catégories de véhicules afin de mettre en évidence une éventuelle différence de comportement entre les véhicules légers et les véhicules poids lourds. Une première analyse a été effectuée sur le mois de juin 2008, avant la mise en service du système, puis une seconde analyse a été réalisée sur le mois de juin 2013 afin de constater un éventuel changement de comportement avec l'ouverture de la troisième voie en période de pointe.

Les analyses sont effectuées sur les données du capteur CH43, seul capteur sur le tronçon de la BAU active disponible en 2008, qui distingue les catégories de véhicules et fournit le temps intervéhiculaire (Chapitre 2.2.4). Les jours ouvrables du mois de juin de chaque année sont analysés sur les périodes de pointe de la journée, à savoir de 6h00 à 9h00 pour la période de pointe du matin et de 16h30 à 19h30 pour celle du soir.

9.1.1 Comportement des usagers en 2008 (avant la mise en service)

Les médianes³ des temps intervéhiculaires des catégories poids lourds et des voitures de tourisme pour le mois de juin 2008 sont décrites dans la Fig. 129.

³ Une analyse sur les médianes permet de réduire l'influence des valeurs extrêmes notamment celles qui, dans le cas de congestions, peuvent influencer de manière importante les valeurs moyennes.

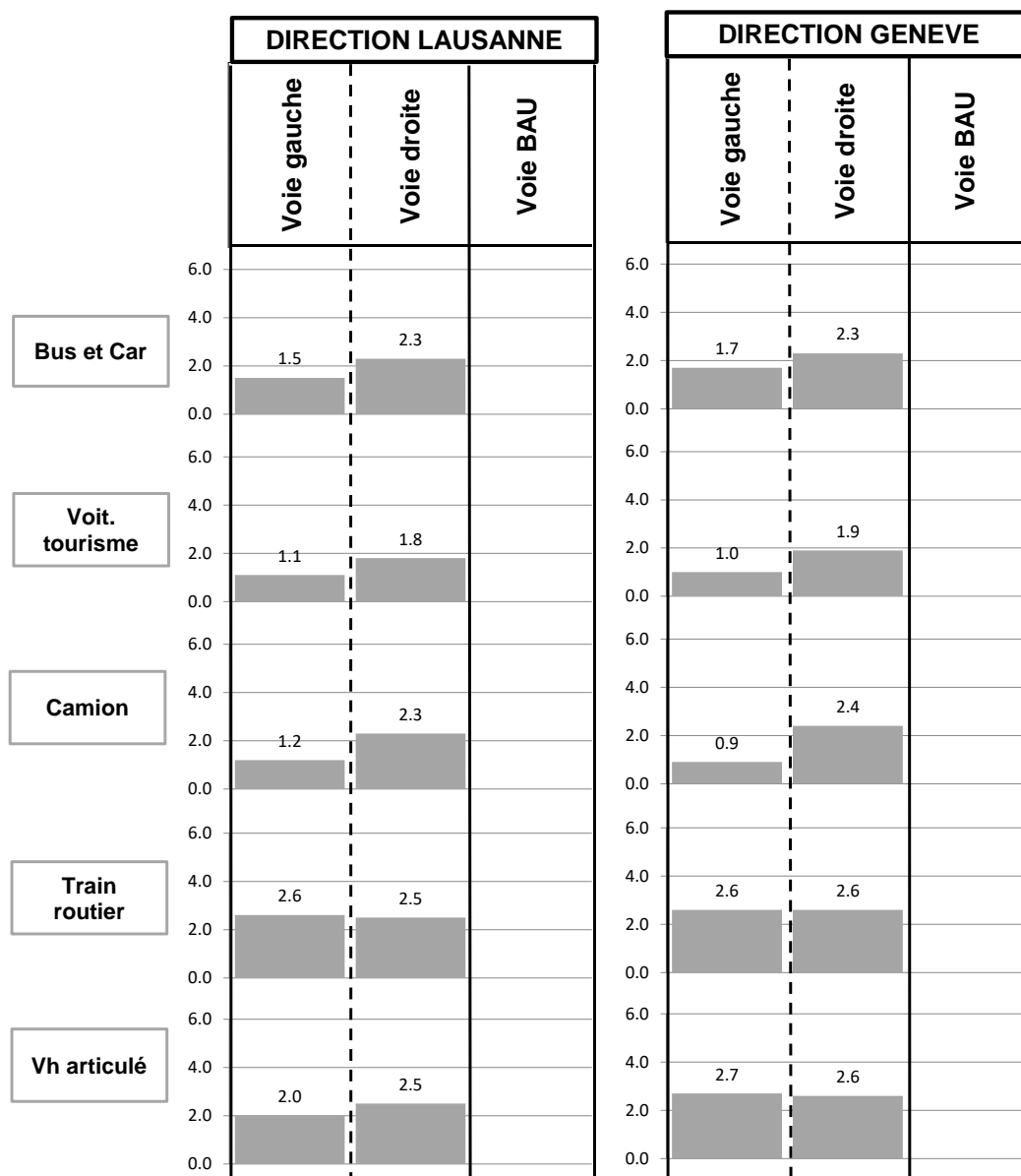


Fig. 129 Médianes des temps intervéhiculaires (s) par catégories de véhicules, périodes de pointe, juin 2008, CH43.

On constate (Fig. 129), de manière générale, que les poids lourds respectent les 2 secondes de sécurité sur la voie de droite. Sur la voie de droite toujours, les temps intervéhiculaires des voitures de tourisme sont légèrement inférieurs aux 2 secondes mais en restent proches.

Sur la voie de gauche, on constate que la distance de sécurité n'est globalement pas respectée avec un temps intervéhiculaire de 1 seconde pour les voitures de tourisme et les camions. Les résultats de la catégorie poids lourds sont à considérer avec précaution puisque seulement un faible échantillon de véhicules circule sur cette voie (environ 8-10% du flux de poids lourds).

9.1.2 Comportement des usagers en 2013 (3 ans après la mise en service)

La même analyse est effectuée sur les données de juin 2013 (Fig. 130).

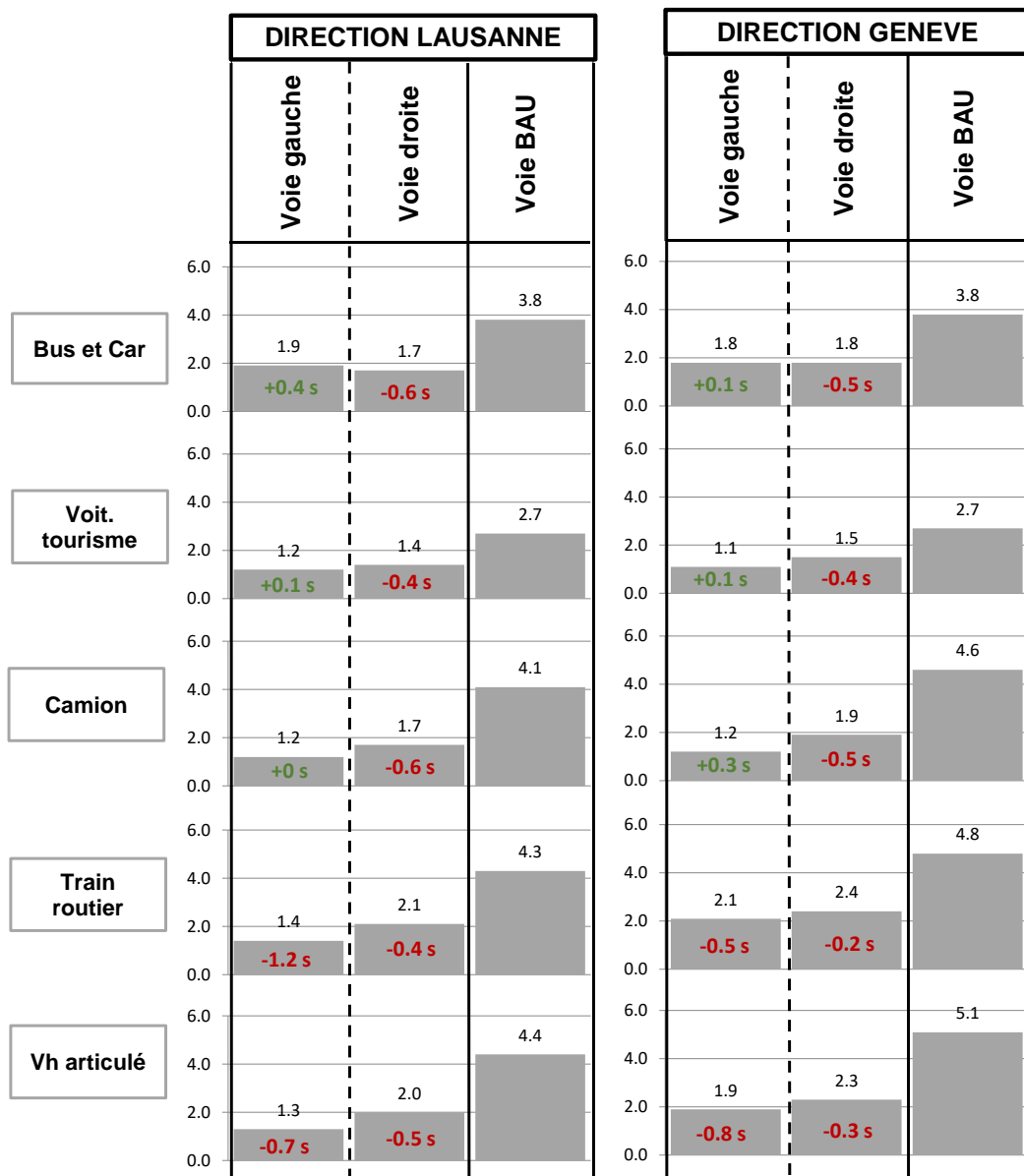


Fig. 130 Médiannes et comparaison des temps intervéhiculaires (s) par catégories de véhicules, périodes de pointe, juin 2013, comparaison par rapport à juin 2008, CH43.

La BAU étant la voie la moins empruntée par les véhicules (Chapitre 5.2), les temps intervéhiculaires sur cette voie sont significativement plus élevés que ceux des autres voies. De manière générale, les 2 secondes de sécurité y sont amplement respectées.

La voie de gauche est la voie où les temps intervéhiculaires sont les plus faibles et souvent inférieurs au temps de sécurité, même pour les catégories poids lourds. Les résultats des catégories poids lourds sur la voie de gauche sont également à considérer avec précaution puisque seulement un très faible échantillon de véhicules circule sur cette voie (environ 6% du flux de poids lourds).

La catégorie des voitures de tourisme est toujours celle qui possède les temps intervéhiculaires les plus faibles.

En comparaison à 2008, on constate que les temps intervéhiculaires des voitures de tourisme sont en légère augmentation sur la voie de gauche, ce qui va dans le sens de la sécurité. Sur la voie de droite (voie centrale dans le cas présent), on constate que les temps intervéhiculaires ont diminué en moyenne d'environ 0.4 à 0.5 secondes. Toutefois, sur cette voie, on reste relativement proche des distances de sécurité, excepté pour les voitures de tourisme.

9.1.3 Synthèse de l'analyse des temps intervéhiculaires

Globalement, on note une légère amélioration des temps intervéhiculaires sur la voie gauche et une diminution des distances de sécurité sur la voie de droite (voie centrale). Sur la BAU, on note que les temps intervéhiculaires sont plus de 2 fois plus importants que sur les autres voies. Ces différents phénomènes peuvent s'expliquer par :

- Une utilisation encore relativement faible de la 3^{ème} voie (Chapitre 5.2) qui implique des espaces intervéhiculaires plus importants.
- Un flux à vitesse plus régulière sur la voie de droite (voie centrale) en raison de l'utilisation de la 3^{ème} voie par les véhicules les plus lents et les poids lourds. Lorsque les vitesses sont homogènes, les temps intervéhiculaires ont tendance à diminuer.
- Une répartition du débit en période de pointe sur 3 voies au lieu de 2, ce qui détend légèrement la circulation sur la voie de gauche (LFDR moins important à débit total identique, Fig. 67, Fig. 68, Fig. 69).

L'effet du système de BAU active sur les temps intervéhiculaires est globalement positif (détente du flux sur la voie de gauche), bien que très faiblement marqué.

9.2 Accidentologie

Des études de l'évolution des accidents sur le secteur de la BAU active ont été menées afin de déterminer l'impact de la mise en service du système.

Etudes de RGR Robert-Grandpierre et Rapp S.A. [8] [10]

Selon [10], il a été relevé par comparaison des mois de février à avril 2010 à ceux de 2008 une diminution du taux d'accident de 70 à 86% tant en heures de pointe qu'en heures creuses. Le nombre d'accidents relevés dans ce laps de temps est relativement faible (2 accidents répertoriés / 1 non répertorié chaussée JURA et 1 accident répertorié chaussée LAC).

Sur la base des relevés statistiques fournis par la police cantonale vaudoise, un an après la mise en service du système de BAU active [8], on constate par rapport à l'année 2008 :

- Une diminution annuelle de 22% des accidents sur la chaussée JURA.
- Une diminution annuelle de 46% des accidents sur la chaussée LAC.
- Une augmentation en période de pointe de 20% sur la chaussée JURA (+ 1 accident).
- Une diminution en période de pointe de 30% sur la chaussée LAC (- 3 accidents).

Sur les tronçons adjacents, on constate :

- Une augmentation du nombre d'accidents au niveau de l'échangeur d'Ecublens (+ 4 accidents) sur la chaussée LAC. Toutefois, il a été démontré que le système de BAU active n'a aucune influence sur ces accidents.
- Une diminution significative (-80%) au niveau de l'entrée de Morges-Est chaussée LAC et de l'aire de repos de La Taillaz.

Il faut toutefois noter que les auteurs de [8] restent prudents quant à expliquer l'effet du système de BAU active sur les diminutions d'accidents constatées.

Travaux de master liés au projet de recherche [22] [23]

Deux autres travaux de master liés à ce projet de recherche ont été menés au sein du LAVOC. Il s'agit du travail de H. Bordes intitulé « Etude de la sécurité routière du bassin lémanique et comparaisons internationales » [22] et de B. Dumont intitulé « Efficacité de la bande d'arrêt d'urgence entre Morges et Ecublens » [23].

Les données utilisées dans le cadre de ces travaux de master sont issues de la base de données de l'application MISTRA VU (Chapitre 2.2.5) pour [22] et des fiches de la police cantonale vaudoise pour [23]. Des différences entre ces deux bases de données ne sont pas exclues.

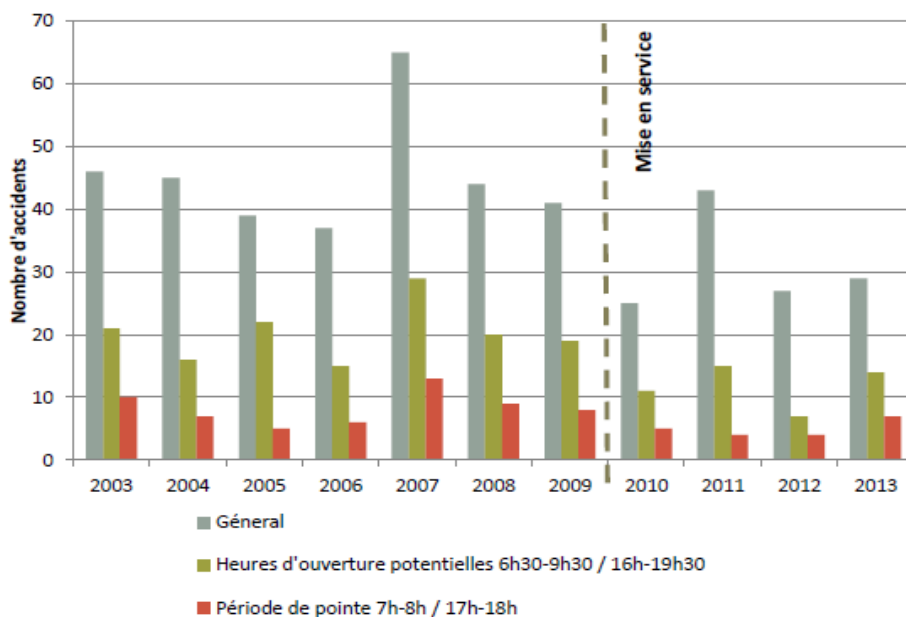


Fig. 131 Evolution annuelle du nombre d'accidents, BAU active, deux directions confondues [22].

Selon [22], on ne constate pas de différence majeure de tendance du point de vue accidentologie entre les différentes périodes de la journée (général, heures potentielles d'ouverture, HP, Fig. 131). A la mise en service, en 2010, le nombre d'accidents répertoriés a chuté pour atteindre 25 accidents annuels. On relève en 2011 une situation quasi identique à celle de 2009 avant une nouvelle diminution en 2012 puis une légère augmentation en 2013.

Les principales causes d'accidents relevées sur le secteur de la BAU active sont :

- Le manque d'attention momentané.
- L'influence de l'alcool.
- Distance intervéhiculaire insuffisante.
- Conduite inadaptée aux conditions de la route (verglas, pluie, feuilles, etc).
- Vitesse inadaptée aux conditions du trafic.

Comme décrit au chapitre 5.3, les zones d'entrées et de sorties du système de BAU active peuvent être d'éventuelles zones de conflit. Dans la direction de Lausanne, on relève une zone critique pour les années 2010-2013 au niveau de l'entrée d'autoroute de Morges-Est, avec trois accidents liés à du tamponnement par l'arrière sur une zone restreinte (Fig. 132).

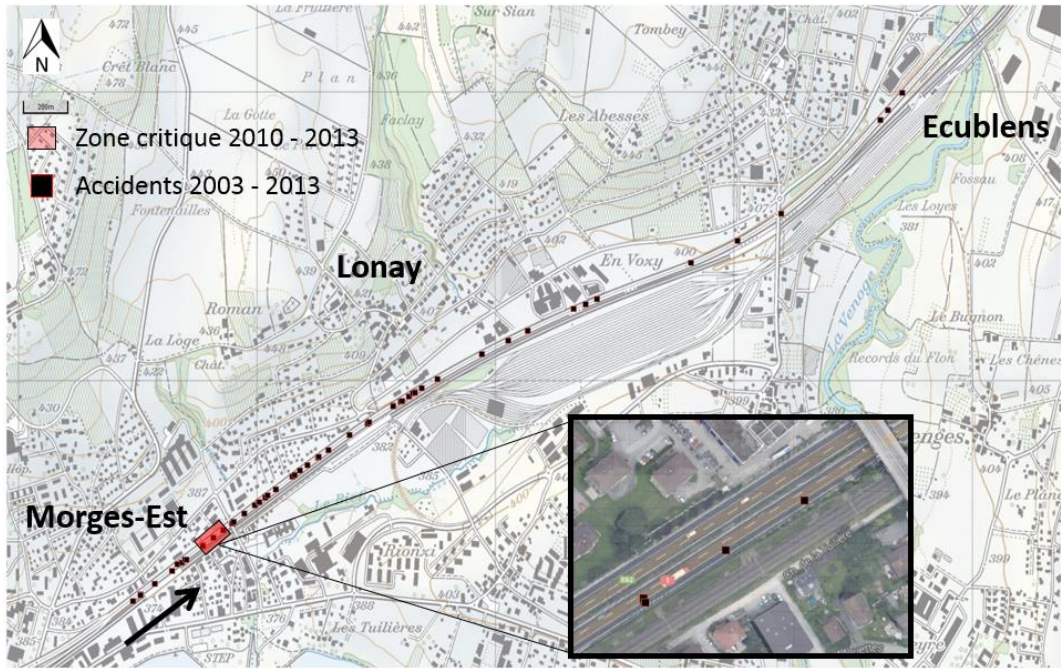


Fig. 132 Zone critique d'accidents dus au tamponnement, direction Lausanne [22].

Dans la direction de Genève, deux zones critiques sont mises en évidence à nouveau en raison du tamponnement. La première face à la gare de triage de Denges et la seconde avant la sortie de Morges-Est (Fig. 133).

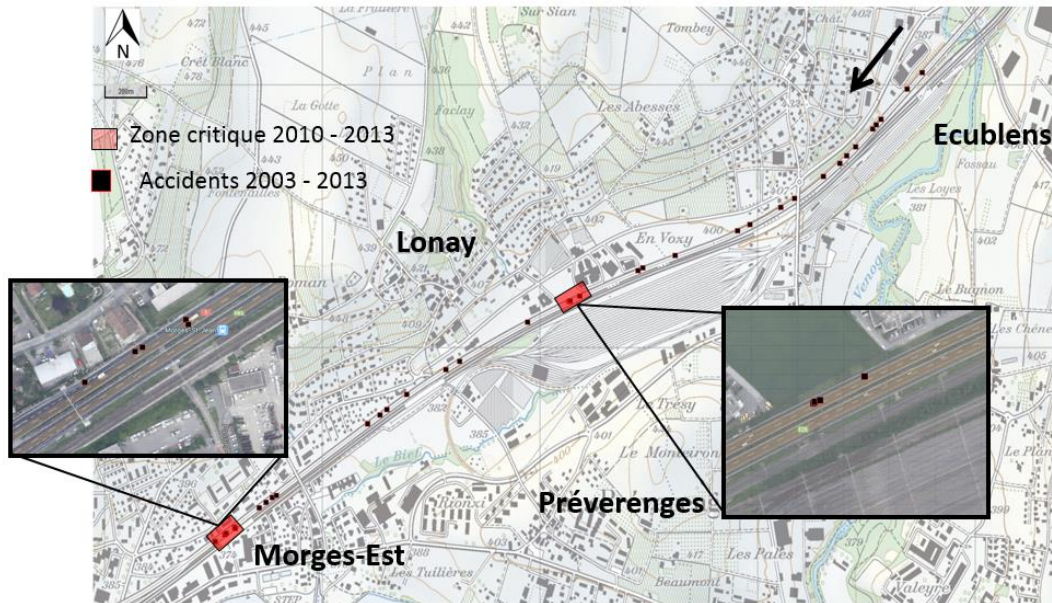


Fig. 133 Zones critiques d'accidents dus au tamponnement, direction Genève [22].

Dans la direction de Genève, une autre zone critique apparaît en raison d'un manque d'attention momentané sous le pont de la route de la Gare (Fig. 134).

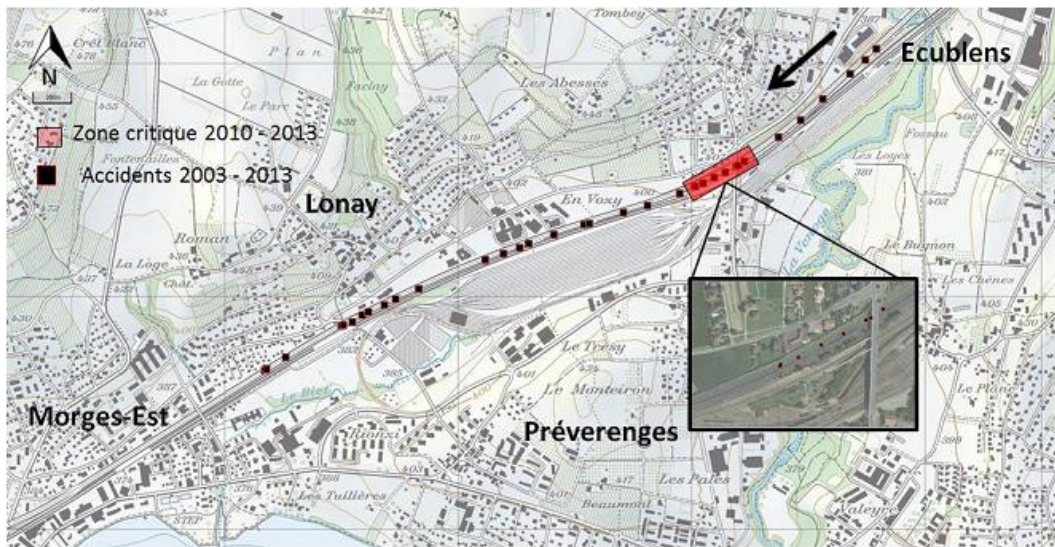


Fig. 134 Zone critique d'accidents liés au manque d'attention momentané, direction Genève [22].

Une analyse des points noirs a également été effectuée dans [22] et il a été observé :

- Que les points noirs constatés dans la direction de Lausanne avant 2010 au niveau de la demi-jonction de Morges-Est ne sont plus répertoriés après la mise en service du système de BAU active.
- Qu'aucun point noir n'est constaté dans la direction de Genève.

[23] propose, sur la base des fiches de police, une analyse des accidents en fonction de leur dépendance ou non aux conditions spécifiques au site. Sont considérés comme accidents indépendants du site ceux notamment liés à la prise d'alcool, de drogues, de médicaments, dus à la fatigue, à la distraction, au manque d'attention ou au manque d'entretien du véhicule. Dans les graphiques qui suivent, par intervalle kilométrique de 500 mètres, les trois colonnes disposées représentent les données des années 2008, respectivement 2010 et 2011.

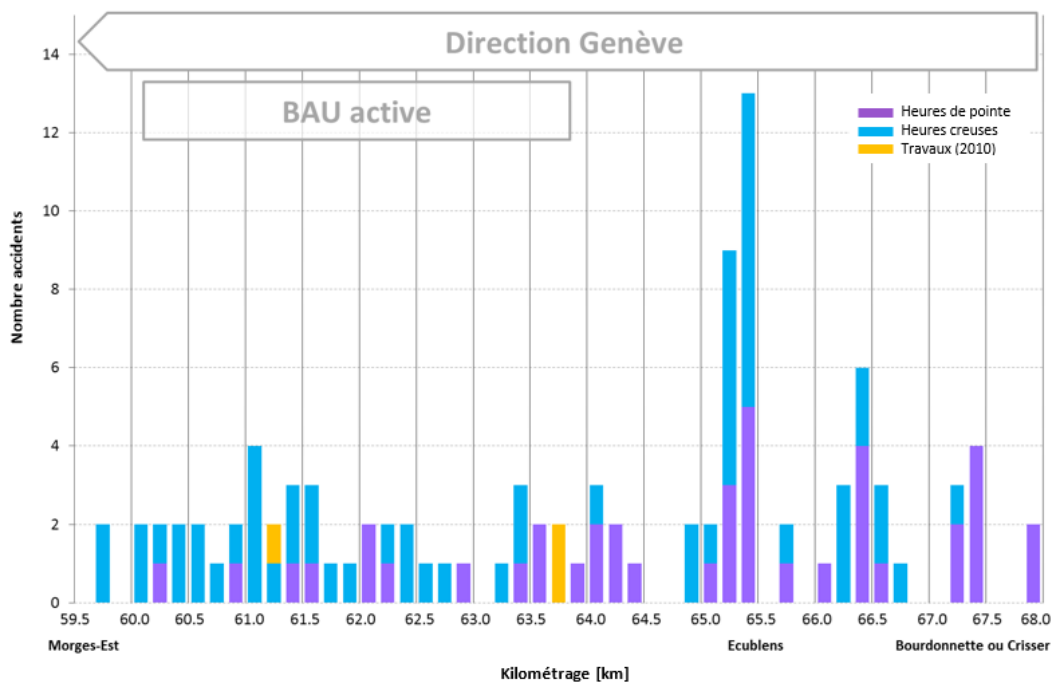


Fig. 135 Accidents dépendants du site, direction Genève, 2008 2010 2011 [23].

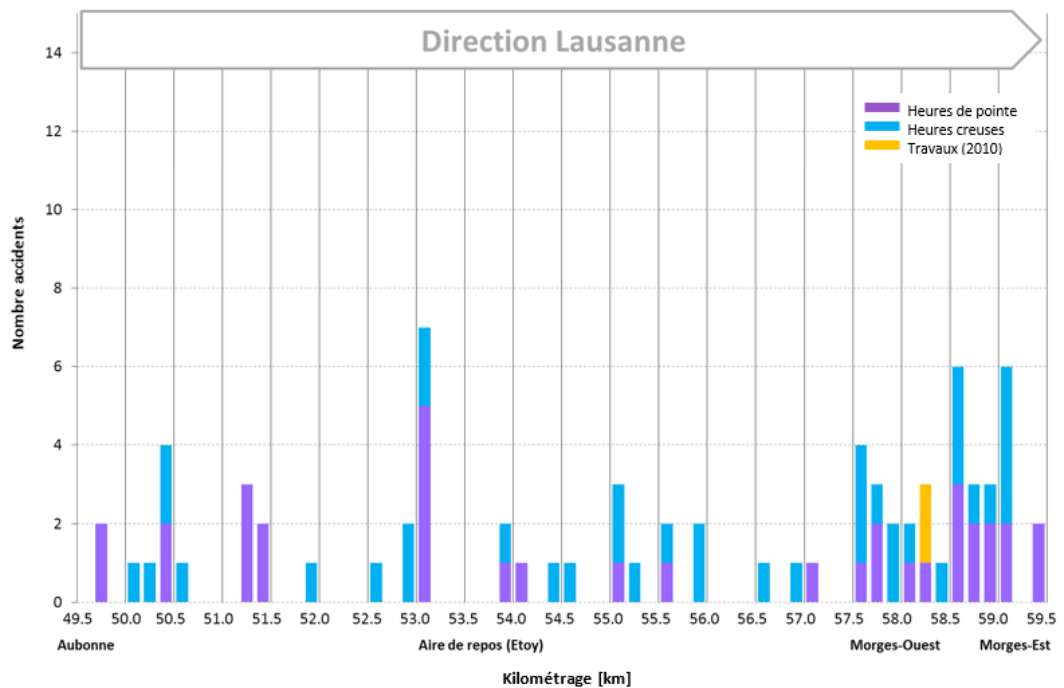


Fig. 136 Accidents dépendants du site, direction Lausanne, 2008 2010 2011 [23].

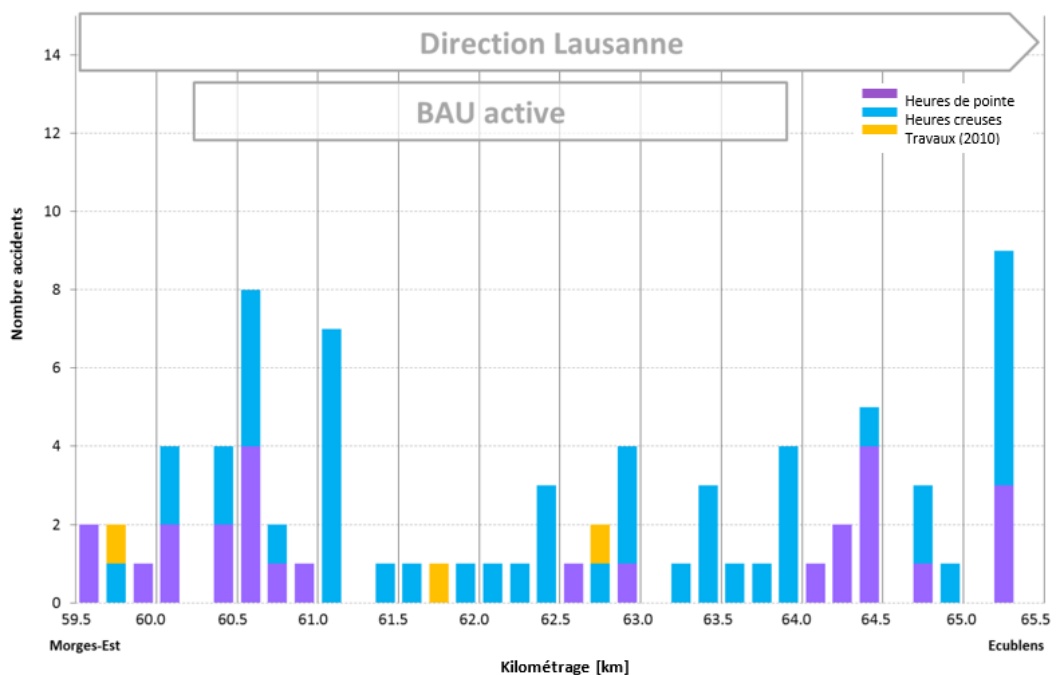


Fig. 137 Accidents dépendants du site, direction Lausanne, 2008 2010 2011 [23].

On constate (Fig. 135, Fig. 136, Fig. 137) globalement les mêmes résultats que pour l'analyse de RGR à savoir une diminution des accidents sur le secteur de la BAU active plus marquée dans la direction de Lausanne que dans celle de Genève notamment aux heures de pointe.

D'autre part, tout comme dans [22], on constate un plus fort taux d'accidents dans l'échangeur d'Ecublens. Ceux-ci sont majoritairement dus à une vitesse inadaptée (virages) et à un manque d'égards en changeant de voie.

Au niveau des jonctions, on constate une diminution des accidents à la demi-jonction de Morges-Est en direction de Lausanne (Fig. 136) malgré cela, une zone critique subsiste

(Fig. 132) en raison d'accidents très localisés. Dans la direction de Lausanne tout comme dans la direction de Genève, le tronçon situé entre les jonctions de Morges-Est et Morges-Ouest reste accidentogène.

9.3 Synthèse de l'impact sur la sécurité

Entre 2009 et 2013, on constate globalement une diminution, sur le tronçon de la BAU active, d'environ 30% des accidents.

Au niveau des jonctions ou demi-jonctions, on relève des zones préférentielles de changements de voies et ainsi des zones potentielles de conflit. Malgré cela, le nombre d'accidents est en baisse notamment à l'entrée du système de BAU active à Morges-Est en direction de Lausanne. Cela pourrait s'expliquer par le fait que les véhicules empruntent de manière convenable, en périodes de pointe, la BAU ouverte à la circulation dans la continuité de la rampe d'entrée (Chapitre 5.3.2). Toutefois, en raison de la localisation très réduite des accidents, cette zone reste critique.

Sur les tronçons adjacents, entre Morges-Ouest et Aubonne, on constate une diminution des accidents. Par contre, l'échangeur de Crissier reste problématique de ce point de vue.

Les diverses études s'accordent toutes sur ces tendances mais restent prudentes quant à l'explication et surtout l'impact réel du système de BAU active sur l'accidentologie.

En termes de temps intervéhiculaires et donc de distances de sécurité, on perçoit un léger effet bénéfique du système de BAU active avec la détente du flux de trafic sur la voie de gauche.

10 Optimisation de la consigne d'ouverture et fermeture

Les consignes d'ouverture et de fermeture du système de contrôle de la BAU active, qui sont transmises aux opérateurs du système, doivent permettre une utilisation optimale de l'infrastructure. L'objectif est d'atteindre une activation pertinente du système tout en assurant la fluidité du trafic et en anticipant une aggravation potentielle des conditions de circulation.

Une modélisation et une étude paramétrique des conditions de circulation et du comportement des usagers du système ont abouti à la sélection de seuils optimaux des paramètres influents.

10.1 Impact du respect des consignes automatiques

Comme décrit au chapitre 3.1, l'opérateur de la centrale de gestion du trafic a la possibilité d'ouvrir, respectivement de fermer, la BAU à la circulation en tout temps. La consigne d'ouverture automatique n'est donc pas forcément suivie par l'opérateur qui se base également sur son expérience.

Ce chapitre permet de constater les effets du respect de la consigne sur les paramètres du trafic du tronçon de la BAU active.

2011

Le premier cas analysé est celui d'une ouverture normale de la BAU à la circulation avec respect de la consigne par les opérateurs, en période de pointe du matin, dans la direction de Lausanne en 2011 (Fig. 138).

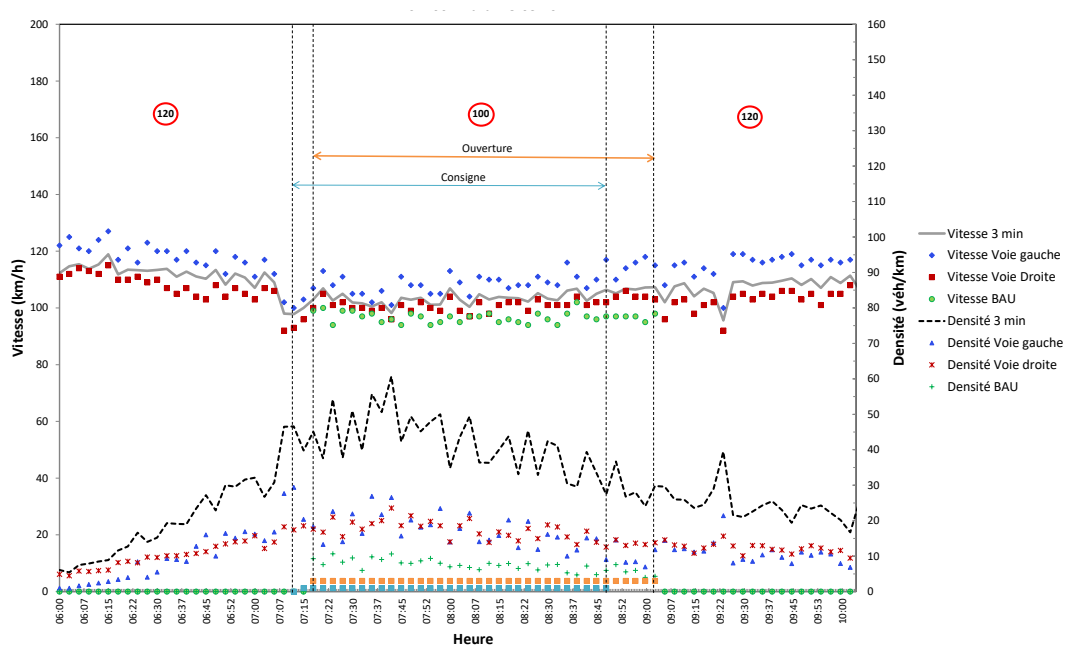


Fig. 138 Vitesse et densité, respect des consignes automatiques, mardi 15.03.2011, matin, direction Lausanne, L-62200.

L'ouverture de la BAU au trafic est effectuée dans le respect de la consigne automatique d'ouverture. L'opérateur, après avoir reçu la consigne automatique qui apparaît à 07h12, effectue le contrôle de l'état de la BAU puis l'ouvre à la circulation à 07h18.

Vers 07h10, la densité sur le tronçon augmente fortement avec une chute sensible de la vitesse, traduisant la formation d'un léger ralentissement. La consigne d'ouverture apparaît donc trop tard par rapport à l'augmentation importante et rapide du trafic

Une fois la BAU ouverte à la circulation, les conditions de trafic se stabilisent avec une vitesse de 103 km/h et aucune congestion n'est ensuite observée lors de la période d'ouverture même lorsque la densité atteint un pic de 60.7 véh/km sur 3 min.

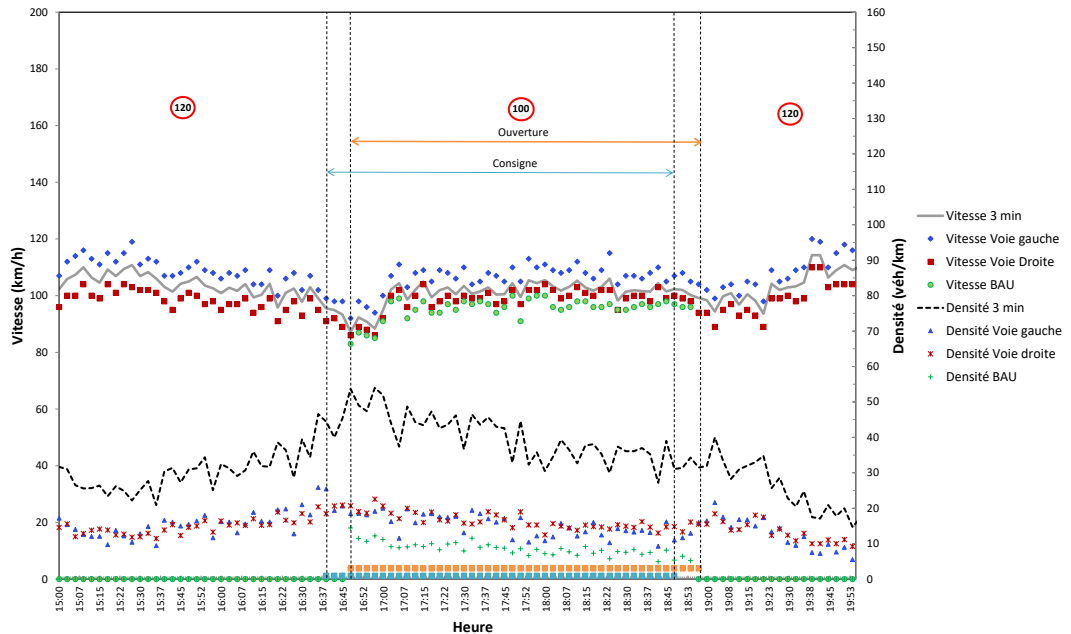


Fig. 139 Vitesse et densité, respect des consignes automatiques, mardi 15.03.2011, soir, direction Lausanne, L-62200.

En période de pointe du soir (Fig. 139), on constate une durée d'environ 10 minutes entre l'apparition de la consigne automatique et l'ouverture de la BAU à la circulation. Le retard de la consigne automatique et le temps de vérification de la BAU accentuent et étendent encore davantage ce ralentissement (vitesse moyenne aux environs de 85 km/h).

Synthèse 2011

En 2011, lorsque l'opérateur respecte la consigne d'ouverture, un ralentissement est observé juste avant l'ouverture de la BAU à la circulation. L'algorithme d'activation n'est donc pas encore bien calibré et la consigne d'ouverture apparaît trop tard. Pour cette raison, les opérateurs ont pris l'habitude d'ouvrir la BAU à la circulation selon leur expérience, avant l'apparition de la consigne, afin d'éviter ce ralentissement.

En ce qui concerne la fermeture de la BAU à la circulation, la commande de fermeture par les opérateurs parvient environ 10 à 15 minutes après l'apparition de la consigne automatique.

2013

En 2013, les opérateurs ouvrent la BAU à la circulation le matin sans attendre l'apparition de la consigne automatique, malgré le fait que l'algorithme de consigne ait été modifié.

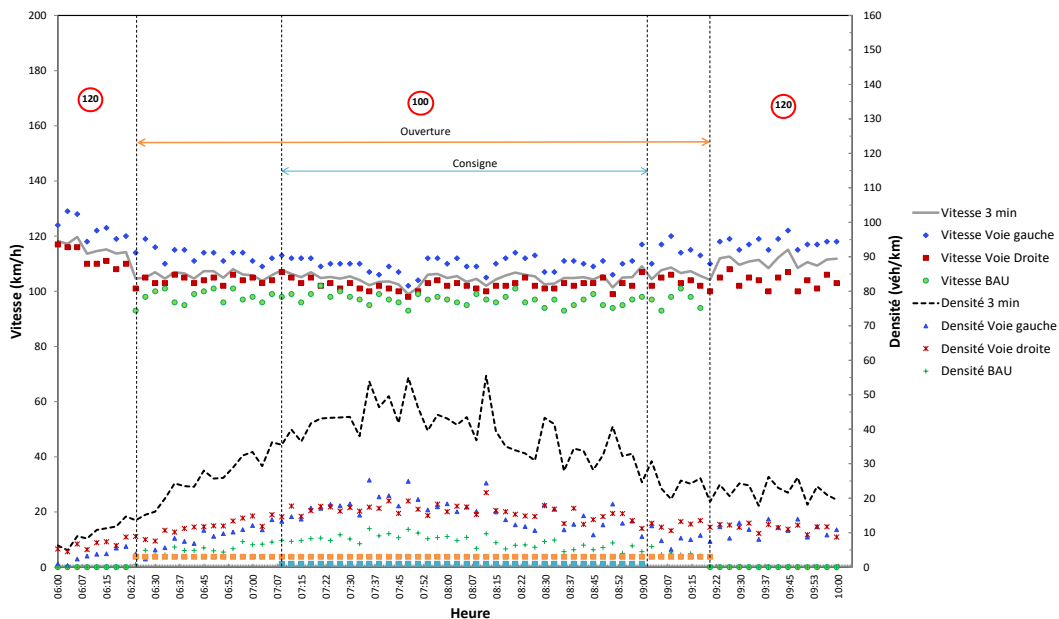


Fig. 140 Vitesse et densité, respect des consignes automatiques, mardi 05.03.2013, matin, direction Lausanne, L-62200.

On constate que le mardi 5 mars 2013, la consigne d'ouverture automatique est apparue à 07h09. Cependant, les opérateurs ont ouvert la BAU à la circulation à 06h24 soit 45 minutes avant la consigne (Fig. 140).

La BAU est ouverte à la circulation alors que la densité sur le tronçon est d'environ 15 véh/km. La densité augmente progressivement jusqu'à atteindre, durant la période d'ouverture, des valeurs maximales d'environ 55 véh/km. Aucune congestion n'apparaît, ni au moment de l'ouverture ni pendant la période d'ouverture, avec des vitesses qui restent stables à 100 km/h.

La fermeture de la BAU est commandée environ 20 minutes après l'apparition de la consigne automatique de fermeture. La BAU est donc restée ouverte à la circulation pendant 2h57 soit 1h06 de plus que le temps préconisé par les consignes automatiques.

En période de pointe du soir, les opérateurs respectent globalement la consigne automatique.

Synthèse 2013

En ouvrant la BAU à la circulation avant l'apparition de la consigne automatique d'ouverture, les ralentissements constatés en 2011 ne le sont plus en 2013. Toutefois, il semble que l'ouverture de la BAU à la circulation par les opérateurs intervient trop rapidement.

Bien que l'impact positif de l'augmentation temporaire de la capacité combiné à une limitation de vitesse abaissée à 100 km/h a été démontré dans le chapitre 1, une trop grande anticipation de l'ouverture du système a un effet défavorable. En effet, la disponibilité de l'infrastructure n'est plus maximale lorsque la vitesse légale est abaissée à 100 km/h alors que les conditions de circulation permettraient probablement une circulation à vitesse légale de 120 km/h.

L'effet d'une ouverture anticipée est analysé dans le chapitre 10.2.

10.2 Effet d'une ouverture anticipée de la BAU sur le temps de parcours

Le présent chapitre a pour but d'estimer la perte de temps de parcours engendrée par une trop grande anticipation de l'ouverture de la BAU à la circulation. Les calculs sont effectués pour le mardi 5 mars 2013 dans la direction de Lausanne en période de pointe du matin (Fig. 140).

Tab. 17 Informations d'ouverture du système de BAU active, 05.03.2013, matin, direction Lausanne

Paramètre	Heure
Ouverture de la BAU à la circulation	06 : 24
Apparition de la consigne d'ouverture	07 : 09
Ouverture selon consigne d'ouverture (au mieux 1 cycle de 3 minutes)	07 : 12

Le temps de parcours pour un trajet de longueur d effectué par un véhicule à une vitesse donnée $v_1 > v_2$ est :

$$t_1 = \frac{d}{v_1}, t_2 = \frac{d}{v_2}$$

où :

- v_1 est la vitesse estimée du véhicule, avec BAU fermée à la circulation.
- v_2 est la vitesse mesurée du véhicule par intervalle de 3 minutes, selon Fig. 140.
- $d = 3.725$ km (zone de BAU active dans la direction de Lausanne).

La différence de temps de parcours par intervalle de 3 minutes correspond à :

$$\Delta t_{3min} = t_2 - t_1 = d \cdot \left(\frac{1}{v_2} - \frac{1}{v_1} \right)$$

La perte de temps de parcours totale correspond à la somme des temps perdus par chaque véhicule (débit n_{3min}) :

$$Perte\ totale = \sum n_{3min} \cdot \Delta t_{3min}$$

La vitesse v_1 est estimée sur la base de conditions de débits semblables relevées le 5 mars 2013 lorsque la BAU est fermée à la circulation (2 voies, Fig. 141).

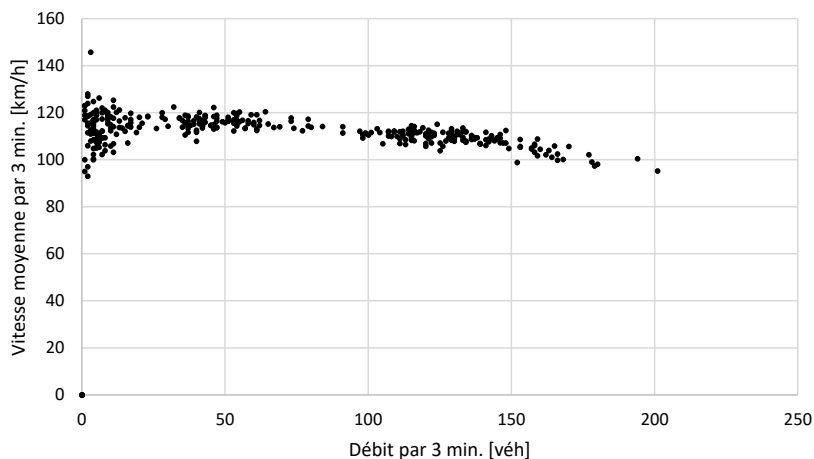


Fig. 141 Débits et vitesses, mardi 05.03.2013, BAU fermée à la circulation, direction Lausanne, L-62200.

Les hypothèses suivantes sont effectuées :

- Le débit mesuré et son évolution ne sont pas influencés par l'ouverture de la BAU à la circulation. La demande reste identique.
- Entre de petits intervalles de débits, l'évolution de la vitesse est linéaire.
- Sont sélectionnés comme points de mesure, pour estimation de la vitesse v_1 , les débits les plus proches du débit mesuré dans un intervalle de +/- 5 véhicules par 3 minutes (Fig. 141).
- La vitesse moyenne estimée est déterminée à partir de la vitesse de 6 points de mesures (débits / vitesse) au minimum (3 points de part et d'autre du débit mesuré).

Tab. 18 Estimation des vitesses moyennes, 05.03.2013, matin, direction Lausanne

Heure	Débit mesuré par 3 min. [véh]	v_2 moy. mesurée par 3 min. [km/h]	v_1 estimée [km/h] (Fig. 141)	Commentaires
06 : 21	84	114.2		
06 : 24	71	104.6	115.1	BAU ouverte à la circulation par opérateur
06 : 27	80	105.0	113.9	
06 : 30	86	106.9	113.8	
06 : 33	104	104.6	111.1	
06 : 36	130	106.9	109.7	
06 : 39	125	106.5	109.6	
06 : 42	122	104.6	109.8	
06 : 45	150	107.3	107.3	
06 : 48	138	107.3	109.1	
06 : 51	136	104.9	109.5	
06 : 54	156	108.0	104.9	$v_1 < v_2 \rightarrow$ effet bénéfique de l'ouverture de la BAU à la circulation
06 : 57	172	106.1	100.7	
07 : 00	177	105.8	100.3	
07 : 03	152	103.8	106.0	
07 : 06	192	105.9	< 100	
07 : 09	191	107.7	< 100	Consigne d'ouverture automatique
07 : 12	212	106.3	< 100	
07 : 15	191	105.1	< 100	
07 : 18	212	106.3	< 100	

A partir de 06h54, la vitesse, qui pourrait être atteinte dans le cas où la BAU est fermée à la circulation (estimation, situation à 2 voies), est plus faible que la vitesse mesurée. Dès ce moment-là, l'ouverture de la BAU à la circulation est bénéfique (Tab. 18).

Selon ces estimations, le calcul de la perte liée à l'anticipation de l'ouverture de la BAU à la circulation est effectué entre 06h24 et 06h54. En raison de cette anticipation de 30 minutes, la perte globale pour les usagers s'élève à 1h35. En moyenne, 1 véhicule perd 5 secondes.

On constate également sur cette base que, potentiellement, la consigne d'ouverture automatique est survenue de manière trop tardive.

10.3 Synthèse de l'impact du respect des consignes automatiques

Comme constaté dans les chapitres 10.1 et 10.2, l'enjeu majeur, en période de pointe, est de trouver une consigne d'ouverture qui anticipe suffisamment la montée rapide du débit sur le tronçon de la BAU active mais qui n'apparaisse pas non plus trop tôt.

Concernant la fermeture de la BAU à la circulation, celle-ci intervient généralement une dizaine de minutes après la consigne automatique de fermeture. Cette durée d'ouverture supplémentaire a également un impact sur les temps de parcours.

Depuis fin novembre 2014, un nouvel algorithme a été mis en place dans le but d'anticiper la montée rapide du débit lors de la période de pointe et des recherches sont effectuées continuellement afin de l'améliorer. Une proposition d'algorithme issue de [7] fait l'objet du chapitre 10.4.

10.4 Méthodologie

Ce chapitre résume des développements théoriques complets qui peuvent être consultés dans [7] par un lecteur averti souhaitant prendre connaissance des bases, notamment statistiques et mathématiques des différentes procédures d'ouverture et de fermeture de la BAU à la circulation.

L'ensemble de ces différentes procédures (nommé algorithme de contrôle) appliqué au système de BAU active sur le périmètre d'étude ainsi que les résultats et conclusions obtenus peuvent être parcourus sans entrer dans le détail de la méthodologie explicitée dans [7].

Données

Afin d'obtenir des tendances récentes en matière de comportement des usagers, les données étudiées sont les suivantes (accidents exclus) :

- 17 au 29 mars 2014.
- 12 mai au 25 mai 2014.
- 10 au 18 décembre 2014.

Cadre méthodologique

Le cadre méthodologique permettant de déterminer l'activation respectivement la désactivation de la consigne d'ouverture du système comprend trois niveaux (Fig. 142) :

- 1^{er} niveau : Méthode de regroupement stochastique.
- 2^{ème} niveau : Méthode de modélisation non-paramétrique.
- 3^{ème} niveau : Optimisation.

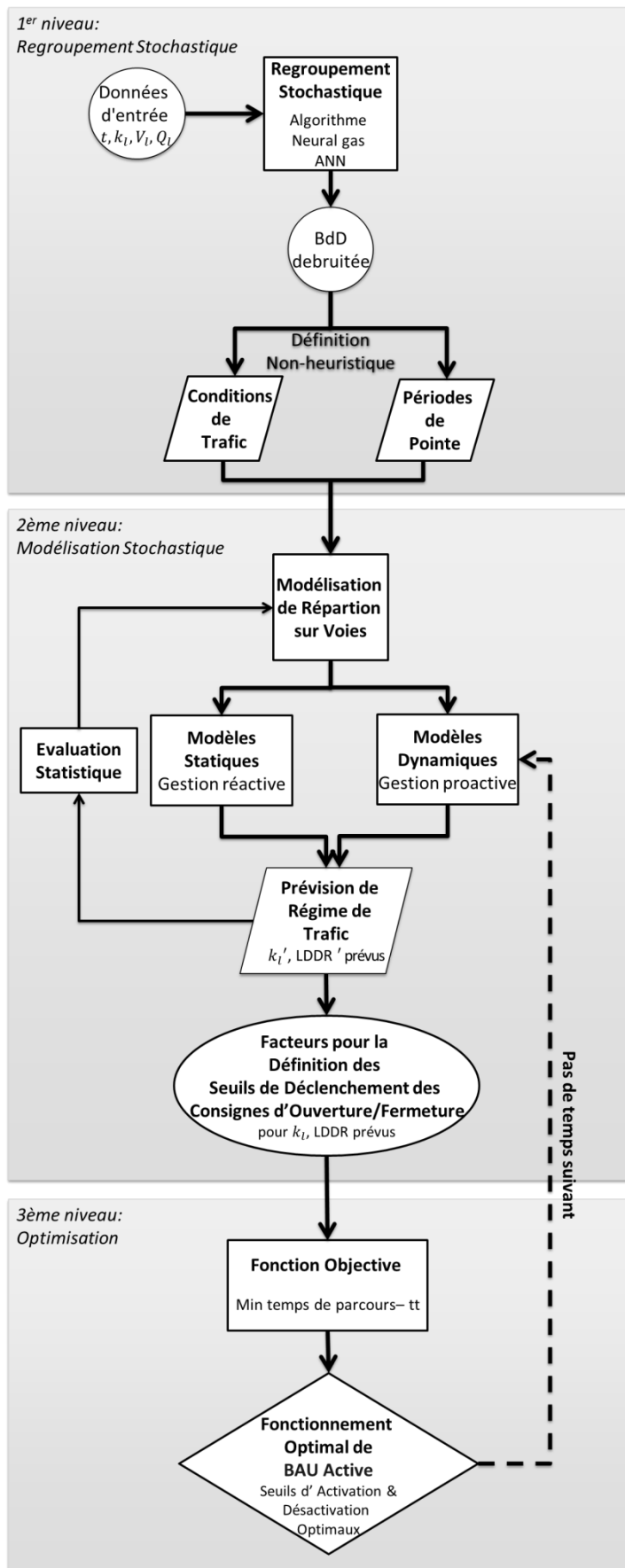


Fig. 142 Cadre méthodologique pour l'activation et la désactivation de la consigne d'ouverture du système de BAU active [7] [14] [16] [17].

10.4.1 Algorithme 1^{er} niveau : Méthode de regroupement stochastique

Premièrement, une exploration de données (data mining) est effectuée. Celle-ci vise à détecter les différents états de trafic ainsi que définir les intervalles des seuils de consignes d'ouverture et de fermeture à étudier (transition des états de trafic).

L'exploration de données est une procédure d'analyse, de détection et d'extraction de tendances dans des bases de données importantes. Les tendances extraites pourront alors être utilisées comme facteurs prédictifs du modèle.

Regroupement stochastique

Le regroupement stochastique (clustering) est une procédure qui permet la segmentation d'une base de données en motifs, en structures (patterns) similaires et les classe en sous-ensembles homogènes (clusters) et permet également d'écarter les valeurs aberrantes.

Dans le cadre de cette étude, le regroupement des données de circulation est primordial en raison de l'imprédictibilité des conditions de trafic dans le temps et dans l'espace. Cette étape a pour but de définir des tendances spatiales des trois régimes de circulation dominants (fluide, synchronisé, dense) ainsi que des tendances temporelles des périodes de pointe (matin, soir).

Plusieurs algorithmes de partitionnement des données sont utilisés et comparés sur la base de mesures de similarité / dissimilarité :

- k-moyennes.
- k-médoïdes.
- k-moyennes floues.
- Méthode bayésienne.
- Gaz neuronal.

Sélection d'un algorithme

Dans le cas présent, l'algorithme de gaz neuronal est déterminé comme étant le plus approprié.

Application

Les trois régimes de trafic (fluide « groupe 1 », synchronisé « groupe 2 », dense « groupe 3 ») sont définis pour chaque secteur du tronçon de la BAU active (Fig. 143) et décrits sur des diagrammes reliant la densité par voie au rapport de la densité par voie par la densité par direction (LDDR) (Fig. 144).

Ces diagrammes permettent de définir les conditions de circulation et d'obtenir l'évolution dynamique de la répartition du trafic sur les voies. Sur cette base, les phases de transition entre les régimes sont établies et des intervalles de seuils d'activation pertinente du système, respectivement de désactivation, sont définis.

Les **seuils candidats à l'activation du système** se situent dans les phases de transition :

- 1 → 2 → 3 (Passage d'un régime fluide à un régime dense par le régime synchronisé, exemple : période de pointe du matin).
- 2 → 3 → 2 (Passage d'un régime synchronisé à un régime dense, exemple : régime synchronisé entre les deux périodes de pointe).

Les **seuils candidats à la désactivation du système** se situent dans les phases de transition :

- 2 → 3 → 2 (Passage d'un régime dense à un régime synchronisé, exemple : fin de période de pointe du matin ou du soir).

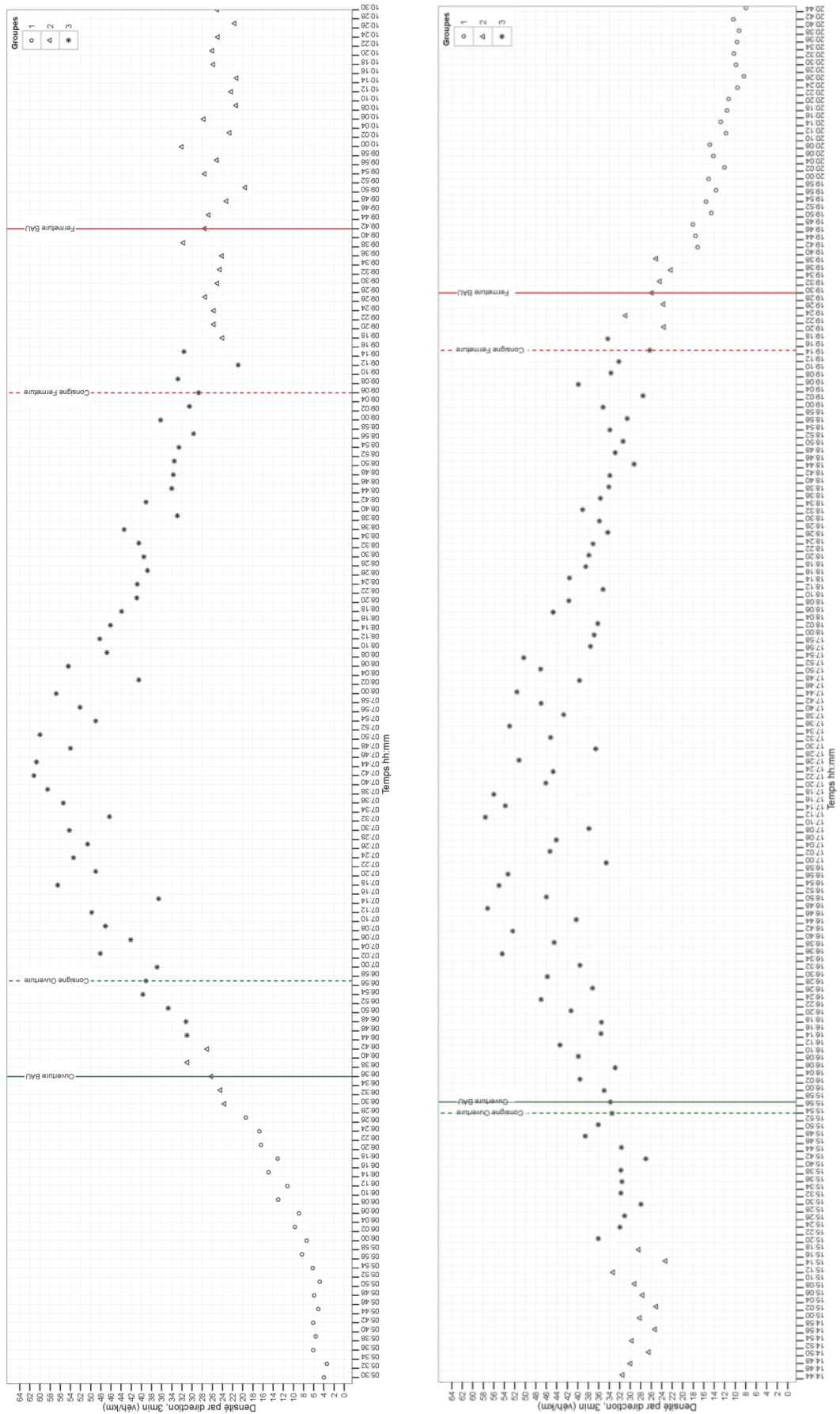


Fig. 143 Régimes de trafic, mardi 18.03.2014, périodes de pointe, direction Lausanne, L-60590 [7] [14] [15] [16].

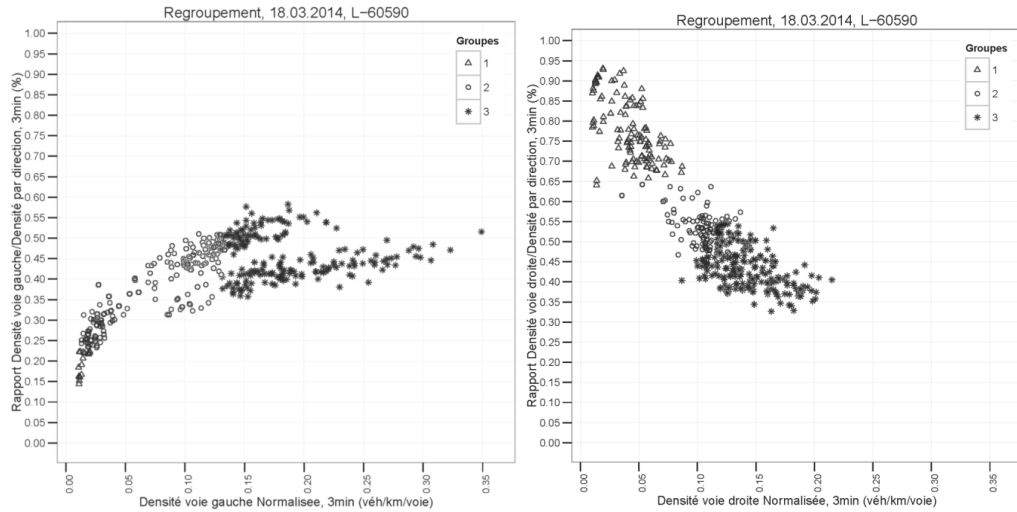


Fig. 144 Régimes de trafic, voie de gauche, voie de droite, mardi 18.03.2014, périodes de pointe, direction Lausanne, L-60590 [7] [14] [15] [16].

10.4.2 Algorithme 2^{ème} niveau : Méthode de modélisation stochastique

Le but de ce second niveau est d'établir des modèles de régression sur la base des paramètres déterminants de chaque régime de trafic. Ces paramètres composeront l'algorithme d'activation et de désactivation du système et ils permettront d'anticiper les conditions de trafic à venir et d'activer des stratégies de gestion proactives ou réactives.

Modélisation de la répartition du trafic sur les voies de circulation

Comme constaté au chapitre 10.4.1, des motifs (clusters) reliant la répartition du trafic entre les voies (voie de gauche et voie de droite) et l'apparition séquentielle des régimes de trafic sont mis en évidence. Afin de décrire la dynamique du trafic et notamment la répartition du trafic par voies, des modèles de régression linéaires avec des poids locaux (LOESS) et des modèles de régression par fonction affine par morceaux sont employés.

Les modèles de LOESS (méthode des k plus proches voisins) permettent une première évaluation de la dynamique du trafic qui est ensuite améliorée à l'aide de la régression affine par morceaux (évaluations d'intervalles de valeurs). La modélisation stochastique de la répartition du trafic par voies est finalement décrite par des modèles de régression linéaires multivariés (distribution de plusieurs variables) dont la qualité est testée (résidu, écart-type, coefficient de détermination R²).

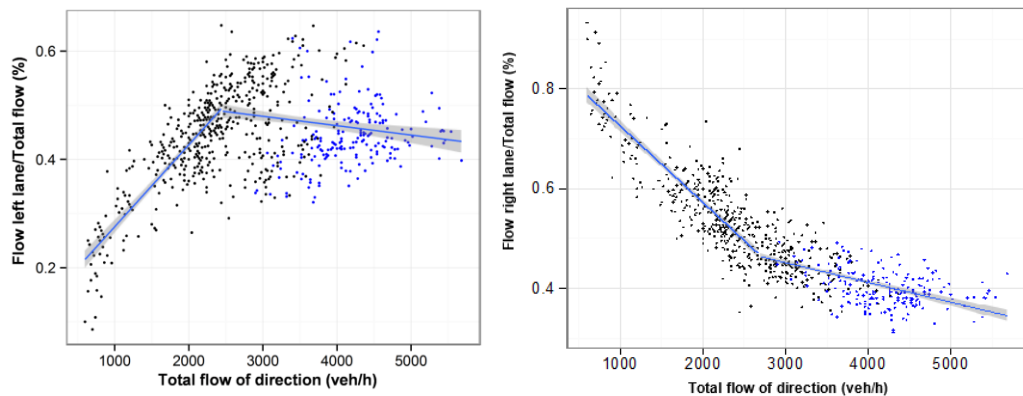


Fig. 145 LFDR en fonction du débit par direction, BAU ouverte : points bleus, BAU fermée : points noirs. Régression par fonction affine par morceaux [7].

Deux morceaux distincts peuvent être séparés au point de bifurcation des tendances, soit à un débit d'environ 2'500 véh/h. Ceux-ci représentent les régimes fluide et non-fluide (synchronisé et dense) (Fig. 145).

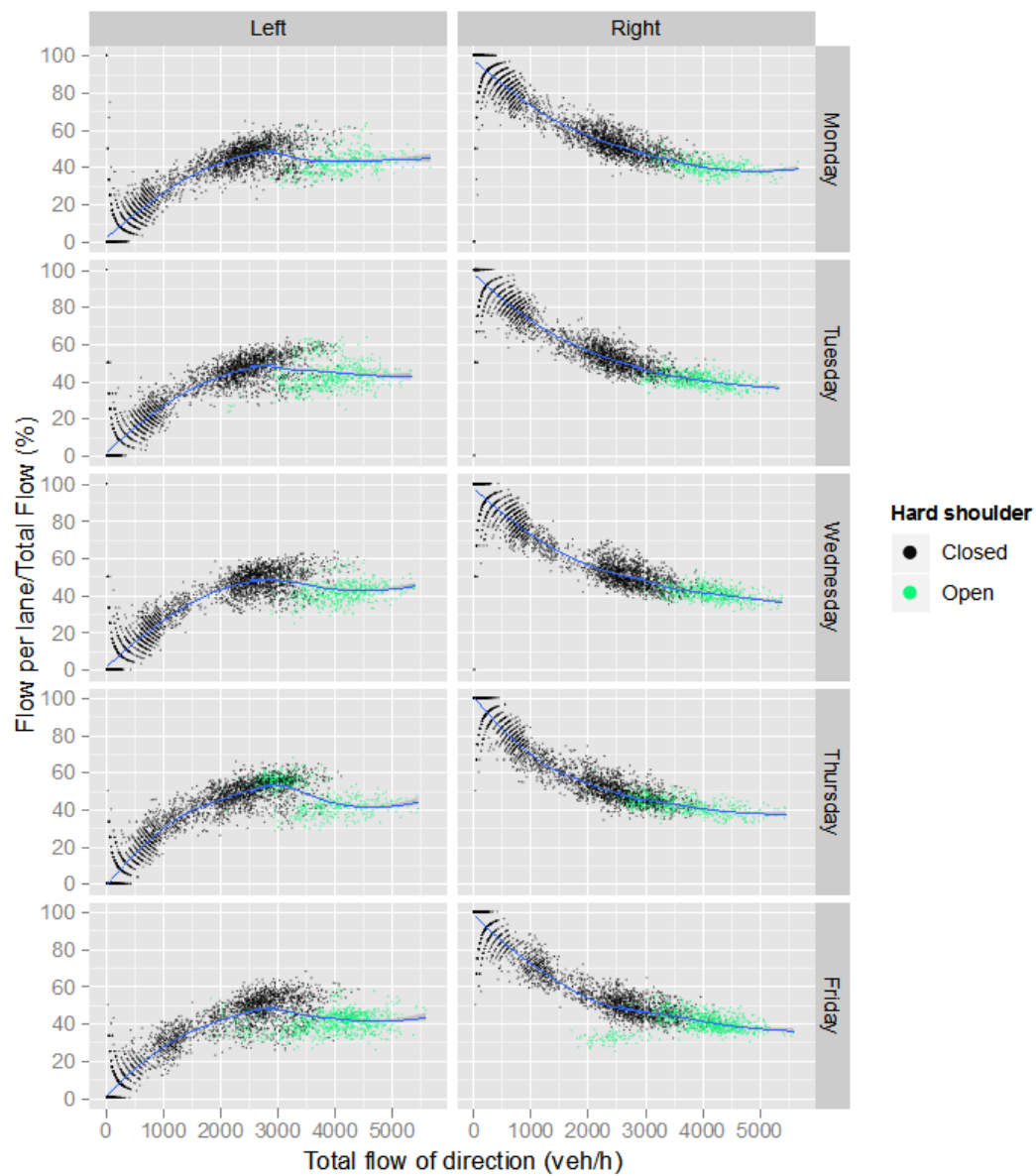


Fig. 146 LFDR en fonction du débit par direction, BAU ouverte : points verts, BAU fermée : points noirs. Modèles de LOESS [7].

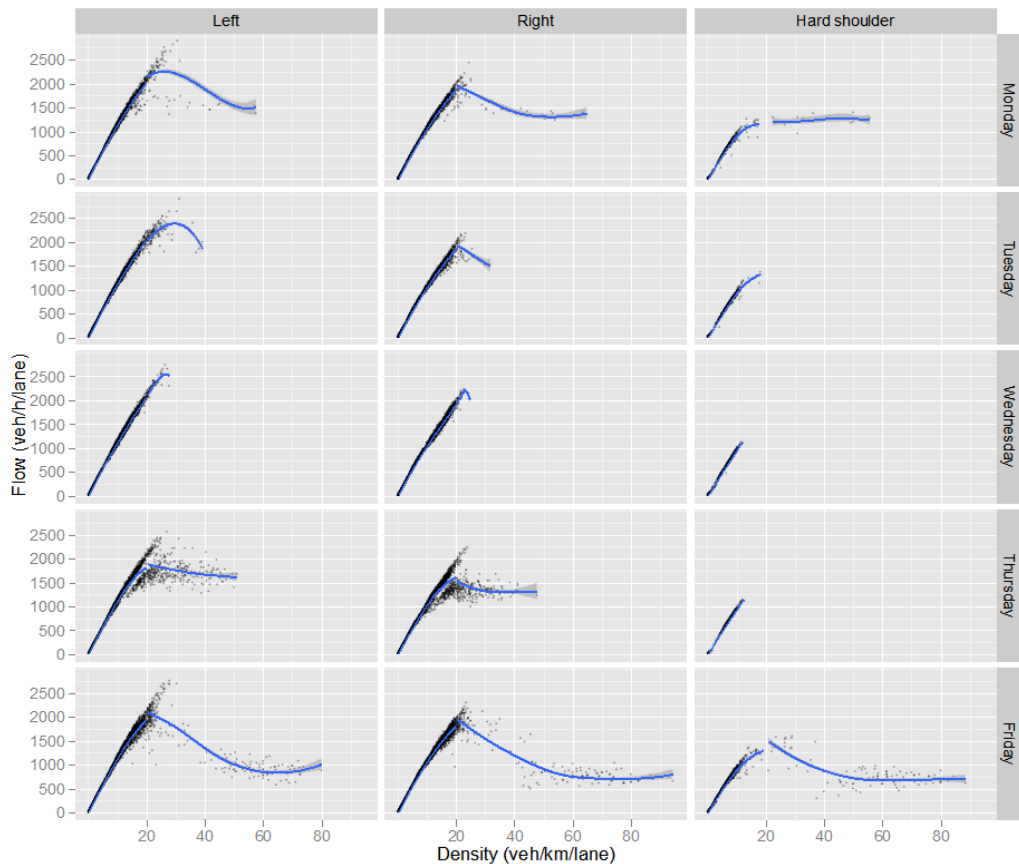


Fig. 147 Flux, densité. Par jour et par voie. Modèles de LOESS [7].

Il est observé (Fig. 145, Fig. 146, Fig. 147) :

- En régime fluide, pour un débit inférieur à 1'500 véh/h/direction et une densité inférieure à 20 véh/km/voie, que la voie de droite a le LFDR le plus élevé (75% à 100%).
- En régime synchronisé, que la voie de droite est également la plus utilisée.
- A partir d'un débit de 2'500 véh/h/direction, débit pour lequel la BAU n'est généralement pas encore ouverte à la circulation, que le LFDR de la voie de droite et celui de la voie de gauche se croisent.
- Pour un débit de 3'000 véh/h/direction, une augmentation du LFDR de la BAU (0-20%) accompagné d'une cassure de la tendance du LFDR de la voie de gauche.

Ces différentes phases de transition des régimes sont prises en compte dans la définition de l'algorithme de contrôle proposé.

Modèles relatifs aux conditions de trafic

Sur la base des résultats de la modélisation de la répartition du trafic sur les voies de circulation, deux types de modèles de régression linéaire multivariés sont proposés pour les régimes fluide et non-fluide (synchronisé et dense) :

- Un modèle statique pour définir les conditions de circulation au temps t .
- Un modèle dynamique afin de prédire les conditions de circulation au temps $t+x$.

Ces différents modèles ont été testés à l'aide d'un important échantillon de données ($n=3765$ observations pour le régime fluide et $n=4293$ observations pour le régime non-fluide) et les résultats obtenus ont démontré leur fiabilité (coefficients de détermination R^2 , étude de précision, détermination de valeur de sur/sous-estimation).

L'horizon de prévision des conditions de trafic est déterminé sur un intervalle de 9 minutes (3 cycles de 3 minutes), afin de détecter les variations essentielles des conditions de circulation tout en garantissant un temps suffisant pour l'activation du système.

10.4.3 Algorithme 3^{ème} niveau : Optimisation

Afin d'améliorer la performance du système, une optimisation multi-objectifs est réalisée (Optimum de Pareto, frontière d'efficacité du système). Certaines variables indépendantes des modèles développés au niveau précédent sont employées afin de former l'ensemble optimal d'activation et de désactivation du système.

L'objectif principal est de maximiser l'utilisation de chaque voie sur la base de paramètres soumis aux limites suivantes :

- Les intervalles proposés comme candidats par le regroupement stochastique sont respectés.
- La valeur médiane de la densité par direction ne doit, dans la mesure du possible, pas atteindre un niveau de service suffisant D (taux d'utilisation inférieur à 90% de la capacité).
- Les seuils des consignes actuelles forment les frontières des intervalles de valeurs des paramètres.

Le but est donc de repousser au maximum l'activation du système sans pour autant atteindre des conditions de circulation menant à une congestion, saturation, visant ainsi à garantir une disponibilité maximale de l'infrastructure (vitesse la plus élevée possible dans les meilleures conditions de circulation).

Les algorithmes d'activation, respectivement de désactivation du système de BAU active sont décrits de la manière suivante :

Tab. 19 Algorithme d'activation de la consigne d'ouverture, jours ouvrés

Paramètre	Conditions
Type de régime	Fluide ou synchronisé
Nombre de voies ouvertes à la circulation	2
Passage séquentiel entre régimes	Ascendant
Pas de temps successifs analysés	t à t+3
Intervalle de densité de la voie de gauche au 1 ^{er} capteur interne de la zone active	14 – 20 véh/km/voie, bornes incluses
LFDR de la voie de gauche au 1 ^{er} capteur interne de la zone active	0.45 – 0.56, bornes incluses
Condition : LFDR de la voie de gauche en amont de la zone active à t+3 plus grand ou égal au LFDR de la voie de droite en amont de la zone active à t	
Seuil optimal déterminé	
Nombre de cycles valides	2
Nombre de voies ouvertes à la circulation	2
Densité de la voie de gauche au 1 ^{er} capteur interne de la zone active	≥ 15 véh/km/voie
LFDR de la voie de gauche au 1 ^{er} capteur interne de la zone active	≤ 0.55

Tab. 20 Algorithme d'activation de la consigne d'ouverture, w-e et jours fériés

Paramètre	Conditions
Type de régime	Fluide ou synchronisé
Nombre de voies ouvertes à la circulation	2
Passage séquentiel entre régimes	Ascendant
Pas de temps successifs analysés	t à t+3
Intervalle de densité de la voie de gauche au 1 ^{er} capteur interne de la zone active ou Intervalle de densité de la voie de droite au 1 ^{er} capteur interne de la zone active	14 – 20 véh/km/voie, bornes incluses
LFDR de la voie de gauche au 1 ^{er} capteur interne de la zone active ou LFDR de la voie de droite au 1 ^{er} capteur interne de la zone active	0.45 – 0.55, bornes incluses
Condition : LFDR de la voie de gauche en amont de la zone active à t+3 plus grand ou égal au LFDR de la voie de droite en amont de la zone active à t	
Seuil optimal déterminé	
Nombre de cycles valides	2
Nombre de voies ouvertes à la circulation	2
Densité de la voie de gauche au 1 ^{er} capteur interne de la zone active et LFDR de la voie de gauche au 1 ^{er} capteur interne de la zone active ou Densité de la voie de droite au 1 ^{er} capteur interne de la zone active et LFDR de la voie de droite au 1 ^{er} capteur interne de la zone active	≥ 15 véh/km/voie ≥ 0.45 ≥ 16 véh/km/voie ≥ 0.45

Tab. 21 Algorithme de désactivation de la consigne d'ouverture (fermeture)

Paramètre	Conditions
Type de régime	Dense ou synchronisé
Nombre de voies ouvertes à la circulation	3
Passage séquentiel entre régimes	Descendant
Pas de temps successifs analysés	t à t+3
Intervalle de densité de la voie de droite au 1 ^{er} capteur interne de la zone active	10 – 14 véh/km/voie, bornes incluses
LFDR de la voie de droite au 1 ^{er} capteur interne de la zone active	0.40 – 0.44, bornes incluses
Condition : Densité de la voie de droite en amont de la zone active à t+3 plus petite ou égale à la densité de la voie de gauche en amont de la zone active à t	
Seuil optimal déterminé	
Nombre de cycles valides	2 en semaine, 3 week-end et jours fériés
Nombre de voies ouvertes à la circulation	3
Densité de la voie de droite au 1 ^{er} capteur interne de la zone active	≤ 13 véh/km/voie
LFDR de la voie de droite au 1 ^{er} capteur interne de la zone active	≥ 0.43

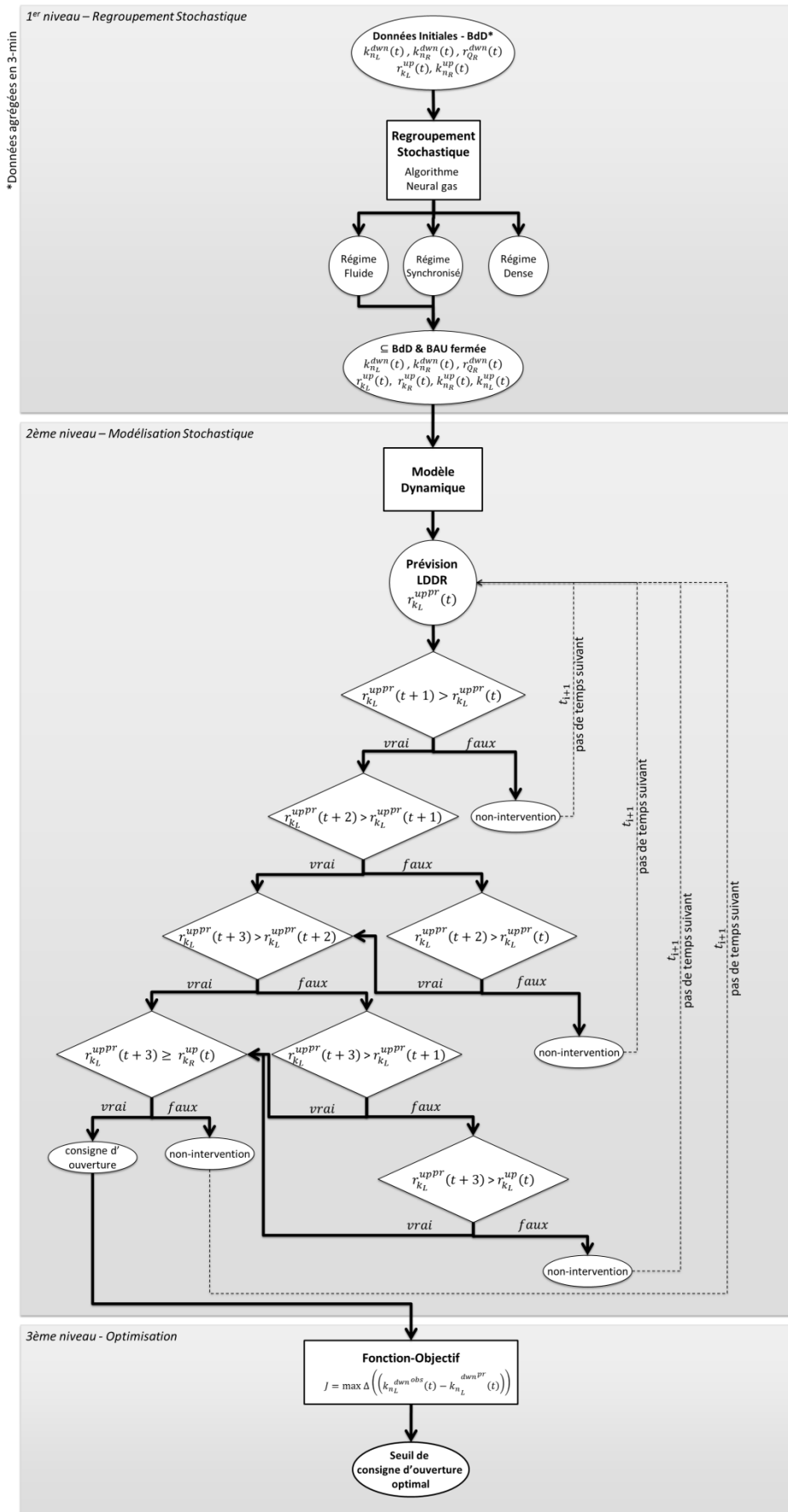


Fig. 148 Organigramme d'activation de la consigne d'ouverture du système de BAU active [7].

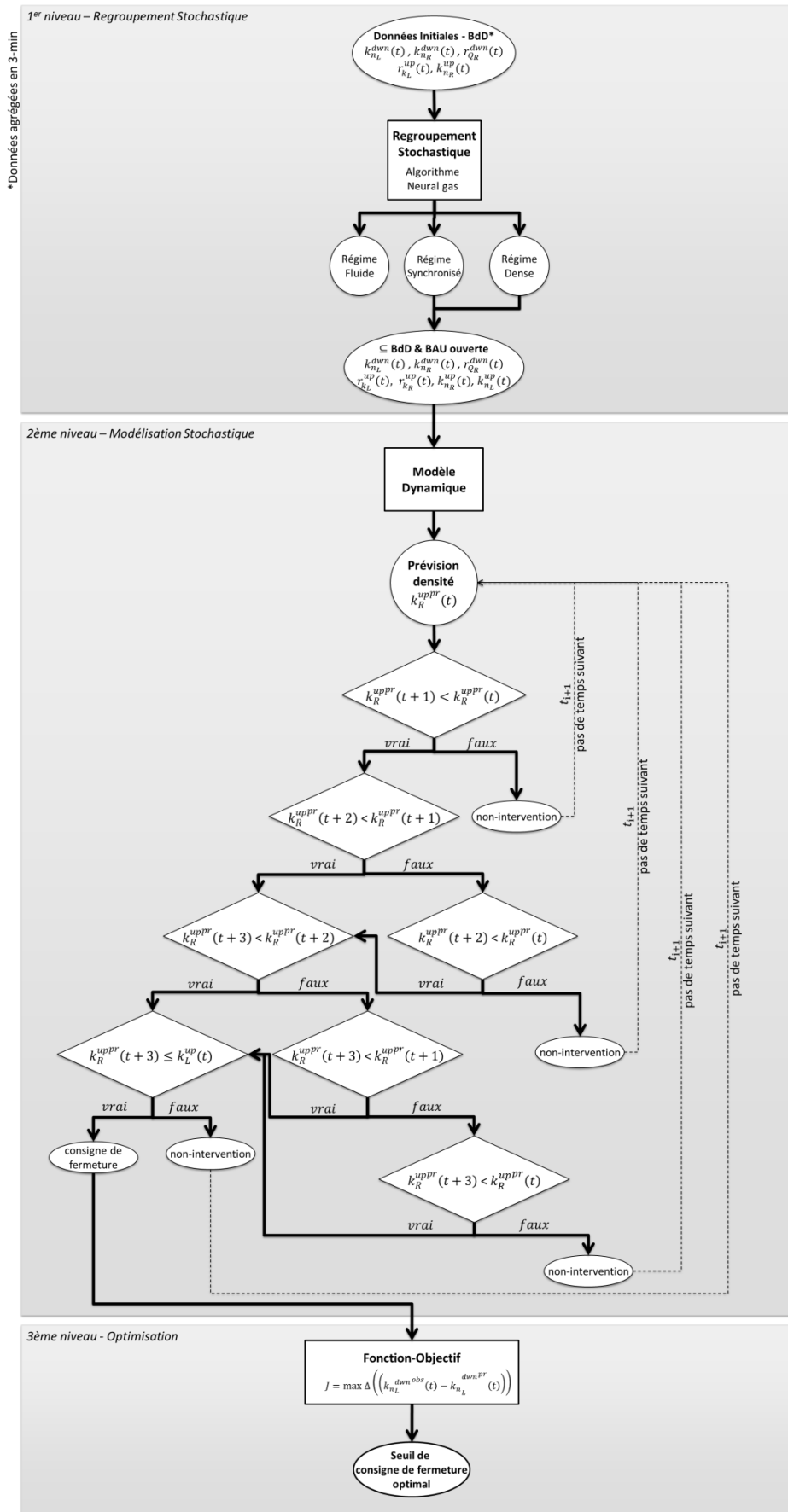


Fig. 149 Organigramme de désactivation de la consigne d'ouverture (fermeture) du système de BAU active [7].

Sur la base des algorithmes optimisés, les consignes automatiques d'une journée type sont présentées dans la figure ci-dessous.

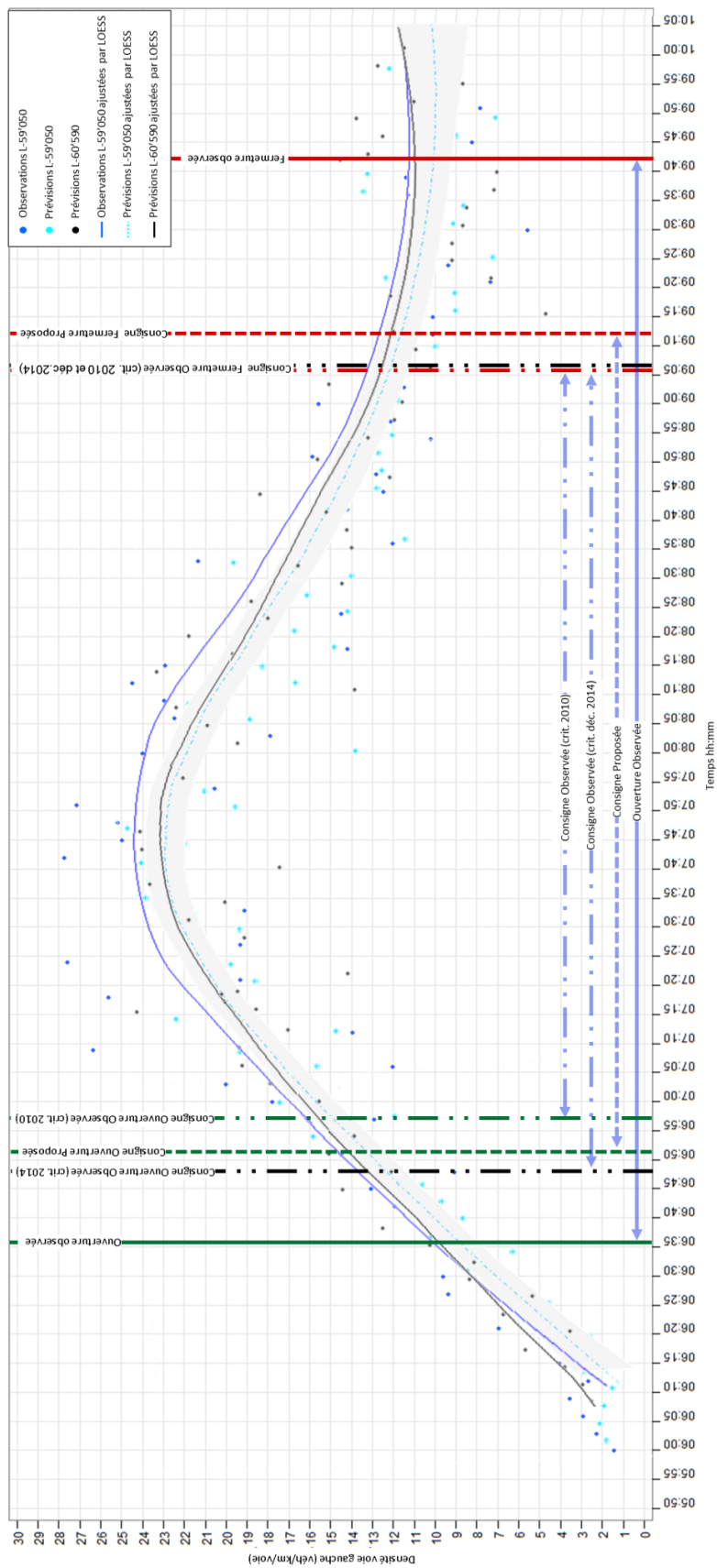


Fig. 150 Exemple de chronologie des diverses consignes, mardi 18.03.2014, période de pointe du matin, direction Lausanne.

10.5 Synthèse de l'optimisation des consignes

L'optimisation des consignes d'activation respectivement de désactivation du système de BAU active ont fait l'objet de plusieurs mises à jour, améliorations afin d'ouvrir la 3^{ème} voie à la circulation de façon optimale.

En 2011, les consignes d'ouvertures implémentées agissaient de manière trop tardive sur le système ce qui induisait une accentuation du ralentissement constaté. Les opérateurs avaient donc pris l'habitude, à bon escient, de procéder à l'ouverture de la BAU à la circulation sur la base de leur expérience.

En 2013, malgré une mise à jour des algorithmes des consignes, l'ouverture de la BAU à la circulation est commandée, par les opérateurs, en amont de la consigne automatique. L'étude des effets d'une telle ouverture anticipée a démontré une perte de temps relativement importante pour les usagers en raison de la sous-utilisation potentielle de l'infrastructure.

Fin 2014, une nouvelle mise à jour de la consigne a été réalisée afin d'éviter la formation de bouchon en HPM due à une montée rapide du débit et limiter au maximum le taux de fausses alarmes. Cette consigne est maintenant performante et bien respectée par les opérateurs.

L'optimisation de l'utilisation du système de BAU active est donc dictée par la consigne d'activation qui doit apparaître suffisamment en amont de conditions de circulation congestionnées mais le plus tard possible afin de maximiser l'utilisation de l'infrastructure ainsi que par la consigne de désactivation qui doit apparaître suffisamment tôt afin de maximiser à nouveau l'utilisation de l'infrastructure sans intervenir trop tôt et générer à nouveau une diminution du niveau de service.

Dans sa thèse de doctorat [7], S. Samoili a développé des algorithmes de prédiction des seuils optimaux des consignes d'activation respectivement de désactivation du système de BAU active. L'échantillon de données utilisées est récent (2014) et important (en moyenne 4'000 observations par régime de trafic). Ces algorithmes se basent sur une étude approfondie des phases de transition des régimes de trafic, sur des méthodes de prédiction des conditions de circulation et finalement sur une détermination par optimisation de variables déterminantes des consignes d'activation (notamment répartition du flux entre les voies et densité par voies). Ces algorithmes n'ont pas été testés en vraie grandeur.

Il convient toutefois de noter que les valeurs des seuils optimisés, basés sur la répartition entre les voies et la densité par voie, sont adaptées aux conditions spécifiques du système de BAU active entre Morges et Ecublens. Toute évolution du comportement des usagers, notamment tout changement de la part du trafic dans la voie de la BAU (acceptation du système) aura une influence directe sur ces seuils optimisés. Dans le cas de mise en service d'autres systèmes de BAU active sur le réseau des routes nationales, les principes d'optimisation des consignes décrits dans les organigrammes précédents (Fig. 148, Fig. 149) pourront être appliqués.

11 Conclusions et recommandations

La recherche ASTRA 2010/023_OBF ayant pour objectif d'évaluer le système de bande d'arrêt d'urgence ouverte à la circulation mis en service sur un tronçon de l'autoroute A1 Lausanne-Genève entre Morges et Ecublens fournit les résultats suivants :

Tab. 22 Objectifs et résultats du projet de recherche

OBJECTIFS	RESULTATS
Analyse d'efficacité du système	
Impact sur la capacité	
Capacité théorique estimée par calcul avant étude	5'000 véh/h (+ 1'000 véh/h).
Détermination du gain moyen sur les débits maximums en HP entre 2008 et 2010 (agrégation par 3 minutes)	+ 925 véh/h direction Lausanne (+19%) + 840 véh/h direction Genève (+17%)
Approximation de la capacité du tronçon (agrégation par 15 minutes) en 2014 sans congestion	Direction Lausanne : > 5'350 véh/h Direction Genève : > 5'050 véh/h
Impact sur le débit mesuré	
Détermination du gain moyen en HP entre 2008 et 2013	+810 véh/h direction Lausanne (+23%) +620 véh/h direction Genève (+17%)
Détermination de l'impact du système de BAU active sur le TJMO	Tendance similaire à celle constatée avant la mise en service du système de BAU active. Pas d'attractivité supplémentaire. Demande importante en HP dans de meilleures conditions de circulation.
Détermination de l'impact du système de BAU active sur le périmètre élargi	Saturation anticipée des tronçons aval. Forte dépendance à d'autres conditions de circulation que celles du tronçon de la BAU active.
Détermination de l'impact du système de BAU active sur le réseau secondaire	Potentielle diminution des charges sur le réseau secondaire. Tendance à confirmer lors du prochain recensement.
Impact sur la vitesse	
Détermination de l'évolution de la vitesse moyenne en HP entre 2008 et 2013	Vitesses plus élevées et plus stables en 2013 qu'en 2008. Limitation légale bien respectée (100 km/h).
Evaluation de la vitesse des poids lourds	Vitesse moyenne supérieure de 7 à 8 km/h par rapport à limite légale (80 km/h).
Détermination de l'évolution de la vitesse sur le périmètre élargi	Congestions récurrentes. Courbe des vitesses moyennes en chute.
Impact sur la densité	
Détermination de l'évolution de la densité en HP entre 2008 et 2013	Augmentation de la densité. Vitesses plus stables → utilisation positive soutenue de l'infrastructure.
Impact sur les temps de parcours	
Détermination de l'évolution relative des temps de parcours en HP (Infrastructure à 2x2 voies vs infrastructure avec BAU active)	Estimation de la diminution des temps de parcours : Entre -8 et -9% direction Genève Entre -25 et -50% direction Lausanne (globalement -30%)
Impact sur l'environnement	
Détermination de l'évolution relative de la consommation de carburant (Infrastructure à 2x2 voies vs infrastructure avec BAU active)	Estimation de la diminution de consommation de carburant : -55% direction Genève (BAU active) -28% direction Genève (zone d'étude élargie) -40% direction Lausanne (zone d'étude élargie)
Détermination de l'évolution relative des émissions de polluants (Infrastructure à 2x2 voies vs infrastructure avec BAU active)	Estimation de la diminution des principales émissions polluantes : ~ -40% sur le CO ₂ et les NO _x ~ -75% sur les particules fines ~ -13% sur les composés organiques volatils

Impact sur la sécurité	
Détermination de l'évolution des temps intervéhiculaires et des distances de sécurité entre 2008 et 2013	Très faible amélioration des distances de sécurité par détente du flux (augmentation des temps intervéhiculaires) sur la voie de gauche. Valeurs relevées largement inférieures aux minima standards, notamment pour les véhicules légers.
Détermination de l'évolution de l'accidentologie entre 2008 et 2013	Diminution des accidents sur la zone de la BAU active, plus marquée en direction de Lausanne que de Genève et notamment aux HP. Augmentation du nombre d'accidents sur un tronçon adjacent (Crissier dir. Lausanne).
Comportement des usagers	
Perception du système par les usagers	
Avis des usagers sur le système en 2012	Globalement satisfaits du système à 78%. Fluidité améliorée, sécurité inchangée. 25% des usagers sont gênés par la ligne blanche continue. Satisfaction augmente et gêne diminue avec l'augmentation de la fréquence d'utilisation.
Répartition du débit par voies	
Utilisation de la BAU	Part du flux total d'environ 20%. Amélioration de la compréhension du système au fil des ans. Comportement adéquat des chauffeurs professionnels (poids lourds).
Comportement à Morges-Est (entrée, sortie du système de BAU active)	
Détermination de l'évolution du comportement des usagers à l'entrée du système (direction Lausanne)	Augmentation de l'insertion directe sur la BAU (18 – 30%). Diminution des changements de voies dans les 600 premiers mètres.
Détermination de l'évolution du comportement des usagers à la sortie du système (direction Genève)	Véhicules sortants présélectionnés à près de 90%. Augmentation des changements de voies de la BAU vers la voie de droite dans la zone de transition. Situation potentiellement à risque.
Activation du système	
Heures et durée d'ouverture	
Evolution de la durée d'ouverture entre 2010 et 2014	Avancement de l'heure d'ouverture. Allongement de la durée d'ouverture (+2h).
Impact du respect des consignes automatiques	Une trop grande anticipation de l'ouverture de l'ordre de 30 minutes implique une perte de temps globale pour les usagers de 1h35.

Paramètres optimaux pour la mise à disposition d'une BAU active

Le bon fonctionnement du système repose sur la présence d'un algorithme de consignes d'ouverture / fermeture performant. Il doit d'une part éviter la formation de congestion en périodes de pointe et d'autre part être un outil d'aide à la décision pour l'opérateur dans lequel celui-ci a confiance et ainsi éviter qu'il n'anticipe la consigne. En effet, dans ce cas, cela génère des pertes de temps pour les usagers (abaissement de la vitesse à 100 km/h inutile).

L'algorithme d'activation / désactivation du système utilisé actuellement a été affiné au fur et à mesure des années d'exploitation du système de la BAU active. Il repose sur l'analyse de la vitesse et de la densité à chaque pas de temps de 3 min. Une condition sur la pente de la densité a été ajoutée pour gérer l'augmentation rapide de trafic observée le matin. Les résultats de cet algorithme sont concluants.

Une proposition d'optimisation de cet algorithme a fait l'objet d'une thèse de doctorat [7]. Les paramètres utilisés pour l'algorithme optimisé sont la densité et le pourcentage de

répartition des véhicules sur les voies. Cet algorithme n'a encore jamais été testé sur un tronçon en vraie grandeur.

Stratégies d'ATM recommandées

L'équipement actuel du système répond aux besoins. Les analyses et observations faites ne démontrent pas de déficit. Dans le cadre des évolutions du système (2014), des modifications des signaux visant à limiter les entrecroisements tardifs ont été testées sur site. Aucune de ces mesures n'a eu de résultats probants.

Dans le cadre de ce mandat de recherche, deux mesures sont proposées pour une optimisation de l'installation :

- Renforcer l'information aux usagers sous la forme de campagnes d'information ciblées (usagers fréquents et groupe 46-60 ans).
- Compléter la signalisation en ajoutant une signalisation dynamique textuelle explicitant l'ouverture et la fermeture de la BAU à la circulation.

Recommandations

Les résultats positifs obtenus par la mise en service d'un système de BAU active sur le tronçon Morges-Ecublens confirme que son application à d'autres tronçons autoroutiers saturés est une bonne solution. La mise en place d'un tel système est notamment recommandée sur des tronçons autoroutiers où un élargissement de l'infrastructure ne peut être facilement réalisé.

Glossaire

Terme	Signification
AIMSUN	Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks, simulateur de trafic, TSS (AIMSUN)
ATM	Active Traffic Management, gestion active du trafic (ATM)
AS	Passage ascendant (AS)
BAU	Bande d'arrêt d'urgence (BAU)
CAR	Autocars (CAR)
CEREMA	Centre d'Etudes et d'expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement (CEREMA)
CERTU	Centre d'études sur les réseaux de transport et l'urbanisme, actuellement CEREMA (CERTU)
CO	Monoxyde de carbone (CO)
CO ₂	Dioxyde de carbone (CO ₂)
CORDIS	Service Communautaire d'Information sur la Recherche et le Développement (CORDIS)
COV	Composés organiques volatils (COV)
CSACR	Comptage suisse automatique de la circulation routière (CSACR)
CSCR	Comptage suisse de la circulation routière (CSCR)
DETEC	Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC)
UVEK	<i>Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK)</i>
DATEC	<i>Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni (DATEC)</i>
DES	Passage descendant (DES)
EPF	Ecole Polytechnique Fédérale (EPF)
EPFL	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
FTV	Système de feux de fermeture temporaire des voies (FTV)
HC	Hydrocarbures imbrûlés (HC)
HP	Heure de pointe (HP)
HPM	Heure de pointe du matin (HPM)
HPS	Heure de pointe du soir (HPS)
ICE	Institution of Civil Engineers (ICE)
ICOM	Laboratoire de la construction métallique, EPFL (ICOM)
KSP	K-Shortest Path tracking algorithm (KSP)
LAVOC	Laboratoire des Voies de Circulation, EPFL (LAVOC)
LBus	Autobus de ligne
LDDR	Rapport de densité de la voie par la densité de direction, lane density distribution ration (LDDR)
LFDR	Part du flux total par voie, Lane Flow Distribution Ration (LFDR)
MC	Motocycles (MC)
MICET	Modèle informatisé des coefficient d'émission du trafic routier (MICET)

Terme	Signification
MISTRA	Système d'information pour la gestion des routes et du trafic (MISTRA)
MSRB	Groupement Maggia / Schopfer & Niggli / RGR / BG (MSRB)
NO _x	Oxydes d'azote (NO _x)
NTUA	Université polytechnique nationale d'Athènes, Grèce (NTUA)
OCR	Ordonnance sur les règles de la circulation routière (OCR)
OFEV	Office Fédéral de l'Environnement (OFEV)
OFROU	Office Fédéral des Routes (OFROU)
OFT	Office Fédéral des Transports (OFT)
OSM	OpenStreetMap (OSM)
PLM	Poids lourds marchandises (PLM)
PM	Matière particulaire, particules fines (PM)
PMV	Panneaux à messages variables (PMV)
PUN	Pannestreifenumnutzung (PUN)
QUARTET	Quadrilateral Advanced Research on Telematics for Environment and Transport, CORDIS (QUARTET)
R-BAU	Réaffectation de la BAU en voie de circulation (R-BAU)
RGR	RGR Robert-Grandpierre et Rapp S.A. (RGR)
RPLP	Redevance poids lourds liée aux prestations (RPLP)
RTS	Radio Télévision Suisse francophone (RTS)
Sétra	Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements, actuellement CEREMA (Sétra)
SMETRA	Serveur de Mesure Trafic (SMETRA)
SN	Norme Suisse (SN)
STI	Systèmes de transport intelligents (STI)
ITS	<i>Intelligent Transportation Systems (ITS)</i>
TC	Transports collectifs (TC)
TI	Transports individuels (TI)
TOPO	Geodetic Engineering Laboratory, EPFL (TOPO)
TRB	Transportation Research Board (TRB)
TSS	Transport Simulation Systems (TSS)
UAV	Véhicule aérien sans pilote, Unmanned Aerial Vehicle (UAV)
UTC	Université de technologie de Compiègne (UTC)
véh/h	Véhicules par heure (véh/h)
VM-CH	Verkehrsmanagement, gestion du trafic en Suisse (VM-CH)
VSS	Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)
VSP	Voie spécialisée partagée (VSP)
VT	Voiture de tourisme (VT)
VU	Application métier « Accidents de la circulation », MISTRA (VU)
VUL	Véhicules utilitaires légers (VUL)

Bibliographie

Lois fédérales

- [1] Confédération suisse (2014), « **Loi fédérale du 19 décembre 1958, état au 1^{er} juillet 2014 sur la circulation routière (LCR)** », *RS 741.01*, www.admin.ch.

Ordonnances

- [2] Confédération suisse (2014), « **Ordonnance du 13 novembre 1962, état au 1^{er} janvier 2014 sur les règles de la circulation routière (OCR)** », *RS 741.11*, www.admin.ch.

Instructions et directives de l'OFROU

- [3] Office fédéral des routes OFROU (2007), « **Conversion de la bande d'arrêt d'urgence (BAU) en voie de circulation** », *Directive ASTRA 15002, V1.30*.
- [4] Office fédéral des routes OFROU (2008), « **Gestion du trafic en Suisse (VM-CH)** », *Directive ASTRA 15003, V1.04*.
- [5] Office fédéral des routes OFROU (2009), « **Postes de comptage du trafic** », *Directive ASTRA 13012, V1.05*.

Normes

- [6] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2006), « **Capacité, niveau de service, charges compatibles** », *SN 640018a*.

Documentation

- [7] S. Samoili (2015), « **Stochastic Modeling of Lane Distribution and Dynamic Control of Managed Lanes for Highways** », *Thèse de doctorat, LAVOC – EPFL*, Lausanne.
- [8] Groupement MSRB (Octobre 2011), « **Monitoring 1 an après la mise en service** », *Rapport BAU Morges Ecublens, version 0.1*, RGR S.A., OFROU.
- [9] Groupement MSRB (Avril 2011), « **Spécifications détaillées du CT_Signalisation, Rapport technique** », *Rapport BAU Morges Ecublens, version 2.5*, RGR S.A., OFROU.
- [10] Groupement MSRB (Août 2010), « **Monitoring 3 mois après la mise en service** », *Rapport BAU Morges Ecublens, version 3.0*, RGR S.A., OFROU.
- [11] Groupement MSRB (Septembre 2013), « **Evolutions 2013 du projet de pilotage et de signalisation** », *Rapport BAU Morges Ecublens, version 3.0*, RGR S.A., OFROU.
- [12] Groupement MSRB (Février 2016), « **Evolutions 2013 du projet de pilotage et de signalisation – Monitoring** », *Rapport BAU Morges-Ecublens, version 2.0*, RGR S.A., OFROU.
- [13] S. Samoili, D. Efthymiou, C. Antoniou, A.-G. Dumont (2014), « **A Multi-Dimensional Analysis of Hard Shoulder Running Systems** », *93rd Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington D.C., USA.
- [14] S. Samoili, N. Geroliminis, A.-G. Dumont (2014), « **Dynamic Modeling of Lane Distribution Impact in Complex Freeways** », *International Symposium of Transport Simulation*, Corse, France.
- [15] S. Samoili, N. Geroliminis, A.-G. Dumont (2015), « **Dynamic Modeling of Lane Flow and Density Distribution in Congested Freeways** », *94th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington D.C., USA.
- [16] S. Samoili, N. Geroliminis, A.-G. Dumont (2015), « **Stochastic Modeling of Lane Distribution and Dynamic Control of Managed Lanes for Highways** », *4rd Symposium of the European Association for Research in Transportation – hEART 2015*, Copenhagen, Danemark.
- [17] S. Samoili, A.-G. Dumont, N. Geroliminis (2015), « **Dynamic Predictive Control Algorithm for Hard Shoulder Running Highways** », *15th Swiss Transport Research Conference*, Ascona, Suisse.
- [18] S. Samoili, D. Efthymiou, C. Antoniou, A.-G. Dumont (2013), « **Investigation of Lane Flow Distribution Forecasting in Hard Shoulder Running Freeways** », *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2396, no 1, TRB.

-
- [19] S. Samoili, D. Efthymiou, C. Antoniou, A.-G. Dumont (2013), « **Short-Term Lane Flow Distribution Forecasting in Hard Shoulder Running Freeways** », *International Symposium on Recent Advances in Transport Modeling – Ptimum 2013*, Kingscliffe, Australie.
-
- [20] J. Chapoton, LAVOC (2014), « **Analyse et positionnement de poids lourds dans le trafic** », *Rapport de projet de master*, LAVOC-EPFL.
-
- [21] J. Chapoton, LAVOC (2013), « **Analyse et positionnement de poids lourds dans le trafic** », *Rapport de pré-étude*, LAVOC-EPFL.
-
- [22] H. Bordes, LAVOC (2014), « **Etude de la sécurité routière du bassin lémanique et comparaisons internationales** », *Rapport de projet de master*, LAVOC-EPFL.
-
- [23] B. Dumont, LAVOC (2013), « **Efficacité de la bande d'arrêt d'urgence entre Morges et Ecublens** », *Rapport de projet de master*, LAVOC-EPFL.
-
- [24] M.-A. Fénart, A.-G. Dumont (LAVOC), L. D'Angelo, A. Nussbaumer (ICOM) (en cours), « **Simulations de trafic intégrant la détermination d'indices de performance structurale ; Partie 1 : Trafic** », Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche AGB 2010/003*.
-
- [25] M.-A. Fénart, M. Ould-Henia, M. Delaby, Nibuxs Sàrl (en cours), « **Actualisation des facteurs d'équivalence de la norme SN640320** », Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche VSS 2015/411*.
-
- [26] A.-G. Dumont, F. Huguenin (décembre 2005), « **Evaluation de la sécurité du trafic par microsimulation** », Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche OFROU 2003/005, Rapport VSS No. 1160*.
-
- [27] E. Bert, E. Chung, A.-G. Dumont (juin 2009), « **Dynamic Urban Origin-Destination Matrix Estimation Methodology** », Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche ASTRA 2006/016, Rapport VSS No. 1275*.
-
- [28] A. Bhaskar, E. Chung, A.-G. Dumont (janvier 2011), « **Development of urban network travel time estimation methodology** », Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche ASTRA 2006/015, Rapport VSS No. 1337*.
-
- [29] M. H. Pham, E. Chung, A.-G. Dumont (décembre 2012), « **Amélioration du modèle de comportement individuel du conducteur pour évaluer la sécurité d'un flux de trafic par simulation** », Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche ASTRA 2004/015, Rapport VSS No. 1406*.
-
- [30] Lausanne Région, Transitec, Citec (Octobre 2011), « **Comptages périodiques de trafic TI-TC 2010** », *Rapport technique, Lausanne Région – Commission Transports*.
-
- [31] Office fédéral des routes OFROU, filiale d'Estavayer-le-Lac (Janvier 2010), « **A1 Autoroute Lausanne-Genève / Annonce de fermeture de chaussée et de mise en service de la bande d'arrêt d'urgence (BAU Active) entre Morges et Ecublens** », *Communiqué de presse*.
-
- [32] Office fédéral des routes OFROU, CSACR (2008), « **Comptage automatique de la circulation routière, rapport annuel 2008** », *Rapport annuel, CSACR*.
-
- [33] OFROU (Juillet 2014), « **Trafic et disponibilité des routes nationales** », *Rapport 2013, OFROU*.
-
- [34] OFT, centre de compétences, Données du transport de marchandises (Avril 2015), « **Transport transalpin de marchandises en Suisse, Indices 2014 et interprétation de l'évolution** », *Rapport du 2^{ème} semestre 2014, OFT, DETEC*.
-
- [35] OFS (2015), « **Ampleur des embouteillages sur le réseau des routes nationales** », CSCR, OFS.
-
- [36] OFS (Juin 2015), « **La pendularité en Suisse 2013** », *Actualités OFS, OFS*.
-
- [37] OFEV (2010), « **Émissions polluantes du trafic routier de 1990 à 2035** », *Rapport – Connaissance de l'environnement*, Office fédéral de l'environnement (OFEV).
-
- [38] Radio Télévision Suisse Romande (Avril 2014), « **L'autoroute A1 entre Genève et Lausanne célèbre ses 50 ans** », *Article de presse*.
-
- [39] Parlement, Confédération Suisse (Novembre 2009), « **Message relatif au programme d'élimination des goulets d'étranglement du réseau des routes nationales et à l'allocation des moyens financiers nécessaires** », *Message n° 09.084*.
-
- [40] TRB (2010), « **Highway Capacity Manual** », TRB.
-
- [41] C. Buisson, J.-B. Lesort, CERTU (2010), « **Comprendre le trafic routier – Méthodes et calculs** », *Editions du CERTU, CERTU*.
-
- [42] J.Y. Bouguet (1999), « **Pyramidal Implementation of the Lucas Kanade Feature Tracker Description of the Algorithm** », *Technical report, Intel Microprocessor Research Lab*.
-
- [43] Z. Zivkovic (2004), « **Improved Adaptive Gaussian Mixture Model for Background Subtraction** », *International Conference on Pattern Recognition, 2004*.
-
- [44] J. Berclaz, F. Fleuret, E. Türetken, P. Fua (2011), « **Multiple Object Tracking Using K-Shortest Paths Optimization** », *IEEE Transactions on Patten Analysis and Machine Intelligence*.
-

-
- [45] U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration (juillet 2004), « **Traffic Analysis Toolbox Volume III : Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software** », Research, Development, and Technology. Turner-Fairbank Highway Research Center. Georgetown.
-
- [46] J. Wardrop (juin 1952), « **Road paper. Some theoretical aspects of road traffic research** », *Proceedings of ICE*, Institution of Civil Engineers.
-
- [47] Sétra (novembre 2009), « **Émissions routières de polluants atmosphériques – Courbes et facteurs d'influence** », *Note d'information*, Sétra.
-
- [48] A. Huang (avril 2008), « **Similarity Measures for Text Document Clustering** », *NZCSRSC 2008*, New Zealand.
-
- [49] T. Kazem, V. Rushikesh (2009), « **Effects of similarity metrics on document clustering** », *7th International Conference on Information Technology*, Las Vegas, USA.
-
- [50] L. I. Panis, S. Broekx, R. Liu (2006), « **Modelling instantaneous traffic emission and the influence of traffic speed limits** », *Science of The Total Environment, Volume 371, Issues 1-3, 1. December 2006, p. 270-285*.
-
- [51] SEDE SA (septembre 2010), « **A1 Morges-Ecublens ; Bande d'arrêt d'urgence ; Impact sur la qualité de l'air** », *SEDE SA sur mandat du service des routes du Canton de Vaud*.
-
- [52] Highways Agency (juin 2008), « **ATM Monitoring and Evaluation – 4-Lane Variable Mandatory Speed Limits – 12 Month Report** », *Mott MacDonald Ltd pour Highways Agency*, UK.
-
- [53] Préfecture de la région d'Île-de-France (juillet 2008), « **La voie auxiliaire sur A4/A86** », *site internet <http://www.dir.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr/>*
-
- [54] Marc Roux (mars 2013), « **Mise en oeuvre d'une Voie spécialisée partagée sur l'autoroute A48** », Département de l'Isère.
-
- [55] G. Riegelhuth, A. Pilz, « **Mise en oeuvre d'une Voie spécialisée partagée sur l'autoroute A48** », *Hessisches Landesamt für Strassen-und Verkehrswesen*, Allemagne.
-

Clôture du projet



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement, des transports,
de l'énergie et de la communication DETEC
Office fédéral des routes OFROU

RECHERCHE DANS LE DOMAINE ROUTIER DU DETEC

Version du 09.10.2013

Formulaire N° 3 : Clôture du projet

établi / modifié le : 29.06.2016

Données de base

Projet N° : ASTRA 2010/023

Titre du projet : Effets sur le trafic de l'utilisation des bandes d'arrêt d'urgence

Echéance effective : 31.08.2016

Textes :

Résumé des résultats du projet :

Le projet de recherche VSS 2010/023 a pour objectif d'étudier les effets, les avantages, les risques et les inconvénients de l'utilisation de la bande d'arrêt d'urgence comme voie de circulation additionnelle. Cette étude a été réalisée sur le système de BAU active de Morges-Ecublens sur l'autoroute A1 Lausanne-Genève.

Les principaux résultats de cette recherche sont les suivants :

- L'ouverture de la 3ème voie à la circulation en périodes de pointe depuis 2011 permet de garantir des conditions de circulation stables avec un débit en moyenne 20% plus élevé en 2013 qu'en 2008.
- L'attractivité du tronçon n'a pas été influencée par la mise en service du système de BAU active. L'évolution moyenne est identique à celle constatée précédemment.
- Les vitesses sont plus stables avec le système actif. Toutefois, on constate une tendance à la diminution des vitesses moyennes et notamment sur les tronçons adjacents qui atteignent leur capacité limite.
- La capacité théorique du tronçon a été estimée par calcul à 5'000 véh/h. Dans des conditions de circulations sans congestion, il a été mesuré 5'350 véh/h dans la direction de Lausanne et 5'050 véh/h dans la direction de Genève.
- Dans la direction de Genève, les gains de temps de parcours sont de l'ordre de 8-9%. Dans la direction de Lausanne, ils sont d'environ 30%.
- Un algorithme de contrôle permettant de déterminer de manière optimisée l'ouverture et la fermeture de la BAU à la circulation a été développé.

Atteinte des objectifs :

Les objectifs fixés ont été atteints :

- La détermination de paramètres optimaux pour décider de la mise en circulation de la BAU font l'objet d'un algorithme de contrôle optimisé.
- Le comportement des usagers a été étudié, modélisé et des pistes d'amélioration pour la compréhension du système et son acceptabilité ont été émises.
- L'étude des débits, des densités, des vitesses, des temps de parcours, des impacts environnementaux et de la sécurité routière ont mis en évidence les bénéfices d'un tel système.

Déductions et recommandations :

Les différents résultats obtenus permettent d'envisager à grande échelle une utilisation d'un tel système sur les tronçons des routes nationales qui présentent des conditions de circulation saturées notamment en périodes de pointe.

Le système de BAU active est une alternative tout à fait efficace afin d'augmenter temporairement la capacité d'une autoroute afin de répondre à la demande. Cette solution est d'autant plus recommandée sur les tronçons où la densité d'habitation, les propriétés cadastrales, les ouvrages d'art et les ressources naturelles ne permettent pas un élargissement de l'infrastructure routière.

Chaque projet de mise en place d'un système de BAU active devrait faire l'objet d'une étude détaillée et notamment de simulations de trafic qui permettent de prédire de manière efficace, on l'a constaté, les conditions de circulation. Chaque projet a ses particularités qui ont une influence sur ces conditions (géométrie, jonctions, tronçons adjacents, particularités du site, flux, ...).

Publications :

- S. Samolli, N. Geroliminis, A.-G. Dumont (2015), « Stochastic Modeling of Lane Distribution and Dynamic Control of Managed Lanes for Highways », 4rd Symposium of the European Association for Research in Transportation – hEART 2015, Copenhagen, Danemark.
- S. Samolli, D. Efthymiou, C. Antoniou, A.-G. Dumont (2014), « A Multi-Dimensional Analysis of Hard Shoulder Running Systems », 93rd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C., USA.
- S. Samolli, N. Geroliminis, A.-G. Dumont (2014), « Dynamic Modeling of Lane Distribution Impact in Complex Freeways », International Symposium of Transport Simulation, Corse, France.
- S. Samolli, D. Efthymiou, C. Antoniou, A.-G. Dumont (2013), « Investigation of Lane Flow Distribution Forecasting in Hard Shoulder Running Freeways », Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, vol. 2396, no 1, TRB.
- S. Samolli, D. Efthymiou, C. Antoniou, A.-G. Dumont (2013), « Short-Term Lane Flow Distribution Forecasting in Hard Shoulder Running Freeways », International Symposium on Recent Advances in Transport Modeling – Ptimum 2013, Kingscliffe, Australie.

Chef/cheffe de projet :

Nom : Dumont

Prénom : André-Gilles

Service, entreprise, institut : LAVOC Laboratoire des voies de circulation, EPFL Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

Signature du chef/de la cheffe de projet :





RECHERCHE DANS LE DOMAINE ROUTIER DU DETEC

Formulaire N° 3 : Clôture du projet

Appréciation de la commission de suivi :

Evaluation :

Selon la commission de suivi l'objectif du projet a été pleinement atteint grâce à l'approche choisie et aux méthodes utilisées.

Les questions précises posées à la démarche du projet de recherche ont été répondues, en outre, il existe des approches concrètes et des recommandations pour améliorer la mise en service d'une BAU.

La collaboration ou coopération entre le groupe de recherche et de la commission de suivi a été constructive. L'inclusion de la commission de suivi a été conçu activement.

Mise en oeuvre :

Le résultat montre que l'utilisation d'une BAU dans certaines constellations apporte une amélioration à la fluidité de la circulation et à l'efficacité. Des Propositions concrètes pour améliorer la sécurité routière, la compréhension d'une BAU et l'acceptation par les usagers de la route font part du résultat - une transmission des résultats dans des projets actuels devrait absolument être envisagée.

Besoin supplémentaire en matière de recherche :

actuellement non

Influence sur les normes :

non; à vérifier: directive de l'Offrou 15002 (Réaffectation de la bande d'arrêt d'urgence; BAU)

Président/Présidente de la commission de suivi :

Nom : Suter

Prénom : Heinz

Service, entreprise, institut : B+S AG, Verkehrsplanung (Start des Projektes: ASTRA, Leiter Verkehrsmanagement)

Signature du président/ de la présidente de la commission de suivi :

Index des rapports de recherche en matière de route

L'index actuel des rapports publiés dernièrement peut être téléchargé sur le site www.astra.admin.ch (Service → Recherche en matière de routes → Downloads → Formulaire).