

# Évaluation de l'impact du taux de pénétration des systèmes coopératifs sur la consommation énergétique des véhicules

L. Khoudour<sup>1</sup>, J.P. Garrigos<sup>1</sup>, C. Françoise<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Cerema (Centred'Etudes et d'Expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement)

louahdi.khoudour@cerema.fr

## Résumé

*Cette étude sur la simulation des C-ITS est portée par le projet européen Compass4d dont le terrain d'expérimentation est le site de Bordeaux Ville. Il s'agit d'implémenter un certain nombre de cas d'usages et de vérifier quelles sont les modifications de fonctionnement du réseau étudié lorsque l'on introduit des systèmes coopératifs. Les modifications de fonctionnement du réseau sont étudiées selon plusieurs dimensions mais les plus étudiées sont les indicateurs : consommation énergétique des véhicules, temps de parcours, nombre d'arrêts aux feux et durée des arrêts*

## Mots Clef

Veins, simulation, taux, consommation, arrêts

## Abstract

In the work here, we have simulated the impact of cooperative systems in Bordeaux pilot test site in the COMPASS4D project. The objectives of these simulation tests are to ensure that the pilot operation of the project will not cause undue interruption in the other pilot sites and to identify optimal trial parameters. Results from this analysis will help with setting realistic performance targets. We have simulated two use cases from the Compass4D services : Energy Efficient Intersection (EEI) : Green Light Optimized Speed Advisory (GLOSA) and Green Wave.

## Keywords

Veins, simulation, rate, consumption, stops

## 1 Introduction

Cette étude sur la simulation des C-ITS est portée par le projet européen Compass4d dont le terrain d'expérimentation est le site de Bordeaux Ville. Il s'agit d'implémenter un certain nombre de cas d'usages et de vérifier quelles sont les modifications de fonctionnement du réseau étudié lorsque l'on introduit des systèmes coopératifs. Les modifications de fonctionnement du réseau sont étudiées selon plusieurs dimensions mais les plus étudiées sont les indicateurs : consommation énergétique des véhicules, temps de parcours, nombre d'arrêts aux feux et la durée des arrêts. A ces indicateurs il faut ajouter deux autres critères qui sont étudiés ici :

- Analyse du système avec des taux de pénétration différents en véhicules équipés
- Evaluation de l'apport du système en fonction du niveau du trafic.

Les cas d'usage étudiés ici sont le GLOSA (carrefour économe) et le Green wave (onde verte). Ces deux cas d'usage sont développés par la suite.

Dans les scénarios testés, les véhicules communiquent avec les unités bord de route pour connaître l'état des feux de circulation des carrefours traversés par les véhicules. Même s'il y a la possibilité de communication entre véhicules elle n'est pas exploitée ici. Le cheminement de l'information la suivante : feu ->UBR -> Véhicules.

## 2 Les outils de simulation utilisés

Pour simuler les cas d'usage sur le réseau bordelais de Compass4D avec des communications V2V et V2I, nous utilisons l'environnement de travail Veins (vehicles in network simulation), qui est un logiciel libre pour faire des simulations sur des réseaux routiers. Il est basé sur deux simulateurs bien connus que sont OMNeT++ et SUMO [9] [13]. Le réseau routier simulé est basé sur une couche Open Street Map.

Une fois Open street map importé dans SUMO, nous devons modifier la géométrie et les paramètres des routes, nombre de voies, vitesse limite, etc...

Pour avoir un réseau le plus proche possible de la réalité, nous avons utilisé des photos aériennes de la ville de Bordeaux qui peuvent être téléchargées de l'Open Data de la ville (Bordeaux urban community). Grâce à ces données nous connaissons à l'avance les sens de circulation, les sens autorisés que nous implémentons dans le modèle.

## 3 Les simulations réalisées

Pour chaque cas d'usage (GLOSA et Greenwave) nous avons fait des simulations en deux temps.

**Dans un premier temps** pour chaque cas d'usage nous avons réalisé 22 simulations en utilisant deux types de flux. Les taux de pénétration en véhicules équipés : 0, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 60, 80, 90 et 100 % ont été utilisés.

**Dans un deuxième temps**, nous avons fixé le flux à 1000 véhicules mais nous avons fait varier les temps de simulation ce qui revient à faire varier la demande en

flux. Ainsi, les taux de pénétration (5, 40 et 80%) et 4 temps de simulations : 3000 secondes (ce qui correspond à une période chargée), 5100 s, 6150 s et 7200 secondes ( ce qui correspond à une période où la demande est beaucoup moins forte) sont les variables de base.

Pour chaque simulation et pour chaque pas de 0.1s, les paramètres suivants sont enregistrés : l'identifiant du véhicule, le temps, véhicule équipé ou non, la vitesse, l'accélération, la position du véhicule, l'identifiant de la rue, la position du véhicule sur la rue.

A partir des sorties de simulation, avec le logiciel R, on calcule :

- Pour chaque véhicule, la vitesse et le profil de consommation;
- Pour chaque véhicule, des statistiques concernant le trajet effectué (consommation, nombre d'arrêts, temps de parcours) [7] [8] [12];
- Des statistiques dépendant du taux de pénétration de véhicules équipés (consommation, nombre d'arrêts, durée des arrêts, temps de parcours).

Pour calculer la consommation, on utilise les sorties de l'outil de cartes d'émissions de SUMO. Cet outil est basé sur le livre blanc sur les émissions concernant les transports routiers (HBEFA), version 3.1 [6]. Cet outil calcule à chaque pas choisi, la vitesse, l'accélération et la consommation. Le modèle HBEFA fournit les facteurs d'émissions pour les différentes catégories de véhicules.

Pour chaque véhicule, nous avons calculé la vitesse et le profil de consommation. Comme le taux de pénétration varie sans changer le flux de véhicules, il est possible de comparer la vitesse et le profil de consommations des véhicules équipés ou non

### 3 Les cas d'usage implémentés

#### 3.1 Cas d'usage GLOSA

Le GLOSA veut dire Green Light Optimized Speed Advisory.

Dans ce cas d'usage, les unités bord de route (UBR) envoient aux véhicules des consignes sur les cycles de feux [1] [2] [3] [4] [9] [10].

Quand les véhicules reçoivent ces informations des UBR, ils vérifient d'abord s'ils sont concernés. Ensuite, ils calculent le temps et la distance restantes pour atteindre le feu. Le véhicule donne au conducteur un conseil de vitesse afin que celui-ci réduise l'allure de son véhicule, de façon à ne pas être arrêté au feu au prochain carrefour.

Les véhicules équipés reçoivent les premiers messages des UBR à une distance moyenne d'environ 500m des feux. Cette distance peut supérieure ou inférieure à ce seuil mais en général c'est la portée des UBR qui fixe la valeur pour chaque véhicule Dans ce cas les feux sont soit à l'état rouge soit à l'état orange.

Dans les deux cas, la première chose faite est le calcul de la distance aux feux et le temps pour les atteindre en considérant une vitesse constante. En fonction du temps restant dans la phase courante, le profil de vitesse du véhicule concerné est modifié pour éviter de s'arrêter aux feux.

Pour construire les profils de vitesse et le temps restant pour atteindre les feux, des modèles de mouvement classiques de la littérature sont utilisés.

Plusieurs cas de figure peuvent se présenter.

##### Cas 1 : le feu est au vert

Si le feu est vert quand le véhicule l'atteindra : pas de modification de vitesse.

Si le feu est rouge à l'arrivée du véhicule : si possible accélération pour atteindre le feu avant qu'il ne change de phase. Si ce n'est pas adapté, pas de changement de vitesse.

##### Cas 2 : le feu est au rouge

Si le feu est vert quand le véhicule l'atteindra : on impose au véhicule de maintenir sa vitesse (s'il accélère, il arrivera au feu alors que celui-ci sera encore dans sa phase de rouge).

Si le feu est rouge à l'arrivée du véhicule : décélération pour atteindre une vitesse adaptée pour avoir le vert (avec un minimum de 25 km/h)

### 3.2 Cas d'usage Green wave (Onde verte)

La vitesse préconisée à Bordeaux pour une onde verte est 38 km/h ( $10.56 \text{ m.s}^{-1}$ ). Le principe de communication entre les UBR et les véhicules équipés est le même que pour le GLOSA.

## 4 Les résultats obtenus

### 4.1 Première série de simulations

**Cas d'usage Glosa** (Tableau 1) : en termes de consommation énergétique, on constate globalement que les véhicules équipés consomment moins que les véhicules non équipés. On constate aussi que plus le taux de pénétration est élevé, plus la consommation des véhicules non équipés est basse car elle bénéficie de la politique de vitesse menée par les véhicules équipés.

Si l'on restreint l'analyse aux véhicules non équipés la consommation moyenne est de 10.2 l / 100 km. Avec un taux de 20%, l'économie est de presque de 2% ( 10 l / 100km) et avec un taux de 80%, l'économie est de 5% (consommation moyenne de 9.7 l / 100 km).

Pour les véhicules équipés : On constate aussi que plus le taux de pénétration est élevé, et plus l'économie en consommation est élevée. Cependant, au delà d'un seuil d'équipement l'évolution du gain est nulle . Autrement dit, il n'est pas nécessaire d'équiper toute la flotte de véhicules pour avoir un gain maximum (le seuil est d'environ 60%)

Les véhicules non équipés bénéficient largement de l'équipement des autres véhicules ce qui leur permet d'économiser près de 5% de carburant quand le taux est à 90%.

En terme de temps d'arrêts, lorsque tous les véhicules ne sont pas équipés, la durée moyenne des arrêts est de 18 secondes. Avec un taux de pénétration de 20%, la moyenne est de 13s (économie de 27%). Lorsque le taux est supérieur à 80%, la durée moyenne baisse à moins de 5s (gain de plus de 73%).

Pour les véhicules équipés, le gain en temps d'arrêts est évidemment très important. Pour les véhicules non équipés, au delà d'un taux de 60%, le gain pour les véhicules est aussi tout important (42%)

Pour le nombre d'arrêts, on note que plus le taux de pénétration est élevé et plus le nombre d'arrêts est bas. Ces variables, nombre d'arrêts et durée des arrêts, apporte le plus gros bénéfice en termes de consommation.

**Cas d'usage Green wave :** Les mêmes phénomènes que dans Glosa sont observés.

## 4.2 Deuxième série de simulations

L'objectif de cette 2<sup>ème</sup> série est de compléter la première et de regarder deux aspects : à partir de quel niveau de trafic le système Compass4D est-il utile, utilisable, bénéfique ? Par ailleurs, travaillant sur des taux de pénétration différents, nous souhaitons savoir quel était le taux minimum à posséder pour que le système soit aussi bénéfique. Nous avons considéré les dimensions suivantes :

- Consommation moyenne
- Temps de parcours moyen
- Durée d'arrêts moyenne
- Nombre d'arrêts moyen.

Les résultats sur les deux cas d'usages (GLOSA et Green Wave) ayant fourni sensiblement les mêmes résultats, nous présentons dans le cadre de cet article uniquement ceux concernant le GLOSA et en trafic fluide ou modéré (Tableau 2).

**Scénario à 80% de taux de pénétration :** Pour le scénario à 80% , la différence entre les situations avec et sans système va intervenir surtout sur les dimensions nombre d'arrêts et temps d'arrêts. La consommation pour les véhicules non équipés est légèrement supérieure à celle des équipés (environ 2%). Mais on constate que plus le taux d'équipement est élevé et plus les véhicules non équipés sont régulés par les équipés. Le comportement des véhicules non équipés devient alors de plus en plus similaire à ceux des véhicules équipés. Ceci est un résultat remarquable car il n'est pas nécessaire d'équiper 100% de la flotte de véhicules afin d'obtenir des résultats optimaux.

Les temps de parcours sont un peu plus élevés pour les équipés, ce qui est parfaitement normal, car ils régulent leur vitesse pour obtenir le feu au vert.

La distribution des temps d'arrêts moyens et du nombre d'arrêts moyen donnent un net avantage à l'utilisation du système. En effet, dans certains scénarios de trafic,

ces indicateurs sont 50 à 60% plus élevés quand les véhicules ne sont pas équipés.

**Scénario à 40% de taux de pénétration :** Pour le scénario à 40%, c'est à nouveau les temps d'arrêts et le nombre d'arrêts moyen qui font la différence entre les situations (de manière flagrante : 70% de plus dans certains scénarios). Par contre comme le taux est à 40% , les véhicules non équipés ne profitent plus autant de la régulation imposée par les véhicules équipés. La consommation moyenne des véhicules non équipés est supérieure d'environ 3% en moyenne. Les temps de parcours continuent à être inférieurs pour les non équipés.

**Scénario à 5% de taux de pénétration :** Pour le scénario à 5%, la consommation moyenne des véhicules équipés est inférieure d'environ 4 à 5% avec un temps de parcours soit plus élevé, soit moins élevé selon la proportion de véhicules qui ont pu passer au vert grâce à leur régulation. La différence se fait à nouveau sur les temps d'arrêts et le nombre d'arrêts.

## 5 Classification hiérarchique descendante

A partir des données de la 2<sup>ème</sup> série de simulations, à savoir 1000 véhicules simulés, en trafic plutôt fluide, nous avons procédé à une classification hiérarchique descendante. L'objectif de cette classification est d'essayer de dessiner des patterns de comportement d'automobilistes selon que leurs véhicules sont équipés ou non et selon aussi le taux d'équipement parmi les 1000 véhicules simulés.

Les variables de classification sont : la consommation, le temps de parcours, le nombre d'arrêts, le temps d'arrêts.

### 5.1 Résultats de la classification avec un taux de 80%

Les résultats de cette classification montrent deux tendances bien différenciées (Figures 1 et 2):

- Une première tendance qui regroupe soit des véhicules équipés à 100% ou des véhicules équipés à 0% mais qui possèdent pourtant des allures favorables en termes de consommation, de temps d'arrêts, en nombre d'arrêts. La consommation moyenne dans ce groupe d'environ 86% de l'échantillon est de 6.4 l/100, ce qui est très encourageant.
- A l'inverse une deuxième tendance se dégage, correspondant à 14% de l'échantillon des 1000, constituée pour moitié de véhicules équipés et pour moitié de non équipés. Dans ce groupe de véhicules, la consommation est élevée (7.2 l/100) ce qui représente un différentiel de 13% avec la classe précédente.

### 5.1 Résultats de la classification avec un taux de 40%

On observe à travers cette classification avec un taux à 40% de taux d'équipement trois tendances :

- Une première tendance comprenant environ 69% de l'échantillon contenant soit des classes avec des véhicules tous équipés ou bien des classes avec des véhicules pas du tout équipés. Cette tendance correspond aux véhicules qui ont bénéficié du système parce qu'ils y ont obéi et aux véhicules non équipés qui ont suivi la politique des véhicules équipés et en ont donc bénéficié. La consommation moyenne pour cette tendance est de 6.3l/100km environ.

- Une deuxième tendance qui comprend environ 22% de l'échantillon et est constituée de deux classes dont le taux d'équipement est de seulement 12% pour l'ensemble. Les résultats donc en termes de consommation sont intermédiaires puisqu'ils se situent à environ 7l/100km. Dans cette tendance, on voit bien l'influence de la baisse du taux d'équipement sur la consommation, le nombre d'arrêts, etc...

- Une troisième tendance regroupant environ 10% de l'échantillon, contenant que des véhicules non équipés et ne bénéficiant pas du système de régulation présente une consommation d'environ 7.4l/100km.

## 5.1 Résultats de la classification avec un taux de 5%

Ici les tendances sont simples : soit les véhicules sont arrêtés aux feux ce qui est le cas pour la majorité des véhicules car 95% d'entre eux ne sont pas équipés et ne sont donc pas guidés sur la vitesse à adopter pour ne pas être arrêtés aux feux. Soit les véhicules sont équipés (c'est une minorité) et dans ce cas ils ne sont pas suffisamment nombreux par rapport aux véhicules non équipés qui les environnent pour imposer leur régulation. On se retrouve alors avec des consommations (plus de 7.3l/100km) et des nombres d'arrêts importants.

## 6. Conjugaison du taux de pénétration et du trafic

Pour le niveau de trafic, il est clair que le système Compass4D n'est utilisable que lorsque celui-ci est fluide ou modérément chargé. Les résultats de simulation montrent bien qu'en période chargée, les résultats en termes de gains de consommation, de temps de parcours, et même en nombre d'arrêts ne sont pas du tout significatifs. En ce qui concerne le taux de pénétration, que ce soit pour la première série de simulation ou la deuxième, un taux minimum de 50 à 60% est requis pour voir la différence entre les situations avec ou sans système.

## 7. Conclusion et perspectives

Cette recherche a été menée dans le cadre du projet européen Compass4D. Des outils de simulations ont été utilisés pour implémenter des scénarios spécifiques sur le site de Bordeaux. Les simulations ont exploité le réseau urbain de la ville. Les simulations pour les cas d'usage GLOSA et Green Wave peuvent conduire à des gains en consommation énergétique substantiels. Ces gains en énergie sont surtout liés à la faculté du système Compass4d et des scénarios utilisés de limiter le nombre d'arrêts aux feux. La deuxième série de simulations a conforté la première série. En ce qui concerne le niveau de trafic, le système ne sera utile que par un trafic qui ne soit pas trop important car dans ce cas les consignes envoyées aux conducteurs de véhicules équipés ne peuvent être suivies. Les résultats trouvés en simulation ont été confirmés lors d'évaluations réelles sur le terrain. Une perspective de ce travail pourrait être une évaluation supplémentaire sur le terrain pour conforter les résultats. Des résultats globaux sur les simulations et les évaluations terrain pour les autres sites du projet se trouvent en référence [5].

Des résultats terrain existent et seront présentés lors de la journée afin de les mettre en relation avec ceux obtenus en simulation.

## Bibliographie

- [1] Rakha, H., & Kamalanathsharma, R. K. (2011, October). Eco-driving at signalized intersections using V2I communication. In *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2011 14th International IEEE Conference on* (pp. 341-346). IEEE
- [2] Konstantinos Katsaros, Ralf Kernchen, Mehrdad Dianati, David Rieck. Performance study of a Green Light Optimized Speed Advisory (GLOSA) Application Using an integrated Cooperative ITS Simulation Platform
- [3] Daniel Krajzewicz<sup>1</sup>, Laura Bieker, Jakob Erdmann. Preparing Simulative Evaluation of the GLOSA Application
- [4] Tessa Tielert, Moritz Killat, Hannes Hartenstein, Raphael Luz, Stefan Hausberger, T Thomas Benz. The Impact of Traffic-Light-to-Vehicle communication on Fuel Consumption and emissions .
- [5] Projet Compass4d, Deliverable D4.2, Simon Edwards et al., January 2016
- [6] HBEFA. HBEFA 3.1: Hot emission factors(2010). *Handbook Emission Factors for Road Transport*. Tech. rep., INFRAS, HBEFA 3.1 URL: <http://www.hbefa.Net/>
- [7] Rakha, H., & Kamalanathsharma, R. K. (2011, October). Eco-driving at signalized intersections using V2I communication. In *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2011 14th International IEEE Conference on* (pp. 341-346). IEEE.
- [8] Katsaros, K., Kernchen, R., Dianati, M., Rieck, D., & Zinoviou, C. (2011). Application of vehicular communications for improving the efficiency of traffic in urban areas. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 11(12), 1657-1667.

[9] Krajzewicz, D. (2010). Traffic simulation with SUMO—simulation of urban mobility. In *Fundamentals of Traffic Simulation* (pp. 269-293). Springer New York.

[10] Krajzewicz, D., Bieker, L., & Erdmann, J. (2012). Preparing simulative evaluation of the GLOSA application. In *Proc. 19th ITS World Congress*.

[11] Christoph Sommer, Reinhard German and Falko Dressler, "Bidirectionally Coupled Network and Road Traffic Simulation for Improved IVC Analysis," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 10 (1), pp. 3-15, January 2011.

[12] Tielert, T., Killat, M., Hartenstein, H., Luz, R., Hausberger, S., & Benz, T. (2010, November). The impact of traffic-light-to-vehicle communication on fuel consumption and emissions. In *Internet of Things (IOT), 2010* (pp. 1-8). IEEE

[13] Varga, A. (2010). OMNeT++. In *Modeling and Tools for Network Simulation* (pp. 35- 59). Springer Berlin Heidelberg.

Taux pénétration	Consommation moyenne	gain	Durée moyenne d'arrêts	gain	Nbre d'arrêts moyen	gain
0	9,93		10,57		0,76	
5	9,87	0,53%	9,76	7,63%	0,72	4,44%
10	9,85	0,80%	9,21	12,84%	0,71	6,25%
15	9,8	1,33%	8,51	19,44%	0,67	11,94%
20	9,77	1,55%	8,18	22,65%	0,63	16,21%
30	9,74	1,90%	7,06	33,22%	0,59	22,20%
40	9,7	2,29%	6,19	41,44%	0,55	26,73%
60	9,69	2,39%	5,18	50,99%	0,49	35,40%
80	9,59	3,40%	3,35	68,30%	0,44	41,48%
90	9,6	3,27%	3,24	69,35%	0,45	39,99%
100	9,57	3,60%	2,77	73,82%	0,44	41,28%

Tableau 1 : Gains calculés pour les principaux indicateurs en fonction du taux de pénétration (1<sup>ère</sup> série de simulations)

Scénario 5%	Equipé?	effectif	Conso moy	TP moyen	temps arrêts moyen	nbre d'arrêts moyen
	Non	944	6,45	162,75	6,91	1,16
	Oui	56	6,12	156,31	0,46	0,16
		Gain	2,63%	2,69%	93,31%	86,14%
<b>Scénario 40%</b>	Non	605	6,36	160,09	12,94	0,78
	Oui	395	6,28	165,64	3,18	0,22
		Gain	1,23%	-3,47%	75,42%	71,41%
<b>Scénario 80%</b>	Non	208	6,37	161,74	4,21	0,61
	Oui	792	6,33	167,84	1,67	0,26
		Gain	0,66%	-3,77%	60,17%	56,42%

Tableau 2 : Gains calculés pour les principaux indicateurs en fonction du taux de pénétration (2<sup>ème</sup> série de simulations)

### Nombre d'arrêts des véhicules non équipés selon le taux de pénétration

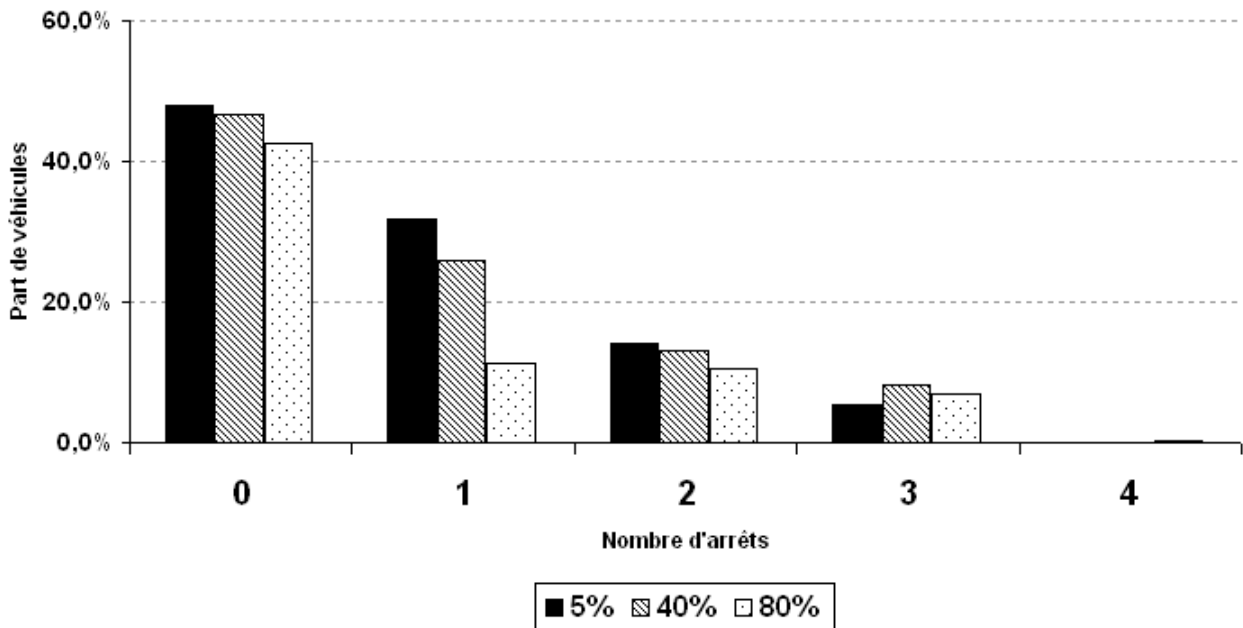


Figure 1 : Nombre d'arrêts des véhicules non équipés selon le taux de pénétration

### Nombre d'arrêts des véhicules équipés selon le taux de pénétration

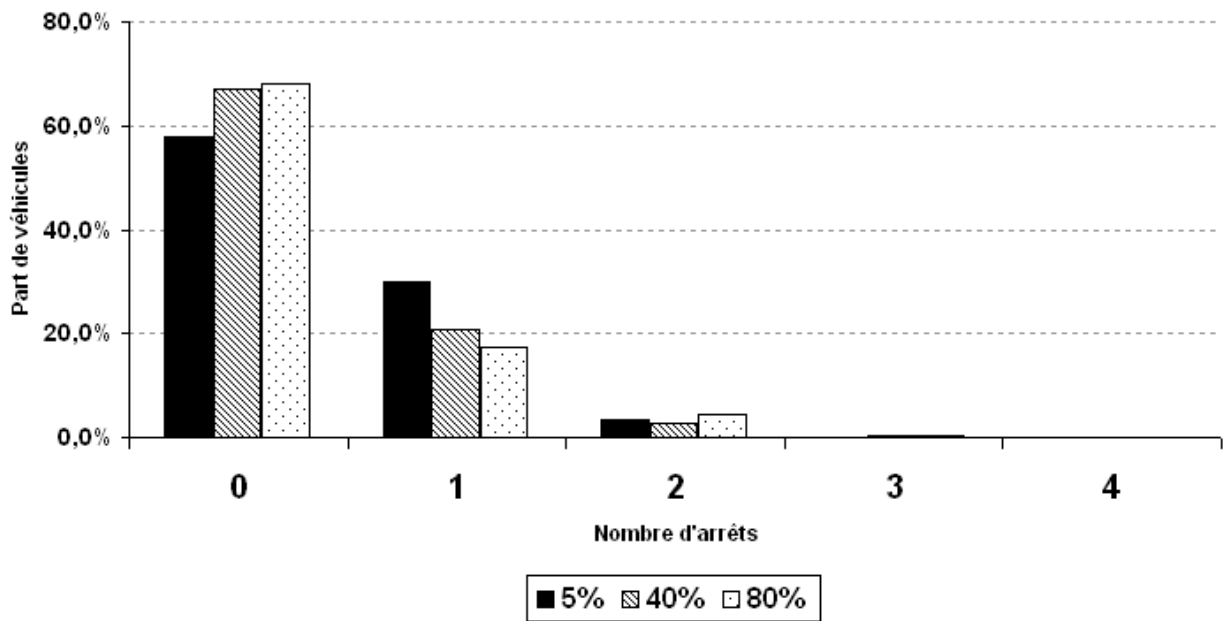


Figure 2 : : Nombre d'arrêts des véhicules équipés selon le taux de pénétration