

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**



**Université Frères Mentouri Constantine -1**  
**Faculté des Sciences de la Technologie**  
**Département Génie des Transports**



N° de série :21/JD3C/2021  
N° d'ordre :04/GTR/2021



## **Thèse**

Pour l'Obtention du Diplôme de  
DOCTORAT 3ème CYCLE  
Domaine : Sciences de la Technologie  
Filière : Génie des Transports  
Spécialité : Ingénierie des Transports  
Présentée par : Mr. KHELFI Mouloud

## **Thème**

---

# **Contribution à l'étude de la congestion et la régulation du trafic routier pour l'évaluation de la circulation en milieu urbain**

---

Soutenue le, 10 / 03 /2021

Devant le Jury

Mr. BOULAHLIB M. Salah	Professeur	Université Frères Mentouri Constantine 1	Président
Mr. BOUKEBBAB Salim	Professeur	Université Frères Mentouri Constantine 1	Rapporteur
Mr. KHOLAI Omar	Professeur	Université Frères Mentouri Constantine 1	Examineur
Mr. TOLBA Cherif	Professeur	Université Badji Mokhtar-Annaba	Examineur
Mr. KEBICHE Abdelhakim	MCA	Université Ferhat Abbas Sétif 1	Examineur

# Remerciements

---

*Au nom d'Allah le plus Grand, le merci lui revient de m'avoir guidé vers le droit chemin, tout au long de mes années d'études.*

*Mes premiers remerciements vont à mon Directeur de thèse, monsieur BOUKEBBAB Salim, Professeur à l'Université des Frères Mentouri, Constantine 1 et directeur du Centre de Recherche en Mécanique. Qu'il trouve ici ma profonde gratitude et ma reconnaissance pour les efforts fournis et les conseils prodigués. Son soutien et sa patience m'ont permis de mener ce travail à bien et dans les meilleures conditions.*

*Je tiens à remercier Docteur Neïla BHOURI et les membres du laboratoire GRETIA/COSYS de l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ex IFFSTAR, Paris), Université Gustave Eiffel, de m'avoir bien accueilli durant mes stages de recherches effectués au sein de leur laboratoire et de m'avoir mis dans de bonnes conditions de travail, ce qui nous a permis de réaliser des productions scientifiques ensemble.*

*Je remercie Professeur Mohamed Saleh BOULAHLIB de l'Université des Frère Mentouri Constantine 1 d'avoir accepté de présider le jury de cette thèse. Ce dernier n'a pas cessé de m'encourager et me conseiller à chaque occasion pour réussir. Ses paroles m'ont été comme une bouffée d'air à chaque fois. Qu'il trouve ici ma profonde gratitude.*

*Je remercie très sincèrement, les membres de jury d'avoir bien voulu accepter de faire partie de la commission d'examineur : le Professeur TOLBA Cherif de l'université de Badji Mokhtar- Annaba, et le Docteur KEBICHE Abdelhakim de Université Ferhat Abbas Sétif 1, qui ont accepté de faire le déplacement dans ces conditions critiques de pandémie Covid-19, et de nous honorer par leurs présences dans la commission d'examineur. Le professeur KHOLAI Omar de l'Université des Frère Mentouri Constantine 1, qui n'a pas hésité à accepter de faire partie des membres de jury.*

*Je n'oublie pas de remercier madame BENAMER Habiba qui m'a beaucoup soutenu et aidé, ainsi que le Professeur Idriss AMARA qui a bien contribué dans ma formation et pour ces valeureux conseils pour que j'atteigne mes objectifs, ce qui reflètent sa grande sagesse.*

*Je remercie fortement Monsieur Adel MESKINE cadre à la Direction des Travaux Publics et Monsieur Redha SOULI cadre aux niveau de l'Entreprise Métro d'Alger, qui m'ont énormément aidé à réaliser plusieurs stages dans plusieurs entreprises dans le domaine du transport.*

*Le plus valeureux remerciement est à ma famille, surtout mes parents, qui m'ont transmis tout ce qui est beau, qui étaient patients, en me soutenant tout au long de ma vie afin d'atteindre mes objectifs.*

*Ainsi, j'adresse mes remerciements les plus chaleureux à mes amis, et toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin par le fruit de leur connaissance dans la réalisation de ce modeste travail.*

# Table des matières

---

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Généralités sur la congestion et la régulation du trafic routier en milieu urbain : Principes et caractéristiques.....</b>	<b>5</b>
<b>I.1 Introduction.....</b>	<b>6</b>
<b>I.2 Quelques définitions de la congestion routière.....</b>	<b>6</b>
<b>I.3 Causes principales de la congestion routière.....</b>	<b>8</b>
I.3.1 Causes de la congestion du trafic récurrente.....	9
I.3.2 Causes de la congestion du trafic non récurrente.....	9
I.3.2.1 Environnement.....	9
I.3.2.2 Mécanique.....	10
I.3.2.3 Humain.....	10
<b>I.4 Ingénierie du trafic routier.....</b>	<b>11</b>
I.4.1 Caractéristiques du trafic routier.....	11
I.4.2 Variables du trafic routier.....	12
I.4.2.1 Variables microscopiques du trafic.....	12
I.4.2.2 Variables macroscopiques du trafic.....	14
I.4.3 Le diagramme fondamental.....	16
I.4.3.2 Modèle vitesse – densité.....	17
I.4.3.3 Modèle vitesse –débit.....	18
I.4.4 Méthodes de mesure du flux du trafic.....	18
I.4.4.1 Comptage manuel.....	19
I.4.4.2 Comptage automatique.....	20
I.4.4.3 Coefficient d'équivalence.....	21
<b>I.5 Régulation des intersections à feux tricolores.....</b>	<b>21</b>
I.5.1 Terminologies.....	22
I.5.2 Les modes de contrôle des intersections par un plan de feux.....	26
I.5.3 Méthode de calcul du cycle de feux fixe optimal.....	27
I.5.4 Régulation des intersections à feux avec priorité pour les transports en commun : cas d'un tramway.....	28
I.5.4.1 Priorité passive (contrôle des ondes vertes).....	29
I.5.4.2 Priorité active.....	29
<b>I.6 Conclusion.....</b>	<b>30</b>
<b>Chapitre II : Le rôle des transports en commun dans la réduction de la congestion en zone urbaine. Cas du tramway de Constantine.....</b>	<b>32</b>
<b>II.1 Introduction.....</b>	<b>33</b>



<b>II.2 L'influence des transports en commun sur la congestion routière .....</b>	<b>33</b>
<b>II.3 L'investissement dans les réseaux de tramways dans le monde et en Algérie .....</b>	<b>35</b>
<b>II.4 Étude de cas : Le tramway de la ville de Constantine (Algérie) .....</b>	<b>37</b>
II.4.1 Présentation de la zone d'étude et de la ligne du tramway de Constantine .....	38
II.4.2 Architecture du tramway et caractéristique .....	39
II.4.3 Critères de conception de la voie .....	40
II. 4.4 Système de traction .....	40
II.4.5. Le poste de contrôle centralisé du tramway de Constantine (PCC).....	41
II.4.5.1. Fonctionnalités du système d'aide à l'exploitation dans le poste de contrôle centralisé .	41
II.4.5.2. Fonctionnalité du système d'aide à l'exploitation à bord .....	42
II.4.6 Indicateurs de performance théorique du tramway de Constantine .....	43
II.4.6.1. La capacité du tramway de Constantine .....	43
II.4.6.2 Temps de parcours, vitesse et temps de stationnement.....	45
<b>II.5. Conclusion.....</b>	<b>47</b>
<b>Chapitre III : Évaluation de la satisfaction des usagers du tramway de Constantine et son impact sur leurs choix modaux .....</b>	<b>50</b>
<b>III.1 Introduction.....</b>	<b>51</b>
<b>III.2 L'importance de l'évaluation de la satisfaction des utilisateurs des transports en commun</b>	<b>51</b>
<b>III.3 Matériel et Méthode .....</b>	<b>52</b>
<b>III.4 Résultats.....</b>	<b>53</b>
III.4.1 Les données de tram du nombre de passagers par an .....	53
III.4.2 Les caractéristiques socio-économiques de l'échantillon.....	54
III.4.3 L'évaluation de la satisfaction des passagers par rapport au service proposé .....	57
III.4.3.1 Évaluation du comportement des agents du tramway .....	57
III.4.3.2 Évaluation de la qualité de l'information donnée aux voyageurs.....	58
III.4.3.3 Évaluation de la sécurité dans les stations et à l'intérieur des tramways .....	58
III.4.3.4 Évaluation de la propreté à l'intérieur du tramway et dans les stations .....	59
III.4.3.5 Évaluation de la qualité de l'air à l'intérieur du tramway .....	59
III.4.3.6 Évaluation du confort des sièges du tramway .....	60
III.4.3.7 Évaluation du prix de ticket du tramway .....	60
III.4.4. Évaluation de l'exploitation du tramway de Constantine.....	61
III.4.4.1 Le temps de début et fin de service .....	61
III.4.4.2 La localisation de la ligne et le nombre des stations .....	61
III.4.4.3 Le temps d'attente aux stations et l'intervalle acceptable entre les tramways .....	62
III.4.4.4 La satisfaction par rapport à l'intervalle de temps entre les tramways.....	62
III.4.4.5 Vitesse, temps de parcours et temps d'attente aux stations .....	63
III.4.4.6 La qualité de la conduite des tramways.....	63
III.4.4.7 La gestion des situations de perturbations lors de l'exploitation.....	64

III.4.5 Raisons pour lesquelles les passagers utilisent le tram.....	64
III.4.6 Évaluation de la satisfaction des utilisateurs et mode de transport préféré.....	65
<b>III. 5. Conclusion .....</b>	<b>65</b>
<b>Chapitre IV : Effet du bruit sur le confort des passagers à l'intérieur du tramway et son impact sur la congestion du trafic dans les zones urbaines .....</b>	<b>67</b>
<b>IV.1 Introduction.....</b>	<b>68</b>
<b>IV.2 Le Problème du bruit à l'intérieur du tramway et son impact sur le choix modal.....</b>	<b>68</b>
<b>IV.3 Problèmes du bruit causés par l'exploitation du tramway.....</b>	<b>69</b>
<b>IV.4 Les perceptions du bruit et ses normes à l'intérieur du tramway de Constantine.....</b>	<b>69</b>
IV.4.1 La perception du bruit .....	69
IV.4.2 Les normes de bruit à l'intérieur du tramway de Constantine .....	70
<b>IV.5 Matériels et méthodes .....</b>	<b>71</b>
IV.5.1 Mesures expérimentales du bruit à l'intérieur du tramway .....	71
IV.5.2 Méthode et analyse de l'enquête sur la perception des passagers .....	72
<b>IV.6 Résultats.....</b>	<b>72</b>
IV.6 .1 Les résultats du bruit à l'intérieur des cabines du tramway .....	72
IV.6 .2 Les résultats du bruit représentés sur une cartographie.....	77
<b>IV.7 Résultats de l'enquête .....</b>	<b>78</b>
IV.7.1 La perception des passagers par rapport au bruit à l'intérieur du tram .....	78
IV.7.1.1 Analyse globale de l'échantillon.....	78
IV.7.1.2 Par genre.....	79
IV.7.1.3 Analyse de l'échantillon par âge .....	79
IV.7.2 Test statistique Khi deux .....	80
IV.7.2.2 Test de Khi deux sur l'échantillon par âge.....	81
IV.7.3 L'impact du bruit sur le choix modal des passagers .....	82
<b>IV.8 Conclusion .....</b>	<b>83</b>
<b>Chapitre V : Évaluation et optimisation de la performance du tramway de Constantine et son impact sur la congestion du trafic dans les intersections communes.....</b>	<b>85</b>
<b>V.1 Introduction .....</b>	<b>86</b>
<b>V.2 L'évaluation de la performance du tram et son effet sur la régulation du trafic routier .....</b>	<b>86</b>
<b>V.3 Matériels et Méthodes .....</b>	<b>87</b>
<b>V.4 Résultats .....</b>	<b>88</b>
V.4.1 L'évaluation de la demande estimée et réelle de passagers .....	88
V.4.2 L'évaluation de l'intervalle de temps entre les tramways .....	88
V.4.3 Le temps de parcours réel et la vitesse moyenne (incluant le temps de stationnement).....	90
V.4.3.1 Le temps de parcours réel et la vitesse moyenne réelle (sans le temps de stationnement).....	91
V.4.3.2 Analyse de la vitesse moyenne et du temps de parcours des tramways dans chaque section du tracé .....	92
V.4.3.3 Le temps d'arrêt aux stations.....	97

V.4.4 L'intervalle optimal de temps de parcours et le gain de temps pour les usagers de la route aux intersections.....	99
<b>V.5. Conclusion.....</b>	<b>100</b>
<b>Chapitre VI : Évaluation et optimisation de la régulation du trafic mixte. Cas d'étude : Intersection de Che Guevara.....</b>	<b>103</b>
<b>VI.1 Introduction.....</b>	<b>104</b>
<b>VI.2 Problème de la congestion aux intersections situées sur la ligne du tramway.....</b>	<b>104</b>
<b>VI.3 Matériels et Méthodologie.....</b>	<b>106</b>
<b>VI.4 Résultats.....</b>	<b>107</b>
VI.4.1 L'analyse de l'enquête.....	107
VI.4.1.1 Les caractéristiques des répondants .....	107
VI.4.1.2 Le problème de la congestion du trafic .....	108
VI.4.2. L'évaluation de la régulation actuelle et la situation du trafic à l'intersection .....	109
VI.4.2.1L'évaluation de la régulation actuelle en heure de pointe la plus critique .....	110
VI.4.2.2 Comparaison entre la demande réelle du trafic et la capacité dans la journée la plus critique.....	111
VI.4.2.3L'optimisation de la régulation du trafic.....	113
<b>VI. 5 Conclusion .....</b>	<b>119</b>
<b>Conclusion générale et perspectives.....</b>	<b>121</b>
<b>Références Bibliographiques .....</b>	<b>125</b>

# Table des figures

---

Figure I. 1 Types et causes de la congestion du trafic routier. ....	9
Figure I. 2 Variables microscopiques du trafic entre deux véhicules.....	13
Figure I. 3 Représentation graphique du débit en fonction de la densité. ....	17
Figure I. 4 Représentation graphique de la vitesse moyenne spatiale en fonction de la densité. ....	18
Figure I. 5 Représentation graphique de la vitesse moyenne spatiale en fonction du débit. ....	19
Figure I. 6 Représentation graphique d'une intersection isolée à feux.....	24
Figure I. 7 Représentation d'un cycle de feux découpé en deux phases au niveau d'une intersection isolée.....	26
Figure I. 8 La dissipation du débit dans la situation de saturation dans la phase verte. ....	27
Figure II. 1 L'occupation de l'espace en utilisant les véhicules privés, vélos et bus (69 personne, 40 voiture) .....	34
Figure II. 2 Facteurs importants pour un haut niveau de service d'un transport en commun. ....	34
Figure II. 3 Le tramway de Constantine .....	38
Figure II. 4 La carte de la ligne de tramway (Constantine, Algérie). ....	39
Figure II. 5 Architecture du tramway de Constantine. ....	39
Figure II. 6 Le rail du tramway de Constantine.....	40
Figure II. 7 Système d'énergie de traction du tramway de Constantine. ....	41
Figure II. 8 Architecture des systèmes de support opérationnel dans la salle de contrôle centralisée. .	42
Figure II. 9 L'architecture du système de support opérationnel à bord et sur la ligne de tramway. ....	43
Figure III. 1 Nombre des passages par an (Source Entreprise Metro Alger). ....	54
Figure III. 2 L'échantillon par genre. ....	54
Figure III. 3 L'échantillon par Age. ....	55
Figure III. 4 Le nombre d'usage du tram. ....	55
Figure III. 5 Le type d'activité. ....	56
Figure III. 6 La raison de déplacement.....	56
Figure III. 7 Le temps entre le domicile et la station la plus proche. ....	57
Figure III. 8 Le comportement des agents du tramway. ....	57
Figure III. 9 La qualité de l'information des voyageurs.....	58
Figure III. 10 La sécurité dans les stations et à l'intérieur des tramways.....	58
Figure III. 11 La propreté à l'intérieur du tramway et dans les stations.....	59
Figure III. 12 La qualité de l'air à l'intérieur du tramway. ....	59
Figure III. 13 Le confort des sièges du tramway. ....	60
Figure III. 14 Le prix du ticket. ....	60
Figure III. 15 Le temps de début et de fin de service. ....	61
Figure III. 16 Localisation de la ligne et le nombre des stations.....	61
Figure III. 17 Temps d'attente aux stations et l'intervalle de temps acceptable en heures de pointe...	62
Figure III. 18 La satisfaction par rapport à l'intervalle de temps entre les tramways. ....	62
Figure III. 19 Vitesse, temps de parcours et temps d'attente aux stations.....	63
Figure III. 20 La qualité de la conduite des tramways. ....	63
Figure III. 21 La gestion des situations de perturbations lors de l'exploitation. ....	64
Figure III. 22 Raisons pour lesquelles les passagers préfèrent d'utiliser le tram par rapport à un autre moyen de transport. ....	64
Figure III. 23 Satisfaction des usagers du tramway sur l'exploitation et la qualité du service. ....	65
Figure IV. 1 La perception du bruit par échelle. ....	70
Figure IV. 2 Sonomètre numérique CA832. ....	71
Figure IV. 3 Mesures du bruit de l'itinéraire 1 et de l'itinéraire 2 pour la cabine M 1. ....	74
Figure IV. 4 Mesures du bruit de l'itinéraire 1 et de l'itinéraire 2 pour la cabine C 1. ....	74

Figure IV. 5 Mesures du bruit de l'itinéraire 1 et de l'itinéraire 2 pour la cabine NM.....	75
Figure IV. 6 Mesures du bruit de l'itinéraire 1 et de l'itinéraire 2 pour la cabine NM.....	75
Figure IV. 7 Mesures du bruit de l'itinéraire 1 et de l'itinéraire 2 pour la cabine NP.....	76
Figure IV. 8 Mesures du bruit de l'itinéraire 1 et de l'itinéraire 2 pour la cabine C2. ....	76
Figure IV. 9 Mesures du bruit de l'itinéraire 1 et de l'itinéraire 2 pour la cabine M2. ....	77
Figure IV. 10 Carte de localisation du bruit à l'intérieur des cabines « tramway de Constantine». ....	78
Figure IV. 11 La perception globale des passagers par rapport au bruit à l'intérieur du tramway. ....	79
Figure IV. 12 La perception des passagers par genre.....	79
Figure IV. 13 La perception des passagers par âge.....	80
Figure IV. 14 Analyse globale du choix modal des passagers.....	82
Figure IV. 15 Analyse du choix modal des passagers par âge.....	83
Figure V. 1 L'évaluation de la demande estimée et réelle de passagers.....	88
Figure V. 2 L'intervalle de temps réel et la capacité offerte dans la voie 1.....	89
Figure V. 3 L'intervalle de temps réel et la capacité offerte dans la voie 2.....	89
Figure V. 4 Deux tramways qui se stationnent l'un derrière l'autre dans la station de l'Emir Abdelkader .....	90
Figure V. 5 Le temps de parcours réel et la vitesse moyenne du tramway de Constantine itinéraire 1.	90
Figure V. 6 Le temps de parcours réel et la vitesse moyenne du tramway de Constantine itinéraire 2.	91
Figure V. 7 Analyse de la vitesse moyenne des tramways et du temps de parcours total pour la voie 1 et la voie 2.....	91
Figure V. 8 Analyse de la vitesse moyenne des tramways et du temps de parcours pour les sections 1- A et 2-I.....	92
Figure V. 9 Analyse de la vitesse moyenne des tramways et du temps de parcours pour les sections 1- B et 2-H.....	93
Figure V. 10 Analyse de la vitesse moyenne des tramways et du temps de parcours pour les sections 1- C et 2-G.....	93
Figure V. 11 Analyse de la vitesse moyenne des tramways et du temps de parcours pour les sections 1- D et 2-F.....	94
Figure V. 12 Analyse de la vitesse moyenne des tramways et du temps de parcours pour les sections 1- E et 2-E.....	94
Figure V. 13 Analyse de la vitesse moyenne des tramways et du temps de parcours pour les sections 1- F et 2-D.....	95
Figure V. 14 Analyse de la vitesse moyenne des tramways et du temps de parcours pour les sections 1- G et 2-C.....	95
Figure V. 15 Analyse de la vitesse moyenne des tramways et du temps de parcours pour les sections 1- H et 2-B.....	96
Figure V. 16 Analyse de la vitesse moyenne des tramways et du temps de parcours pour les sections 1- I et 2-A.....	96
Figure V. 17 Le temps d'arrêt total dans les stations, Itinéraire 1.....	97
Figure V. 18 Le temps d'arrêt total dans les stations, Itinéraire 2.....	97
Figure V. 19 Le temps d'arrêt des tramways dans les stations, voie 1.....	98
Figure V. 20 Le temps d'arrêt des tramways dans les stations, voie 2.....	98
Figure VI. 1 Carte de l'intersection de Che Guevara, ville de Constantine, Algérie.....	105
Figure VI. 2 La perturbation de la synchronisation des feux de circulation (le feu vert lorsque le tramway passe pour ceux qui traversent la ligne de tramway).....	109
Figure VI. 3 La demande du trafic à l'intersection de Che Guevara en heure de pointe en unité de véhicule particulier par heure (uvp/h).....	109
Figure VI. 4 La demande de trafic et la capacité moyennes pour les itinéraires 1 par heure.....	111
Figure VI. 5 La demande de trafic et la capacité moyennes des itinéraires 2 par heure.....	111
Figure VI. 6 La demande de trafic et la capacité moyennes des itinéraires 3 par heure.....	112
Figure VI. 7 La demande moyenne de trafic et la capacité des itinéraires 4 par heure.....	112

Figure VI. 8 La demande moyenne de trafic et la capacité des itinéraires 5 par heure .....	113
Figure VI. 9 La demande moyenne de trafic et la capacité des itinéraires 6 par heure .....	113
Figure VI. 10 Le taux de dissipation du flux de trafic pour itinéraire 1 .....	116
Figure VI. 11 Le taux de dissipation du flux de trafic pour itinéraire 3 .....	117
Figure VI. 12 Le taux de dissipation du flux de trafic pour itinéraire 3 .....	117
Figure VI. 13 Le taux de dissipation du flux de trafic pour itinéraire 4 .....	118
Figure VI. 14 Le taux de dissipation du flux de trafic pour itinéraire 5 .....	118
Figure VI. 15 Le taux de dissipation du flux de trafic pour itinéraire 6 .....	119

# Liste des tableaux

---

Tableau I. 1 Définitions de la congestion routière.....	8
Tableau II. 1 Tableau II.1. L'inauguration du tramway dans différentes villes du monde. ....	36
Tableau II. 2 L'inauguration de nouvelle ligne du tramway en France (dernière mise à jour en 2019). .....	36
Tableau II. 3 L'inauguration des lignes du tramway en Algérie. ....	37
Tableau II. 4 Projets en cours de réalisation des réseaux du tramway dans quelques pays au monde..	37
Tableau II. 5 La capacité du tramway de Constantine .....	44
Tableau II. 6 Le temps théorique et la capacité en jours ouvrables.....	44
Tableau II. 7 Le service du tramway pendant vendredi .....	44
Tableau II. 8 Le service du tramway pendant samedi .....	45
Tableau II. 9 Le temps du parcours total, la vitesse et le temps d'attente du tramway à la station pour les deux itinéraires.....	45
Tableau II. 10 Le temps de parcours théorique entre les stations, Itinéraire 1 .....	46
Tableau II. 11 Le temps de parcours théorique entre les stations, itinéraire 2 .....	47
Tableau V. 1 Le nouvel intervalle de temps suggéré pour le tramway et le temps vert dont bénéficient les usagers de l'intersection pour les jours de semaine. ....	100
Tableau VI. 1 Les caractéristiques des répondants.....	107
Tableau VI. 2 Problèmes et causes de congestion du trafic à l'intersection. ....	108
Tableau VI. 3 Les données des phases réelles et de la synchronisation des feux dans l'intersection de Che Guevara.....	110
Tableau VI. 4 Les données du vert effectif réel et de la capacité par voie dans l'heure la plus critique. .....	110
Tableau VI. 5 Le résultat du ratio $Y_i$ pour toutes les voies. ....	114
Tableau VI. 6 Le temps vert réel par phase.....	114
Tableau VI. 7 Le temps vert effectif et la capacité utilisant la méthode Webster .....	115
Tableau VI. 8 Le temps vert effectif et la capacité utilisant la méthode Webster et l'intervalle optimal de tramway. ....	116

---

# *Introduction Générale*

---



## **Introduction générale**

Actuellement, la congestion routière constitue un problème majeur dans de nombreuses villes dans le monde, tant sur le plan environnemental que sur le plan économique. La congestion routière sur le plan environnemental, fait augmenter les émissions de gaz à effet de serre en raison du surplus de carburant consommé dans les embouteillages, et engendre des nuisances sonores. Elle provoque aussi des pertes économiques liées aux coûts du retard des automobilistes et un impact direct sur le délai de livraison de la marchandise. Les trois mesures majeures proposées pour remédier à cette situation sont : la construction de nouvelles infrastructures, l'amélioration de l'offre du transport en commun et l'optimisation de la régulation du trafic.

Opter pour l'extension des infrastructures est une solution coûteuse, voire impossible dans certains cas par le manque d'espace. La meilleure solution aux problèmes du trafic routier serait de mieux gérer l'infrastructure existante, en optimisant la performance du transport en commun et en régulant le trafic surtout aux intersections complexes, tout en cherchant un équilibre entre l'offre et la demande qui ne cessent d'augmenter.

Afin de protéger l'environnement et réduire la pollution causée par la congestion du trafic routier, l'utilisation des moyens de transport en commun écologique, économique et plus rapide est devenue une nécessité dans un monde où le besoin de la mobilité ne cesse d'augmenter. Étant un moyen de transport en commun largement utilisé, le tramway peut contribuer au décongestionnement du réseau de trafic en réduisant l'utilisation des véhicules privés. De ce fait, il faut de plus en plus rendre ce moyen plus efficace en termes de confort, de régularité des horaires afin d'inciter la population à l'utiliser.

La régulation de trafic routier est nécessaire dans un monde qui connaît un accroissement considérable dans le taux de motorisation et le besoin de mobilité. Le contrôle de la circulation surtout dans les intersections à trafic mixte vise à diriger et orienter les usagers en vue de fluidifier les routes et de satisfaire aussi l'intérêt individuel et collectif en termes de temps de parcours, sécurité... etc.

La thématique de notre recherche s'intéresse principalement au contrôle du trafic routier dans les intersections qui sont traversées par une ligne de tramway. L'objectif de cette thèse est de proposer une solution optimale, réalisable, et la moins coûteuse, pour fluidifier la circulation dans les intersections complexes, en présence d'une ligne de tramway, sans modifier la géométrie des intersections. Cela d'une part par une étude approfondie de la

performance du tramway, pour attirer le maximum d'utilisateurs afin de savoir comment sa performance influe sur la régulation du trafic au niveau des carrefours. D'autre part, par une étude sur la demande du trafic et la performance de la régulation au niveau des carrefours communs, ce qui permettra d'optimiser efficacement la synchronisation des feux de circulation au niveau des intersections communes et de répondre aux différentes exigences scientifiques, économiques et environnementales.

La particularité de notre contribution, c'est que nous avons fait l'évaluation et l'optimisation de la gestion de deux systèmes différents, dans une intersection complexe à trafic mixte (tramway-véhicules), c'est ce qui nous a menés à diviser cette thèse en deux grands axes : le premier est lié à la performance du tramway, pour connaître son effet sur l'état du trafic dans les intersections urbaines. Ainsi que le deuxième est liée à l'efficacité de la régulation du trafic par les feux de signalisation. De ce fait, nous pourrions évaluer l'état actuel et proposer une régulation efficace en prenant en compte des contraintes existantes, afin d'améliorer la fluidité dans ce type d'intersections. Pour résoudre ce problème de congestion en milieu urbain, la solution proposée dans cette thèse est une gestion optimale de l'exploitation du tramway et des feux de circulation.

Notre thèse comporte six chapitres organisés comme suit :

Dans le 1<sup>er</sup> chapitre, nous visons à présenter et à faire comprendre le phénomène de la congestion du trafic routier en milieu urbain. Nous allons définir et présenter les facteurs principaux qui provoquent ce phénomène. De plus, ce chapitre va être consacré à étudier ce problème sur le plan ingénierie. Nous présentons les différents composants du trafic routier, afin de montrer les méthodes de mesures du trafic, les méthodes de régulation des intersections à feux, en terminant avec les principes de la régulation des intersections à feux avec la priorité du tramway.

Le 2<sup>ème</sup> chapitre est consacré principalement à la performance du tramway pour déterminer son rôle dans la réduction de la congestion du trafic dans les zones urbaines, surtout au niveau des intersections complexes, ce qui va nous permettre d'apprendre et de comprendre comment ce moyen de transport peut influencer sur l'état de circulation dans les intersections à feux. À travers ce chapitre, nous allons présenter un cas d'étude, qui est le tramway de Constantine, tous les principes et performances d'exploitations liés à ce mode de transport seront présentés. Ce qui nous permettra d'étudier et d'évaluer l'exploitation du tramway à partir de ses performances théoriques.

Dans le 3<sup>ème</sup> chapitre, nous allons évaluer la performance du tramway d'un point de vue qualitatif, à partir d'une enquête menée avec les usagers du tramway, afin de connaître leurs opinions sur la qualité de l'exploitation du tramway, surtout par rapport aux confort et régularité. Cela nous permettra de donner un aperçu sur la qualité de service réelle et de connaître si ce moyen de transport est privilégié par la population.

Le 4<sup>ème</sup> chapitre est consacré à l'étude de l'exploitation du tramway sur le plan confort acoustique dont le but de connaître si le niveau du bruit détecté à l'intérieur des cabines du tramway respecte la valeur théorique et répondre à la question suivante : est-ce que cet indicateur de confort influe-t-il sur le choix modal des passagers du tramway ?

Quant au 5<sup>ème</sup> chapitre, il évalue les différents indicateurs de performance du tramway, par rapport à la régularité et la ponctualité, et par rapport à l'équilibre offre/ demande. Cela nous permettra de connaître comment la performance du tramway peut influencer d'une façon directe sur l'état de la circulation dans les intersections à feux, afin de confirmer le résultat de l'étude faite dans le 3<sup>ème</sup> chapitre. Nous allons également proposer un modèle qui permet de trouver l'intervalle de temps optimal entre les tramways, ainsi de montrer comment ce nouvel intervalle basé sur des données réelles de passagers, fait gagner plus de temps pour les autres usagers aux intersections à trafic mixte.

Ce dernier chapitre a trait à la régulation du trafic au niveau des intersections à feux. Nous avons choisi comme exemple l'intersection la plus complexe située sur la ligne du tramway de Constantine. L'objectif de cette étude est d'évaluer la situation actuelle de la circulation, de détecter les causes de la congestion dans les intersections communes, afin de trouver une solution optimale pour résoudre ce problème. Nous allons combiner la méthode de calcul optimal des feux fixes avec le résultat trouvé de l'intervalle optimal entre les tramways, tout en veillant à respecter les contraintes existantes, sans le rajout de nouveaux instruments technologiques.

Nous concluons notre thèse par une synthèse sur le travail effectué, les résultats obtenus et les perspectives de cette étude.

# Chapitre I

---

*Généralités sur la congestion et la régulation du trafic routier en milieu urbain :*  
*Principes et caractéristique*

---

<b>I.1 Introduction .....</b>	<b>6</b>
<b>I.2 Quelques définitions de la congestion routière.....</b>	<b>6</b>
<b>I.3 Causes principales de la congestion routière.....</b>	<b>8</b>
I.3.1 Causes de la congestion du trafic récurrente.....	9
I.3.2 Causes de la congestion du trafic non récurrente.....	9
I.3.2.1 Environnement.....	9
I.3.2.2 Mécanique.....	10
I.3.2.3 Humain.....	10
<b>I.4 Ingénierie du trafic routier .....</b>	<b>11</b>
I.4.1 Caractéristiques du trafic routier.....	11
I.4.2 Variables du trafic routier .....	12
I.4.2.1 Variables microscopiques du trafic.....	12
I.4.2.2 Variables macroscopiques du trafic .....	14
I.4.3 Le diagramme fondamental .....	16
I.4.3.2 Modèle vitesse – densité.....	17
I.4.3.3 Modèle vitesse –débit .....	18
I.4.4 Méthodes de mesure du flux du trafic.....	18
I.4.4.1 Comptage manuel .....	19
I.4.4.2 Comptage automatique .....	20
I.4.4.3 Coefficient d'équivalence .....	21
<b>I.5 Régulation des intersections à feux tricolores .....</b>	<b>21</b>
I.5.1 Terminologies .....	22
I.5.2 Les modes de contrôle des intersections par un plan de feux .....	26
I.5.3 Méthode de calcul du cycle de feux fixe optimal .....	27
I.5.4 Régulation des intersections à feux avec priorité pour les transports en commun : cas d'un tramway .....	28
I.5.4.1 Priorité passive (contrôle des ondes vertes).....	29
I.5.4.2 Priorité active.....	29
<b>I.6 Conclusion .....</b>	<b>30</b>

## **I.1 Introduction**

La congestion du trafic urbain est un souci majeur dans toutes les villes du monde. Ce phénomène compliqué peut être considéré comme une surexploitation de l'infrastructure routière, cela est dû principalement à la croissance de la population mondiale et du parc automobile surtout dans les grandes villes. Ce problème a des conséquences négatives sur la qualité de vie des citoyens : temps de parcours long, retards, stress, pollution de l'air et nuisance sonore, etc.... Ces embouteillages ont aussi des impacts socio-économiques considérables car ils constituent simultanément :

- Une perte de temps ; un temps qui aurait pu être utilisé pour le travail, les tâches quotidiennes et les loisirs.

- Une perte d'argent due à l'augmentation de la consommation du carburant par les automobiles et la perturbation de la régularité dans le transport de marchandises.

L'état de la circulation routière dépend de plusieurs facteurs tels que la géométrie de l'infrastructure routière, la complexité du trafic, l'attitude des automobilistes et la régulation du trafic. Autrement dit, les conditions du trafic auxquelles sont confrontés les utilisateurs de la route dépendent de la nature du réseau. Plusieurs établissements de recherche dans diverses spécialités s'intéressent à résoudre ce problème complexe dans le monde.

Nous commencerons ce premier chapitre par une présentation de la congestion du trafic routier en milieu urbain. Nous définirons ce phénomène, puis nous citerons les causes majeures qui le provoquent. Ensuite, nous décrirons ce problème sur le plan ingénierie à partir d'une présentation des différentes variables du trafic et nous le représenterons sous forme de diagrammes fondamentaux. Enfin, nous terminerons ce chapitre par une projection sur la régulation du trafic par des feux de signalisation, afin de connaître les principes de régulation de la circulation dans les intersections urbaines.

## **I.2 Quelques définitions de la congestion routière**

De nombreuses définitions ont été proposées pour décrire la congestion routière sur les routes des zones urbaines. Néanmoins, il n'existe pas de définition spécifique de la congestion routière [1]. Le tableau 1 présente un résumé de définitions de la congestion provenant de la littérature. Ces dernières peuvent être classées en deux grandes catégories : la demande liée à la capacité et le temps de parcours lié aux retards [2, 3, 4, 5, 6].

Catégories	Définitions
Relation entre la demande et la capacité.	La congestion du trafic se produit lorsque la demande de déplacement dépasse la capacité du réseau routier existant [7].
	La congestion est une situation dans laquelle le nombre de véhicules qui tentent d'emprunter une voie routière à instant donné dépasse sa capacité [8].
	La congestion est un problème qui survient lorsque le nombre de personnes souhaitant se déplacer à un moment donné est supérieur à ce que l'infrastructure de transport peut supporter : il s'agit d'un simple cas où la demande dépasse l'offre [9].
	Lorsque le volume de véhicules sur une installation de transport dépasse la capacité de cette installation, il en résulte un état de congestion [10].
	La congestion est l'impédance que les véhicules s'imposent les uns aux autres, en raison de la relation vitesse-débit, dans des conditions où l'utilisation d'un système de transport s'approche de sa capacité [11].
	La congestion peut être définie comme l'état du flux de trafic sur une installation de transport caractérisée par des densités élevées et des vitesses faibles, par rapport à un état de référence choisi (avec des densités faibles et des vitesses élevées) [12].
	L'embouteillage routier est un état dans laquelle la demande sur l'espace de la route dépasse l'offre [13].
Relation entre le retard et temps de parcours.	La congestion routière peut être déterminée par la demande très élevée du trafic routier par rapport à la capacité de l'infrastructure [14].
	La congestion est un déséquilibre entre le flux du trafic et la capacité qui entraîne une augmentation du temps de déplacement, le coût et la modification du comportement[9].
	La congestion routière est un temps de parcours ou un retard supérieur à celui normalement encouru dans des situations de circulation en flux libre [15].

---

	La congestion du trafic est une condition de retard de la circulation (lorsque le flux de trafic est ralenti en dessous des vitesses de référence) parce que le nombre de véhicules essayant d'utiliser le réseau routier excède sa capacité [16].
Relation entre le retard et temps de parcours.	La congestion du trafic est la présence de retards le long d'un chemin physique en raison de la forte présence des usagers [17].
	La congestion peut être définie comme la situation où le trafic se déplace à une vitesse inférieure à la capacité prévue d'une route, parce que les conducteurs sont incapables d'aller plus vite [1].
	La congestion se rapporte généralement à un excès de véhicules sur une partie de la chaussée à un moment donné, ce qui donne des vitesses lentes - parfois beaucoup plus lentes - que les vitesses normales ou «à écoulement libre » [18].

---

**Tableau I.1.** Définitions de la congestion routière.

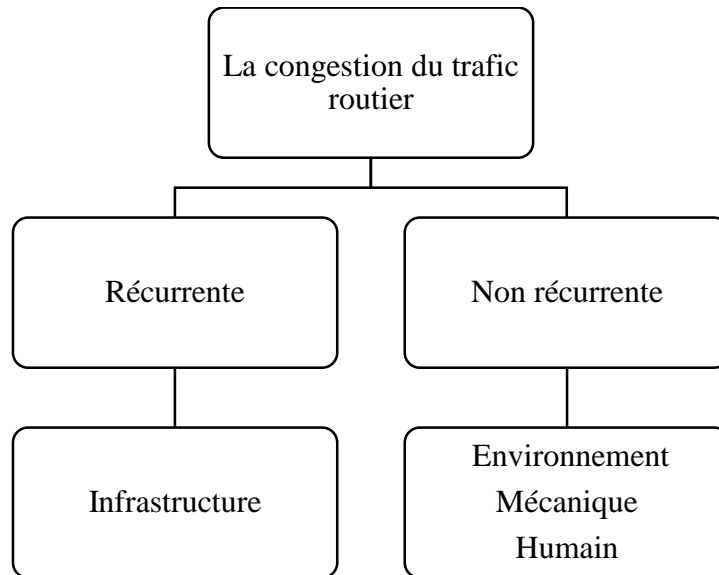
### **I.3 Causes principales de la congestion routière**

La première principale cause de congestion routière en milieu urbain est le nombre élevé de véhicules utilisés dû à la croissance des habitants, ainsi que le développement rapide de l'économie, ce qui a créé plus de chances d'emploi dans les villes [19, 20, 21].

La deuxième raison pour laquelle la congestion routière existe dans les différentes villes du monde est que trop d'individus doivent se rendre quelque part aux mêmes heures chaque jour, ce qui provoque de graves problèmes d'embouteillages dans les villes densément peuplées. De plus, l'inefficacité du transport en commun surtout dans les zones à faible densité, la flexibilité et le respect de la vie privée qu'offrent les véhicules personnels sont souvent plus importants que les transports en commun [22, 23].

En outre, il existe deux catégories de congestion du trafic, récurrente et non récurrente [24, 25, 26]. Des embouteillages récurrents se produisent pratiquement quotidiennement en raison du manque de capacité de la route, c'est à dire, là où la demande de trafic dépasse la capacité routière existante surtout aux heures de pointe. En d'autres termes, il y a un volume élevé de trafic circulant sur la route que cette dernière ne peut en contenir physiquement, ce type de congestion a tendance à être prévisible et répétitive [27, 28].

En revanche, les embouteillages non récurrents ne se produisent pas nécessairement quotidiennement, donc une congestion irrégulière, car ils consistent en des perturbations temporaires, d'un événement inattendu, c'est-à-dire difficilement prévisibles, ou non typiques qui varient d'un tronçon routier à l'autre [29, 30, 31].



**Figure I.1.** Types et causes de la congestion du trafic routier.

### ***1.3.1 Causes de la congestion du trafic récurrente***

Les problèmes de congestion du trafic liés à l'infrastructure entraînent souvent une congestion importante du trafic. La forte demande de trafic, la capacité insuffisante, la mauvaise gestion de la capacité, la perturbation intermittente de la circulation par des dispositifs de contrôle telles que la synchronisation non optimale des feux de circulation, ou le manque de cette dernière dans les carrefours contribuent également à la congestion et à la variabilité des temps de trajet [32, 24]. De plus, la mauvaise gestion des intersections croisée par des lignes de tramways ou avec une priorité des transports en commun cause souvent de longues files d'attente.

### ***1.3.2 Causes de la congestion du trafic non récurrente [33, 34, 27]***

#### ***1.3.2.1 Environnement***

Les embouteillages causés par l'environnement se produisent en raison des conditions météorologiques, du temps pluvieux ou brumeux, aux tempêtes de neige extrêmes qui empêchent les usagers de la route d'avancer. Les conditions météorologiques peuvent avoir un effet incontrôlable non seulement sur l'état du trafic, mais également sur les conditions routières.



Par conséquent, ces conditions environnementales peuvent entraîner des changements dans le comportement du conducteur. En raison de la visibilité réduite, les conducteurs réduiront généralement leur vitesse en cas de soleil éclatant à l'horizon, de brouillard ou de fumée. L'état de la surface de la chaussée mouillée, enneigée ou verglacée entraînera également le même effet, même après la fin des précipitations. De plus, quelque chose de plus grave, comme un glissement de terrain soudain, pourrait non seulement arrêter la circulation, mais provoquer une collision si un conducteur se trouve au mauvais endroit et au mauvais moment.

#### *1.3.2.2 Mécanique*

Un autre facteur qui peut provoquer des embouteillages est le cas d'une panne mécanique. Bien qu'une défaillance mécanique puisse sans doute entrer dans une catégorie d'origine humaine, par exemple un véhicule mal entretenu par le conducteur. Des défaillances mécaniques peuvent également survenir en raison de facteurs externes tels qu'un objet pointu sur la route, et peuvent arriver soudainement pendant la conduite, même si le véhicule soit bien maintenu. Alors que les humains peuvent aider à prévenir et à réduire les problèmes mécaniques en inspectant les véhicules avant chaque voyage et en s'assurant que les cycles de maintenance préventive sont suivis, dans les deux cas, ces problèmes obligent le conducteur à quitter la route.

Les événements tels que les accidents de véhicules, les pannes et les débris dans les voies de circulation sont la forme d'incident la plus courante. En plus de bloquer physiquement les voies de circulation, les incidents qui se produisent sur l'accotement ou au bord de la route peuvent également influencer la circulation en distrayant les conducteurs, entraînant des changements dans le comportement des conducteurs et en fin de compte dégradant la qualité de la circulation.

#### *1.3.2.3 Humain*

Un troisième facteur important qui déclenche la congestion dans les zones urbaines est le facteur humain, parce qu'il y a autant de conducteurs qui changent de voie sur des routes très fréquentées. C'est la façon dont les conducteurs réagissent dans les voitures derrière les autres automobilistes qui ralentissent la circulation.

Donc, le comportement humain est la cause trop courante de la congestion du trafic. La distraction, l'alcool, la somnolence au volant ou la conduite émotionnelle sont aussi des

causes très fréquentes. Les embouteillages les plus courants causés par le comportement humain sont ceux qui se produisent lorsque les automobilistes prennent des décisions rapides et adoptent des comportements comme le freinage de dernière minute, provoquant un ralentissement de la circulation dans leurs voies et les autres voies pendant des heures. Les effets d'un freinage de dernière minute s'aggravent en cas de collision.

En outre, d'autres origines de la congestion non récurrente sont les zones de travaux, et le trafic supplémentaire résultant d'événements spéciaux ou d'urgences. Les travaux routiers tels que la maintenance et la construction des routes entraînent généralement une réduction de la capacité des voies, ce qui va ralentir la fluidité du trafic routier [35, 36].

## **I.4 Ingénierie du trafic routier**

L'ingénierie du trafic, ou, en termes plus modernes, le contrôle et la gestion du trafic se préoccupent de fournir une mobilité active des personnes et des marchandises tout en préservant la sécurité et en minimisant tous les impacts néfastes sur l'environnement. Un regard plus large sur l'ingénierie du trafic pourrait inclure une variété de compétences en ingénierie, y compris la conception, la construction, l'exploitation, la maintenance et l'optimisation des systèmes de transport. Cependant, en pratique, l'ingénierie de la circulation se concentre plus sur l'exploitation des systèmes que sur les activités de construction et de maintenance [37].

### ***I.4.1 Caractéristiques du trafic routier***

Le flux du trafic peut être divisé en deux types principaux : un flux interrompu et un flux ininterrompu. Un flux ininterrompu se produit lorsque les véhicules traversant une longueur de route ne sont pas obligés de s'arrêter pour une cause extérieure au flux de trafic, comme les dispositifs de contrôle de la circulation. L'écoulement ininterrompu est régulé par les interactions véhicule-véhicule d'un côté et par les interactions entre les véhicules et l'environnement et la géométrie de la chaussée de l'autre côté.

Un exemple de flux ininterrompu comprend les véhicules circulant sur une autoroute ou sur d'autres installations à accès limité où il n'y a pas de feux de signalisation ou de panneaux pour interrompre le trafic. Un écoulement ininterrompu peut également se produire sur de longues sections de route de surface rurale entre les intersections à signalisation. Même lorsque ces installations subissent de la congestion, les pannes dans le flux du trafic sont le résultat d'interactions internes plutôt qu'externes dans le flux de trafic [37].

Une interruption de flux se produit lorsque le flux est périodiquement interrompu par des moyens externes, principalement des dispositifs de contrôle de la circulation tels que des panneaux d'arrêt et de rendement et des feux de circulation. Dans des conditions d'écoulement interrompu, les dispositifs de contrôle de la circulation jouent un rôle primordial dans la définition du flux de trafic, tandis que les interactions véhicule-véhicule et les interactions véhicule-chaussée ne jouent qu'un rôle secondaire. Par exemple, les feux de signalisation permettent aux mouvements désignés de se produire seulement une partie du temps. De plus, en raison de l'arrêt et du redémarrage répété du flux de trafic sur ces installations, le flux se produit en pelotons [37].

Les paramètres de flux de trafic représentent la mesure quantitative pour comprendre et décrire le flux de trafic. Les paramètres du flux de trafic se divisent en deux grandes classes : les paramètres macroscopiques, qui caractérisent le flux de trafic dans son ensemble, et les paramètres microscopiques, qui caractérisent le comportement des véhicules individuels dans le flux de trafic [37, 38].

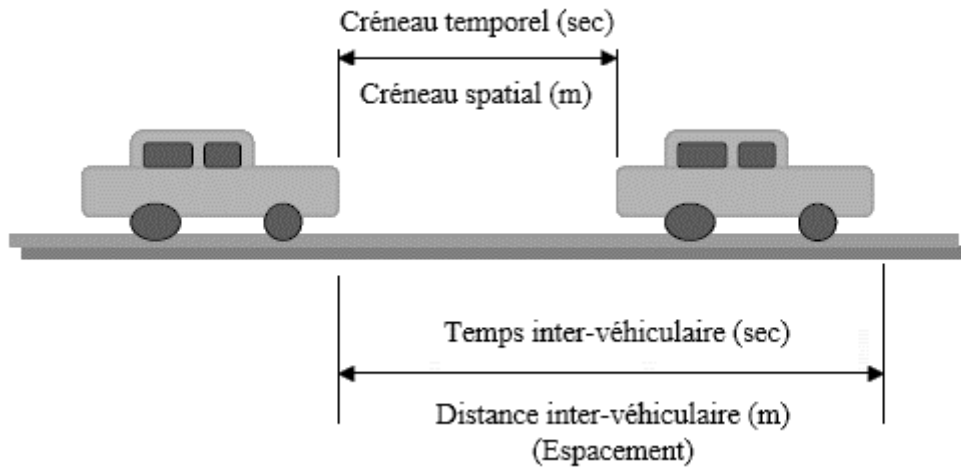
#### ***1.4.2 Variables du trafic routier***

##### *1.4.2.1 Variables microscopiques du trafic [39, 40, 41]*

Les paramètres microscopiques sont ceux liés aux véhicules évalués individuellement :

- *Temps inter-véhiculaire* : il représente le temps calculé entre le passage de l'avant des véhicules qui se suivent ou leurs arrières en un point donné de la route. Ce paramètre est aussi utile dans les recherches liées à la sécurité routière. Ainsi, certains programmes de régulation d'intersections à feux fonctionnent avec le principe du temps inter-véhiculaire. De plus, au niveau des autoroutes urbaines, la régulation d'intervalles de temps entre les véhicules constitue aujourd'hui une solution d'exploitation importante.
- *Distance inter-véhiculaire ou espacement* : Cette variable décrit l'espacement ou la distance entre le front des véhicules consécutifs ou leurs arrières sur la même file de circulation à un instant donné.
- *Créneau temporel* : c'est le temps qui sépare le franchissement de l'arrière d'un véhicule en un point donné de la route ; du franchissement du front du véhicule qui le suit.

- *Créneau spatial* : c'est la distance ou l'espace qui sépare à un temps donné l'arrière d'un véhicule ; du front du véhicule suivant.



**Figure I.2.** Variables microscopiques du trafic entre deux véhicules [37].

- *Vitesse instantanée* : La vitesse instantanée  $v_i(t)$  est la dérivée de la position d'un véhicule calculée  $x(t)$  par rapport au temps :

$$v_i(t) = \dot{x}(t) = \frac{dx(t)}{dt} \quad (I.1)$$

La vitesse moyenne d'un véhicule sur un trajet de temps T est déterminée par la formule suivant :

$$v_m = \frac{1}{T} \int_0^T v_i(t) dt \quad (I.2)$$

- *Accélération instantanée* : cette variable est obtenue en dérivant la vitesse instantanée d'un véhicule par rapport au temps.

$$a_i(t) = \ddot{x}(t) = \frac{d^2x(t)}{dt^2} = \frac{dv_i(t)}{dt} \quad (I.3)$$

L'accélération moyenne d'un véhicule sur un trajet de temps T est déterminée par :

$$a_m = \frac{1}{T} \int_0^T a_i(t) dt = \frac{1}{T} (v_i(T) - v_i(0)) \quad (I.4)$$

Dont  $a_i(t)$  est l'accélération instantanée du véhicule à l'instant  $t$ .

#### I.4.2.2 Variables macroscopiques du trafic [38, 40, 42]

Les variables macroscopiques permettent de décrire en général l'écoulement des flots de véhicules sur une portion de la voie. Les trois paramètres macroscopiques qui décrivent le flux de trafic sont : le volume ou le débit, la concentration ou la densité et la vitesse moyenne.

- *Le débit* : Il représente le nombre de véhicules qui passent à un point donné sur une voie dans une période de temps précisée. L'unité du débit est exprimée en véhicules par une tranche de temps spécifiée, cette dernière est souvent exprimée en termes heure, jour, semaine, mois et année. Le débit moyen est donné dans la formule suivant:

$$q = \frac{n}{t} \quad (I.5)$$

Où :

$q$  représente le débit, volume ou flux de trafic en véhicules par unité de temps.

$n$  est le nombre de véhicule passant un point désigné sur la route.

$t$  est la durée de l'intervalle de temps.

Notant que le débit moyen peut être calculé aussi à partir d'une approche microscopique en utilisant la valeur moyenne du temps inter-véhiculaire :

$$q = \frac{1}{h_m} \quad (I.6)$$

$h_m$  est le temps inter-véhiculaire moyen ( $\sum h_i / n$ ) en unité de temps par véhicule.

$h_i$  est l'intervalle de temps du  $i^{\text{ème}}$  véhicule (le temps écoulé entre les arrivées des véhicules  $i$  et  $i - 1$ ).

$n$  est le nombre d'intervalles de temps mesurés à un point de la route.

- *La densité (ou concentration)* : est le nombre de véhicules présents sur une longueur d'une voie donnée à un instant donné, elle est exprimée en véhicules par kilomètre. Les densités élevées indiquent que les véhicules individuels sont très proches les uns des autres, tandis que les faibles densités indiquent le contraire. La densité est un paramètre difficile à mesurer directement sur le terrain. Des mesures directes de

densité peuvent être obtenues par photographie aérienne, qui est une méthode coûteuse, ou elles peuvent être estimées à partir de l'équation suivante :

$$k = \frac{n}{l} \quad (I.7)$$

Où :

$k$  est la densité du trafic en véhicules par unité de distance.

$n$  est le nombre de véhicules occupant un tronçon de route à un moment donné.

$l$  représente la longueur de la route.

La densité peut également être liée à l'espacement individuel entre les véhicules successifs, elle est déterminée par la formule suivante :

$$k = \frac{1}{s_m} \quad (I.8)$$

$s_m$  est l'espacement moyen ( $\sum s_i / n$ ) en unité de distance par véhicule.

$s_i$  est l'espacement du  $i^{\text{ème}}$  véhicule (la distance entre les véhicules  $i$  et  $i - 1$ , mesurée du pare-chocs avant au pare-chocs avant).

$n$  est le nombre d'espacements mesurés entre les véhicules.

- *La vitesse moyenne* : La vitesse moyenne du trafic a deux définitions. La première est la moyenne arithmétique des vitesses des véhicules observés en un point choisi sur la route dans un intervalle de temps donné, elle est appelée la vitesse moyenne temporelle. Cette vitesse est exprimée par l'équation suivante :

$$u_{mt} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i \quad (I.9)$$

Où :

$u_m$  est la vitesse moyenne temporelle en unité de distance par unité de temps.

$u_i$  est la vitesse instantanée des véhicules.

$n$  est le nombre de vitesses instantanées mesurées des véhicules.

La deuxième définition de la vitesse est plus utile dans le contexte de l'analyse du trafic, elle est déterminée sur la base du temps nécessaire des véhicules pour parcourir une longueur de route connue et à un instant donné. Cette mesure est appelée vitesse moyenne spatiale, cette variable est exprimée dans la formule suivante :

$$u_{ms} = \frac{l}{t_m} \quad (I.10)$$

$u_{ms}$  est la vitesse moyenne spatiale en unité de distance par unité de temps,

$l$  est la longueur du tronçon de la route utilisé pour mesurer le temps de trajet des véhicules.

$t_m$  est le temps de parcours moyen du véhicule, il est déterminé par l'équation suivante :

$$t_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad (I.11)$$

$t_i$  est le temps nécessaire au véhicule  $i$  pour parcourir un tronçon routier de longueur  $l$ .

$n$  est le nombre de temps de parcours mesurés des véhicules [44].

Les paramètres macroscopiques précédents, le débit, la densité et la vitesse moyenne spatiale sont reliés par l'équation ci-dessous :

$$q = k u_{ms} \quad (I.12)$$

➤ *Taux d'occupation* : La variable du taux d'occupation est très utilisée dans l'exploitation des infrastructures routières. La méthode de mesure de cette variable c'est en utilisant des capteurs, généralement des boucles électromagnétiques. Cette grandeur est déterminée par la proportion du temps durant laquelle la boucle d'induction magnétique est occupée, le taux d'occupation  $T_0$  et la concentration  $k$  sont liés par l'équation ci-dessous :

$$T_0 = (L + \lambda)k \quad (I.13)$$

$L$  représente la longueur moyenne des véhicules.  $\lambda$  est la longueur du capteur [39, 40].

### ***1.4.3 Le diagramme fondamental [38, 39, 42, 44]***

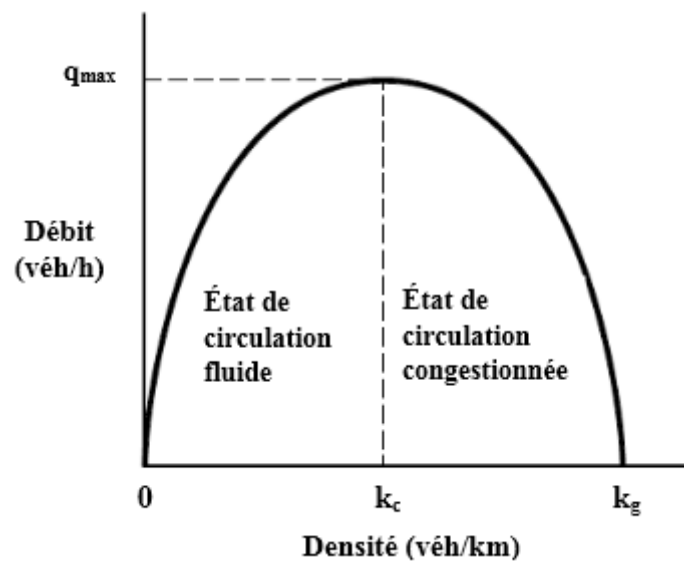
Les grandeurs définies précédemment décrivent la relation qui existe entre les différents paramètres du flux du trafic. Dans cette partie, nous représentons la relation entre les grandeurs macroscopiques sous forme de trois types de diagrammes qui décrivent deux régimes de trafic différents.

#### ***1.4.3.1 Modèle débit – densité***

Ce type de diagramme fondamental représente l'état de l'écoulement du trafic à partir de l'interaction entre les deux variables qui sont le débit et la concentration. Ce modèle est

généralement le plus utilisé pour montrer et expliquer l'état de l'écoulement du trafic sur un tronçon routier. La première section du graphique représente la situation du trafic fluide. C'est-à-dire les véhicules s'écoulent sans gêne, le débit s'accroît avec la densité jusqu'à un point  $k_c$  appelé densité critique. Le débit lié à cette densité diminue la capacité de la route, le débit maximal,  $q_{max}$ , représente le débit de circulation le plus élevé que l'infrastructure est capable de gérer.

En revanche, si la densité continue de croître, le débit commence à régresser jusqu'à ce que le trafic soit saturé. Notant que si le flux de trafic est nul, cela veut dire que soit la route est vide ou que c'est l'inverse, c'est-à-dire que la densité est au seuil de saturation  $k_g$ .



**Figure I.3.** Représentation graphique du débit en fonction de la densité.

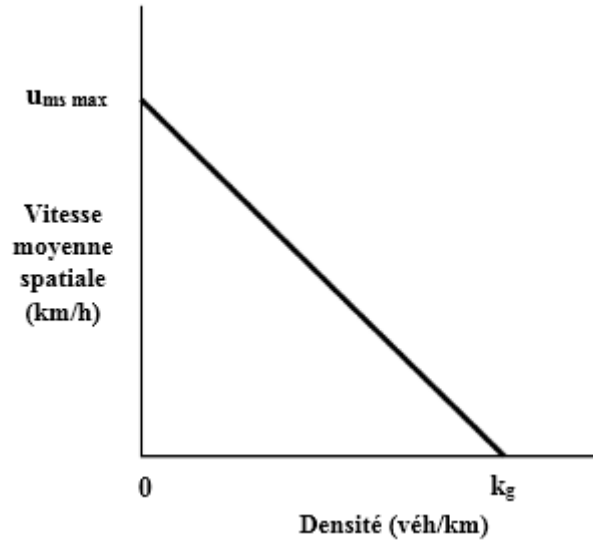
#### 1.4.3.2 Modèle vitesse – densité

Le point de départ le plus intuitif pour développer un modèle de trafic cohérent et généralisé est de se concentrer sur la relation entre vitesse et densité. Dans la figure ci-dessous, on remarque dans les conditions où la densité est très faible, la vitesse moyenne du flot est très élevée ou au maximum. Cette vitesse est appelée aussi vitesse d'écoulement libre, car la vitesse des véhicules n'est pas freinée par la présence d'autres véhicules.

Au fur et à mesure que de plus en plus de véhicules débutent à emprunter le tronçon routier, la densité du trafic augmentera et la vitesse moyenne des véhicules décroîtra lorsque les conducteurs ralentissent soit ; à cause de la vitesse imposée par les autres véhicules ou pour permettre les manœuvres des autres usagers de la route. Lorsque le tronçon routier deviendra si congestionné (une densité très élevée), la vitesse du flot (vitesse moyenne



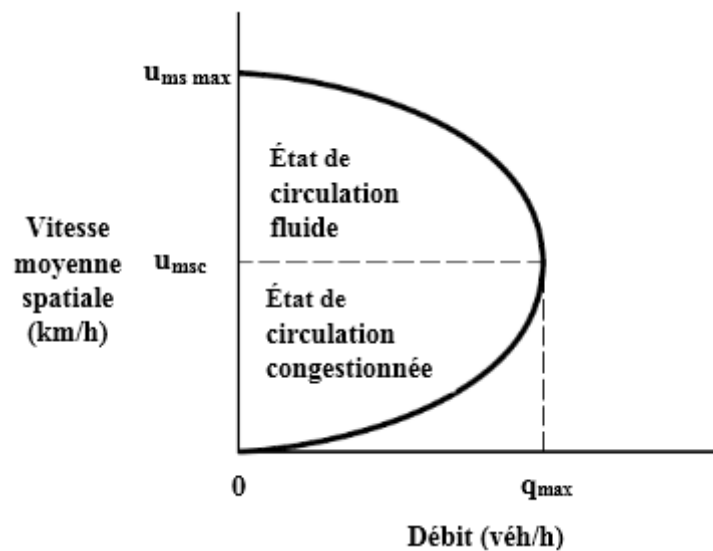
spatiale) s'approchera de 0. La densité sera déterminée par la longueur des véhicules et les espaces que les conducteurs laissent entre eux. Cette condition de densité élevée s'appelle densité de congestion.



**Figure I.4.** Représentation graphique de la vitesse moyenne spatiale en fonction de la densité.

#### 1.4.3.3 Modèle vitesse –débit

L'état de l'écoulement du trafic peut aussi être représenté en utilisant les deux variables vitesse moyennes spatiales et le débit. On remarque sur la figure ci-dessous que la vitesse et le débit augmentent proportionnellement ce qui représente l'état du trafic fluide. Tandis que lorsque la vitesse commence à diminuer et s'approche de 0, et que le débit de véhicules baisse aussi, cela prouve que le tronçon routier est dans un état très encombré et instable.



**Figure I.5.** Représentation graphique de la vitesse moyenne spatiale en fonction du débit.

#### ***1.4.4 Méthodes de mesure du flux du trafic***

Les informations sur la circulation routière au-delà d'un point donné au cours d'une période donnée fournissent une contribution essentielle aux décisions concernant la planification, la conception et l'exploitation des systèmes de transport. Les études sur le débit du trafic sont menées pour recueillir des données sur le nombre de véhicules qui passent un point déterminé sur une installation routière pendant une période de temps spécifiée. Cette période varie d'aussi peu que 15 minutes à autant qu'un an selon l'utilisation prévue des données. Les données collectées peuvent également être organisées dans des sous-classes qui peuvent inclure les mouvements directionnels, les taux d'occupation et la classification des véhicules [44, 45].

Les mesures du flux du trafic sont généralement menées à partir d'un comptage pour connaître les caractéristiques du trafic comme le débit du trafic annuel, mensuel, journalier et des heures de pointe, ainsi que les types de véhicules qui passent dans l'infrastructure routière. Notant que, lors du choix de la période du comptage, il faut éviter les vacances scolaires les jours particuliers où lors des événements occasionnels, parce qu'il y aura un changement important du volume du trafic. Les comptages du trafic routier sont effectués à l'aide de deux méthodes de base : manuelle et automatique [44, 46].

##### ***1.4.4.1 Comptage manuel***

Le comptage manuel implique une ou plusieurs personnes enregistrant les véhicules observés à l'aide d'un compteur ou en l'enregistrant sur une fiche de comptage. La méthode traditionnelle de collecte des données sur la circulation était de placer des agents à côté de la route et de leur demander d'enregistrer le nombre de véhicules passant dans la ou les directions désignées. L'enregistrement manuel des flux de trafic par le personnel chargé des enquêtes est encore courant pour les comptages ponctuels sur une courte période et par les organisations qui ne peuvent pas s'investir dans des équipements plus coûteux [44, 45].

Avec ce genre de comptage, les mouvements à l'intersection et les types de véhicules peuvent être enregistrés. À noter qu'en général, lors du comptage avec un compteur, l'inclusion des camionnettes et camions légers à quatre pneus dans la catégorie des voitures particulières ne crée pas de lacunes significatives dans les données collectées, puisque les caractéristiques de performance de ces véhicules sont similaires à celles des voitures particulières. Cependant, dans certains cas, les données plus détaillées des véhicules peuvent être nécessaires, ce qui nécessiterait la récolte de données en fonction du nombre d'essieux

et/ou du poids. Les principaux inconvénients de la méthode de comptage manuel sont qu'elle demande beaucoup de travail et peut donc être coûteuse, elle est soumise aux limites des facteurs humains, ainsi qu'elle ne peut pas être utilisée pendant de longues périodes [44, 47].

#### *1.4.4.2 Comptage automatique*

Le comptage du trafic automatique est généralement utilisé lorsqu'il y a une nécessité de connaître les données liées aux flux du trafic sur une période longue, par exemple, une semaine un mois ou un an. Les données peuvent être présentées en termes de flux par période de temps, par exemple par heure, par jour ou par semaine et utilisées pour comparer les variations journalières, hebdomadaires ou saisonnières, ainsi que pour quantifier le volume de trafic. Les compteurs automatiques sont utiles lorsque l'on souhaite collecter des données indicatives sur une période prolongée à moindre coût [46, 47].

Parmi les capteurs utilisés dans ce type de comptage, nous citons :

- *Les capteurs à tubes pneumatiques* : ce tube de pression est comprimé à chaque fois, qu'un essieu de véhicule le traverse, cela envoie une impulsion le long du tube et donc le débit du véhicule peut être estimé. En effet, les problèmes courants de ce type de capteur c'est que sont montés en surface, les tubes pneumatiques peuvent être coupés, arrachés et qu'ils risquent d'avoir une infiltration d'humidité. Les capteurs pneumatiques sont utilisés pour un comptage de courtes durées.
- *Les boucles électromagnétiques* : ils sont les plus utilisés dans plusieurs pays au monde pour réaliser l'étude de comptage, le passage de la masse métallique d'un véhicule sur la boucle induit un champ magnétique dans la boucle, permettant d'enregistrer la présence d'un véhicule. Ce type de technologie compte directement la présence des véhicules avec une impulsion pour chaque véhicule. Cependant, les boucles peuvent donner de fausses lectures si deux véhicules passent la boucle simultanément ou sont proches l'un de l'autre ; à l'inverse, un véhicule tirant une remorque peut être lu comme deux véhicules.
- *Les capteurs acoustiques (ultrasons)* : L'utilisation de ce capteur permet de mesurer le flux du trafic par les ondes acoustiques, mais la performance de ce capteur est faible par rapport aux mesures de vitesses et taux d'occupation, ainsi qu'il n'est fort aux conditions météorologiques.
- *Les capteurs acoustiques passifs (microphone)* : Cet instrument technologique localise les bruits produits par les véhicules. Ce type de capteur ne peut être utile que pour

détecter l'absence ou l'existence des véhicules sur quelques sections de la route. Ce type de capteurs est rarement appliqué dans l'exploitation des infrastructures routières, parce qu'il a une faible performance en situation de congestion, il est seulement performant dans l'état de trafic fluide.

- *Les capteurs à effet Doppler (Radars)* : ils permettent de détecter le débit de véhicules par des ondes électromagnétiques. La vitesse des véhicules est calculée grâce aux ondes renvoyées, à partir des fréquences décalées entre les signaux émis et reçus. Il y a quelques facteurs qui perturbent la détection des véhicules comme l'application d'une très basse ou d'une très grande vitesse par les conducteurs.
- *Les capteurs vidéos* : sont utilisées pour avoir plus d'exactitude dans le comptage, ainsi de récolter plus de données en utilisant des caméras qui traitent les informations d'une façon automatique. Ce type de capteur a plus de fiabilité, mais il nécessite une maintenance régulière surtout dans les conditions météorologiques en cas de pluie, ou de neige, ainsi dans le cas d'un soleil rasant.

Finalement, des visites périodiques du site peuvent être nécessaires pour vérifier que les capteurs cités sont toujours en bon état [40, 44, 45, 47, 48].

#### *1.4.4.3 Coefficient d'équivalence*

Après avoir récolté les données du trafic à partir du comptage, il est nécessaire de présenter le flux du trafic avec la même unité. La notion de coefficient d'équivalence donne la possibilité d'exprimer toutes les classes de véhicules avec la même unité d'une façon homogène. Cette unité est " l'unité de véhicule particulier (uvp)". Les flux de trafic s'expriment en uvp/h. Les valeurs généralement appliquées sont :

- ✓ 1 véhicule léger = 1 uvp.
- ✓ 1 poids lourd = 2 uvp.
- ✓ 1 bus articulé = 3 uvp.
- ✓ 1 deux roues = 0.3 uvp.

Dans une intersection à feux, il est essentiel aussi d'appliquer un deuxième coefficient d'équivalence. Ce dernier est donné en fonction du type de mouvement. Par exemple pour un mouvement sans gêne direct le coefficient d'équivalence est de 1. Alors que pour un mouvement de tourne à droite le coefficient d'équivalence est de 1.1. Ainsi, pour un mouvement de tourne à gauche le coefficient d'équivalence est de 1.7 [40, 46].

## **I.5 Régulation des intersections à feux tricolores**

La plupart des villes à travers le monde disposent d'un système de régulation à feux au niveau des intersections, les deux principaux systèmes sont : le plan de feux fixe et le système de régulation à feux adaptative. L'objectif principal de la signalisation est de réduire les collisions et les retards au niveau des intersections, cela par la gestion optimale des mouvements des flux du trafic, ce qui va maximiser la capacité de l'infrastructure. Donc, les feux de signalisation sont utilisés pour réguler et contrôler les conflits entre les mouvements opposés des véhicules ou des piétons.

Une intersection simple se compose de deux routes qui se croisent ; une intersection complexe dessert plusieurs routes qui se croisent dans la même zone. Le but de cette section est de résumer certaines techniques couramment utilisées dans la régulation du trafic par des feux de circulation. Nous commençons par présenter un aperçu des différentes terminologies utilisées dans le contrôle du trafic par les feux de signalisation, puis nous présentons les systèmes de contrôle ainsi de connaître le principe de régulation dans les intersections à feux avec priorité des transports en commun [44, 47].

### ***1.5.1 Terminologies [38, 40, 44, 49]***

#### *1.5.1.1 Zone de conflit d'une intersection*

Elle représente la zone où les flux de trafic se déplaçant dans des directions différentes interfèrent les uns avec les autres.

#### *1.5.1.2 Zone de stockage d'une intersection*

C'est la zone sur laquelle les véhicules s'entreposent pour franchir l'intersection au moment où le feu vert s'allume.

#### *1.5.1.3 Zone de sortie d'une intersection*

C'est la zone qui va recevoir le flux venant des autres routes, donc elle représente la zone de destination qui permette de dissiper le flux de véhicules des autres voies d'origine ou des zones de stockage.

#### *1.5.1.4 Mouvement*

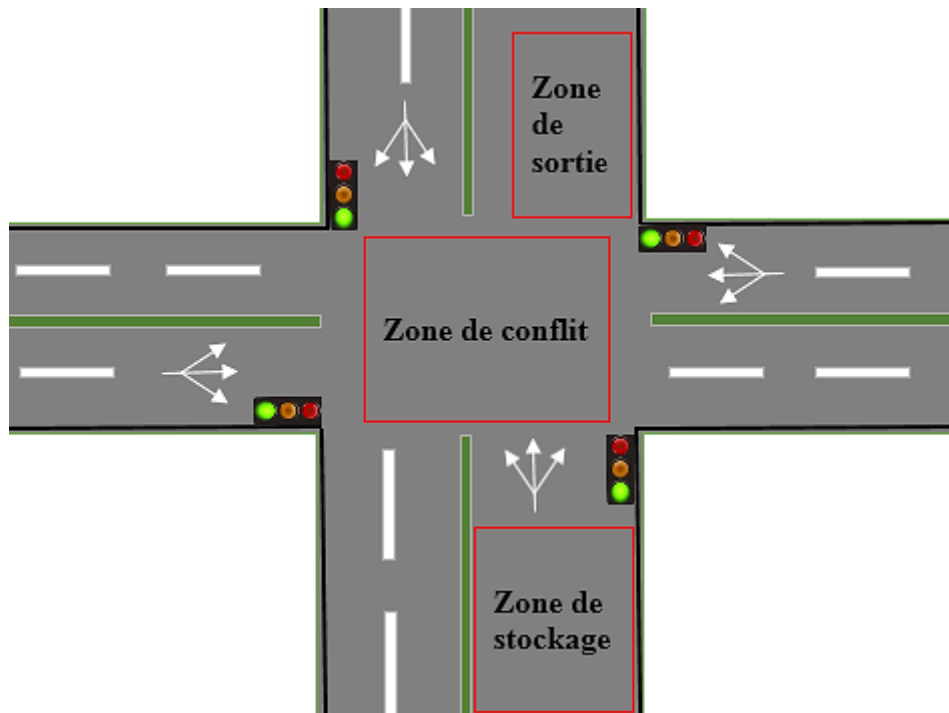
Un flux de véhicules ou de piétons exécutant un mouvement d'un point d'origine à un point de destination.

#### *1.5.1.5 Voie principale*

Une voie à l'intersection qui a la plus grande importance ou priorité, généralement parce qu'elle contient le plus grand débit de trafic.

#### *1.5.1.6 Voie secondaire*

Une voie à l'intersection qui n'est pas prioritaire et qui a moins d'importance généralement parce qu'elle contient une faible demande de trafic.



**Figure I.6.** Représentation graphique d'une intersection isolée à feux.

#### *1.5.1.7 Système de signalisation*

Un réseau de feux de circulation coordonné pour déplacer systématiquement le trafic selon un plan de feux fixes ou variables.

#### *1.5.1.8 Indication*

L'éclairage d'une ou plusieurs lentilles de signalisation (verts, jaunes, rouges) indiquant un mouvement de circulation autorisé ou interdit.

#### *1.5.1.9 Cycle de feux (durée du cycle)*

C'est le temps en secondes requis pour une séquence de couleurs complète de signalisation (le cycle de feux C est généralement exprimé en secondes). La durée du cycle est le temps qui s'écoule du début de l'indication verte à la fin de l'indication rouge.

#### *1.5.1.10 Temps du feu vert*

C'est une période de temps du cycle pendant laquelle un mouvement ou la combinaison de mouvements reçoit une indication verte. Ceci est exprimé en secondes et reçoit le symbole G. Ce feu donne l'autorisation aux véhicules de franchir la zone de conflit pour rejoindre leurs destinations.

#### *1.5.1.11 Temps du feu jaune*

C'est une période de temps du cycle pendant laquelle un mouvement ou la combinaison de mouvements reçoit une indication jaune. Ceci est exprimé en secondes et reçoit le symbole Y. Ce temps est appelé intervalle de changement, car il avertit les conducteurs que l'indication du signal est sur le point de passer du vert au rouge.

#### *1.5.1.12 Temps du feu rouge*

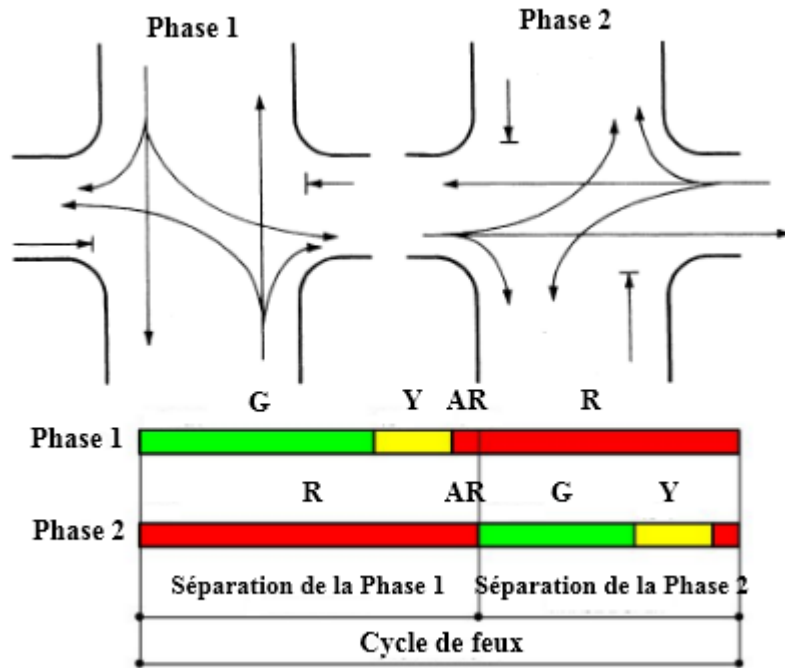
C'est une période de temps du cycle pendant laquelle un mouvement où la combinaison de mouvements reçoit une indication rouge. Ceci est exprimé en secondes et reçoit le symbole R. Ce feu indique que les véhicules doivent s'arrêter complètement, il est interdit de franchir la zone de conflit.

#### *1.5.1.13 Temps du feu rouge intégral*

Toutes les voies ont une indication rouge (exprimée en secondes et portant le symbole AR). Ce temps est appelé intervalle de dégagement, car il permet aux véhicules qui auraient pu entrer à la fin de l'intervalle jaune de franchir l'intersection avant que la phase verte ne commence. Ce type d'intervalle est de plus en plus courant pour des raisons de sécurité, parce que le taux de véhicules entrant à la fin de l'indication jaune et au début de l'indication rouge n'a cessé d'augmenter ces dernières années.

#### *1.4.1.14 Phase*

C'est une partie d'un cycle alloué à un flux de trafic, ou à une combinaison de deux flux ou plus ayant la priorité simultanément dans l'intersection pendant un ou plusieurs intervalles (figure I.7). Une phase est définie aussi par la somme des temps affichés vert, jaune et rouge pour un mouvement ou une combinaison de mouvements qui reçoivent la priorité simultanément pendant le cycle. La somme des longueurs de phase (en secondes) est la durée du cycle. Notons que le nombre de phases doit être le minimum possible pour limiter les temps des retards liés aux démarrages des véhicules, au temps jaune et rouge intégral.



**Figure I.7.** Représentation d'un cycle de feux découpé en deux phases au niveau d'une intersection isolée.

#### 1.5.1.15 Temps du feu vert effectif

La durée pendant laquelle un mouvement de trafic ou un ensemble de mouvements donné peut se dérouler ; il est égal à la durée du cycle moins le temps rouge effectif et le temps perdu. Ceci est exprimé en secondes et reçoit le symbole  $G_{eff}$ .

#### 1.5.1.16 Temps perdu

Ce temps est une partie du début de chaque période verte et une partie de chaque changement jaune qui ne sont pas utilisables par les véhicules. La somme de ces deux périodes est le temps perdu.

#### 1.5.1.17 Temps perdu au dégagement

C'est le temps, en secondes, entre les phases du signal pendant lequel l'intersection n'est franchie par aucun véhicule.

#### 1.5.1.18 Temps perdu au démarrage

C'est le retard lié au démarrage des véhicules lors du déclenchement du feu vert.



### 1.5.1.19 Débit de saturation

Le débit de saturation est le volume horaire maximal qui peut traverser une intersection, à partir d'une voie ou d'un groupe de voies donné, si cette voie (ou ces voies) a été allouée à un vert constant au cours d'une heure. Le débit de saturation est donné par :

$$s = \frac{3600}{h} \quad (I.14)$$

$s$  est le débit de saturation en véh / h.

$h$  est le temps inter véhiculaire.

3600 est le nombre de secondes par heure.

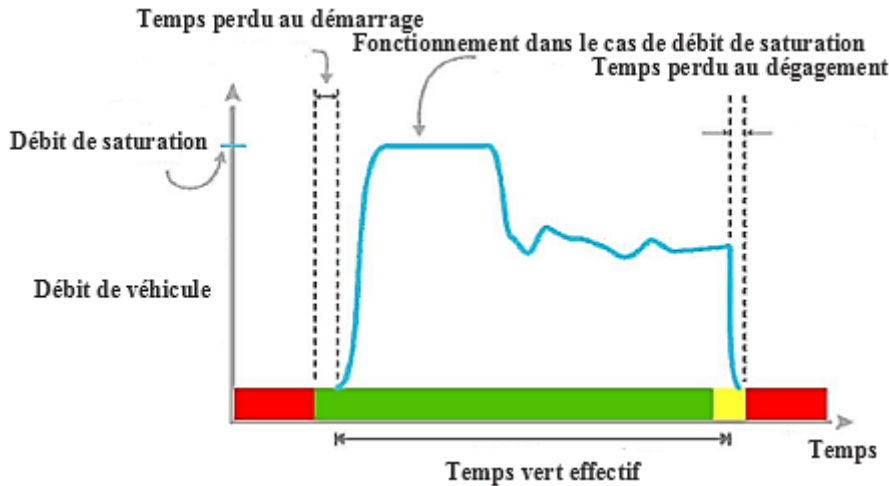


Figure I.8. La dissipation du débit dans la situation de saturation dans la phase verte.

### 1.5.2 Les modes de contrôle des intersections par un plan de feux

Pour comprendre comment ces caractéristiques de contrôle sont implémentées, il est essentiel d'analyser l'implémentation physique de ces concepts. L'affichage des différentes indications de signaux (vert, jaune, rouge, protégé, autorisé) à une intersection est géré par un contrôleur de signaux (qui est généralement situé dans une armoire à côté de l'intersection). Les contrôleurs de signaux modernes sont des équipements électroniques sophistiqués. Les contrôleurs de feux de circulation sont conçus pour fonctionner dans un ou plusieurs des modes suivants : mode de temps fixe, semi-adaptatif et adaptatif.

#### 1.5.2.1 Mode de temps fixe (cycle de feux fixes)

Un mode dont la synchronisation (durée du cycle, temps vert, etc.) est fixée sur des périodes de temps spécifiées et ne change pas en réponse aux variations du flux de trafic en

temps réel à l'intersection. Aucune détection de véhicule n'est nécessaire avec ce mode de fonctionnement.

#### *1.5.2.2 Mode semi-adaptatif*

Un mode dont la synchronisation (durée du cycle, temps vert, etc.) est affectée lorsque des véhicules sont détectés (par capteur vidéo, détecteurs de boucle électromagnétique intégrés à la chaussée, etc.) sur certaines approches, mais pas toutes. Ce mode de fonctionnement se trouve généralement là où une route à faible volume croise une route à volume élevé, souvent appelée voie secondaire et voie principale, respectivement. Dans ce cas, le temps vert est alloué à la voie principale jusqu'à ce que des véhicules soient détectés sur la voie secondaire ; puis l'indication verte est brièvement allouée à la route à faible trafic puis renvoyée de nouveau à la voie principale.

#### *1.5.2.3 Mode adaptatif*

Un mode dont la synchronisation des feux (durée du cycle, temps vert, etc.) est ; totalement influencée par les volumes de trafic lorsqu'il est détecté, sur toutes les approches. Les signaux entièrement activés sont le plus couramment utilisés aux intersections de deux voies principales et là où des variations substantielles existent dans tous les volumes de circulation au cours d'une journée.

Dans cette thèse nous nous concentrerons que sur le principe de régulation du trafic avec un plan de feux fixe, parce qu'il est le plus simple à appliquer dans les conditions actuelles de nos villes [38, 50].

### ***1.5.3 Méthode de calcul du cycle de feux fixe optimal***

Le contrôle du trafic par un plan de feux fixe est basé sur l'historique du trafic routier qui s'écoule dans chaque voie de l'intersection, cela en les accordant un temps vert prédéfini en fonction de la demande de trafic pour chaque heure de la journée ou pour toute la journée. Ce plan de feux est le plus utilisé dans plusieurs pays au monde vu que son implantation n'est pas coûteuse.

En outre, la durée du cycle des feux de signalisation a un effet important sur la qualité de service dont bénéficient les automobilistes. Les longs cycles augmentent les retards tandis que les cycles très courts sont inefficaces. De plus, la manière dont la durée du cycle est répartie entre les phases a un effet important sur la qualité de service perçue par les

automobilistes qui traversent l'intersection. La méthode de Webster est la plus connue et appliquée pour déterminer la durée du cycle optimale des feux fixes, ce qui permet de limiter les retards aux intersections sans l'utilisation des instruments coûteux. La méthode de Webster pour calculer le cycle optimal suit les formules principales suivantes [44, 47] :

$$C_{opt} = \frac{1.5L + 5}{1 - \sum_{i=1}^n Y_i} \quad (I.15)$$

$C_{opt}$  est le cycle du temps optimal (sec) ;

$L$  est la somme du temps perdu pour chaque cycle (sec) ;

$Y_i$  est les ratios totaux des flux de trafic critiques ;

$n$  est le nombre de phases ;

$$L = \sum_{i=1}^n l_i + R \quad (I.16)$$

$l_i$  est le temps perdu à l'intersection ;

$R$  est le temps du rouge intégral.

$Y_i$  suit la formule suivante :

$$Y_i = \frac{q_{ij}}{S_j} \quad (I.17)$$

$q_{ij}$  est le volume du trafic ;

$S_j$  est le flux de la saturation.

#### ***1.5.4 Régulation des intersections à feux avec priorité pour les transports en commun : cas d'un tramway***

La priorité des transports en commun doit être considérée dans le contexte d'une stratégie globale de transport urbain avec des objectifs qui incluent non seulement une meilleure exploitation des trams (ou bus) et la limitation des déplacements en véhicule particulier, mais également un environnement amélioré pour les résidents, les travailleurs et les visiteurs. Les mesures proposées doivent servir tous ces objectifs, tout en respectant le bon rapport coût-efficacité, ainsi par rapport à la performance en termes de capacité de transport, régularité et ponctualité. Les objectifs de conception typiques des mesures prioritaires de transport public sont les suivants :

- Améliorer les conditions et la fiabilité de l'exploitation des trams par l'introduction de mesures de priorité appropriées ;
- Modifier l'équilibre du trafic en faveur des trams aux endroits où cela peut être dûment justifié ;
- Améliorer la sécurité routière en général pour tous les usagers surtout aux intersections [47].

Il existe deux types de priorité pour les tramways dans les intersections contrôlées avec des feux de signalisation, la première est la priorité active, et la deuxième est la priorité passive.

#### *1.5.4.1 Priorité passive (contrôle des ondes vertes)*

Cette priorité se base sur la conception des plans de feux de sorte à favoriser les voies soutenant le passage du tramway, sans la détection individuelle de ces véhicules, parce que cette approche se repose principalement sur la création d'une bande d'ondes vertes pour les passages de tram aux intersections en ajustant les paramètres des feux de circulation tels que les séquences de phase et les décalages. Les performances pratiques de la priorité passive sont régies par la fiabilité du temps de circulation des tramways entre les intersections. La priorité passive est couramment adoptée pour réaliser le contrôle des véhicules et des transports en commun, en raison d'un coût relativement faible et d'un impact moindre sur la circulation des autres véhicules [51, 52, 53, 54, 55].

#### *1.5.4.2 Priorité active*

La priorité active donne des feux de signalisation verts aux tramways à chaque fois que les tramways approchent des intersections, cette méthode dynamique fonctionne avec le principe de changement de la signalisation à l'intersection lorsqu'un tramway est détecté, pour permettre son passage en toute sécurité. Cependant, la priorité active entraîne généralement des retards importants aux intersections pour les autres usagers [51, 52, 56, 57].

La détection des tramways a été réalisée à l'aide des capteurs généralement des boucles électromagnétiques. Pour chaque intersection, deux détecteurs sont placés ; le détecteur d'entrée et le détecteur de sortie. Le détecteur d'entrée est placé en amont de l'intersection. Lorsque le tram passe au-dessus de la boucle d'entrée, un signal se transmet au contrôleur de la circulation indiquant que le tram approche de l'intersection. En outre, le détecteur de sortie est placé en aval de l'intersection et lorsque le tram passe au-dessus d'un détecteur de sortie,

un signal sera transmis au contrôleur de la circulation indiquant que le tram a franchi complètement l'intersection [58].

## **I.6 Conclusion**

Au cours de ce premier chapitre, nous avons présenté les différentes caractéristiques du trafic routier et de la congestion urbaine, ainsi que les principes de mesures et de régulation de la circulation routière. Dans la première partie, nous avons fourni plusieurs définitions existantes dans la littérature qui décrivent le phénomène de l'embouteillage du trafic routier. De plus, nous avons exposé les divers facteurs qui causent ce problème surtout en milieu urbain. Puis dans l'étape suivante, nous avons abordé ce phénomène sur le plan ingénierie, nous avons présenté les variables microscopiques et macroscopiques du trafic routier. La relation entre les grandeurs macroscopiques a été montrée à travers les diagrammes fondamentaux décrits dans la section I.3.3.

Après avoir terminé la description des différentes variables du trafic, nous avons pu constater dans la partie suivante comment nous pouvons mesurer les flux du trafic. Ces derniers peuvent être mesurés par un comptage manuel ou automatique réalisé en utilisant plusieurs types de capteurs qui permettent de récolter les différentes caractéristiques du trafic. En outre, dans cette partie de l'étude, nous avons pu percevoir comment transférer les caractéristiques des véhicules à partir d'un coefficient d'équivalence en unité de véhicule particulier, ce qui permet d'avoir plus d'exactitude dans les études de circulation.

Pour résoudre le problème de la congestion dans les intersections urbaines, plusieurs pays utilisent les systèmes de signalisation du trafic. A partir de ces derniers, nous nous sommes intéressés, dans la dernière section de ce chapitre, à la régulation du trafic par les feux de signalisation. Nous avons donné les terminologies et les définitions relatives au domaine de la régulation par des feux tricolores dans les intersections urbaines.

De plus, nous avons pu discerner dans cette partie les modes de contrôle du trafic par un plan de feux, puis nous nous sommes focalisés sur la régulation par le plan de feux fixe. Ce dernier est le plus appliqué dans nos villes et le moins coûteux. Aussi, nous avons choisi la méthode de « Webster » pour calculer le cycle de feux optimal, utilisée pour définir le cycle nécessaire pour les intersections à plan de feux fixe. Nous avons finalisé cette partie avec les intersections qui contiennent une priorité d'un transport en commun, plus exactement, le cas du tramway. Ceci nous a permis de connaître les deux types de priorités existantes dans ce

type d'intersections, et d'apprendre que la régulation optimale des intersections ne sera pas optimale sans la bonne performance du tramway, surtout sur le plan régularité et ponctualité.

Donc, nous pouvons conclure que la performance du tramway est très importante pour résoudre le problème de congestion dans les intersections à trafic mixte.

# **Chapitre II**



---

*Chapitre II Le rôle des transports en commun dans la réduction de la congestion en zone urbaine. Cas du tramway de Constantine.*

---

<b>II.1 Introduction.....</b>	<b>33</b>
<b>II.2 L'influence des transports en commun sur la congestion routière.....</b>	<b>33</b>
<b>II.3 L'investissement dans les réseaux de tramways dans le monde et en Algérie .....</b>	<b>35</b>
<b>II.4 Étude de cas : Le tramway de la ville de Constantine (Algérie) .....</b>	<b>37</b>
II.4.1 Présentation de la zone d'étude et de la ligne du tramway de Constantine .....	38
II.4.2 Architecture du tramway et caractéristique .....	39
II.4.3 Critères de conception de la voie.....	40
II. 4.4 Système de traction.....	40
II.4.5. Le poste de contrôle centralisé du tramway de Constantine (PCC) .....	41
II.4.5.1. Fonctionnalités du système d'aide à l'exploitation dans le poste de contrôle centralisé .....	41
II.4.5.2. Fonctionnalité du système d'aide à l'exploitation à bord .....	42
II.4.6 Indicateurs de performance théorique du tramway de Constantine.....	43
II.4.6.1. La capacité du tramway de Constantine .....	43
II.4.6.2 Temps de parcours, vitesse et temps de stationnement .....	45
<b>II.5. Conclusion.....</b>	<b>47</b>

## **II.1 Introduction**

Nous avons présenté dans le premier chapitre, le problème de la congestion du trafic routier, les causes, et les différentes données qui représentent et décrivent ce problème sur le plan ingénierie. Nous allons connaître à travers ce chapitre, le rôle des transports en commun dans la réduction des embouteillages dans les zones urbaines, ainsi que les facteurs essentiels qui influent sur la qualité du service d'un transport en commun en particulier, les tramways. Car ces derniers offrent plusieurs avantages tant sur le plan environnemental qu'économique. Le tramway procure aussi une diminution considérable de la circulation routière et une meilleure image de la ville. Nous mettrons ensuite le point sur l'importance qui représente ce système de transport pour les gouvernements. Elle est manifestée par le nombre d'investissements de plusieurs pays dans ce système de transport. Depuis une dizaine d'années, l'Algérie a commencé à s'intéresser à ce mode de transport.

Afin de mener cette étude, nous avons choisi le réseau de tramway de Constantine. Le type de matériel roulant utilisé, la voie, le système de traction, le système intelligent qui aide à bien contrôler l'exploitation du tramway et les différentes performances théoriques de ce moyen de transport qui seront décrits dans ce chapitre.

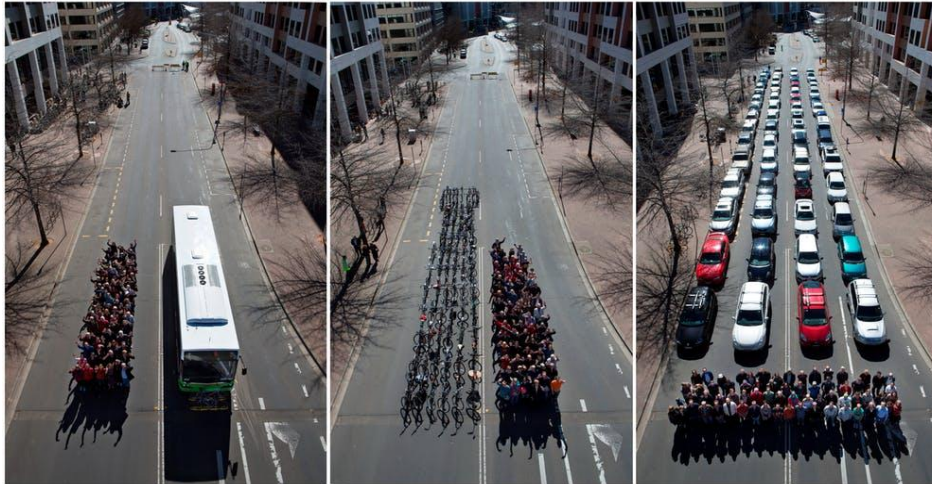
## **II.2 L'influence des transports en commun sur la congestion routière**

L'investissement, la modernisation et l'optimisation du système de transport en commun comptent parmi les stratégies importantes pour réduire les embouteillages et la pollution atmosphérique dans de nombreuses villes du monde entier [59, 60, 61, 62, 63]. Aussi, ceci a pour but de rendre ce système plus efficace, en particulier, en termes de capacité de transport et de rapidité [64, 65]. Cette stratégie va encourager positivement les citoyens à prendre les transports en commun plutôt que leurs propres véhicules [66, 67, 68, 69] (figure II.1), ce qui va réduire le débit de véhicules qui emprunte le même itinéraire que les transports publics, donc de réduire la congestion dans les zones urbaines. De plus, le déplacement en transport en commun est plus sûr par rapport à un voyage en véhicule privé. De plus, son utilisation réduit le nombre d'accidents sur les routes [70].

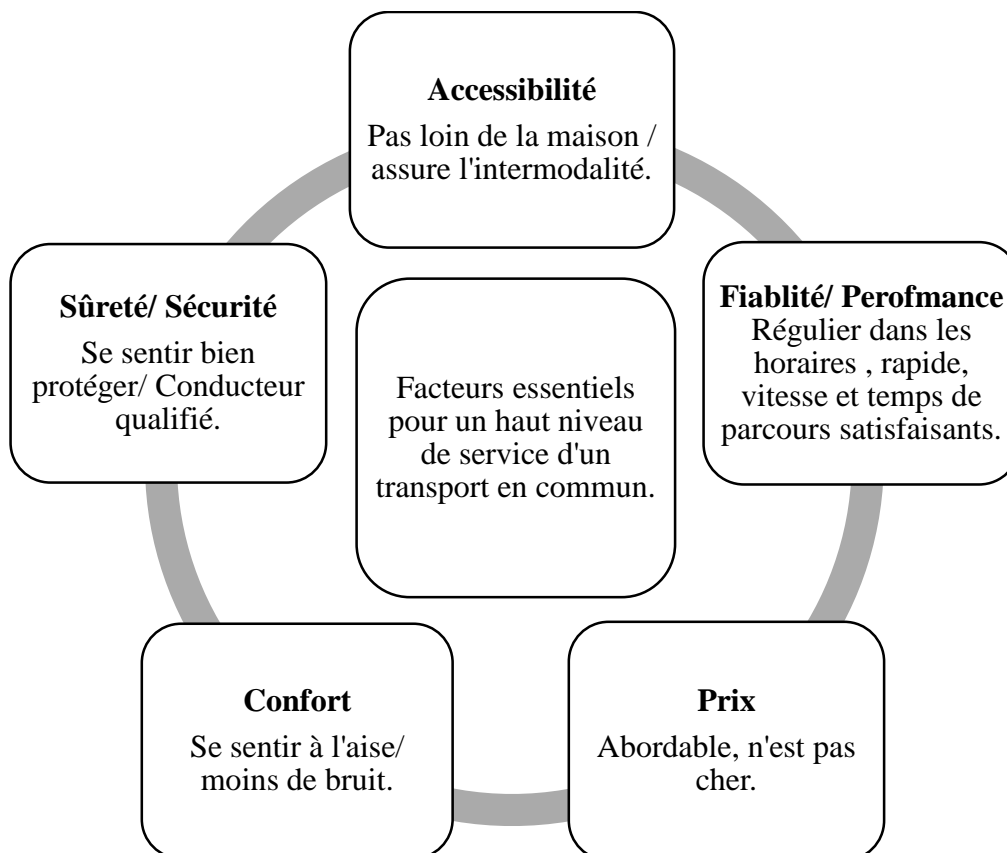
Un réseau de transport en commun performant doit répondre d'une façon optimale aux divers indicateurs qui attirent les usagers (figure II.2), cela facilite le déplacement des citoyens et surtout des touristes qui visitent la ville [71, 72, 73]. Un transport public efficace est un facteur important de mobilité.



De plus, c'est un élément fondamental dans l'amélioration de la qualité de vie offerte à la population [74, 75]. Cependant, il est nécessaire d'analyser d'une façon régulière les différents facteurs qui influent sur le choix de la population vis-à-vis l'utilisation des transports publics [76].



**Figure II.1.** L'occupation de l'espace en utilisant les véhicules privés, vélos et bus (69 personne, 40 voiture) [77].



**Figure II.2.** Facteurs importants pour un haut niveau de service d'un transport en commun.

### II.3 L'investissement dans les réseaux de tramways dans le monde et en Algérie

Le tramway est l'un des moyens de transport modernes le plus sollicité, et cela est lié aux différents avantages qu'il offre [78, 79, 80], en particulier, parce qu'il est moins polluant, ainsi qu'il contribue à réduire le flux du trafic et à minimiser les accidents de la route sur sa ligne [81, 82, 83, 84]. C'est dans ce sens que plusieurs pays dans le monde ont investi et développé leurs réseaux de transport ferroviaire urbain, pour améliorer le service de transport dans leurs villes [57, 64, 85]. Le plus grand réseau de tramway dans le monde se localise dans la ville de Melbourne en Australie, s'étend sur presque 250 km en doubles voies et une flotte de 500 tramways [86]. Un autre exemple d'un réseau important de tramway moderne en Europe est celui d'Île-de-France (France), le réseau est actuellement de 126.8 km, cette ligne assure le transport quotidien de plus d'un million de passagers, de plus, d'autres extensions sont en cours de réalisation [87].

Dans les tableaux ci-dessous, nous citons quelques exemples sur l'inauguration des tramways modernes dans les 20 dernières années dans différentes villes du monde, en France et en Algérie, ainsi que les projets en cours de réalisation. Ce qui reflète l'importance de ce système de transport dans la mobilité actuelle et future. Le tableau II .1 illustre l'inauguration du tramway dans différentes villes du monde dans les deux dernières décennies [88].

Villes	Année d'inauguration du tramway moderne	Longueur de la ligne km	Nombre de station
Casablanca (Maroc)	2012	47.5	71
Rabat-Salé (Maroc)	2011	27	43
Addis-Abeba (Ethiopie)	2015	31.6	39
Buenos Aires (Argentine)	2007	2.1	4
Medellin (Colombie)	2016	4.3	9
Dubai (EAU)	2014	10.5	11
Barcelone (Espagne)	2004	29	55
Dublin (Irlande)	2004	42.1	67
Bergen (Norvège)	2010	20.4	15
Croydon (GB)	2000	28	39
Gold Coast (Australie)	2014	13	16
Nottingham (GB)	2004	14	51

Madrid (Espagne)	2007	27.8	36
Washington DC (EUA)	2016	4.2	8
Suzhou (Chine)	2014	43	41
Tianjin (Chine)	2007	7.86	14
Gaziantep (Turquie)	2011	12	13
Eskişehir (Turquie)	2004	14.5	26
Saragosse (Espagne)	2011	12.8	11
Séville (Espagne)	2007	2.2	5
Cochabamba (Bolivie)	2017	42.1	43

**Tableau II.1.** L'inauguration du tramway dans différentes villes du monde.

Le tableau II.2 regroupe quelques exemples sur l'inauguration de nouvelles lignes de tramway moderne en France dans les derniers vingt ans [89, 90, 91].

Villes	Année d'inauguration du tramway moderne	Longueur de la ligne km	Nombre de station
Angers	2011	12.3	25
Besançon	2014	14.5	28
Reims	2011	11.2	22
Montpellier	2000	60.5	84
Tours	2013	15.5	29
Dijon	2012	19	35
Lyon	2001	66.3	107
Bordeaux	2003	77.3	142
Nice	2007	24.2	55
Toulouse	2011	16.7	27
Valenciennes	2006	33.8	48
Mulhouse	2006	16.2	29
Le Mans	2007	18.9	35
Le Havre	2012	13	23
Caen	2019	17.3	36
Brest	2012	14.3	28

**Tableau II.2.** L'inauguration de nouvelle ligne du tramway en France (dernière mise à jour en 2019).

Entre 2011 et 2018, le nombre de kilomètres de voies ferrées urbaines construits en Algérie est en augmentation remarquable, six villes algériennes ont bénéficié d'un réseau de tramway ; en plus d'autres projets sont en cours de construction pour trois autres villes [92]. Le tableau II.3 représente les tramways modernes inaugurés en Algérie [93, 94, 95].

Villes	Année d'inauguration du tramway moderne	Longueur de la ligne km	Nombre de station
Alger	2011	23.2	38
Oran	2013	18.7	32
Constantine	2013	14.7	15
Sidi Bel Abbès	2017	14	22
Ouargla	2018	9.6	16
Sétif	2018	15.2	26

**Tableau II.3.** L'inauguration des lignes du tramway en Algérie.

Le tableau II.4 représente quelques tramways en cours de réalisation en Algérie et dans quelques autres villes du monde [96].

Villes	Année d'inauguration prévue du tramway	Longueur de la ligne km	Nombre de station
Mostaganem (Algérie)	2020	14.2	24
Annaba (Algérie)	/	21.7	35
Batna (Algérie)	/	14	24
Lusail (Qatar)	2020	19	25
Québec (Canada)	2026	23	35
Nancy (France)	2023	15	27
Lund (Suède)	2020	5.5	9

**Tableau II.4.** Projets en cours de réalisation des réseaux du tramway dans quelques pays au monde.

#### II.4 Étude de cas : Le tramway de la ville de Constantine (Algérie)

Aujourd'hui, le tramway est un moyen de transport fréquemment utilisé dans la ville de Constantine. Ce tramway a amélioré l'offre de transport public dans la ville avec sa capacité de transport de 6000 voyageurs en heure de pointe [81]. Ce mode de transport écologique acquiert un grand intérêt grâce à ses diverses qualités : grande capacité, rapidité, confort, aussi en améliorant l'accessibilité aux plusieurs zones administratives et commerciales importantes

[78, 97]. De plus, ce mode de transport en commun a redessiné le paysage urbain tout au long de sa ligne (figure II.3).

Cette section décrit l'aire d'étude, le matériel roulant, les systèmes intelligents utilisés pour contrôler l'exploitation du tramway de Constantine, l'offre de transport et les différents indicateurs clés de performance théoriques suggérées.



**Figure II.3.** Le tramway de Constantine [98].

#### ***II.4.1 Présentation de la zone d'étude et de la ligne du tramway de Constantine***

La ville de Constantine est située dans l'Est Algérien, elle est la troisième importante ville du pays (Capitale de l'Est Algérien). Elle est connue pour son histoire importante dans la région méditerranéenne. Le tramway a été inauguré dans cette ville le 4 juillet 2013. C'est le troisième tramway mis en service après ceux d'Alger et Oran.

La longueur de la première ligne d'exploitation de tramway de Constantine est de 7.6 km, elle relie le centre-ville à la zone suburbaine de Zouaghi Slimane et comprend huit stations d'arrêt à l'exception des terminaux. Après les travaux d'extension, la longueur de la ligne est devenue 14.7 kilomètres le 3 juin 2019 [93].

En outre, la durée de vie de ce mode de transport est de 30 ans [99]. Notre étude va se concentrer sur la performance du tramway avant l'inauguration de la nouvelle extension vers Ali Mendjeli.

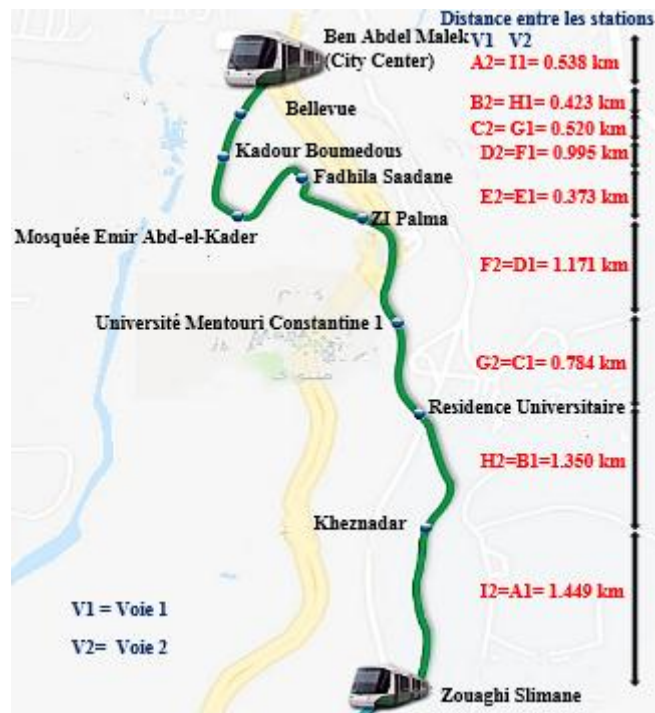


Figure II.4. La carte de la ligne de tramway (Constantine, Algérie).

#### II.4.2 Architecture du tramway et caractéristique

Afin de réduire le bruit et de rendre le tramway plus confortable, de nouveaux tramways sont développés avec un plancher bas et des matériaux auxiliaires sur le toit [100].

Le véhicule proposé appartient à la gamme CITADIS, sous la référence Alstom CITADIS 402, est du type à plancher bas 100%, et d'une capacité totale de 302 passagers.

Le véhicule est bidirectionnel et devrait fonctionner comme une seule unité. La longueur du véhicule est d'environ 44 mètres. Chaque côté du véhicule est composé de 6 portes à double accès, en plus de deux autres portes à accès simple. Le tramway est composé de sept sections articulées comme suit :

- Deux cabines motorisées (M1 et M2) ;
- Une nacelle motorisée (NM) et une nacelle porteuse (NP) ;
- Trois sections centrales suspendues (Caisses) (C1, C2 et CC) [101].

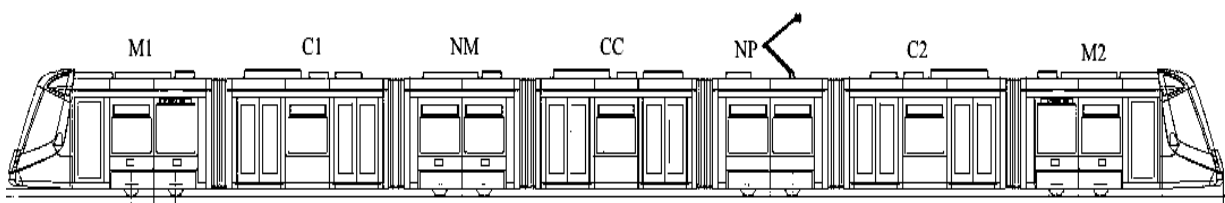


Figure II.5. Architecture du tramway de Constantine.

### **II.4.3 Critères de conception de la voie**

L'excitation des roues-rails est l'une des principales sources de bruit et de vibrations à l'intérieur du tramway. La conception de la voie est basée sur les contraintes suivantes :

- Sécurité et confort des utilisateurs ;
- Niveau de vibration à l'intérieur et l'extérieur du tramway ;
- Niveau de bruit à l'intérieur et l'extérieur du véhicule ;
- Vitesse maximale tout au long de la voie ;
- Construction et maintenance simples [102].

Les caractéristiques du sol et de la piste jouent un rôle majeur dans le degré de bruit et de vibration [103].



**Figure II.6.** Le rail du tramway de Constantine.

### **II. 4.4 Système de traction**

Les six sous-stations de traction sont alimentées en 30kV par une boucle haute tension. Cette dernière est reliée au poste haute tension 60/30kV qui est branché au réseau de SONELGAZ.

Chaque sous-station (SST) comprend un groupe traction sauf la SST 06 qui en dispose deux : une destinée à l'alimentation de la ligne du tramway, et l'autre à l'alimentation du dépôt. Ensuite, cette énergie est redistribuée à ligne aérienne de contact (LAC) en 750 volts courants continu par l'intermédiaire des sous-stations. Le retour du courant de traction vers les sous-stations en ligne est fait à travers les rails de roulement [99].



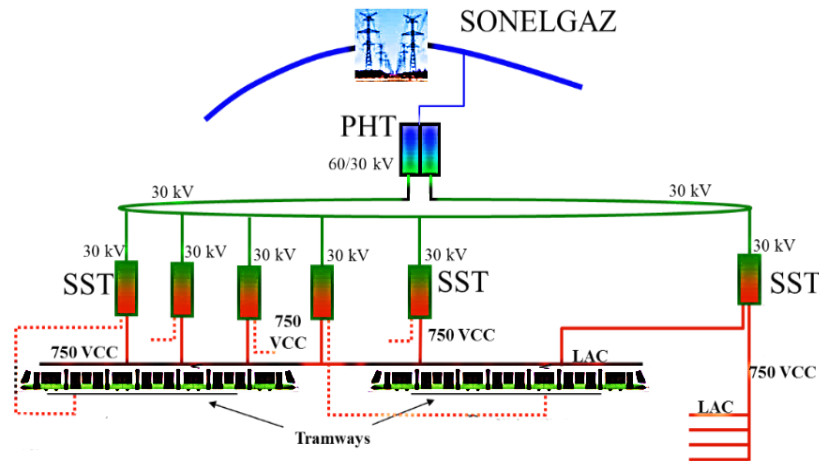


Figure II.7. Système d'énergie de traction du tramway de Constantine.

#### II.4.5. Le poste de contrôle centralisé du tramway de Constantine (PCC)

Le tramway de la ville de Constantine se repose principalement sur un système de gestion centralisé, qui est réalisé depuis le PCC (Poste de contrôle centralisé) par des superviseurs et des contrôleurs.

Le système le plus important pour optimiser le contrôle de l'exploitation du tramway en temps réel est le système d'aide à l'exploitation (SAE). Ce dernier comprend notamment le système de transmission d'images CCTV (Circuit Closed Television), ainsi que la solution radio pour communiquer avec les conducteurs et les agents d'exploitation du tramway en temps réel. Les principales fonctions du système d'aide à l'exploitation sont divisées en deux :

##### II.4.5.1. Fonctionnalités du système d'aide à l'exploitation dans le poste de contrôle centralisé

Les fonctions principales du SAE au niveau du poste de contrôle centralisé sont les suivantes :

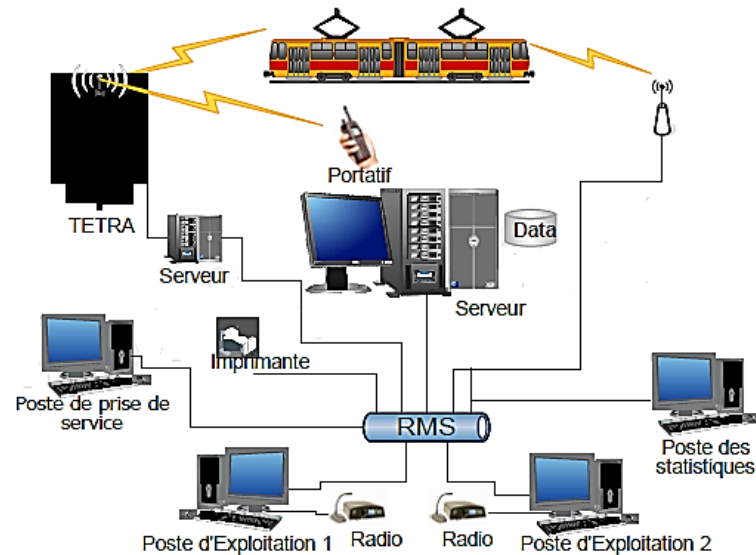
- ♦ La gestion des tramways : suivre la position du tramway (superviser l'exploitation de la ligne de tram, c'est-à-dire localiser et suivre ses mouvements) et le contrôle des conducteurs (dialoguer et échanger des données avec les conducteurs).

- ♦ Le contrôle de la circulation du tramway, qui aide l'opérateur à évaluer la conformité de l'horaire théorique et en temps réel, en essayant de maintenir l'avance du tram à un rythme régulier.

- ♦ Le contrôle des véhicules et du personnel, qui permet au contrôleur de gérer les conducteurs et le véhicule en temps réel, de modifier les trajets et les programmes des jours.



◆ Le contrôle de l'exploitation (statistiquement), qui consiste à collecter les caractéristiques du schéma de circulation réel du tramway et à analyser les données d'exploitation (données statistiques).



**Figure II.8.** Architecture des systèmes de support opérationnel dans la salle de contrôle centralisée.

#### II.4.5.2. Fonctionnalité du système d'aide à l'exploitation à bord

Chaque cabine est équipée d'un ordinateur SAE de bord. Ce dernier est placé avec un boîtier de contrôle / visualisation en liaison avec les autres équipements du matériel roulant, tels que la radio, le contrôle des feux, le contrôle des portes, l'odomètre, les contacts de la cabine de conduite, le système de sonorisation, les girouettes ainsi que les alarmes techniques du matériel roulant. La zone de visualisation montre les informations données par le système d'aide à l'exploitation (SAE) comme :

- Le temps, les séquences de départ et le service,
- L'itinéraire et les noms des stations,
- L'avance et le retard du tramway par rapport à l'heure prévue.

De plus, le SAEIV (système d'aide à l'exploitation et information voyageurs) contrôle les affichages destinés à l'information des passagers à bord des véhicules. La détection des tramways est fournie par un récepteur GPS et un odomètre, ainsi que les balises existantes sur la ligne qui permettent la détection exacte des tramways dans les sections de l'aiguille.

En outre, pour une bonne exploitation des tramways, tout incident doit être résolu dans un délai très court, car une perturbation, sur un tramway ou sur une partie de la ligne, peut avoir des conséquences sur l'exploitation de la ligne entière. La pertinence de l'information et

la capacité des superviseurs à prendre des décisions rapides dépendent donc du respect de la qualité du service :

- Régularité et ponctualité du service,
- Informations pour les voyageurs, en tenant compte du flux de passagers,
- Sécurité des voyageurs et du personnel d'exploitation.

Tous ces systèmes permettent de superviser et de contrôler le tramway de manière optimale en temps réel [104, 105].

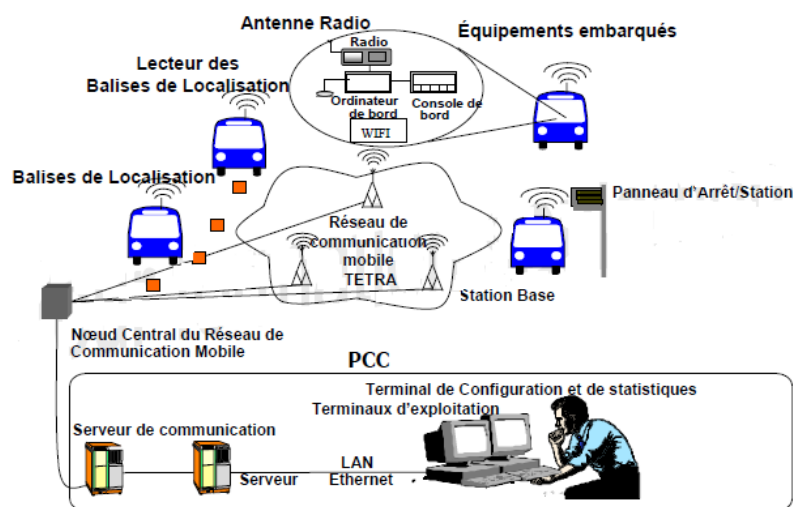


Figure II.9. L'architecture du système de support opérationnel à bord et sur la ligne de tramway.

#### II.4.6 Indicateurs de performance théorique du tramway de Constantine

Le tramway de la ville de Constantine a une capacité de 302 voyageurs/tramway dans une situation confortable et 414 voyageurs/tramway dans la charge maximale. Le temps de passage suggéré et le nombre de tramways sont déterminés par une demande de passagers estimée à 6000 utilisateurs en heures de pointe [101].

Les tableaux ci-dessous montrent les différents indicateurs de performance théoriques du tramway de Constantine, comme la capacité, la vitesse moyenne, le temps de parcours, le temps d'arrêt aux stations.

##### II.4.6.1. La capacité du tramway de Constantine

La capacité des passagers ( $p$ ) du tramway de Constantine est représentée dans le tableau suivant [101] :

	La charge en situation de confort (4p/m <sup>2</sup> )	La charge maximale (6p/m <sup>2</sup> )
Utilisateurs assis	78	78
Utilisateurs debout	224	336
Capacité du tramway	302	414

**Tableau II.5.** La capacité du tramway de Constantine.

Le tableau II. 6 représente l'intervalle de temps théorique et la capacité dans les jours ouvrables [104] :

Jours ouvrables	L'intervalle de temps entre les tramways (minutes)	Utilisateurs par heure et par itinéraire (302 passagers / tram)
05:00 to 07:00	5	3624
07:00 to 09:00	3	6040
09:00 to 14:00	5	3624
14:00 to 18:00	3	6040
18:00 to 22:00	5	3624

**Tableau II.6.** Le temps théorique et la capacité en jours ouvrables.

Les tableaux II.7 et II.8, représentent l'intervalle de temps entre les tramways, ainsi que la capacité offerte dans le week-end [104] :

Vendredi	L'intervalle de temps entre les tramways (minutes)	Utilisateurs par heure et par itinéraire (302 passagers / tram)
05:00 to 07:00	7	2588
07:00 to 09:00	4	4530
09:00 to 14:00	7	2588
14:00 to 18:00	4	4530
18:00 to 22:00	7	2588

**Tableau II.7.** Le service du tramway pendant vendredi.

Samedi	L'intervalle de temps entre les tramways (minutes)	Utilisateurs par heure et par itinéraire (302 passagers / tram)
05:00 to 07:00	10	1812
07:00 to 09:00	6	3020

09:00 to 14:00	10	1812
14:00 to 18:00	6	3020
18:00 to 22:00	10	1812

**Tableau II.8.** Le service du tramway pendant samedi.

#### II.4.6.2 Temps de parcours, vitesse et temps de stationnement

Les temps de parcours, vitesse et temps de stationnement théoriques du tramway de Constantine sont représentés dans le tableau suivant :

	Voie 1 (Station Zouaghi Slimane au terminus Ben Abdelmalek)	Voie 2 (Station Ben Abdelmalek au terminus Zouaghi Slimane)
Le temps de parcours moyen (incluant le temps de stationnement)	1251,5 secondes	1282,5 secondes
La vitesse moyenne (incluant le temps de stationnement)	21.9 km / h	21.3 km / h
Le temps de parcours optimal (incluant le temps de stationnement)	1144 secondes	1174 secondes
La vitesse optimale (incluant le temps de stationnement)	23.9 km / h	23.3 km / h
Le temps de parcours optimal (sans temps d'arrêt dans les stations)	904 secondes	934 secondes
La vitesse moyenne optimale (sans temps d'arrêt dans les stations)	30.3 km/h	29.3km/h
Le temps d'attente du tram à chaque station (sans terminus)	30 secondes	30 secondes
Le temps d'arrêt dans les stations (sans terminus)	240 secondes	240 secondes

**Tableau II.9.** Le temps du parcours total, la vitesse et le temps d'attente du tramway à la station pour les deux itinéraires [105].

Itinéraire 1 (Zouaghi au terminus Ben Abdel Malek)			
Section	Départ	Destination	Temps de parcours théorique (sec)
A1	Zouaghi Slimane	Kheznadar	162.09
B1	Kheznadar	Résidence Universitaire	140.51
C1	Résidence Universitaire	Université Mentouri Constantine 1	65.03
D1	Université Mentouri Constantine 1	ZI Rhumel	113.35
E1	ZI Rhumel	Fadhila Saadane	64.66
F1	Fadhila Saadane	Mosquée Emir Abd-el-Kader	145.17
G1	Mosquée Emir Abd-el-Kader	Kadour Boumedous	63.93
H1	Kadour Boumedous	Bellevue	58.96
I1	Bellevue	Ben Abdel Malek (Centre-ville)	90.26
Total			903.97 $\approx$ 904

**Tableau II.10.** Le temps de parcours théorique entre les stations, Itinéraire 1.

Itinéraire 2 (Ben Abdel Malek au terminus Zouaghi)			
Section	Départ	Destination	Temps de parcours théorique (sec)
A2	Ben Abdel Malek (Centre-ville)	Bellevue	94.37
B2	Bellevue	Kadour Boumedous	60.08
C2	Kadour Boumedous	Mosquée Emir Abd-el-Kader	63.82
D2	Mosquée Emir Abd-el-Kader	Fadhila Saadane	161.57
E2	Fadhila Saadane	ZI Palma	64.55
F2	ZI Palma	Université Mentouri Constantine 1	113.70

Itinéraire 2 (Ben Abdel Malek au terminus Zouaghi)			
G2	Université Mentouri Constantine 1	Résidence Universitaire	67.63
H2	Résidence Universitaire	Kheznadar	138.94
I2	Kheznadar	Zouaghi Slimane	169.08
Total			933.74 $\approx$ 934

**Tableau II.11.** Le temps de parcours théorique entre les stations, itinéraire 2.

## II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné une vision globale sur l'importance de l'investissement et la modernisation du transport en commun, en particulier, le tramway. Ce dernier apporte plusieurs bienfaits à la ville surtout sur le plan environnemental, offre de transport, ainsi que son influence sur l'état de la congestion routière.

Nous avons présenté dans ce chapitre aussi les facteurs essentiels qui doivent être respectés pour assurer un haut niveau de service d'un transport en commun, vu que la satisfaction et l'attraction des passagers envers les transports en commun sont liées principalement à la fiabilité et à la performance du tramway, le confort, le prix, la sécurité, la sûreté, ainsi que l'accessibilité.

L'un des réseaux de transports qui prend une place importante dans le monde, est les réseaux de tramways. Nous avons vu un exemple de plusieurs pays qui ont investi dans ce système de transport, ce qui reflète l'importance qu'occupe les réseaux de transports ferroviaires urbains dans le développement de la qualité de vie dans les villes.

Nous avons constaté aussi, que l'Algérie est parmi les pays qui ont montré beaucoup d'intérêt à ce système de transport dans la dernière décennie dû à l'inauguration de plusieurs lignes de tramways, commençant par celui d'Alger, Oran puis Constantine. En arrivant maintenant à six réseaux en exploitation actuellement, ainsi que trois autres nouveaux réseaux en cours de réalisation et des extensions en cours de travaux à Constantine et Sétif.

Le tramway offre des avantages surtout en termes de capacité ; qui ont encouragé le gouvernement à s'investir dans le but d'améliorer la mobilité et réduire la congestion et la pollution atmosphérique surtout dans les grandes villes algériennes.

Les tramways modernes disposent d'un système intelligent avancé, ils sont contrôlés et suivis à partir d'un poste commande centralisé en temps réel, ainsi qu'en disposant des systèmes de communications avancés qui permettent d'informer les voyageurs et de contacter les conducteurs pour les informer et les diriger. Tout cela a pour objectif de gérer d'une façon optimale les tramways, car ils doivent respecter les performances théoriques, satisfaire la demande réelle et limiter les perturbations.

Cependant, malgré les différents avantages que le tramway offre, surtout son principal rôle dans la réduction des embouteillages, il a un impact négatif sur les zones urbaines qui ne bénéficient pas d'un grand espace. L'insertion de la ligne du tramway réduit la capacité des voies routières, ce qui peut compliquer l'état de la congestion routière dans ces zones. De plus, si son exploitation est mauvaise, il y'aura moins de population qui utilise le tramway, ce qui va augmenter le nombre de voitures sur le même itinéraire, rendant ainsi la circulation routière compliquée et difficile.

De ce fait, une exploitation efficace pour attirer la population à l'utiliser pour espérer réduire le débit de voiture sur sa ligne est nécessaire. Aussi, une nouvelle régulation du trafic mixte dans les intersections communes est importante pour une fluidité optimale.

Ce chapitre nous a conduits à poser plusieurs questions sur l'efficacité du tramway de Constantine, pour savoir s'il contribue vraiment à la décongestion du trafic dans les zones situées sur son tracé :

- Est-ce que le tramway de Constantine assure un haut niveau de service, en respectant les facteurs essentiels présentés précédemment ?
- Est-ce que les utilisateurs du tramway de Constantine sont satisfaits du niveau de service offert ?
- Est-ce que l'exploitation du tramway n'influe pas négativement sur les autres usagers de la route et contribue efficacement à réduire la congestion routière dans les intersections communes ?
- Est-ce que la régulation du trafic mixte dans les intersections communes est optimale ?

Toutes ces questions, nous mènent à étudier profondément dans les prochains chapitres, le service offert réellement, la performance réelle et son effet sur l'état de la circulation dans les intersections à trafic mixte.



# Chapitre III



---

*Chapitre III : Évaluation de la satisfaction des usagers du tramway de  
Constantine et son impact sur leurs choix modaux*

---

<b>III.1 Introduction .....</b>	<b>51</b>
<b>III.2 L'importance de l'évaluation de la satisfaction des utilisateurs des transports en commun.....</b>	<b>51</b>
<b>III.3 Matériel et Méthode .....</b>	<b>52</b>
<b>III.4 Résultats .....</b>	<b>53</b>
III.4.1 Les données de tram du nombre de passagers par an.....	53
III.4.2 Les caractéristiques socio-économiques de l'échantillon.....	54
III.4.3 L'évaluation de la satisfaction des passagers par rapport au service proposé.....	57
III.4.3.1 Évaluation du comportement des agents du tramway .....	57
III.4.3.2 Évaluation de la qualité de l'information donnée aux voyageurs .....	58
III.4.3.3 Évaluation de la sécurité dans les stations et à l'intérieur des tramways .....	58
III.4.3.4 Évaluation de la propreté à l'intérieur du tramway et dans les stations .....	59
III.4.3.5 Évaluation de la qualité de l'air à l'intérieur du tramway .....	59
III.4.3.6 Évaluation du confort des sièges du tramway .....	60
III.4.3.7 Évaluation du prix de ticket du tramway.....	60
III.4.4. Évaluation de l'exploitation du tramway de Constantine.....	61
III.4.4.1 Le temps de début et fin de service .....	61
III.4.4.2 La localisation de la ligne et le nombre des stations .....	61
III.4.4.3 Le temps d'attente aux stations et l'intervalle acceptable entre les tramways .....	62
III.4.4.4 La satisfaction par rapport à l'intervalle de temps entre les tramways .....	62
III.4.4.5 Vitesse, temps de parcours et temps d'attente aux stations.....	63
III.4.4.6 La qualité de la conduite des tramways.....	63
III.4.4.7 La gestion des situations de perturbations lors de l'exploitation.....	64
III.4.5 Raisons pour lesquelles les passagers utilisent le tram .....	64
III.4.6 Évaluation de la satisfaction des utilisateurs et mode de transport préféré. ....	65
<b>III. 5. Conclusion .....</b>	<b>65</b>

### **III.1 Introduction**

De nos jours, le tramway, vient de connaître un nouvel âge d'or puisque les villes modernes préfèrent une mobilité durable. Ce moyen de transport peut donner une image décente de la zone urbaine et contribuer à répondre à la demande croissante de la mobilité. Sans une exploitation optimale et un meilleur service, le tramway ne peut être un moyen de transport efficace pour décongestionner le trafic routier. Si les passagers préféreront l'utilisation d'autres modes de transport comme les taxis ou les véhicules particuliers à la place des tramways ; l'augmentation du trafic routier à l'heure actuelle va compliquer davantage l'état du trafic dans les villes. Cependant, connaître l'avis des utilisateurs sur un moyen de transport en commun est très important afin d'évaluer sa performance et de l'améliorer selon les besoins des citoyens.

Cela nous a conduit à réaliser cette étude qui a pour objectif d'abord de savoir l'opinion des usagers du tramway, de faire ressortir les points forts qui encouragent la population à l'utiliser ainsi que les points faibles que nous devrions prendre en considération pour améliorer sa performance afin d'attirer le maximum d'utilisateurs. Puis, l'importance de ce chapitre aussi : est de connaître le moyen de transport privilégié pour eux du moment qu'ils ont le choix entre plusieurs moyens de transport. Cela nous permettra aussi d'avoir une image sur la future demande probable du trafic routier situé sur la ligne du tramway.

### **III.2 L'importance de l'évaluation de la satisfaction des utilisateurs des transports en commun**

Le transport public des passagers est un système qui permet de transporter régulièrement des personnes qui veulent se déplacer rapidement, facilement et à moindre coût [106]. De plus, il est considéré comme le principal concurrent du véhicule particulier [107]. Cependant, l'amélioration de sa qualité de service est nécessaire pour répondre aux exigences de la population ce qui va les motiver à l'utiliser [108, 109]. La qualité et la fiabilité des transports en commun sont des facteurs essentiels de l'attitude des passagers et ont un effet important sur leurs satisfactions [110].

Une qualité de service perçue comme satisfaisante peut encourager encore les usagers à prendre d'autres moyens de transport public à la place de leurs voitures particulières [111, 112, 113, 114, 115].

En outre, l'amélioration de l'offre soit qualitative ou quantitative n'engendre pas fortement une satisfaction des passagers ou une croissance de la demande [116, 117], mais il faut l'optimiser selon les points les plus importants qui attirent réellement les clients existants

et les clients potentiels envisagés. La connaissance de la satisfaction par rapport à la qualité du service proposé et aux performances d'un mode de transport doit être fournie par les passagers [118, 119]. La satisfaction des passagers est déterminée en connaissant le pourcentage des services fournis qui répondent à leurs attentes [120]. Les chercheurs et les opérateurs de transports en commun tentent de trouver les facteurs principaux qui affectent le choix modal des clients pour les satisfaire, ainsi pour rentabiliser leurs flottes [121, 122].

De plus, il est essentiel de savoir le taux de fidélité des passagers aux transports publics, car c'est un facteur majeur pour un système de transport durable [123]. D'autre part, le comportement de la population par rapport au choix modal est l'un des éléments principaux de la planification des systèmes de transport [124, 125]. Alors, il est important de connaître les différents facteurs qui influent sur leurs choix pour le mode de transport préféré [126, 127, 128]. Selon plusieurs études faites précédemment, la ponctualité, le prix et l'accessibilité sont les indicateurs prédominants qui influent sur la satisfaction des passagers, ainsi sur leurs choix du mode de transport [129, 130, 131, 132].

L'un des importants transports publics durables qui aident à réduire les embouteillages est le transport ferroviaire urbain [133, 134, 135, 136, 137, 138], raison pour laquelle le gouvernement algérien s'est investi dans les tramways modernes dans plusieurs villes du pays. Parmi celles-ci, la ville de Constantine qui est l'une des villes bénéficiaires d'une ligne de tramway.

Dans ce chapitre, nous allons présenter la perception des passagers par rapport aux différents services proposés, ainsi que les indicateurs de régularité du tramway de Constantine pour pouvoir évaluer sa qualité de service.

### **III.3 Matériel et Méthode**

Pour ce faire, nous avons devisé notre étude en deux étapes. Dans la première partie, une présentation de la demande des passagers a été réalisée et qui nous a permis d'avoir un aperçu sur l'évolution de la demande actuelle.

Quant à la deuxième étape, avait pour objectif d'avoir une vision sur la perception des utilisateurs du tramway de Constantine concernant la qualité de ses services et sur son exploitation, cela a été réalisé à travers une enquête de terrain basée sur des données collectées entre la fin Janvier et le début Février 2018. Un échantillon de 250 utilisateurs du

tramway a été sélectionné au hasard au niveau des tramways, des gares et à proximité des lignes de tramway.

La méthodologie de recherche utilisée est basée sur un questionnaire qui a été distribué pendant plusieurs créneaux horaires dans la journée. Le questionnaire consiste en une série de 26 questions divisées en quatre (04) sections. Les personnes concernées avaient la possibilité de donner leurs remarques et suggestions. C'est ce qu'on appelle un questionnaire ouvert.

Dans la première section de l'enquête, les caractéristiques socio-économiques des passagers, telles que le sexe, l'âge, la profession, et les informations sur les particularités de l'utilisation du tramway, ont été enregistrées.

Dans la seconde section, les informations concernant l'opinion des utilisateurs sur le service proposé ont été récoltées. Les répondants avaient évalué les indicateurs suivants : Prix du billet, confort, sécurité, propreté, etc... sur l'échelle catégorielle de 1 (Insatisfait), qui représente la plus faible satisfaction, puis le 2 (Peu satisfait), qui donne une satisfaction moyenne des clients, ensuite le 3 (Satisfait), ce dernier représente la satisfaction plus élevée.

La troisième section est basée sur les opinions des passagers quant à la régularité du tram, telle que : Ponctualité, temps d'attente, nombre et emplacements des stations de tram, etc. Les répondants ont été interrogés sur leur satisfaction à l'égard de ces services (oui ou non).

Enfin, nous concluons le travail avec la quatrième section concernant l'opinion des passagers sur les indicateurs qui les encouragent à utiliser le tram, ce qui nous permet de connaître leur moyen de transport préféré. Cela vise à savoir si le tramway est efficace ou il doit être amélioré pour atteindre l'attractivité maximale.

## **III.4 Résultats**

### ***III.4.1 Les données de tram du nombre de passagers par an***

La figure III.1 représente le nombre annuel de passagers au niveau des Tramways de Constantine. Nous observons dans le graphique que depuis 2014, chaque année, le nombre d'utilisateurs du Tram augmente, mais qu'au cours de la dernière année (2017), le nombre de passagers a baissé. Cela nous pousse à déceler, tout au long de cette étude, les principales causes de cette diminution de l'utilisation du tramway.

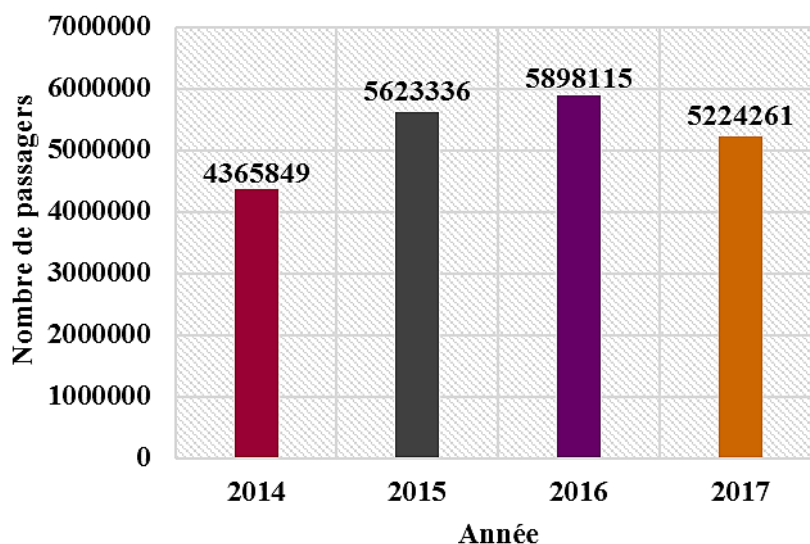


Figure III. 1. Nombre des passages par an (Source Entreprise Metro Alger).

### III.4.2 Les caractéristiques socio-économiques de l'échantillon

#### III.4.2.1 Analyse de l'échantillon par genre

La figure III.2 représente les passagers questionnés des deux genres ; Femme et homme. Il est clair dans ce résultat que le taux de répondants est assez proche des deux sexes dans cette étude 45.60% pour les femmes et 54.40% pour les hommes. Ce qui prouve que ce moyen de transport est aussi bien utilisé par le genre masculin que le genre féminin.

Egalement, nous pouvons souligner par ces mêmes résultats, l'importance donnée par les répondants à l'enquête ; où ils ont exprimé librement leurs avis et degrés de satisfaction d'une façon générale.

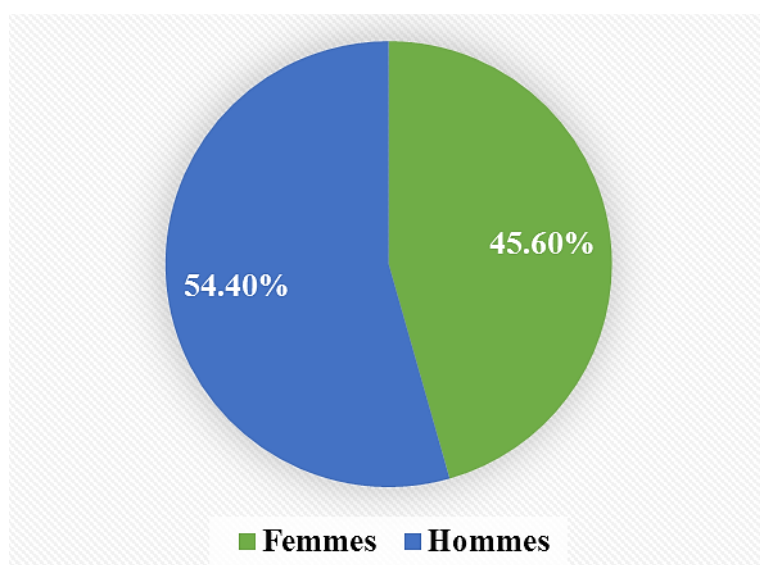


Figure III. 2. L'échantillon par genre.

### III.4.2.2 Analyse de l'échantillon par âge

La figure III.3 illustre la distribution de l'échantillon par âge des passagers. La classe dominante des usagers est entre 18 et 36 ans avec un taux de 56.40%, ce qui correspond à la catégorie des jeunes suivie de la tranche d'âge située entre 37- 55ans avec un taux de 30.40%. Finalement, la dernière catégorie correspond aux personnes dont l'âge est supérieur à 55ans avec un taux de 13.20%. Les deux premières classes sont les plus importantes parce que ce sont ceux qui vont l'utiliser encore sur le long terme. Ce qui nous donne la possibilité de faire une bonne analyse sur la situation future.

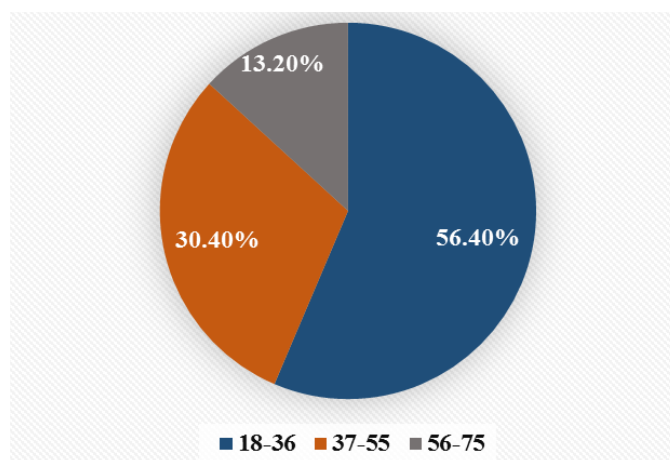


Figure III.3. L'échantillon par Age.

### III.4.2.3 Analyse de la fréquence d'usage du tram

La figure III.4 indique la fréquence de l'utilisation du tramway de Constantine par les usagers. Il est clair que 78.80% des passagers empruntent le tramway au moins une fois par semaine à un usage quotidien, ce qui donne plus de valeur et de fiabilité à ce travail parce qu'ils l'utilisent d'une façon régulière.

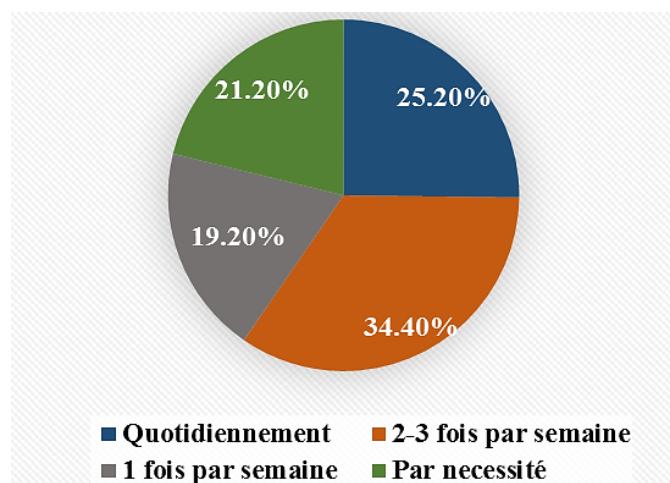


Figure III.4. Le nombre d'usage du tram.

#### III.4.2.4 Analyse de l'échantillon par type d'activité

La figure III.5 se concentre sur le type d'activité des passagers. Les deux principales catégories sont ceux des étudiants et des travailleurs avec un taux de 45.60% et 37.20% respectivement. Cela est dû au tracé du tramway qui lie le plus important pôle commercial, administratif et touristique qui est le centre-ville de Constantine, à la zone urbaine Zouaghi Slimane, passant par la zone industrielle Palma, des universités et des résidences universitaires.

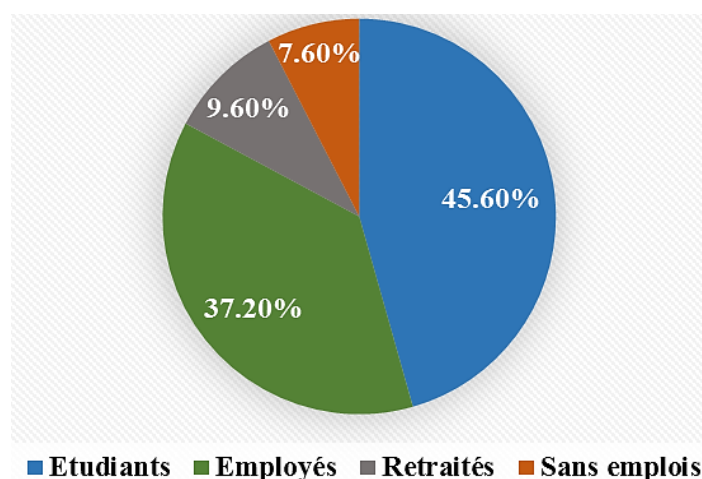


Figure III.5. Le type d'activité.

#### III.4.2.5 Analyse de la raison de déplacement des voyageurs

La figure III.6 indique la raison de déplacement des usagers du tramway. Le mouvement des passagers diffère selon leurs besoins. Il existe quatre motifs principaux pour se déplacer en tram, 38% des voyageurs l'utilisent pour les études, 22.40% le prennent pour aller travailler, 21.20% pour les achats et 18.40% des usagers se rendent par le tram pour divers motifs.

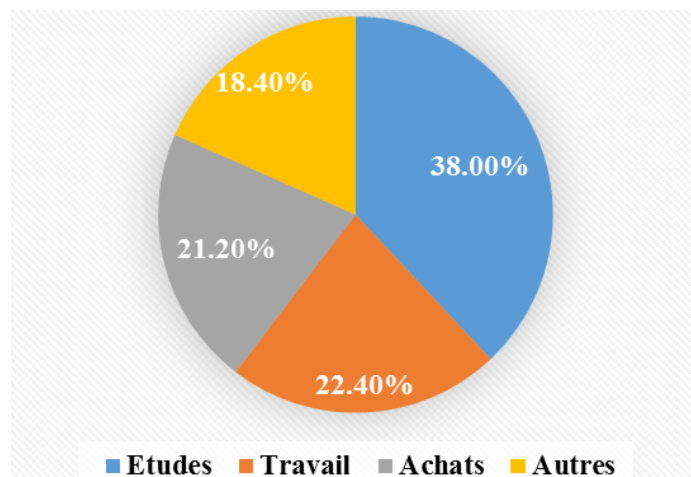


Figure III.6. La raison de déplacement.



### III.4.2.6 Analyse du temps entre le domicile et la station la plus proche des usagers

La Figure III.7 représente le temps entre le domicile et la station la plus proche des usagers. Plus de 52,80% des utilisateurs questionnés habitent à proximité de la ligne du tramway, ainsi que 23,20% résident à 15 — 30 minutes du tracé et le reste de passagers vivent un peu plus loin.

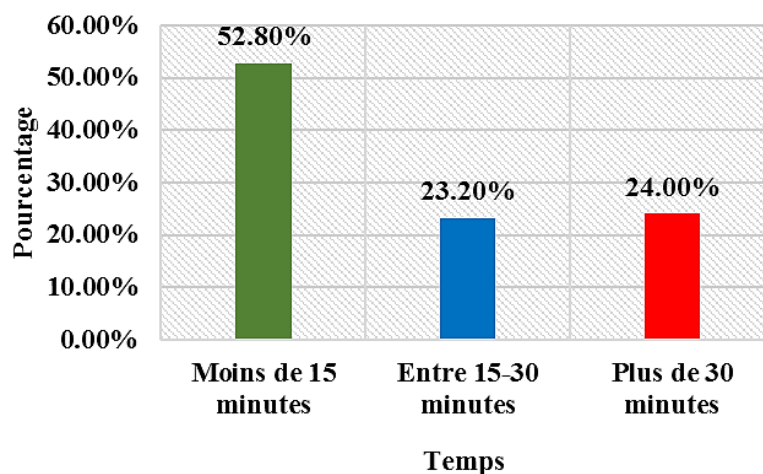


Figure III.7. Le temps entre le domicile et la station la plus proche.

### III.4.3 L'évaluation de la satisfaction des passagers par rapport au service proposé

#### III.4.3.1 Évaluation du comportement des agents du tramway

L'histogramme ci-dessous représente l'évaluation du comportement des agents d'accueil ou de contrôle du tramway. Nous remarquons que le comportement est acceptable en général, 54,80% des passagers sont satisfaits ainsi que 33,20% sont peu satisfaits. Cependant, il faut l'améliorer encore plus. Les utilisateurs du tram déclarent que le comportement des agents de contrôle et ceux des guichets sont bien, mais ils doivent être plus compréhensifs par rapport à certains cas.

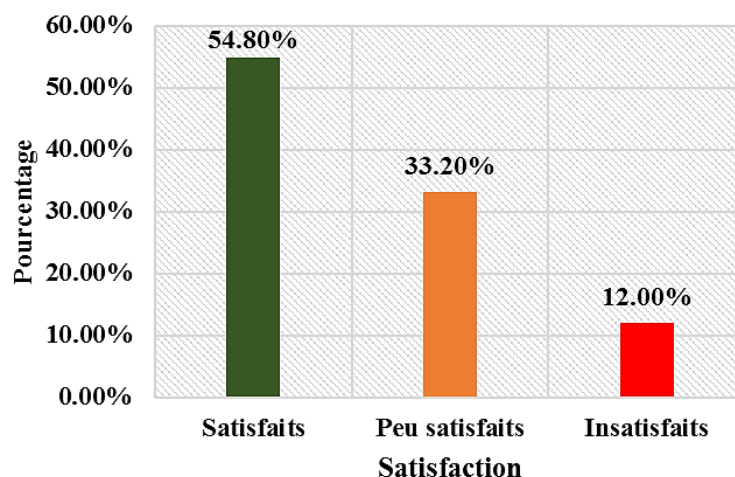


Figure III.8. Le comportement des agents du tramway.



### III.4.3.2 Évaluation de la qualité de l'information donnée aux voyageurs

La figure III.9 est une évaluation de la qualité de l'information donnée aux voyageurs à l'intérieur du tram et aux stations. Nous constatons que seulement 5.60% des voyageurs ne sont pas satisfaits de cet indicateur de qualité. 94.40% sont entre peu satisfaits et complètement satisfaits. Les passagers révèlent qu'un panneau d'information « électronique » est nécessaire dans les stations pour indiquer la durée restante du prochain tram.

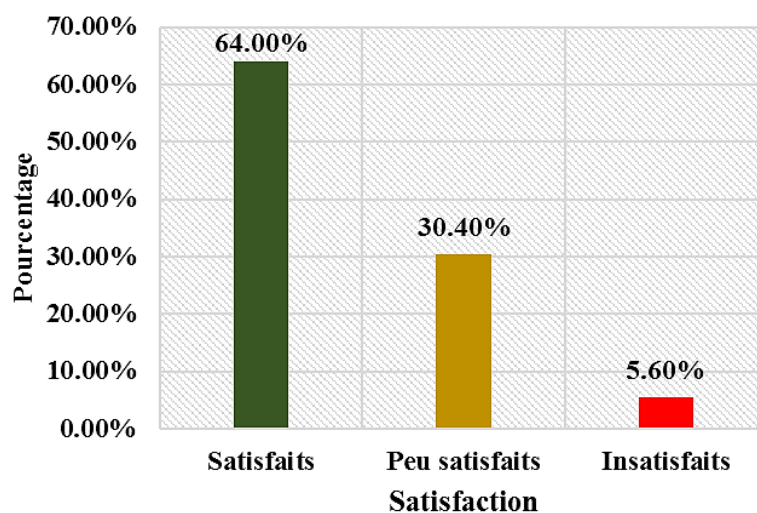


Figure III.9. La qualité de l'information des voyageurs.

### III.4.3.3 Évaluation de la sécurité dans les stations et à l'intérieur des tramways

La figure III.10 illustre l'évaluation de la sécurité dans les stations et à l'intérieur des tramways. Les résultats montrent que cet indicateur est moyennement bon avec un taux de voyageurs satisfaits et peu satisfaits de 43.20% et 27.20% respectivement. Les passagers ont indiqué qu'il faudra plus de sécurité dans les stations et dans les rames, surtout le soir. Soulignant plusieurs provocations surtout envers les femmes dans ce mode de transport.

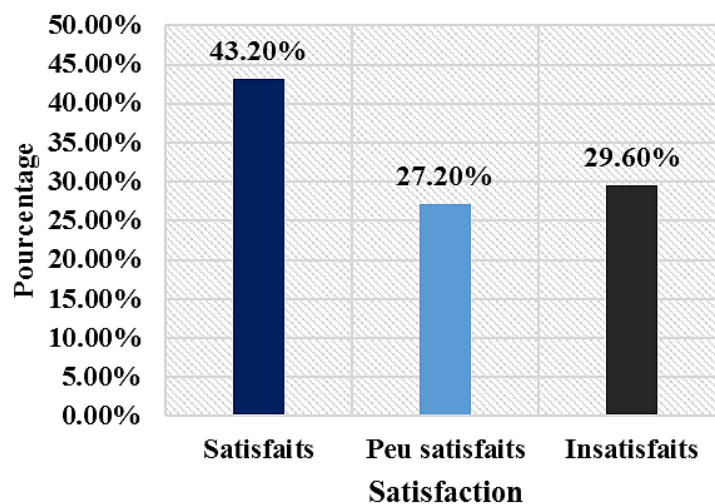


Figure III. 10. La sécurité dans les stations et à l'intérieur des tramways.

### III.4.3.4 Évaluation de la propreté à l'intérieur du tramway et dans les stations

La figure III.11 montre une analyse de la perception des passagers par rapport à la propreté à l'intérieur du tram et dans les stations. Les résultats prouvent que la propreté est acceptable, mais les répondants suggèrent qu'un entretien quotidien reste nécessaire pour plus de propreté et de confort.

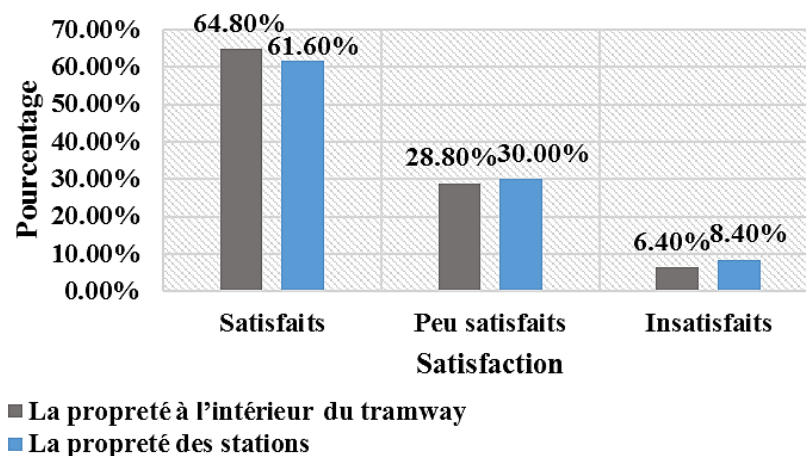


Figure III.11. La propreté à l'intérieur du tramway et dans les stations.

### III.4.3.5 Évaluation de la qualité de l'air à l'intérieur du tramway

La figure III.12 représente la qualité de l'air à l'intérieur du tramway de Constantine. À partir de l'histogramme ci-dessous Nous remarquons que l'aération est satisfaisante parce que le véhicule dispose d'un système de climatisation. Ce qui explique le taux de 64% de satisfaction des passagers contre seulement 30.80% d'utilisateurs peu satisfaits. Nous tenons à préciser tout de même que 5.20% des voyageurs mettent l'accent sur le manque des bonnes odeurs et d'aération convenable surtout dans les situations où le tramway est rempli ou lorsque les usagers sont bloqués à l'intérieur suite à une panne.

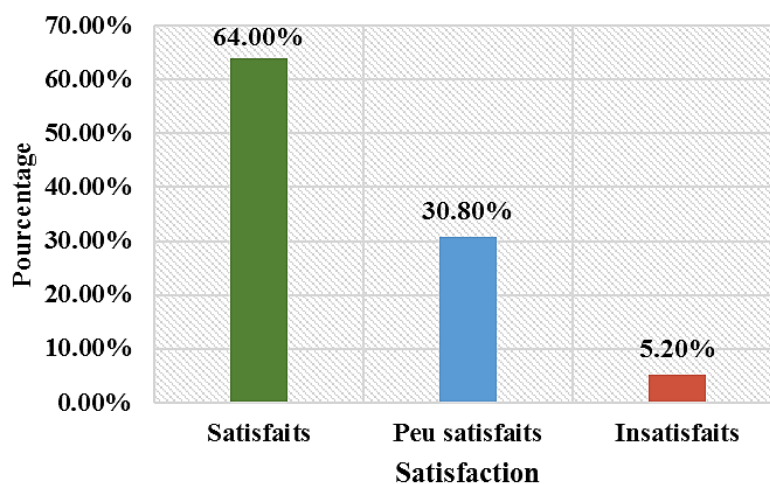


Figure III.12. La qualité de l'air à l'intérieur du tramway.

### III.4.3.6 Évaluation du confort des sièges du tramway

L'histogramme de la figure III.13 indique la perception des usagers du tramway par rapport au confort des sièges. Nous constatons que seulement 2.40% des passagers trouvent que les sièges ne sont pas confortables et évoquent la dureté de la matière de construction.

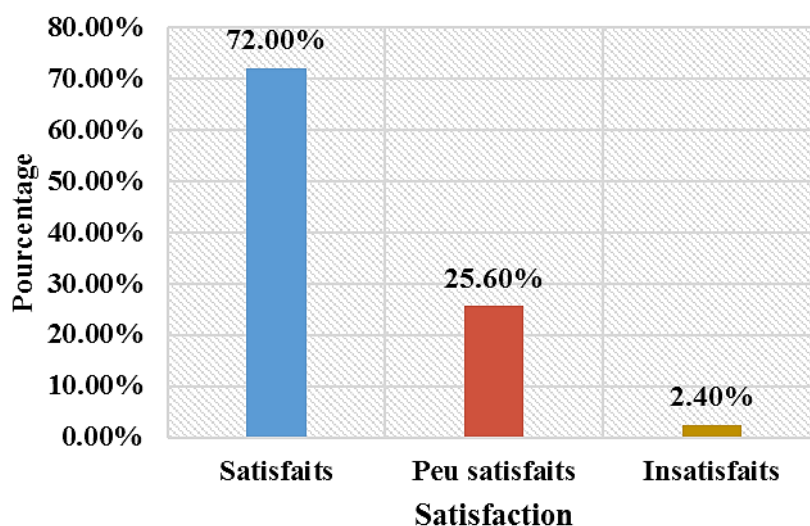


Figure III.13. Le confort des sièges du tramway.

### III.4.3.7 Évaluation du prix de ticket du tramway

La Figure III.14 illustre la perception des passagers du tramway par rapport au prix du ticket. Les usagers du tram trouvent que le prix du ticket est exagérément cher et illogique, puisqu'un voyageur qui se déplace pour 500 mètres paie la même somme que celui qui se déplace sur 8 kilomètres. Cet indicateur est très important et influe directement sur le choix modal des passagers. Ainsi, ces derniers préfèrent prendre des taxis lors de leurs déplacements sur une courte distance.

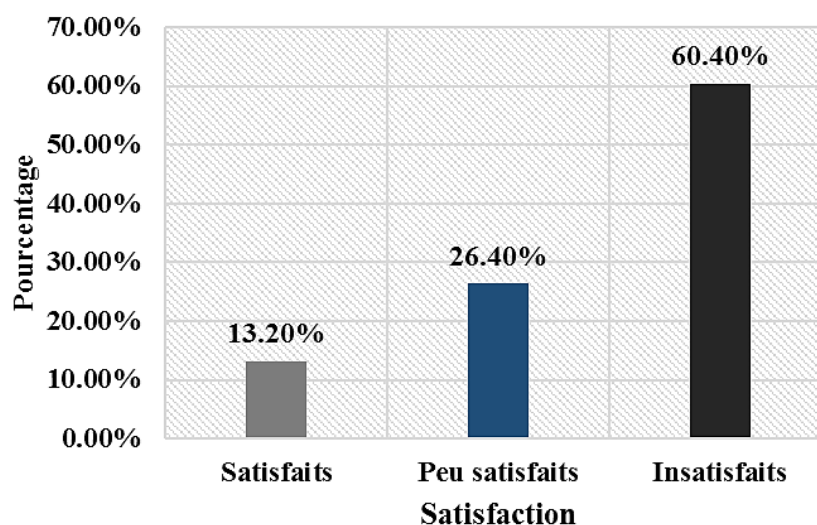


Figure III.14. Le prix du ticket.

### III.4.4. Évaluation de l'exploitation du tramway de Constantine

#### III.4.4.1 Le temps de début et fin de service

Cette partie du travail représente l'opinion des passagers sur les différents indicateurs de performance et réels du tram. Le résultat présenté sur la figure III.15 nous permet de connaître la perception des passagers sur le temps de début et de fin de service. Nous remarquons que 95.20% sont satisfaits voir peu satisfaits. Or, 4.80% des utilisateurs veulent que l'exploitation du tramway finisse à 23 h en hiver et en automne et à 00h00 en été et en printemps.

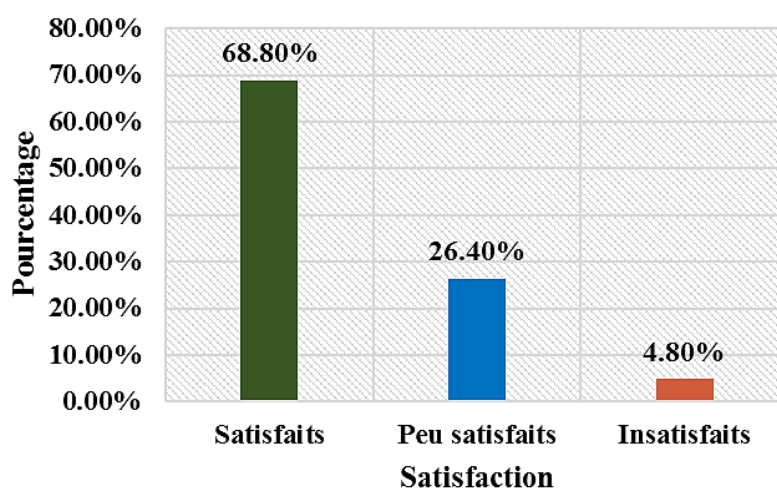


Figure III.15. Le temps de début et de fin de service.

#### III.4.4.2 La localisation de la ligne et le nombre des stations

La figure III.16 montre la localisation de la ligne et le nombre des stations. Nous constatons que 71.20% des voyageurs pensent que le nombre de stations et la localisation de la ligne sont bons. Cependant, 28.20% ne sont pas satisfaits et ils suggèrent d'ajouter une station devant l'Institut paramédical.

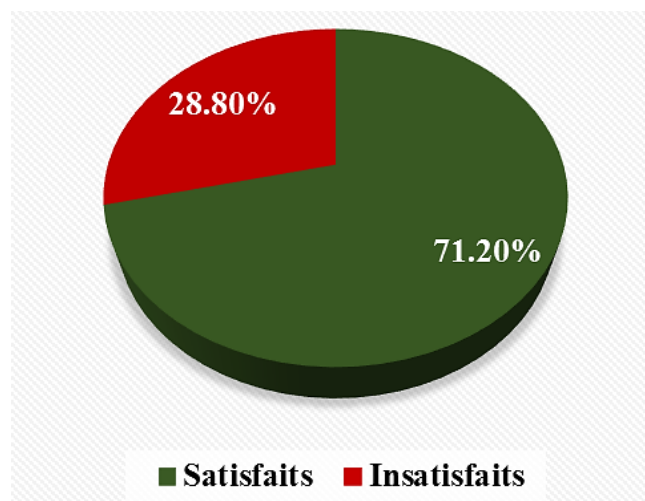


Figure III.16. Localisation de la ligne et le nombre des stations.

### III.4.4.3 Le temps d'attente aux stations et l'intervalle acceptable entre les tramways

La figure III.17 montre que seulement 23,60% des personnes interrogées trouvent que le tramway arrive en 3 minutes, contre 76,40% qui indiquent que les trams dépassent l'intervalle de 3 minutes, et que cet intervalle n'est pas respecté surtout aux heures de pointe. Ce qui les oblige à attendre entre 4 et 12 minutes. En outre, 74,80% trouvent que l'intervalle acceptable pour les passagers est plus de 3 minutes, et ils peuvent attendre aussi entre 4-6 minutes et plus, lors des heures de pointes.

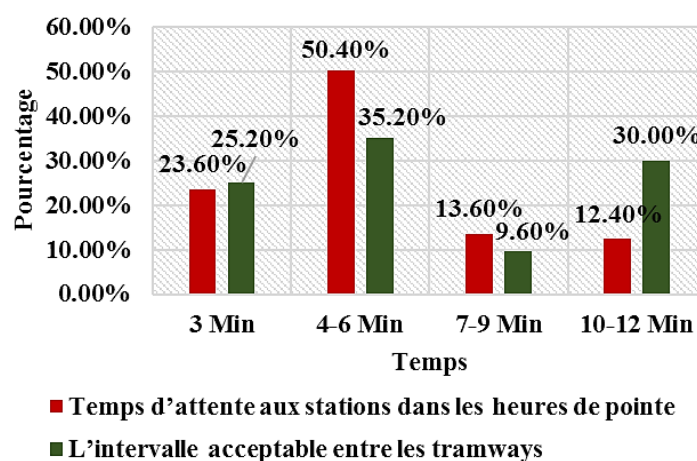


Figure III.17. Temps d'attente aux stations et l'intervalle de temps acceptable en heures de pointe.

### III.4.4.4 La satisfaction par rapport à l'intervalle de temps entre les tramways

La Figure III.18 ci-dessous donne un aperçu sur la satisfaction des passagers par rapport à l'intervalle de temps entre les tramways. Les résultats montrent que 45,20% des usagers sont insatisfaits de l'intervalle entre les tramways et de sa gestion. De plus, ils ont remarqué que plusieurs tramways passent presque vides de voyageurs dans certaines heures, donc, fort possible que l'exploitation du tramway n'est pas vraiment optimale surtout si elle ne répond pas vraiment à la demande.

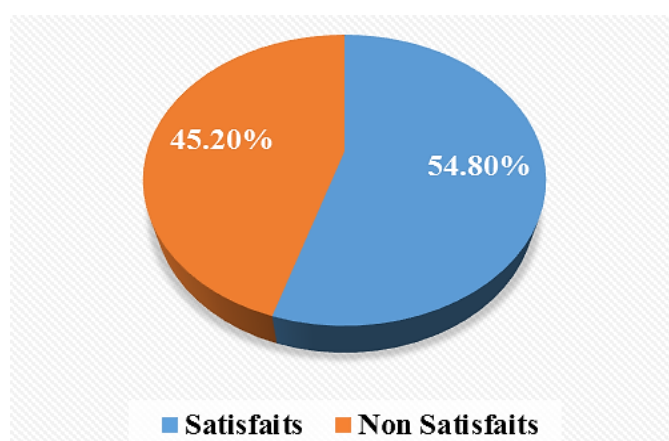


Figure III.18. La satisfaction par rapport à l'intervalle de temps entre les tramways.



#### III.4.4.5 Vitesse, temps de parcours et temps d'attente aux stations

La figure III.19 est le résultat de la perception des usagers du tramway par rapport à la vitesse du tramway, le temps de parcours et le temps de stationnement.

Nous observons que 58.80% des passagers sont satisfaits de ces indicateurs, contre 33.60% qui sont peu satisfaits et 7.60% des usagers ne le sont pas.

Les utilisateurs trouvent que le temps d'arrêt aux stations n'est pas respecté parce que les trams quittent les stations dans un temps 10-20 et même 40 secondes selon le nombre de voyageurs qui existent dans les stations. Ainsi que la vitesse des tramways de temps en temps est très lente selon le conducteur, ce qui augmente le temps de parcours.

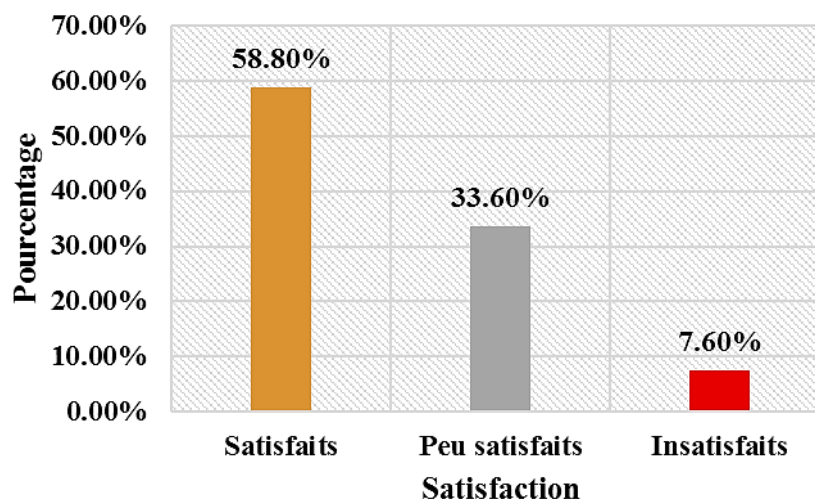


Figure III.19. Vitesse, temps de parcours et temps d'attente aux stations.

#### III.4.4.6 La qualité de la conduite des tramways

La figure III.20 montre la perception des voyageurs par rapport à la qualité de conduite des tramways. 80.40% des usagers indiquent qu'ils se sentent en confort et qu'ils sont satisfaits de cette qualité.

En effet, 19.60% des passagers ne le sont pas et justifient qu'il existe des conducteurs qui roulent avec une vitesse très lente et arrivent en retard à leurs destinations.

De plus, selon eux, il y'a des cas où lorsqu'ils poussent le bouton pour ouvrir les portes avant que le tramway démarre, le conducteur ne les ouvre pas après la condamnation. Cela les oblige à attendre un autre tramway et perdre plus de temps.

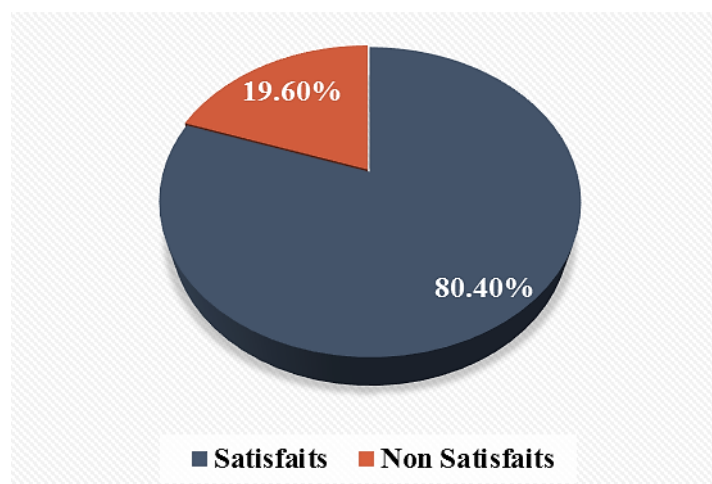


Figure III.20. La qualité de la conduite des tramways.

#### III.4.4.7 La gestion des situations de perturbations lors de l'exploitation.

La figure III.21 représente la perception des passagers sur la gestion des situations de perturbation des tramways. Il est clair sur l'histogramme ci-dessous que seulement 29.20% des passagers sont satisfaits de ce point ; tandis que 52.80% sont peu satisfaits et 18% sont complètement insatisfaits. À ce propos, les usagers justifient leurs avis sur le manque d'informations en temps réel à propos de la cause des pannes et/ou le temps nécessaire pour reprendre le voyage.

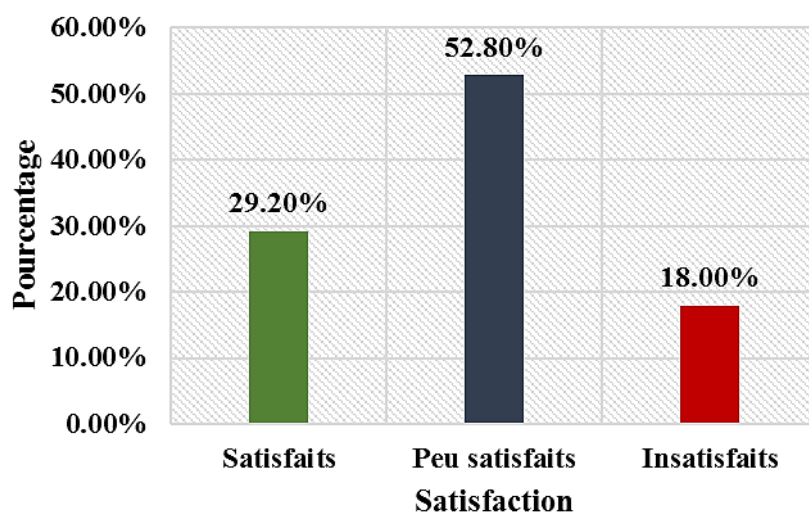
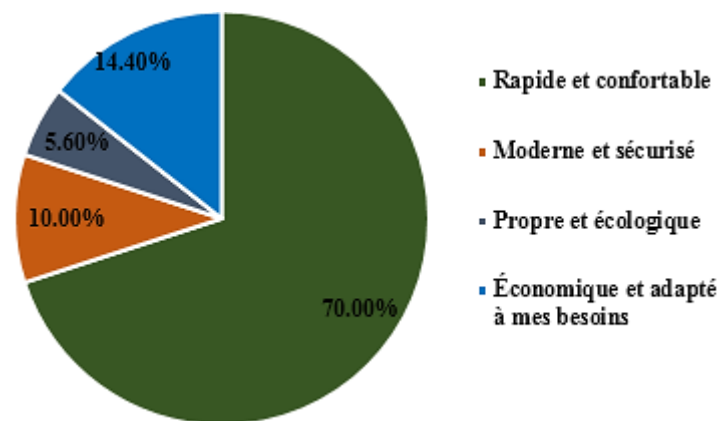


Figure III.21. La gestion des situations de perturbations lors de l'exploitation.

#### III.4.5 Raisons pour lesquelles les passagers utilisent le tram

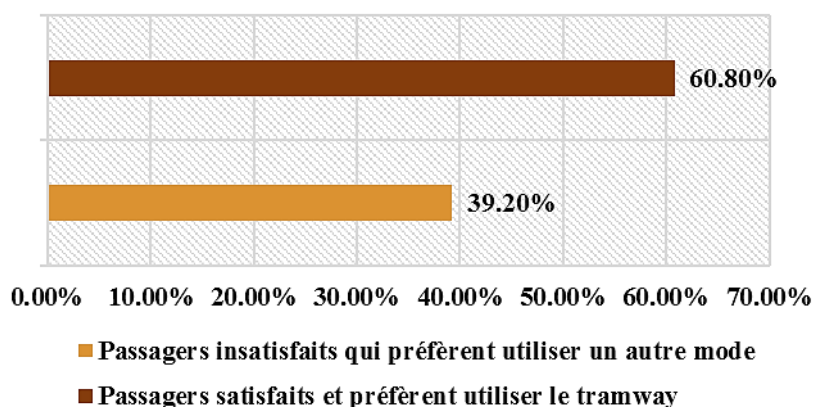
La figure III.22 montre que les principales raisons pour lesquelles les passagers utilisent le tram sont le confort et la rapidité avec un taux de 70% (régularité dans les horaires). Par conséquent, si l'exploitation du tramway est mauvaise, ou si les utilisateurs ne se sentent pas à l'aise et en sécurité, certainement ces derniers vont changer le mode de transport.



**Figure III.22.** Raisons pour lesquelles les passagers préfèrent d'utiliser le tram par rapport à un autre moyen de transport.

### III.4.6 Évaluation de la satisfaction des utilisateurs et mode de transport préféré

Nous observons sur la figure III.23 que 39,20% des passagers ne sont pas satisfaits de l'exploitation et de la qualité du service actuelle, ce qui montre que le taux est assez élevé. Cette catégorie de voyageurs affirme qu'ils préfèrent utiliser d'autres moyens de transport, car la gestion des tramways n'est pas bonne par rapport aux années précédentes. 91,84% des passagers non satisfaits déclarent qu'ils préfèrent prendre des taxis ou des véhicules privés, tandis que 8,16% optent pour les bus.



**Figure III.23.** Satisfaction des usagers du tramway sur l'exploitation et la qualité du service.

## III. 5. Conclusion

La présente étude avait pour objectif de déterminer l'impact de la qualité de service proposée sur le choix modal des usagers du tramway de Constantine. À travers l'enquête réalisée, nous avons pu connaître l'opinion des passagers sur la qualité de service proposé, en particulier sur l'exploitation du tram, de ressortir les points forts et surtout les points faibles de ce moyen de transport afin de proposer une éventuelle correction.



Il est démontré que le service offert est acceptable en général, mais qu'il a besoin d'être amélioré. 60,40% des passagers affirment que le prix du ticket est cher, en particulier pour ceux qui parcourent 500 m ou 2000 m, étant donné qu'ils paient le même prix que ceux qui parcourent 8 km. En conséquence, soit ils ne paient pas le ticket ou ils choisissent d'autres modes pour se déplacer. Cette enquête a également montré que 29,60% des passagers n'étaient pas satisfaits de la sécurité dans les stations et dans les tramways. De plus, 12,00% des clients n'étaient pas satisfaits du comportement des agents de tramway, ces derniers doivent être compréhensifs par rapport à certains cas qui représentent un facteur important de non-satisfaction d'après nos répondants.

Pour la partie exploitation du tramway, seuls 23,60% des utilisateurs ont déclaré que les trams arrivent en 3 minutes aux heures de pointe ; tandis que 54,00% déclarent un non-respect de cet intervalle de temps entre les tramways. Ce qui a donné un taux de non satisfaction de 45,20% des utilisateurs. Egalement, seulement 25,20% des passagers trouvent qu'il est nécessaire que les tramways viennent toutes les 3 minutes, alors que 74,80% déclarent pouvoir attendre entre 4 à 12 minutes.

Nos résultats de cette partie d'étude ont montré que 70% de passagers utilisent le tram pour sa rapidité et son confort. En raison du manque de respect de l'exploitation proposée, 39,20% des clients ne sont pas satisfaits et préfèrent prendre un autre moyen de transport, 91,84% de ces usagers déclarent qu'ils préfèrent utiliser leurs voitures ou des taxis qu'un tramway lorsque cela est possible ; en conséquence, la situation du trafic routier dans les intersections communes risque de se compliquer à l'avenir.

Raisons pour lesquelles, il est recommandé d'optimiser l'exploitation des tramways, ainsi que d'améliorer le confort et la sécurité, vu que ces facteurs ont un impact direct sur le choix modal des passagers. De plus, le prix du ticket doit être adapté pour les raisons mentionnées ci-dessus. De plus, un contrôle quotidien des tramways et des stations est nécessaire. La qualité de l'information doit être améliorée, en particulier dans les situations de perturbations.

Finalement, comme les indicateurs les plus importants sont ceux du confort et de la rapidité (régularité des horaires), les deux prochains chapitres seront détaillés sur le confort à l'intérieur du tramway et sa relation avec le choix modal des passagers, ainsi que sur l'exploitation réelle du tramway de Constantine. Afin d'optimiser cette dernière, de satisfaire la demande des passagers et d'encourager en plus la population à prendre tramway.

# Chapitre IV



---

*Chapitre IV Effet du bruit sur le confort des passagers à l'intérieur du tramway et son impact sur la congestion du trafic dans les zones urbaines.*

---

<b>IV.1 Introduction.....</b>	<b>68</b>
<b>IV.2 Le Problème du bruit à l'intérieur du tramway et son impact sur le choix modal.....</b>	<b>68</b>
<b>IV.3 Problèmes du bruit causés par l'exploitation du tramway .....</b>	<b>69</b>
<b>IV.4 Les perceptions du bruit et ses normes à l'intérieur du tramway de Constantine .....</b>	<b>69</b>
IV.4.1 La perception du bruit.....	69
IV.4.2 Les normes de bruit à l'intérieur du tramway de Constantine .....	70
<b>IV.5 Matériels et méthodes.....</b>	<b>71</b>
IV.5.1 Mesures expérimentales du bruit à l'intérieur du tramway.....	71
IV.5.2 Méthode et analyse de l'enquête sur la perception des passagers.....	72
<b>IV.6 Résultats.....</b>	<b>72</b>
IV.6 .1 Les résultats du bruit à l'intérieur des cabines du tramway .....	72
IV.6 .2 Les résultats du bruit représentés sur une cartographie .....	77
<b>IV.7 Résultats de l'enquête .....</b>	<b>78</b>
IV.7.1 La perception des passagers par rapport au bruit à l'intérieur du tram .....	78
IV.7.1.1 Analyse globale de l'échantillon .....	78
IV.7.1.2 Par genre .....	79
IV.7.1.3 Analyse de l'échantillon par âge .....	79
IV.7.2 Test statistique Khi deux.....	80
IV.7.2.2 Test de Khi deux sur l'échantillon par âge.....	81
IV.7.3 L'impact du bruit sur le choix modal des passagers .....	82
<b>IV.8 Conclusion .....</b>	<b>83</b>

## **IV.1 Introduction**

Le tramway est un mode de transport largement exploité dans de nombreuses villes du monde, vu qu'il augmente l'offre de transport en commun grâce à son importante capacité. Cela pourrait améliorer l'état du trafic routier en réduisant le débit de véhicules le long de la ligne de tramway. Cependant, ces avantages seront efficaces si ce mode répond d'une façon optimale aux attentes de la population. En effet, nous avons constaté à travers l'enquête menée précédemment et présentée dans le chapitre III que 39.20 % des passagers ne sont pas satisfaits de la qualité du service proposé, sachant que les deux indicateurs principaux qui attirent les usagers pour prendre le tram et qui influent sur leurs choix modaux sont le confort et la régularité. De ce fait, nous avons choisis d'étudier dans ce chapitre un indicateur essentiel lié au confort des utilisateurs qui est le bruit à l'intérieur du tramway. En outre, ce travail se focalise aussi sur l'opinion des passagers sur les niveaux de bruit détectés à l'intérieur du tramway.

L'objectif de ce travail est ainsi d'identifier et d'analyser le niveau du bruit détecté à l'intérieur du tramway, de savoir dans quelle cabine et dans quelle section sont enregistrés les niveaux du bruit les plus élevés, de détecter les causes de ce problème et de connaître l'impact du bruit sur le confort des utilisateurs du tram. Ce qui peut être une raison pour que ces derniers optent pour un autre moyen de transport et cela va augmenter la congestion routière tout au long de la ligne du tramway.

## **IV.2 Le Problème du bruit à l'intérieur du tramway et son impact sur le choix modal**

Ces dernières années, le bruit ambiant a suscité un intérêt croissant, en particulier le bruit causé par les différents moyens de transport [139, 140, 141]. C'est un grave problème qu'il faut traiter profondément, en raison de ses impacts négatifs sur la santé humaine [142, 143]. Le bruit en milieu urbain est entraîné par plusieurs facteurs, parmi lesquels le trafic routier, les trains et certainement les tramways [143, 144, 145].

De nombreuses études se sont concentrées sur le bruit causé par le tramway, car il constitue une source de nuisance pour la population urbaine [143, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152]. C'est pourquoi les constructeurs de tramways déploient des efforts considérables pour limiter ce facteur d'inconfort à l'intérieur et à l'extérieur du véhicule [153]. Les tramways sont largement utilisés pour décongestionner les zones urbaines [154]. Cela contribue à diminuer le bruit à proximité des habitations situées sur la ligne et à réduire les

émissions de CO<sub>2</sub> [155, 156], et ce qui a conduit à la restauration des tramways dans le monde entier [157].

Cependant, le confort des passagers est fortement affecté par le bruit à l'intérieur du tram [158], donc c'est une source de nuisance non seulement pour les habitants [159, 160, 161], mais également pour les usagers. Pour cette raison, il est nécessaire de réduire le niveau du bruit à l'intérieur du tramway et à proximité de ses rails [162]. De plus, il est important de prévoir les niveaux du bruit futurs [163] et de prendre en compte cette contrainte lors de la construction de nouvelles lignes de tram dans les villes [164]. Cela encouragera les gens à utiliser le tramway plus que leur voiture particulière, car le véhicule sera plus confortable, ce qui va contribuer efficacement à diminuer la congestion et les accidents dans les zones urbaines [165, 166].

### **IV.3 Problèmes du bruit causés par l'exploitation du tramway**

L'emplacement de la ligne du tram réduit la capacité de la route, surtout, qu'à certaines zones, il n'y a pas la possibilité de faire des modifications sur la géométrie de la chaussée. Cette contrainte a causé une congestion énorme dans les endroits critiques qui se situent entre la station Abdelmalek et la station ZI Palma.

De plus, le tram franchit les intersections toutes les 3 ou 5 minutes dans les jours de semaine, ce qui engendre des embouteillages et aggrave l'état de la circulation. Cette mauvaise exploitation du tramway entraîne une réduction probable de la durée de vie de la voie et du matériel roulant, cela augmentera le degré de bruit qui va gêner les passagers du tramway et les habitants [158], parce que l'état du rail fait partie des facteurs qui influent le niveau de bruit à l'extérieur et à l'intérieur des cabines de tramway [166].

La gestion optimale des tramways est nécessaire pour prolonger la durée de vie des rails, réduire les embouteillages et améliorer l'état du trafic routier. Le tramway sera plus attirant avec moins de bruit à l'intérieur et à l'extérieur des cabines.

### **IV.4 Les perceptions du bruit et ses normes à l'intérieur du tramway de Constantine**

#### **IV.4.1 La perception du bruit**

Un bruit n'est rien d'autre qu'un ensemble de sons gênant ou indésirable perçut par l'oreille. Il est connu par sa fréquence en (hertz) et par son intensité en décibel (dB) [167, 168,

169]. La perception du bruit a un effet important sur la qualité de vie et les risques de santé [170]. Il est l'un des plus importants indicateurs du confort d'un moyen de transport à évaluer [171]. Une exposition prolongée à des bruits forts 75 dB(A) pendant huit heures par jour, au fil des années peut entraîner une perte auditive. Le corps peut également répondre à des niveaux sonores plus faibles : le sommeil peut être perturbé par un bruit extérieur de 40 dB(A) [172, 173] (Figure IV.1).

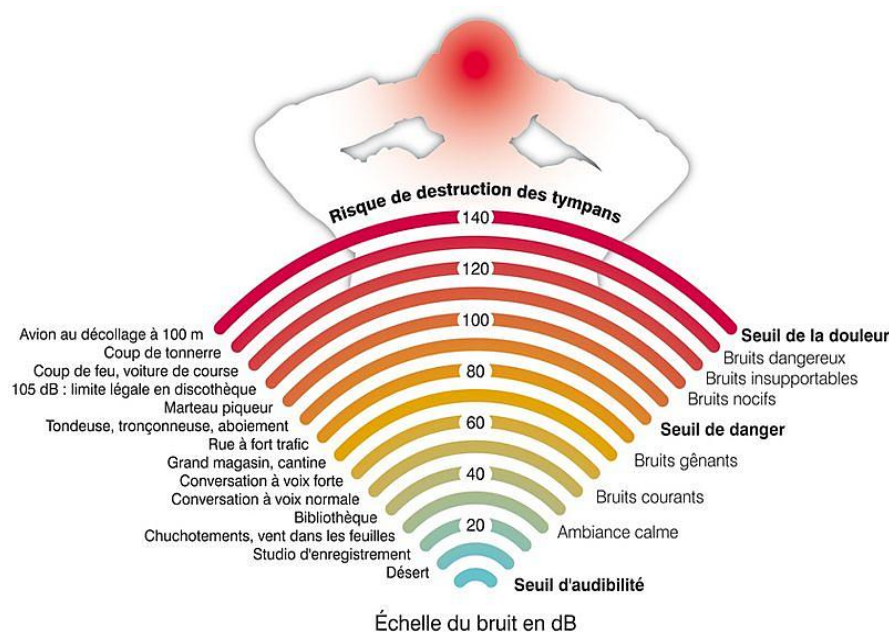


Figure IV.1. La perception du bruit par échelle [167].

#### IV.4.2 Les normes de bruit à l'intérieur du tramway de Constantine

Afin de réduire le bruit et de rendre le tramway plus confortable, les nouveaux tramways sont équipés d'un plancher bas et des matériaux auxiliaires sur le toit [174]. Aussi, les caractéristiques du rail jouent un rôle majeur dans le degré du bruit [175].

Les conditions de mesure du bruit sont définies par les normes NF S 31-028 à l'intérieur du véhicule. Le niveau de pression acoustique, mesuré dans les compartiments passagers, sur un véhicule vide en ordre de marche est :

- Le niveau de bruit est inférieur à 62 dB(A) mesuré pendant 30 secondes sur un véhicule à l'arrêt et peut être supérieur à 3 dB(A) au-dessous des unités de refroidissement en mode de réfrigération.
- Le niveau de bruit est inférieur à 72 dB(A) mesuré pendant 30 secondes sur un véhicule roulant à une vitesse de 50 km / h [176].

## IV.5 Matériels et méthodes

### IV.5.1 Mesures expérimentales du bruit à l'intérieur du tramway

Pour mesurer le niveau de bruit à l'intérieur du tramway, nous avons utilisé un sonomètre numérique CA832 (Figure IV.2). Ce dernier est fabriqué pour mesurer les nuisances sonores et les bruits dans les milieux industriels, les routes, les aéroports, et dans les moyens des transports surtout ferroviaires. Ce sonomètre répond à la norme IEC 651 [177]. Le bruit se détecte par un microphone mis au bout du sonomètre pour écarter les perturbations et avoir des mesures avec un taux élevé d'exactitude.

Le C.A 832 sert à mesurer les niveaux de bruit entre 37 à 130 dB en 3 gammes : 37-80 dB, 50-100 dB, 80-130 dB. Les deux courbes de pondération dont le sonomètre est doté ; sont les courbes A et C. La courbe A est utilisée dans l'environnement industriel, ainsi la courbe C est faite pour détecter les sons de basse fréquence [177].

Les mesures sont effectuées tout au long de la ligne du tramway dans les deux sens de rotation et dans toutes les cabines, elles sont prises pendant plusieurs jours de la semaine et à différentes heures. Nous les avons réalisés dans tous les kilomètres où ces derniers ont été divisés en trois sections de mesure afin de ne pas rater les points ou les sections qui contiennent beaucoup de bruit. Chaque cabine a été testée trois fois dans les deux sens et dans toutes les sections pour confirmer le niveau du bruit et les causes qui le provoquent dans toutes les cabines du tram. Les passagers étaient silencieux dans chaque cabine pour prendre les mesures dans les meilleures conditions et enregistrer la valeur réelle du bruit.

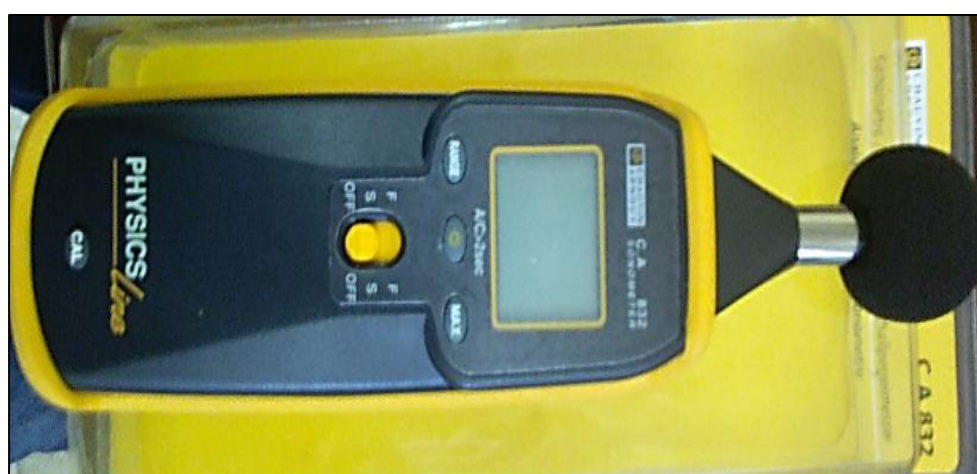


Figure IV.2. Sonomètre numérique CA832.

### IV.5.2 Méthode et analyse de l'enquête sur la perception des passagers

Cette enquête a pour but de déterminer si le bruit détecté sur la ligne et dans les différentes cabines du tram affectant le confort des passagers. Elle s'est déroulée en mois de décembre 2016 dans les différents moments de la journée. Un échantillon aléatoire de 250 passagers a été sélectionné à l'intérieur du tram et dans les stations.

Pour analyser cette partie, nous avons choisi un test statistique de Khi-deux. Ce dernier permet de valider à travers une hypothèse les résultats statistiques sur la perception des usagers par rapport au niveau de bruit à l'intérieur du tramway.

Hypothèse nulle :

$$H_0: p = \frac{1}{2} \text{ contre } H_1: p > \frac{1}{2}, \quad (\text{IV.1})$$

Où  $p$  est la probabilité qu'un passager ne soit pas gêné par le bruit.  $H_0$  signifie : qu'il y a autant de passagers dérangés par le bruit que de passagers qui ne le sont pas. Le test statistique du Khi-deux est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$D^2 = \sum_{i=1}^2 \frac{(N_i - \frac{100}{2})^2}{\frac{100}{2}}; \quad (\text{IV.2})$$

Il s'agit d'une distribution de Khi-deux avec un degré de liberté égal à 1.  $N_i$  est la fréquence observée c'est-à-dire le pourcentage, et  $100/2$  est la valeur espérée (taille de l'échantillon x la probabilité sous l'hypothèse nulle  $H_0$ ) [178].

Nous allons comparer la valeur du test statistique  $D^2$  à la valeur critique  $d_\alpha$ .

Nous rejetons l'hypothèse nulle  $H_0$  si  $D^2 > d_\alpha$ . ,  $d_\alpha = 3.841$  si  $\alpha = 0.05$ .

## IV.6 Résultats

### IV.6.1 Les résultats du bruit à l'intérieur des cabines du tramway

Les graphiques ci-dessous représentent les mesures de bruit à l'intérieur des sept cabines dans les deux sens de la ligne. Le premier itinéraire va de la station de Zouaghi Slimane au terminus de Benabdelmalek, et le second, du terminus de Benabdelmalek à la station de Zouaghi Slimane. Nous remarquons que les cabines à bogies font plus de bruit que les cabines centrales suspendues (C1, CC et C2). Sur plusieurs tronçons de la ligne, le bruit est supérieur aux valeurs minimales et maximales mesurées à l'intérieur du tram avant son exploitation officielle.

La première source de bruit dans les courbes, ainsi que dans les sections qui contiennent de nombreuses stations qui se séparent avec une courte distance est principalement associée aux bogies et aux équipements auxiliaires sur le toit. Le tram passe dans ces tronçons dans les deux itinéraires avec une vitesse faible entre 7 km/h et 30 km/h. Le bruit dans ces tranches de la ligne est compris entre 65 dB(A) et 79 dB(A).

La deuxième cause de bruit est liée au contact roue-rail. Il est détecté lorsque la vitesse est comprise entre 40 km/h et 60 km/h. Ce bruit est très élevé et se produit dans certaines sections dans les deux sens à 83.1 dB(A). Beaucoup de tramways ont un bruit fort qui a atteint 88.9 dB(A), cette valeur est très grande pour un nouveau tramway Citadis. À partir de là, nous avons remarqué que le bruit à l'intérieur du tramway augmente proportionnellement à sa vitesse. Les graphiques montrent aussi que la section comprise entre le troisième kilomètre et le cinquième kilomètre, ainsi que pour le premier kilomètre pour l'itinéraire 1 et le dernier kilomètre pour l'itinéraire 2 ; sont ceux qui contiennent un haut niveau de bruit. Ce sont les tronçons qui perturbent les passagers des tramways dans les deux sens.

Certaines autres expériences ont été effectuées lorsque les voyageurs se comportent normalement. Le résultat indique une augmentation du bruit comprise entre 5 — 10 dB(A), de plus il atteint 15 dB(A) dans la situation la plus critique. Cette augmentation ne dépend pas seulement du nombre d'usagers, mais également de leur comportement à l'intérieur du tram.

Enfin, il existe une autre source de bruit à l'intérieur des rames ; à savoir ; le son du système d'information des passagers. C'est un très fort son, car il atteint 99 dB(A), ainsi qu'il se répète pendant 1 minute pour chaque station.

La figure IV.3 représente les mesures effectuées dans la cabine M1 du tramway dans les deux itinéraires. Dans cette cabine, le bruit a atteint les 79.4 dB(A), 79.7 - 81 dB(A) entre le 3<sup>ème</sup> et le 5<sup>ème</sup> kilomètre dans le premier sens (Zouaghi Slimane vers le terminus Benabdelmalek Ramdane). Par ailleurs, dans le deuxième sens, le bruit a atteint 81.1 et 82.2 dB(A) dans les mêmes sections entre le 3<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> kilomètre.

De plus, ce niveau de bruit est arrivé au 80.3 et 80.5 dB(A) entre le 7<sup>ème</sup> et le 8<sup>ème</sup> kilomètre. Comme nous avons indiqué ci-dessus, le bruit enregistré dans ces sections de la ligne est dû principalement au contact roues-rail ainsi que les moteurs de traction. Alors, nous concluons qu'il n'y a pas une grande différence de valeurs dans les deux sens pour les deux cabines.



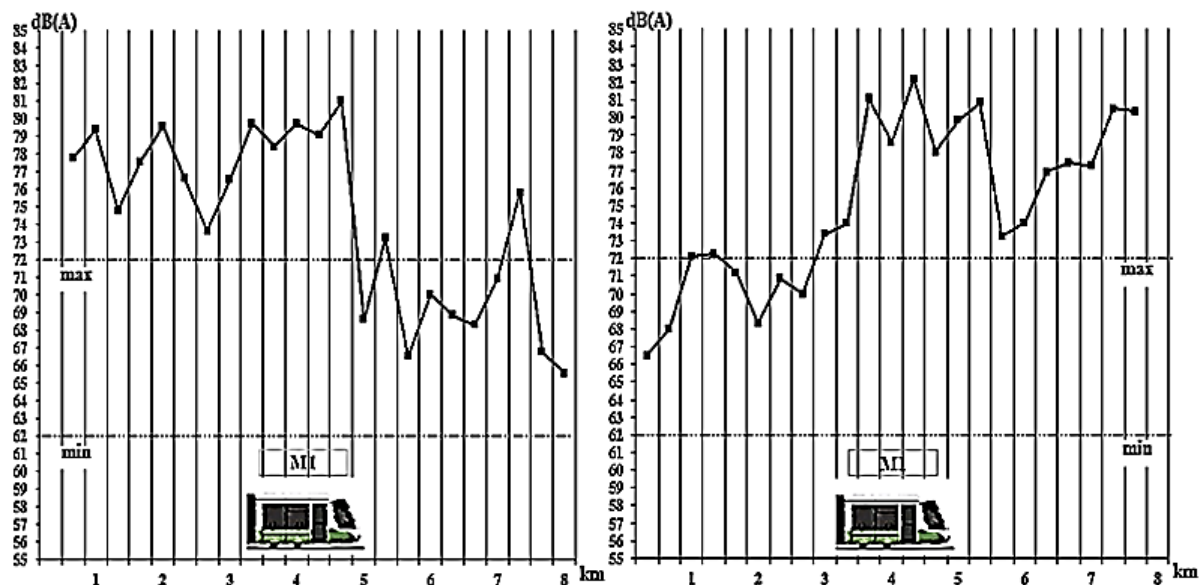


Figure IV.3. Mesures du bruit de l'itinéraire 1 et de l'itinéraire 2 pour la cabine M 1.

La Figure IV.4 est le résultat des mesures de bruit effectuées dans les cabines C1 dans les deux sens du tram. Les graphes ci-dessous indiquent que le bruit maximal égal à 82.5 dB(A) dans la partie située entre le 4<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> kilomètre, ainsi qu'entre le 3<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> kilomètre il arrive à 79.6 dB(A). Nous remarquons également que le bruit est plus faible et au-dessous du maximum quand il s'agit du début du 5<sup>ème</sup> kilomètre jusqu'au presque le 7<sup>ème</sup> kilomètre. Dans le deuxième sens, nous constatons que le bruit est moins fort que le premier, et qu'il est inférieur de la valeur maximale entre le 1er et le premier quart du 3<sup>ème</sup> kilomètre, ainsi qu'entre le 5.5 et les 6.5 kilomètres. Egalement, le bruit élevé détecté est toujours localisé entre la deuxième moitié du 3<sup>ème</sup> kilomètre et la première quarte du 5<sup>ème</sup> kilomètre, qui est de 75.0 et 75.5 dB(A). De plus, la valeur maximale enregistrée dans cette cabine est de 77.5 dB(A) dans le dernier kilomètre.

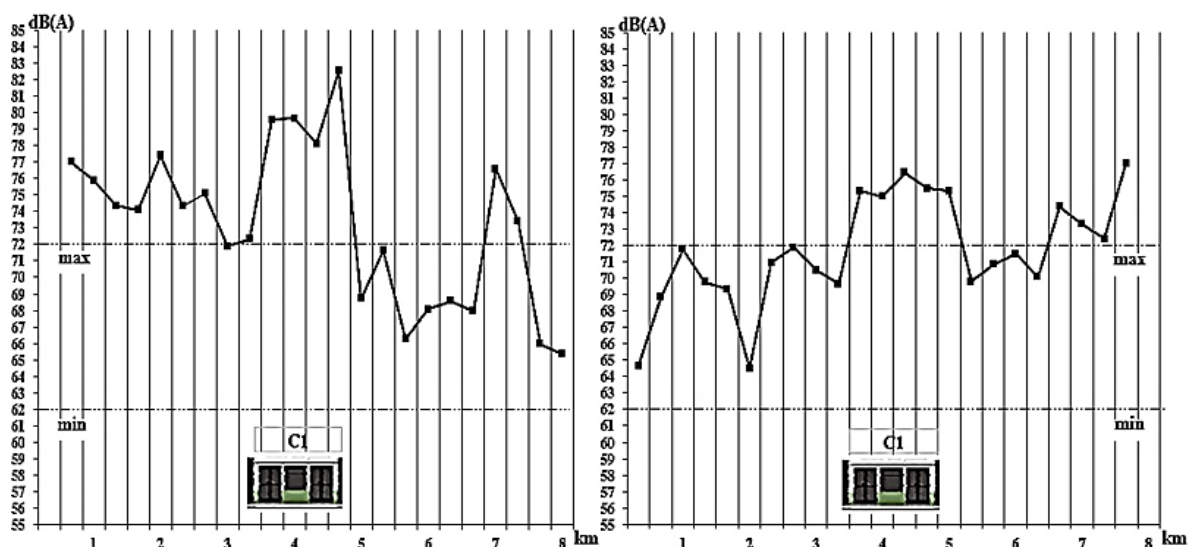


Figure IV.4. Mesures du bruit de l'itinéraire 1 et de l'itinéraire 2 pour la cabine C 1.

Des mesures de bruit à l'intérieur de la cabine NM sont montrées sur la figure IV.5 ; où nous remarquons que les valeurs enregistrées sont élevées dans cette cabine motrice. Le premier itinéraire a enregistré des valeurs entre 75.6 et 80.6 dB(A) du début du 1<sup>er</sup> au 5<sup>ème</sup> kilomètre, ainsi que 78.1-78.8 dB(A) entre le dernier quart du 6<sup>ème</sup> kilomètre et la deuxième tranche du 7<sup>ème</sup> kilomètre. En outre, le deuxième sens contient un bruit fort dans la section située entre le 3<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> kilomètre, les valeurs sont arrivées à 81.0 -82.9 dB(A). Par contre, dans le dernier kilomètre les valeurs du bruit sont élevées, mais ces derniers sont entre 78.1 et 78.9 dB(A).

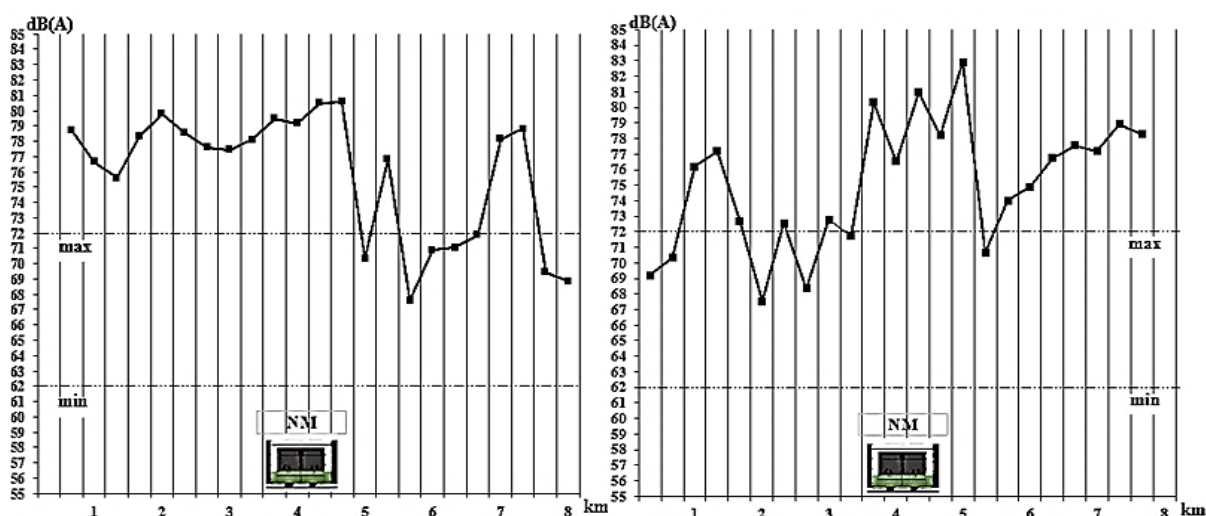


Figure IV.5. Mesures du bruit de l'itinéraire 1 et de l'itinéraire 2 pour la cabine NM.

La figure IV.6 montre les mesures de bruit effectuées à l'intérieur de la cabine CC. Il est clair dans les graphes que cette cabine est la moins bruyante du tram. Les valeurs dans le premier sens ne dépassent pas 77.3 dB(A) enregistrés entre le 3<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> kilomètre. Le deuxième itinéraire a connu la valeur la plus critique dans le dernier kilomètre avec 80.4 dB(A).

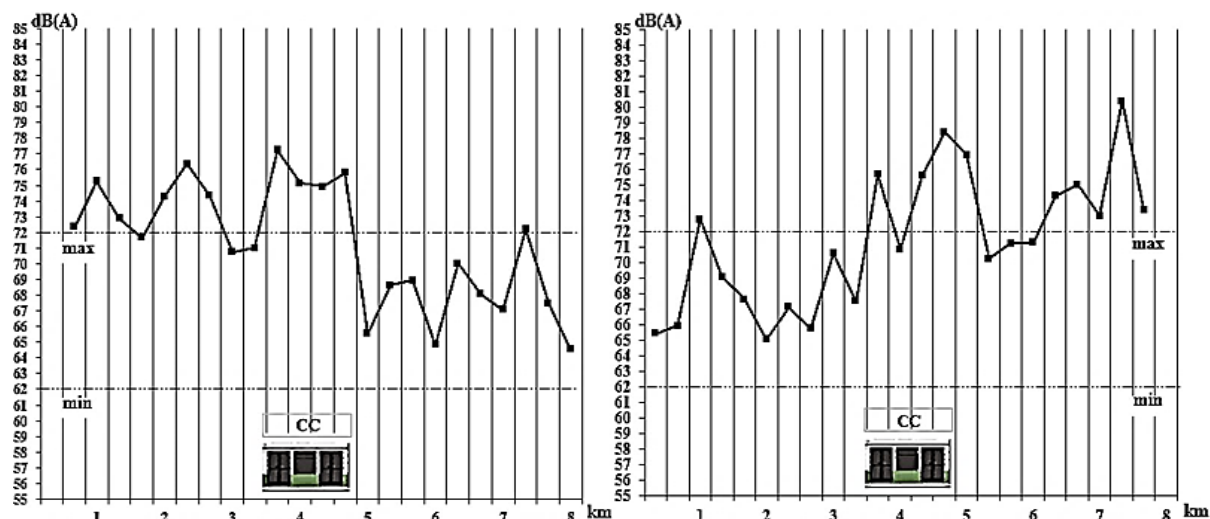


Figure IV.6. Mesures du bruit de l'itinéraire 1 et de l'itinéraire 2 pour la cabine CC.

Le résultat des mesures de bruit faites à l'intérieur de la cabine NP a été représenté sur figure IV.7. Nous pouvons conclure que le bruit est très élevé dans cette cabine à cause du système de traction situé au-dessus. Pour le premier sens, les valeurs maximales sont à 81.2 dB(A) dans le premier kilomètre, ainsi que 80.9 et 81.0 dB(A) entre les sections 3 et 5, et il arrive à 78.9 dB(A) dans la dernière section. Cependant, la deuxième voie a connu un niveau de bruit inférieur. Le bruit maximal a été marqué dans la partie localisée entre le 4<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> kilomètre avec 78.6 dB(A).

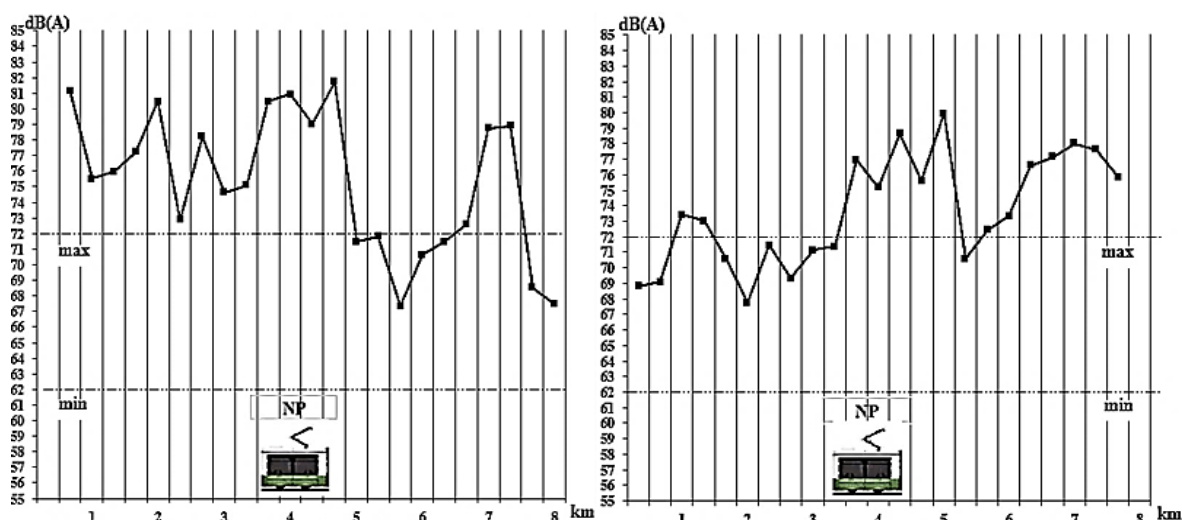


Figure IV.7. Mesures du bruit de l'itinéraire 1 et de l'itinéraire 2 pour la cabine NP.

La figure IV.8 illustre les résultats des mesures effectuées dans la cabine C2. Le pic le plus élevé affiché dans le premier sens est de 80.5 dB(A) situé dans le dernier quart du 4<sup>ème</sup> kilomètre. Par ailleurs, nous avons également trouvé que le deuxième sens fait moins de bruit que le premier, la plus haute valeur enregistrée dans cet itinéraire est de 78.6 dB(A). Aussi, entre les sections du 3<sup>ème</sup> et le 5<sup>ème</sup> kilomètre de cette même cabine, le bruit varie entre 73.4 et 77.1 dB(A).

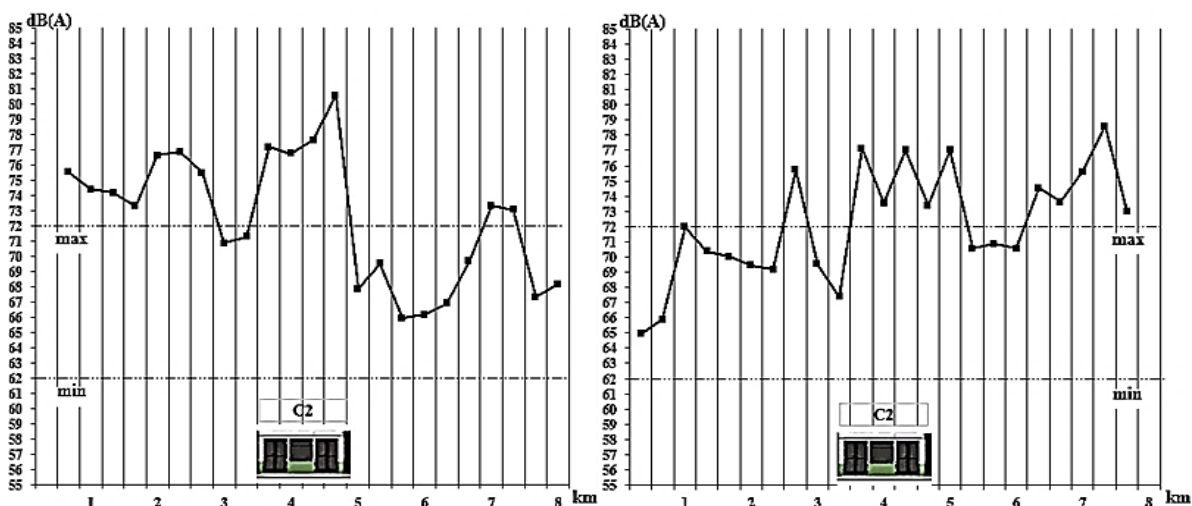


Figure IV.8. Mesures du bruit de l'itinéraire 1 et de l'itinéraire 2 pour la cabine C2.

Le résultat des mesures réalisées dans les deux sens à l'intérieur de la cabine M2 a été illustré sur la figure IV.9, ce qui montre que le bruit est très élevé dans cette cabine.

Dans la première voie, le bruit atteint des valeurs allant de 80.4 dB(A) jusqu'à 84.7 dB(A) dans la section située entre le 3<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> kilomètre, c'est la plus grande valeur enregistrée dans toutes les cabines. De plus, le tronçon localisé entre le 7<sup>ème</sup> et le 8<sup>ème</sup> kilomètre a connu aussi une valeur élevée de 78.3 dB(A).

Le deuxième sens est aussi très bruyant, les valeurs ont atteint les 82.7 et 83.1 dB(A) dans la section noire qui se trouve entre le 3<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> kilomètre. Ainsi que dans la partie située entre le 6<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> kilomètre a connu une valeur critique de 79.1 et 79.6 dB(A).

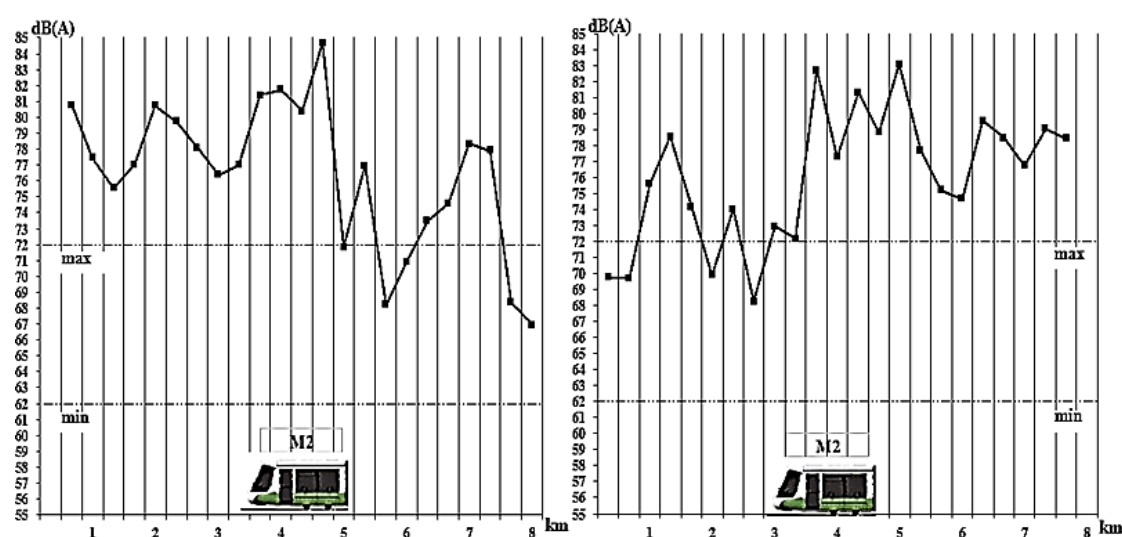


Figure IV.9. Mesures du bruit de l'itinéraire 1 et de l'itinéraire 2 pour la cabine M2.

#### IV.6 .2 Les résultats du bruit représentés sur une cartographie

La cartographie du bruit est une autre méthode pour présenter le résultat de mesures qui vise à connaître la localisation du niveau de bruit détecté à l'intérieur du tramway le long de sa ligne. Nous pouvons voir clairement sur la carte que le niveau du bruit varie entre les différentes sections, surtout dans les virages et les pentes ; ainsi que les courbes présentées dans la partie précédente et qui ont montré que les niveaux de bruit dans les sept cabines sont différents. Le bruit élevé est détecté dans les cabines motorisées.

Dans la section précédente, nous avons trouvé que le bruit est très élevé spécialement dans le premier kilomètre de l'itinéraire 1 (dernier kilomètre de l'itinéraire 2), ce qui représente sur la carte la section qui se situe entre le terminus Zouaghi Slimane et la station Khaznadar. De plus, le tronçon qui contient un pic de bruit élevé se situe juste après la station Khaznadar, plus exactement près de l'institut paramédical jusqu'à la station de la résidence

universitaire Mentouri. En outre, la section la plus critique présentée dans les courbes précédentes (entre le tronçon 3 et 5 pour l'itinéraire 1 et section 3 et 6 pour l'itinéraire 2) est celle de l'université Mentouri jusqu'à l'entrée du viaduc qui mène à la station ZI Palma. La première source de bruit liée aux sections citées est due au mauvais contact roue-rail.

Finalement, le fort bruit mesuré dans les deux sections qui se situent juste à la proximité de la station Fadila Saadane et Bellevue est causé beaucoup plus par le système de traction et les équipements de toiture. Ces deux stations se trouvent près de deux pentes et de deux courbes.

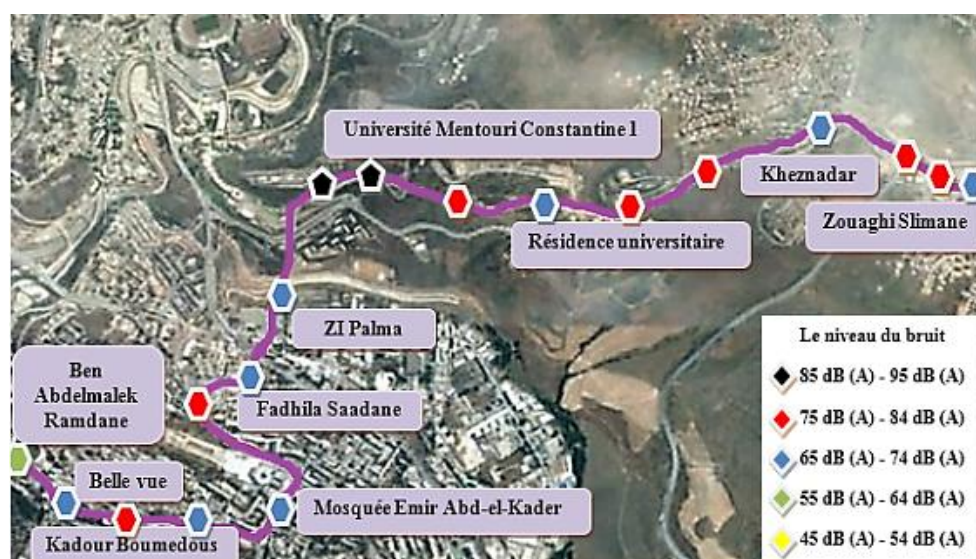


Figure IV.10. Carte de localisation du bruit à l'intérieur des cabines « tramway de Constantine ».

## IV.7 Résultats de l'enquête

### IV.7.1 La perception des passagers par rapport au bruit à l'intérieur du tram

Dans cette partie, il a été montré que la moitié des usagers du tram, hommes et femmes de toutes les classes d'âge, admettent qu'ils sont dérangés par le bruit spécialement celui qui est provoqué par le contact roue-rail car il peut durer jusqu'à 30 secondes dans certains tronçons ; ainsi que le bruit causé par les équipements de toiture lorsque le tramway traverse les virages.

#### IV.7.1.1 Analyse globale de l'échantillon

La figure IV.11 représente la perception des utilisateurs de tramways, hommes et femmes, de toutes les catégories d'âge ; par rapport au bruit senti à l'intérieur du tram. Nous



observons sur l'histogramme que 46,80% sont gênés par le bruit et que ce taux d'insatisfaction est très élevé.

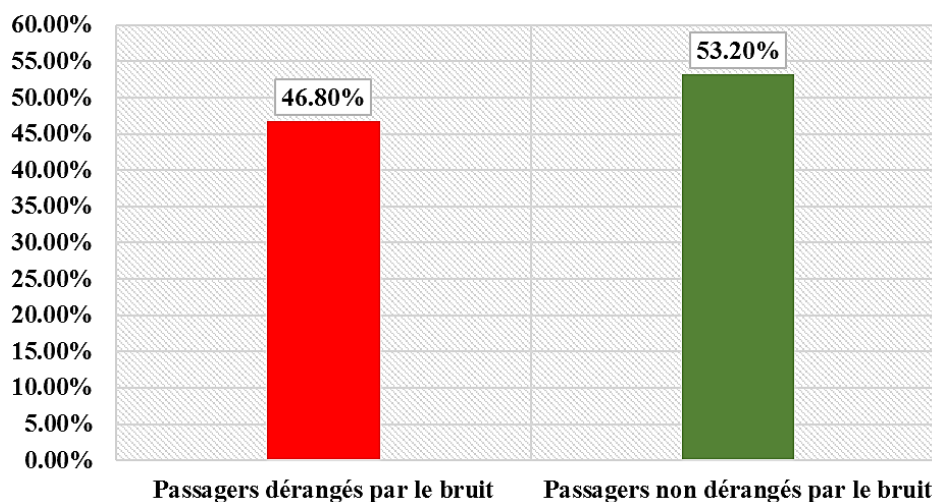


Figure IV.11. La perception globale des passagers par rapport au bruit à l'intérieur du tramway.

#### IV.7.1.2 Par genre

Dans la figure IV.12, nous remarquons que 47,71% des femmes et 46,10% des hommes ne sont pas satisfaits du niveau du bruit à l'intérieur du tram. Par conséquent, environ la moitié des femmes et des hommes qui ont répondu au questionnaire, étaient très ennuyés par ce bruit.

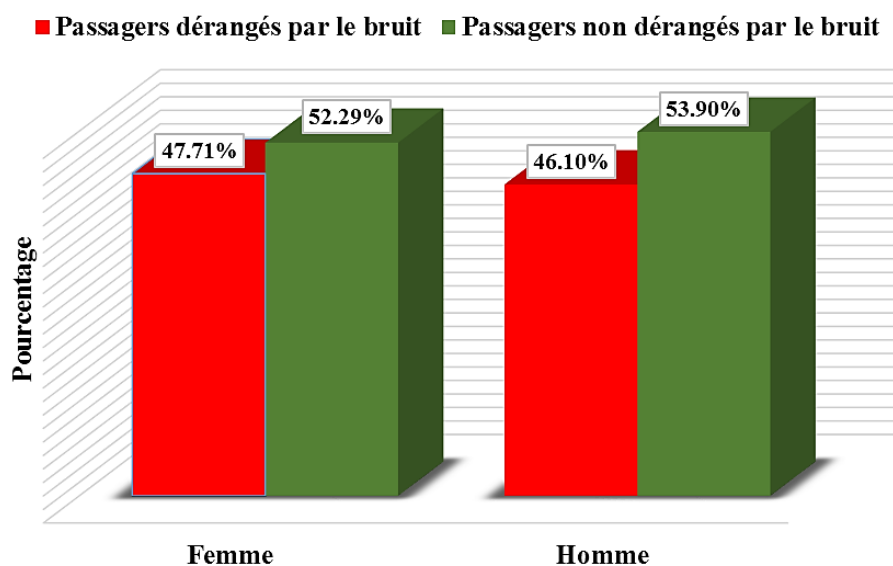


Figure IV.12. La perception des passagers par genre.

#### IV.7.1.3 Analyse de l'échantillon par âge

La figure IV.13 montre l'échantillon en fonction de l'âge des passagers. Les principales catégories d'utilisateurs sont âgées de 18 à 36 ans, ce qui correspond à la catégorie des jeunes ainsi que de 37 à 55 ans qui correspond à la catégorie des travailleurs. Nous remarquons aussi

que ces deux catégories d'âge sont beaucoup plus gênées par le bruit à l'intérieur du tram que la catégorie des personnes âgées entre 56-75 ans.

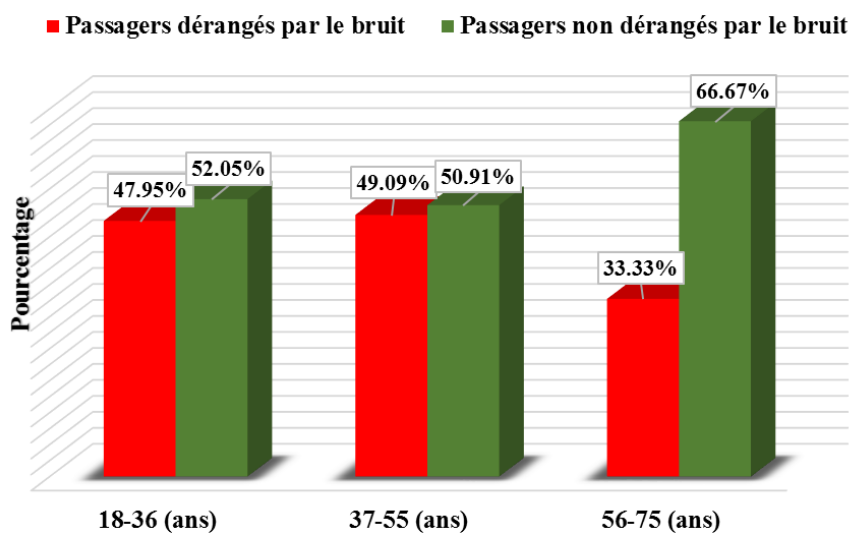


Figure IV.13. La perception des passagers par âge.

#### IV.7.2 Test statistique Khi deux

Afin de valider ce résultat, nous avons utilisé le test statistique Khi-deux présenté dans la section IV.5.2.

##### IV.7.2.1 Test de Khi deux sur l'échantillon par genre

- **Catégorie femmes**

Nous appliquons l'hypothèse nulle de l'équation (1) :

Où  $p$  est la probabilité qu'une femme ne soit pas gênée par le bruit.  $H_0$  signifie : qu'il y a autant de femmes dérangées par le bruit que de femmes qui ne le sont pas. Le test statistique du khi deux est calculée à l'aide de la formule (2) :

Après calcul, nous obtiendrons :

$$D^2 = 0.2098.$$

En la comparant avec la valeur critique  $d_\alpha$ , nous trouvons que  $0.2098 < 3.841$ , donc nous acceptons l'hypothèse nulle  $H_0$ .

- **Catégorie hommes**

Nous utilisons l'hypothèse nulle pour les hommes présentés dans l'équation (1) :

Où  $p$  est la probabilité qu'un homme ne soit pas gêné par le bruit.  $H_0$  Signifie : qu'il y a autant d'hommes dérangés par le bruit que d'hommes qui ne le sont pas.

Après calcul, nous obtiendrons :

$$D^2 = 0.6084.$$

Nous avons  $0.6084 < 3.841$ , pour cela nous acceptons l'hypothèse nulle  $H_0$ .

#### IV.7.2.2 Test de Khi deux sur l'échantillon par âge

##### ➤ Pour la première catégorie 18-36 ans

Nous appliquons l'hypothèse nulle présentée dans l'équation (1) pour la catégorie de passagers âgés entre 18-36 ans :

Où  $p$  est la probabilité qu'un passager âgé entre 18-36 ans ne soit pas gêné par le bruit.

Hypothèse nulle  $H_0$ : Il y a autant de personnes gênées par le bruit par rapport aux personnes qu'ils ne le sont pas pour la catégorie âgée entre 18 à 36 ans.

$$D^2 = 0.1681.$$

Nous avons  $0.1681 < 3.841$ , Pour cela nous acceptons l'hypothèse nulle  $H_0$ .

##### ➤ Pour la deuxième catégorie 37-55 ans

La même chose que pour la catégorie précédente, nous utilisons l'hypothèse nulle présentée dans l'équation (1) pour la catégorie de passagers âgés entre 37-55 ans :

Où  $p$  est la probabilité qu'un passager âgé entre 37-55 ans qu'il ne soit gêné par le bruit.

Hypothèse nulle  $H_0$  : il y a autant de personnes gênées par le bruit par rapport aux personnes qu'ils ne le sont pas pour la catégorie âgées entre 37 à 55 ans.

$$D^2 = 0.033124. \text{ On a } 0.033124 < 3.841,$$

Donc à partir du résultat obtenu, nous acceptons l'hypothèse nulle  $H_0$ .

##### ➤ Pour la troisième catégorie 56-75 ans

Nous constatons que la catégorie des personnes âgées entre 56 et 75 ans n'est pas beaucoup gênée par ce bruit comme les deux autres catégories. Pour valider cela, nous prenons :



Avec la même équation (1) que nous avons appliqué pour les catégories précédentes, nous calculons l'hypothèse nulle  $H_0$  pour la catégorie de passagers âgés entre 56-75 ans :

Où  $p$  est la probabilité qu'un passager âgé entre 18-36 ans ne soit pas gêné par le bruit.

Hypothèse nulle  $H_0$  : Il y a autant de personnes gênées par le bruit que de personnes qu'ils ne le sont pas pour la catégorie âgée entre 56 à 75 ans.

$$D^2 = 11.115556. \text{ On a } 11.115556 > 3.841,$$

Alors nous rejetons l'hypothèse nulle  $H_0$ .

Donc, nous confirmons qu'il y a beaucoup de personnes qui ne sont pas gênées par le bruit par rapport à ceux qui le sont pour cette catégorie.

### IV.7.3 L'impact du bruit sur le choix modal des passagers

La figure IV.14 représente l'analyse de l'échantillon par rapport à l'impact du bruit sur le choix modal des passagers. Nous constatons que 30.40% des passagers ont révélé que le dérangement causé par le bruit influe sur leur choix du moyen de transport et surtout si ce problème continue et devient plus fort dans le futur.

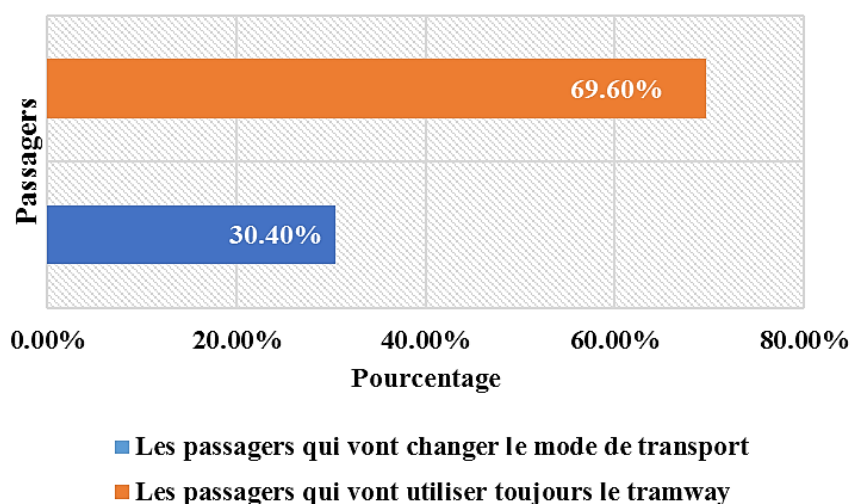


Figure IV.14. Analyse globale du choix modal des passagers.

La figure IV.15 est une analyse du choix modal des passagers par âge. Les résultats ci-dessous montrent que 28.80% des usagers qui vont changer vers un autre mode de transport sont des deux catégories 18-36 ans et 37-55 ans. Ce pourcentage est très important, parce qu'il s'agit ici de passagers qui se déplacent beaucoup plus par le tramway, aussi ceux qui vont l'utiliser sur le long terme. Donc, les résultats indiquent que ce bruit affecte négativement le

confort des voyageurs, ce qui influe sur leurs futurs choix modaux. Cela va compliquer encore plus la situation de la congestion routière tout au long de la ligne du tramway.

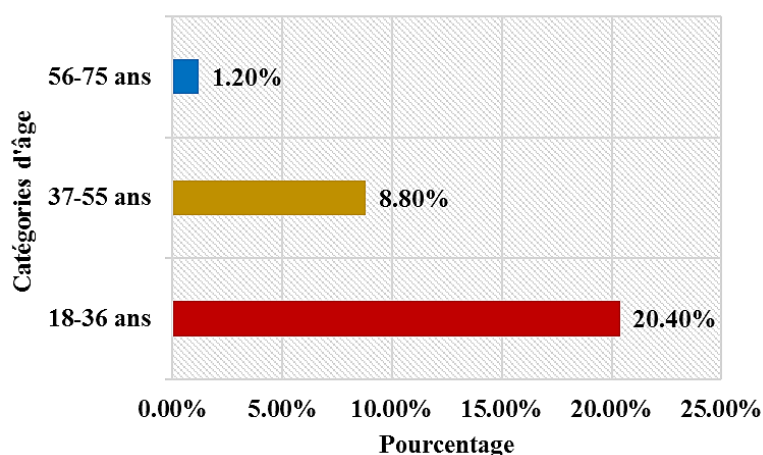


Figure IV.15. Analyse du choix modal des passagers par âge.

## IV.8 Conclusion

Dans ce chapitre, le problème des émissions acoustique a été abordé. Contrairement aux travaux précédents, celui-ci a été réalisé à l'intérieur du tram afin de mesurer le bruit ressenti par les passagers. Egalement, cette étude avait pour but de déterminer si le bruit affectait le confort des utilisateurs, de plus, montrer si ce dernier peut influencer sur leurs choix modaux pour connaître sa répercussion sur la future demande du trafic routier.

Les résultats de cette enquête ont montré que le rail, le matériel roulant comme les bogies, et le système de traction comme les équipements situés aux toits sont les principales causes du bruit à l'intérieur du tram. Il a également été démontré que le bruit à l'intérieur du tramway augmente proportionnellement à sa vitesse.

Par ailleurs, le niveau élevé du lancement sonore du système d'informations des voyageurs gêne beaucoup les passagers, aussi il est parmi les causes qui influent sur le niveau du bruit vu qu'il atteint les 99 dB(A). En outre, il est à noter qu'une exploitation non optimale dégradera rapidement la durée de vie de la voie et du matériel roulant. Ce problème provoquera un mauvais contact entre le rail et les roues ; ainsi le bruit sera plus élevé encore dans le futur. D'autre part, cette étude a également affirmé que le nombre de passagers et en particulier leurs comportements influent sur les niveaux de bruit à l'intérieur des cabines.

Ensuite, la deuxième partie de ce travail a montré que près de la moitié des utilisateurs, hommes et femmes, sont perturbés par le bruit. Ce dernier affecte négativement le confort des

voyageurs, surtout les catégories des jeunes et des adultes. Par la suite, 30.40% de l'échantillon vont changer le mode de transport si ce problème persiste ou s'accroît dans le futur. À noter que 28.80% appartiennent toujours aux catégories d'âge entre 18-36ans et 37-55 ans. Par conséquent, la demande du trafic routier augmentera ce qui va provoquer une congestion critique dans les zones urbaines.

Plusieurs recommandations doivent être prises afin de diminuer le bruit à l'intérieur des tramways et d'accroître le confort des passagers. Une maintenance efficace doit être appliquée au matériel roulant, au rail et aux équipements de traction pour les maintenir en bon état afin de générer moins de bruit.

Certaines solutions techniques doivent être appliquées pour limiter le bruit provoqué par le contact du couple roue-rail, comme la lubrification des rails, ainsi, d'injecter le sable dans les roues par les conducteurs lorsque le tramway traverse des sections qui entraînent un fort bruit, et d'utiliser des matériaux qui aident à absorber le bruit, tels que des plaques en caoutchouc le long des sections de la ligne où le bruit est intense. De plus, il est également nécessaire de réduire la vitesse dans les sections critiques qui contiennent un niveau de bruit élevé. En outre, le niveau du lancement sonore du système d'information des voyageurs doit être réglé autour de 65 dB (A) afin de rendre le tram plus confortable pour tous les passagers.

Par ailleurs, les horaires d'exploitation du tramway doivent être optimisés en prenant en considération l'état actuel du trafic routier, de la durée de vie du matériel roulant et de la voie. Et ce, afin d'optimiser ces deux derniers et de réduire l'embouteillage dans les carrefours en communs importants. Aussi, l'intervalle de temps entre les tramways doit être optimisé selon la demande des passagers tout en respectant la régularité des tramways. Cela permet que le matériel roulant et le rail ne s'usent pas rapidement à cause de la haute fréquence du trafic des tramways.

Enfin, cette étude est considérée comme une contribution au prochain chapitre qui aura pour objectif d'évaluer l'exploitation du tramway de Constantine et de l'optimiser, pour le rendre plus confortable et plus efficace en ce qui concerne la capacité de transport et sa régularité. Ces facteurs vont rendre le tramway plus attractif, ce qui incitera plus de personnes à l'utiliser au détriment d'autres moyens de transport, et aidera à réduire ainsi la congestion routière tout au long de sa ligne surtout dans les intersections communes dans les zones urbaines.

# **Chapitre V**



---

*Chapitre V : Evaluation et optimisation de la performance du tramway de  
Constantine et son impact sur la congestion du trafic dans les intersections  
communes*

---

<b>V.1 Introduction .....</b>	<b>86</b>
<b>V.2 L'évaluation de la performance du tram et son effet sur la régulation du trafic routier .....</b>	<b>86</b>
<b>V.3 Matériels et Méthodes .....</b>	<b>87</b>
<b>V.4 Résultats .....</b>	<b>88</b>
V.4.1 L'évaluation de la demande estimée et réelle de passagers .....	88
V.4.2 L'évaluation de l'intervalle de temps entre les tramways.....	88
V.4.3 Le temps de parcours réel et la vitesse moyenne (incluant le temps de stationnement).....	90
V.4.3.1 Le temps de parcours réel et la vitesse moyenne réelle (sans le temps de stationnement) .....	91
V.4.3.2 Analyse de la vitesse moyenne et du temps de parcours des tramways dans chaque section du tracé.....	92
V.4.3.3 Le temps d'arrêt aux stations.....	97
V.4.4 L'intervalle optimal de temps de parcours et le gain de temps pour les usagers de la route aux intersections.....	99
<b>V.5. Conclusion.....</b>	<b>100</b>

## **V.1 Introduction**

Les résultats des chapitres III et IV prouvent qu'attirer et inciter les passagers à utiliser le tramway ne peut se faire sans une exploitation optimale. Ceci passe seulement par le respect des indicateurs de régularité et de confort, en maîtrisant l'intervalle de temps entre les tramways et en adaptant la capacité offerte à la demande dans les diverses heures de la journée. De ce fait, l'objectif de ce chapitre consiste à analyser les différents indicateurs de performances, à déterminer si les facteurs de ponctualité sont respectés et à comparer la demande réelle à la capacité proposée. En outre, le but est également de montrer l'effet de l'exploitation du tramway sur le contrôle du trafic pour les utilisateurs de la route, afin de prouver comment la performance du tram peut, éventuellement, influencer sur l'état de la circulation dans les intersections communes. Ainsi qu'en proposant un nouveau tableau d'intervalle de temps, qui permettra de satisfaire tous les usagers, pour les passagers du tramway par sa régularité, où pour les automobilistes, en minimisant le temps de retard aux carrefours à feux.

## **V.2 L'évaluation de la performance du tram et son effet sur la régulation du trafic routier**

Malgré tous les avantages offerts par le tram, il a été critiqué pour son exploitation et la sécurité des usagers dans les intersections communes [179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188], plus précisément, par rapport à son non-respect de l'intervalle de passage et les retards qui cause pour les usagers de la route aux intersections signalisées, en raison de la priorité qu'il a dans ces dernières [189, 190, 191, 192]. Il bloque les automobilistes qui traversent sa voie, en particulier dans les zones stratégiques dans plusieurs villes du monde [193, 194, 195, 196].

Le tramway dispose des systèmes de contrôle et de télécommunication avancés comme de nombreux modes de transports [197, 198]. Ceci permet de bien gérer le tramway pour répondre de façon optimale à la demande en temps réel, ainsi que de respecter les horaires [199, 200, 201]. De plus, ceci vise à satisfaire les passagers en maîtrisant de manière idéale son exploitation [202]. Il est donc important d'utiliser efficacement le système intelligent du tramway, afin d'optimiser l'exploitation du tramway en temps réel.

Mais malheureusement, le système de télécommunication et d'aide à l'exploitation dont le tramway de Constantine dispose (présenté dans le chapitre II), et l'étude que nous avons

réalisée dans le chapitre III ; ont montré que 54% des passagers trouvent que le tramway ne respecte pas les horaires, et 39,20% sont insatisfaits de la gestion actuelle. En conséquence, ils préfèrent utiliser un autre mode de transport. Cela aura un impact négatif sur la congestion du trafic à l'avenir en raison du nombre de voitures qui augmente sur la ligne. C'est ce qui nous a conduit à mener cette étude pour analyser et évaluer l'exploitation réelle du tramway afin de l'optimiser. Cela pourrait avoir un effet positif sur la gestion du trafic routier dans les intersections situées sur sa ligne.

### **V.3 Matériels et Méthodes**

La première étape consiste à évaluer les performances du tramway, à comparer la demande réelle et la demande estimée. Notre objectif est de déterminer si l'offre et la demande sont équilibrées. Puisque, pour un programme d'optimisation, il est nécessaire de connaître la demande réelle [203, 204]. Pour cela, les données sur les flux de voyageurs ont été recueillies auprès de l'Enterprise Metro Alger (EMA). La journée au cours de laquelle le nombre maximal de passagers a été enregistré durant l'année 2018, est utilisée comme référence. À partir de cette dernière, nous allons déterminer l'intervalle idéal ainsi que le nombre de trams essentiels pour les différentes heures de la journée.

L'indicateur de performance le plus important pour les moyens de transport est la régularité [205]. Pour cela, dans cette étude, les principaux indicateurs de régularité ont été analysés. Deux cent soixante-six (266) temps d'intervalle sont mesurés pour détecter s'il est respecté. D'autre part, cette mesure nous permet de connaître la capacité réelle offerte en plusieurs heures. De plus, cette enquête a été réalisée dans un jour chargé de la semaine.

L'étape suivante commence par une analyse générale du temps de parcours, de la vitesse moyenne réelle et du temps d'attente dans les stations. Pour se faire, une vingtaine de trajets ont été effectués aux heures de pointe, dans les deux sens. Ensuite pour une analyse plus approfondie, le temps de parcours et la vitesse moyenne réelle dans chaque tronçon de la ligne sont calculés. De même, le temps d'attente dans les stations est étudié, afin de détecter les causes réelles qui influent sur la régularité du tram. Un nombre important de mesures est effectué, 116 mesures ont été réalisées dans toutes les sections du tracé (chaque section a été mesurée 116 fois), aux heures de pointe et dans les deux sens.

Ces mesures approfondies sont effectuées pour confirmer les résultats trouvés précédemment et pour faire une réelle comparaison avec les performances théoriques du tram. Celui-ci vise à évaluer son exploitation, à optimiser cette dernière et à montrer son effet pour

réduire la congestion du trafic dans les intersections communes. Toutes les mesures liées au temps de parcours, à la vitesse moyenne et au temps de stationnement, ont été enregistrés à travers des caméras vidéo à l'intérieur du tram tout au long de la ligne.

## V.4 Résultats

### V.4.1 L'évaluation de la demande estimée et réelle de passagers

La première partie des résultats est consacrée à l'analyse de la demande théorique et réelle. L'objectif est de savoir si l'exploitation du tramway est bien équilibrée. Les données de la demande quotidienne la plus élevée de l'année précédente sont présentées dans la figure V.1. Ces valeurs ont été enregistrées dans un jour de la semaine (Source : Entreprise Metro Alger). Cette figure révèle que la capacité estimée dépasse la demande réelle, en particulier pendant les heures de pointe, dans lesquelles le taux d'occupation du tramway se situe entre 4.75% et 22.06%. Cet écart important entre la demande et la capacité offerte, prouve que l'exploitation du tramway est mauvaise. Cela nous a conduit à analyser profondément les autres indicateurs de performance du tramway.

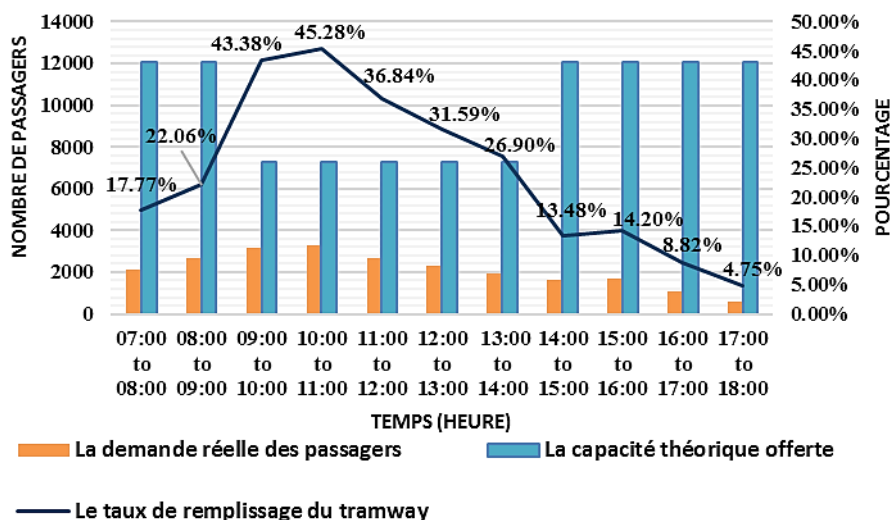


Figure V.1. L'évaluation de la demande estimée et réelle de passagers.

### V.4.2 L'évaluation de l'intervalle de temps entre les tramways

Les figures V.2 et V.3 montrent que l'intervalle de temps entre les trams dans les deux sens n'est pas constant, et que l'intervalle théorique entre les trams pour toutes les heures n'est pas respecté. Parfois, la durée dépasse 8 minutes, et d'autres fois, elle est inférieure à l'intervalle indiqué. Donc à travers les 266 mesures effectuées, nous constatons que

l'intervalle de temps est différent pour les deux voies et varie entre tous les tramways pour toutes les heures. C'est ce qui a créé un déséquilibre dans l'exploitation (Figure V.4).

De plus, la capacité réelle du tramway ce jour-là, ne respecte pas la capacité suggérée pour toutes les heures. Cette mauvaise gestion des tramways aura comme conséquence, un impact négatif sur les utilisateurs du tramway, parce qu'il n'est pas régulier d'une part, car il ne respecte pas l'intervalle de temps théorique, et cela a un impact négatif sur les usagers de la route aux intersections communs, d'une autre part. C'est une raison pour laquelle, il est nécessaire de trouver les causes de cette non-régularité dans les horaires.

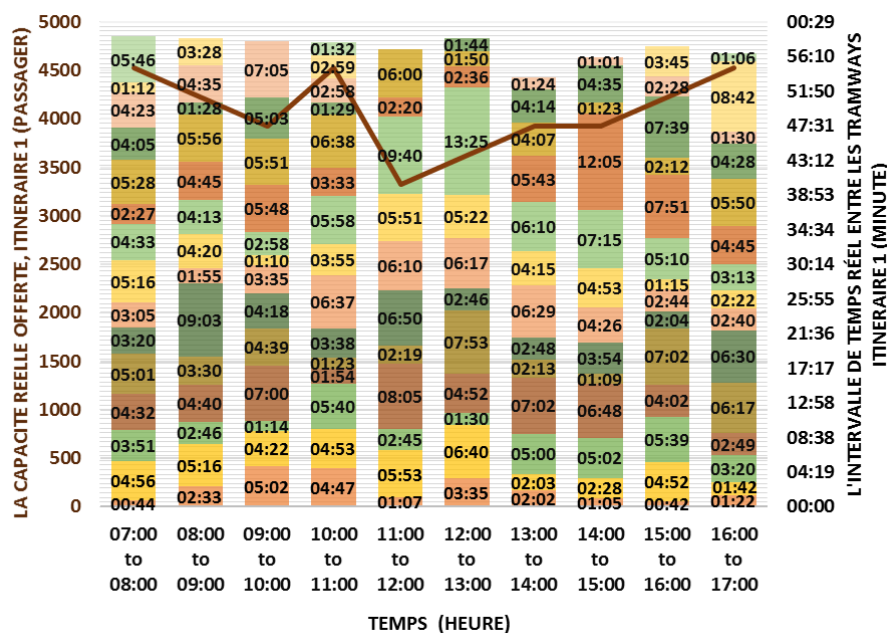


Figure V.2. L'intervalle de temps réel et la capacité offerte dans la voie 1.

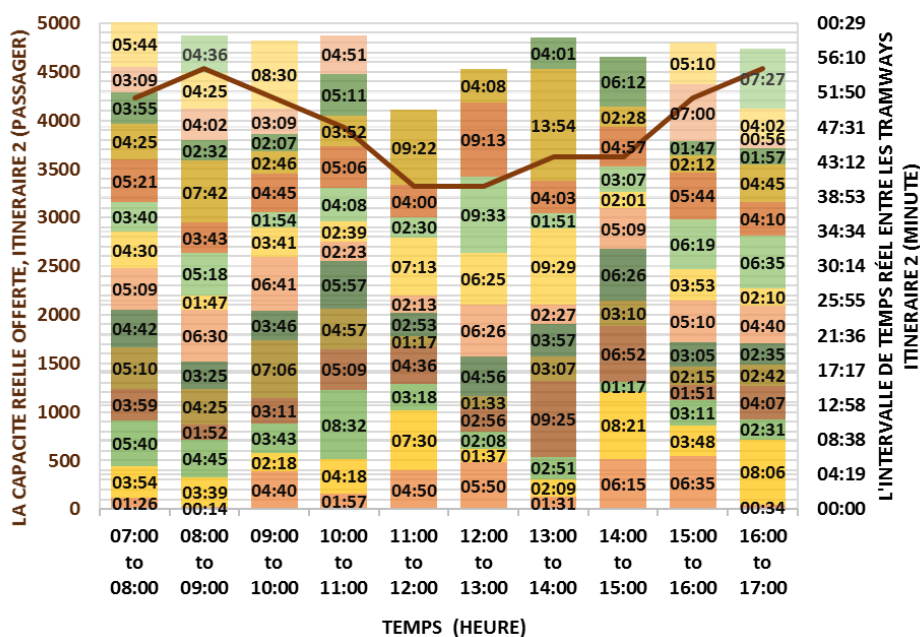


Figure V.3. L'intervalle de temps réel et la capacité offerte dans la voie 2.

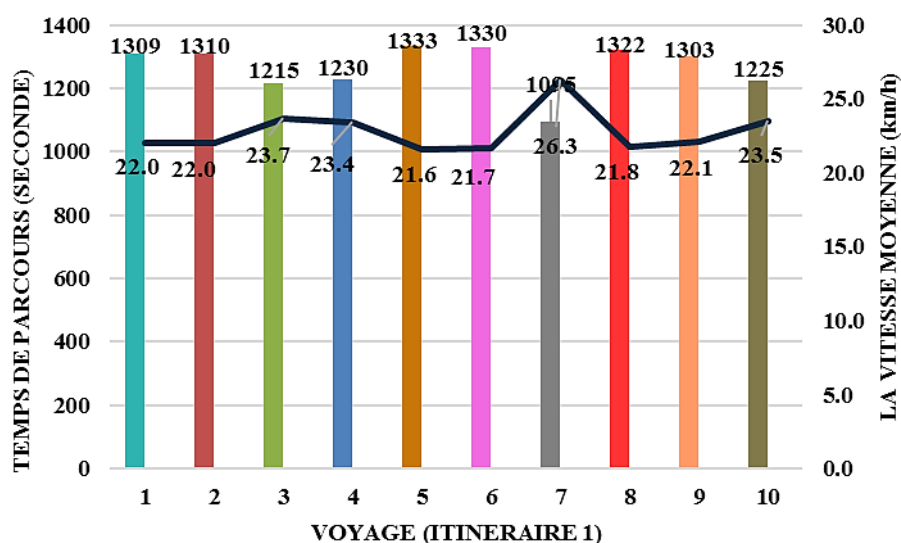




**Figure V.4.** Deux tramways qui se stationnent l'un derrière l'autre dans la station de l'Emir Abdelkader.

#### V.4.3 Le temps de parcours réel et la vitesse moyenne (incluant le temps de stationnement)

Les figures V.5 et V.6 représentent le temps de parcours et la vitesse moyenne dans les deux itinéraires. Nos observations montrent que ces deux indicateurs changent pour tous les tramways dans les deux voies. Donc les tramways ne respectent pas la vitesse moyenne et le temps de parcours théorique. Nous pouvons en déduire que la raison du non-respect de l'intervalle de temps entre les tramways est la différence du temps de parcours réalisé pour chaque conducteur. Cela nous conduit dans la prochaine section, à travers une analyse détaillée, à connaître les causes principales de ce problème, de savoir si c'est la variation de la vitesse qui provoque ce non-respect du temps de parcours, ou c'est le temps de stationnement aussi.



**Figure V.5.** Le temps de parcours réel et la vitesse moyenne du tramway de Constantine itinéraire 1.

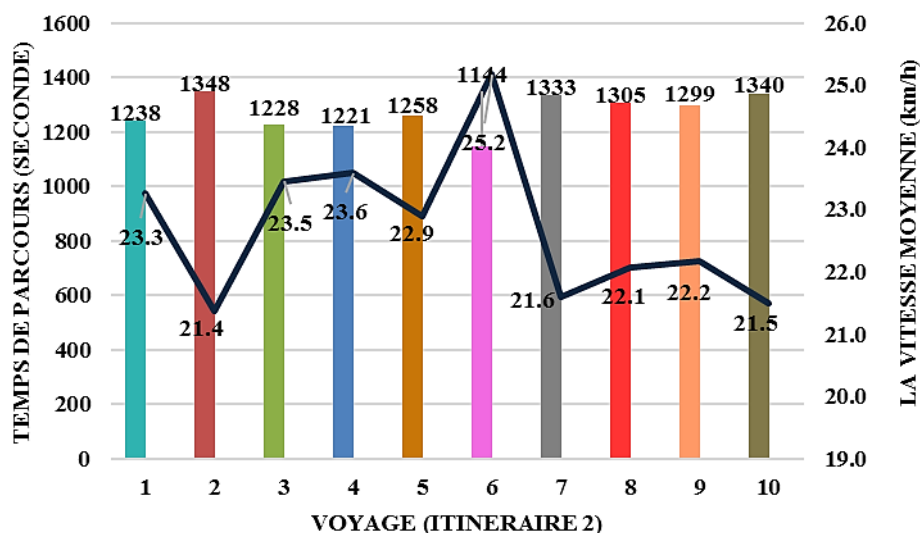


Figure V.6. Le temps de parcours réel et la vitesse moyenne du tramway de Constantine itinéraire 2.

#### V.4.3.1 Le temps de parcours réel et la vitesse moyenne réelle (sans le temps de stationnement)

La figure V.7 montre l'analyse de la vitesse moyenne et du temps de parcours des tramways pour la voie 1 et 2. Comme l'indique la figure ci-dessous, la valeur du temps de parcours global pour certains trams est inférieure à la valeur du temps de parcours total théorique et pour d'autres, elle la dépasse. Car il est clair que la vitesse moyenne n'est pas constante pour tous les trams et ne respecte pas la vitesse optimale présentée dans les tableaux II.10 et II.11 pour les deux sens. Cela nous a conduit à analyser chaque partie de la ligne de tramway et à trouver les sections dans lesquelles les tramways présentent une grande variation par rapport aux valeurs théoriques. Aussi, nous avons pu observer que l'une des principales causes de la non-régularité des temps de parcours des tramways est la différence du temps de parcours et de la vitesse moyenne de chaque tram.

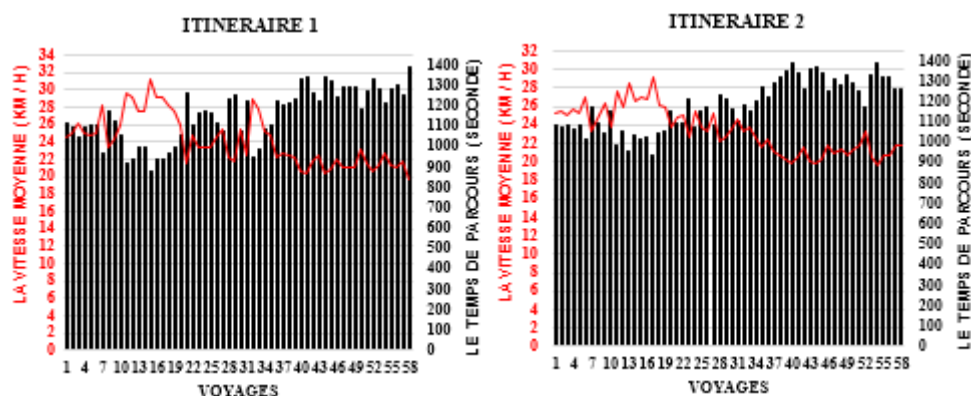
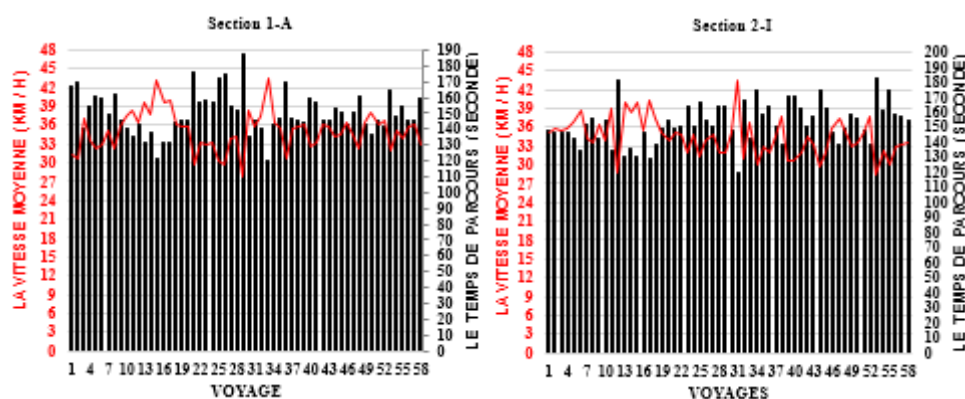


Figure V.7. Analyse de la vitesse moyenne des tramways et du temps de parcours total pour la voie 1 et la voie 2.

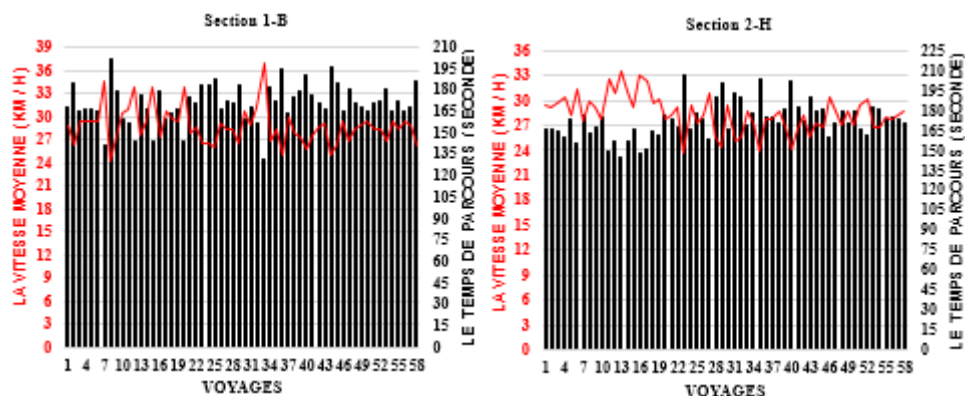
### V.4.3.2 Analyse de la vitesse moyenne et du temps de parcours des tramways dans chaque section du tracé

Dans les figures ci-dessous, chaque partie de la ligne du tramway a été analysé. Les résultats montrent que la vitesse moyenne appliquée par chaque conducteur n'est pas constante pour tous les trams, ce qui a engendré un impact sur le respect des temps de parcours optimaux. Dans la figure V.8, le graphique de la section 1-A représente la vitesse moyenne du tramway en fonction du temps de parcours de la station de base de Zouaghi Slimane à la station de Khaznadar, voie 1. Ainsi que le graphique de la section 2-I présente la vitesse moyenne du tramway en fonction du temps de parcours à partir de la station de Khaznadar à la station de base de Zouaghi de la voie 2. Nous remarquons que le temps de parcours obtenu à partir des résultats analytiques est différent du temps de parcours théorique pour ces deux sections qui sont respectivement (164.09 secondes) pour la section 1-A, et (169.08 secondes) pour la section 2-I. Nous constatons que le temps de parcours réel est supérieur avec une valeur entre 42-49 secondes pour les deux sections.



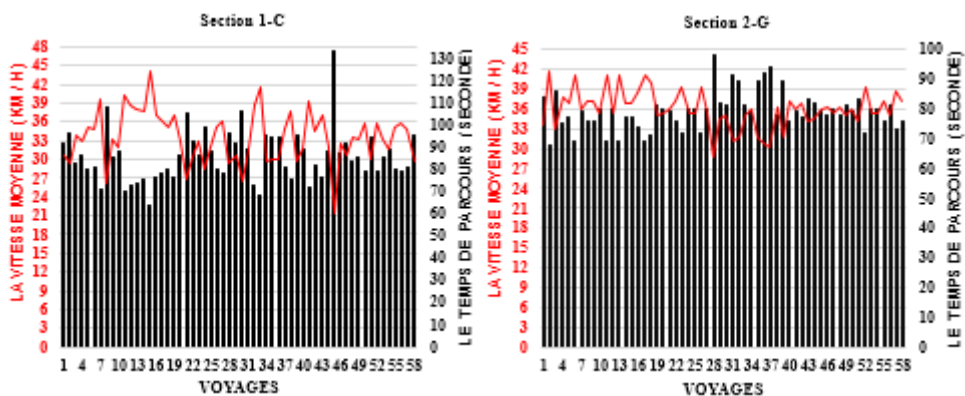
**Figure V.8.** Analyse de la vitesse moyenne des tramways et du temps de parcours pour les sections 1-A et 2-I.

Dans la figure V.9, la section 1-B illustre la vitesse moyenne du tramway en fonction du temps de parcours de la station de base de Khaznadar à la station de base de la résidence universitaire du chemin 1, alors que le graphique de la section 2-H représente la vitesse moyenne du tramway en fonction du temps de parcours de la base de résidence universitaire jusqu'à la station de Khaznadar du chemin 2. Comme dans les figures précédentes, la valeur du temps de parcours est différente de la valeur du temps de parcours théorique présenté dans le chapitre II. La différence entre le temps de parcours théorique et réel pour cette section atteint 60 secondes pour le premier itinéraire et 67 secondes pour la deuxième direction.



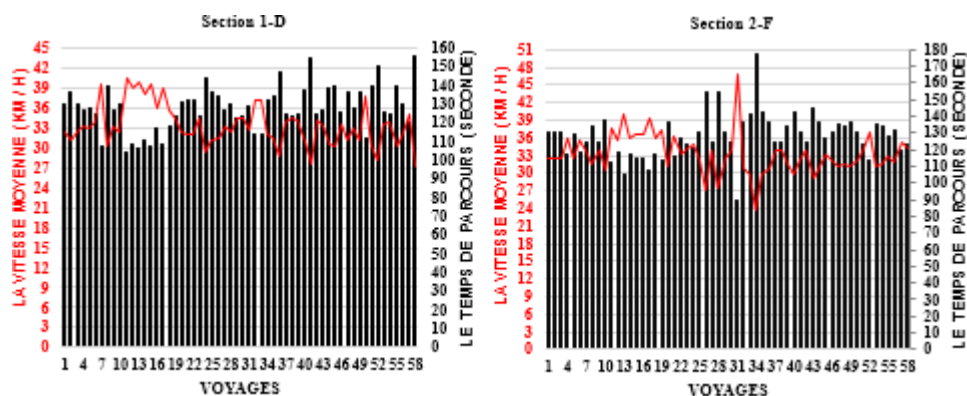
**Figure V.9.** Analyse de la vitesse moyenne des tramways et du temps de parcours pour les sections 1-B et 2-H.

Dans la figure V.10, le graphique de la section 1-C illustre la vitesse moyenne du tramway en fonction du temps de parcours à partir de la station résidence universitaire à la station université de Mentouri Constantine 1, itinéraire 1. Ainsi que le graphique de la section 2-G représente la vitesse moyenne du tramway en fonction du temps de parcours, cette section commence à partir de la station université Mentouri Constantine 1, jusqu'à la station de la résidence universitaire dans l'itinéraire 2. L'écart entre les temps de parcours réels et théoriques a atteint 68 secondes pour la section 1-C et 30 secondes pour la section 2-G.



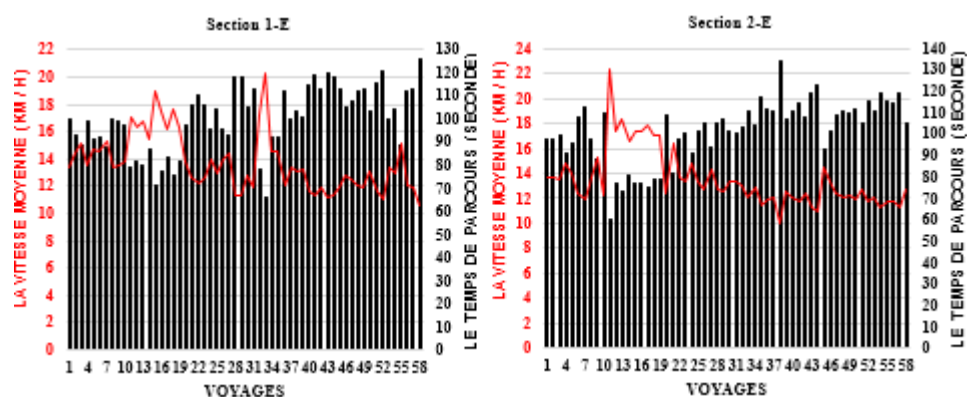
**Figure V.10.** Analyse de la vitesse moyenne des tramways et du temps de parcours pour les sections 1-C et 2-G.

La section 1-D dans la figure V. 11 représente la vitesse moyenne du tramway en fonction du temps de parcours de la station de base de l'Université de Mentouri Constantine 1 à la station de base de ZI Rhumel de l'itinéraire 1, tandis que le graphique de la section 2-F présente la vitesse moyenne du tramway en fonction du temps de parcours de la station de base de ZI Rhumel à la station de base de l'Université de Mentouri Constantine1 du trajet 2. Pour la section 1-D, l'écart entre le temps de parcours théorique et réel atteint 41 secondes, or dans la section 2-F, ce temps a atteint 63 secondes.



**Figure V.11.** Analyse de la vitesse moyenne des tramways et du temps de parcours pour les sections 1-D et 2-F.

La figure V.12 (section 1-E) représente la vitesse moyenne du tramway en fonction du temps de parcours de la station de ZI Rhumel à la station de base de Fadhila Saadane de l’itinéraire 1. Alors que le graphique (section 2-E) montre la vitesse moyenne du tramway en fonction du temps de parcours à partir de la station de base de Fadhila Saadane, jusqu’à la station de base de ZI Rhumel de la direction 2. Les deux graphiques indiquent clairement que le temps de parcours n’est pas le même pour tous les trams. L’écart entre les temps de parcours réels et théoriques a atteint 61 secondes pour la section 1-E et 69 secondes pour la section 2-E.

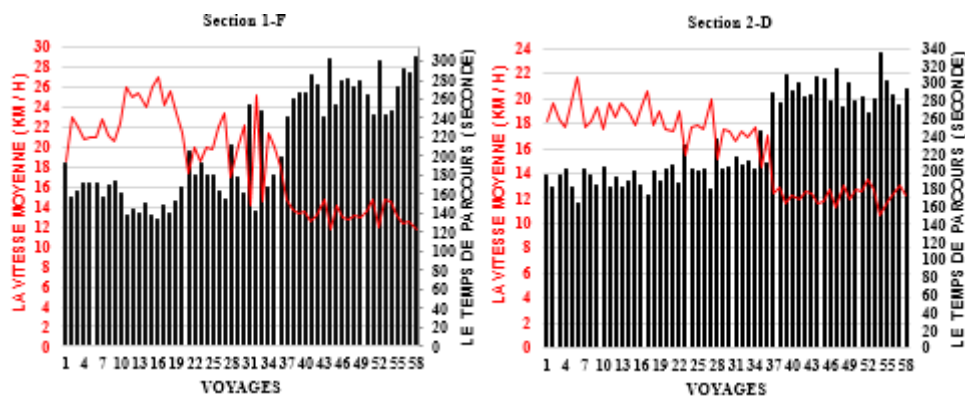


**Figure V.12.** Analyse de la vitesse moyenne des tramways et du temps de parcours pour les sections 1-E et 2-E.

La figure V.13 (section 1-F) indique la vitesse moyenne du tramway en fonction du temps de parcours de la station Fadhila Saadane à la station Mosquée de l’Emir Abdelkader, itinéraire 1. Tandis que le graphique de la section 2-D révèle la vitesse moyenne du tramway en fonction du temps de parcours de la station de base de la Mosquée de l’Emir Abdelkader à la station de base de Fadhila Saadane, itinéraire 2. Le temps de parcours réel dans cette

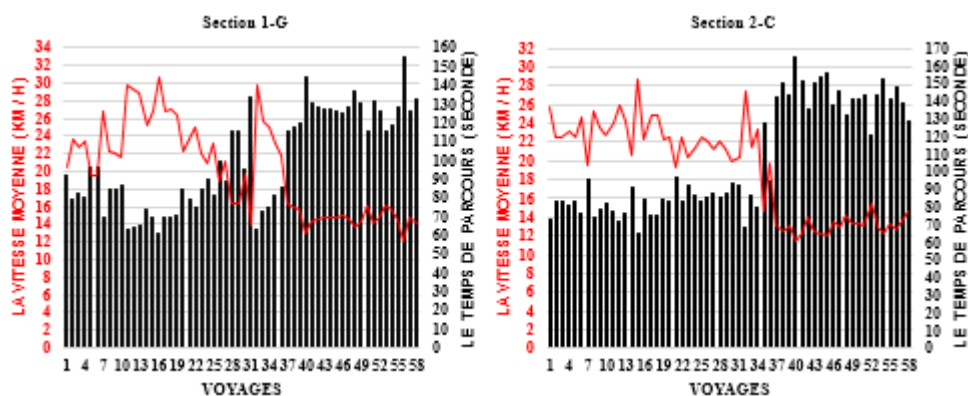
section n'est pas le même qui a été présenté dans la partie performance théorique dans les tableaux II.10 et II.11.

La différence entre eux a atteint 109 secondes pour la section 1-F et 84 secondes pour la section 2-D. Les 22 dernières mesures pour cette section ont été faites lorsque le rail de cette partie était en maintenance. De plus, nous avons constaté que le temps de parcours n'est pas constant.



**Figure V.13.** Analyse de la vitesse moyenne des tramways et du temps de parcours pour les sections 1-F et 2-D.

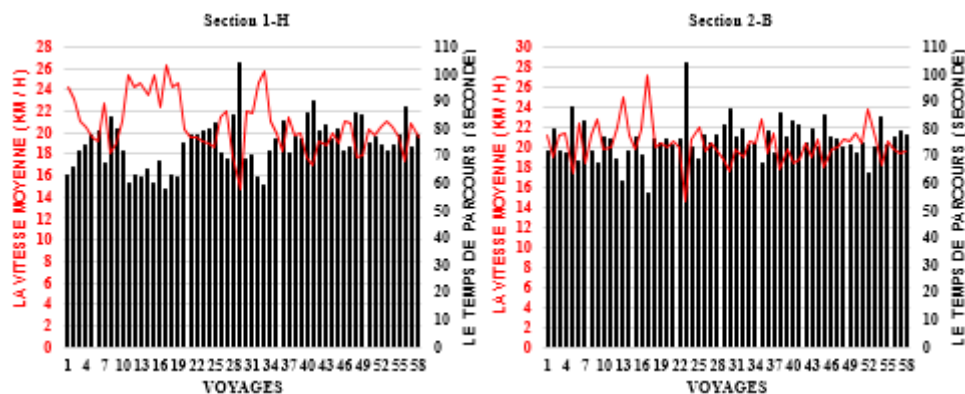
La figure V.14 (section 1-G) illustre la vitesse moyenne du tramway en fonction du temps de parcours de la station Mosquée Émir Abdelkader à la station Kadour Boumedous, direction 1. Alors que le graphique de la section 2-C montre la vitesse moyenne du tramway en fonction du temps de parcours de la station Kadour Boumedous à la station Mosquée Émir Abdelkader, direction 2. La valeur du temps de parcours théorique et réel est différente, l'écart entre eux a atteint 51-91 secondes pour le premier et entre 64 - 101 secondes pour le second.



**Figure V.14.** Analyse de la vitesse moyenne des tramways et du temps de parcours pour les sections 1-G et 2-C.

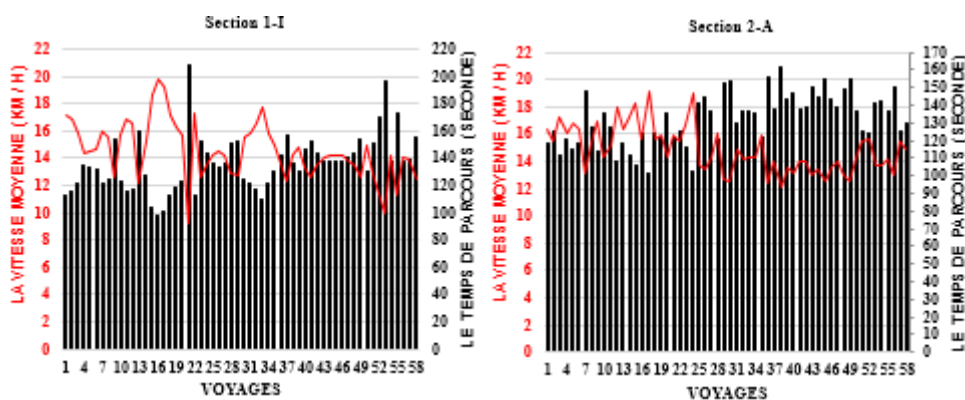


La figure V.15 (section 1-H) présente la vitesse moyenne du tramway en fonction du temps de parcours à partir de la station Kadour Boumedous à la station Bellevue, itinéraire 1. Egalement, le graphique de la section 2-A montre la vitesse moyenne du tramway en fonction du temps de parcours de la station Bellevue à la station de Kadour Boumedous de l'itinéraire 2. Les valeurs des temps de parcours réels sont différentes de celles définies théoriquement. La différence entre les deux est de 23-44 secondes pour la première direction et de 26-45 secondes pour la deuxième.



**Figure V.15.** Analyse de la vitesse moyenne des tramways et du temps de parcours pour les sections 1-H et 2-B.

La figure V.16 (section 1-I) illustre la vitesse moyenne du tramway en fonction du temps de parcours de la station Belle vue à la station Ben Abdel Malek (centre-ville), direction 1. Le graphique de la section 2-A représente la vitesse moyenne du tramway en fonction du temps de parcours à partir de la station de base Ben Abdel Malek (centre-ville) à la station Bellevue, direction 2. L'écart entre les temps de parcours théorique et réel pour ces dernières sections a atteint 70 à 119 secondes pour la section 1-I, et 67 secondes pour la section 2-A.



**Figure V.16.** Analyse de la vitesse moyenne des tramways et du temps de parcours pour les sections 1-I et 2-A.

### V.4.3.3 Le temps d'arrêt aux stations

Les résultats des figures V.17 et V.18, montrent que le temps d'arrêt total des deux itinéraires n'est pas respecté. La plupart du temps, il est plus ou moins 240 secondes. Nous remarquons sur la figure V.17 que le tram est en avance avec une différence de 116 secondes, ce qui signifie qu'il est en avance presque de 2 minutes. Ainsi que toutes les valeurs sont moins de 240 secondes. De plus, sur la figure V. 18, nous observons que la mise à part des deux tramways qui sont en retard, le reste sont en avance. Aussi, l'un des tramways dans cet itinéraire est en avance avec 109 secondes. Donc il se peut qu'aucun tramway n'ait respecté les 30 secondes du temps d'arrêt dans chaque station. Alors le non-respect du temps de parcours est non seulement causé par la vitesse moyenne qui varie d'un tram à l'autre, mais encore par le temps d'arrêt aux stations qui n'est pas respecté.

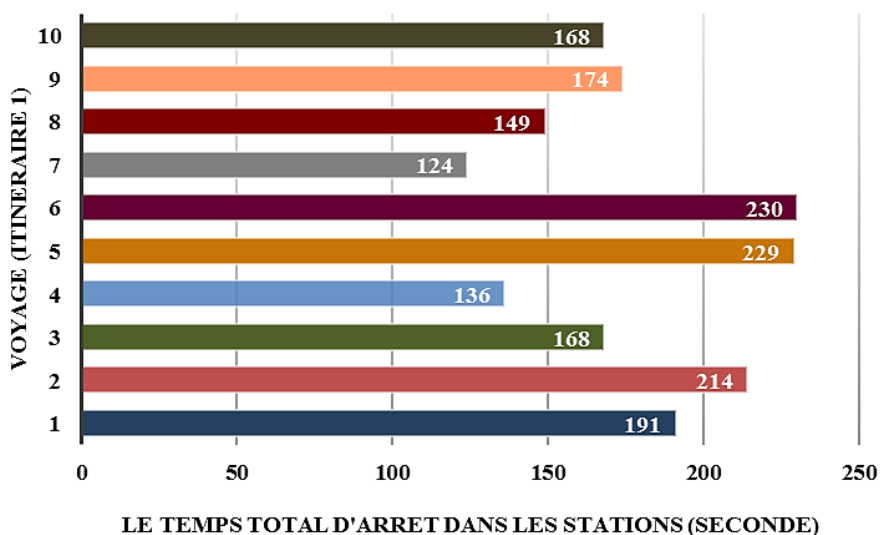


Figure V.17. Le temps d'arrêt total dans les stations, Itinéraire 1.

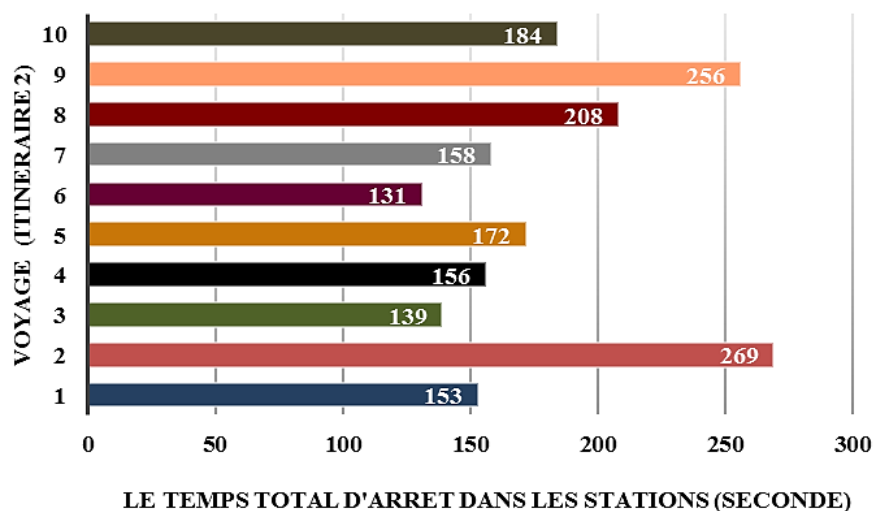


Figure V.18. Le temps d'arrêt total dans les stations, Itinéraire 2.



Les données des figures V.19 et V.20 montrent que sur 160 valeurs du temps d'attente mesuré à plusieurs stations dans les deux sens, seuls quelques trams respectent les 30 secondes de stationnement. Le plus souvent, le temps d'attente dans chaque station est inférieur ou supérieur à 30 secondes. Dans ce résultat, nous constatons que le temps d'attente est l'une des principales causes du non-respect de l'intervalle de temps entre les tramways.

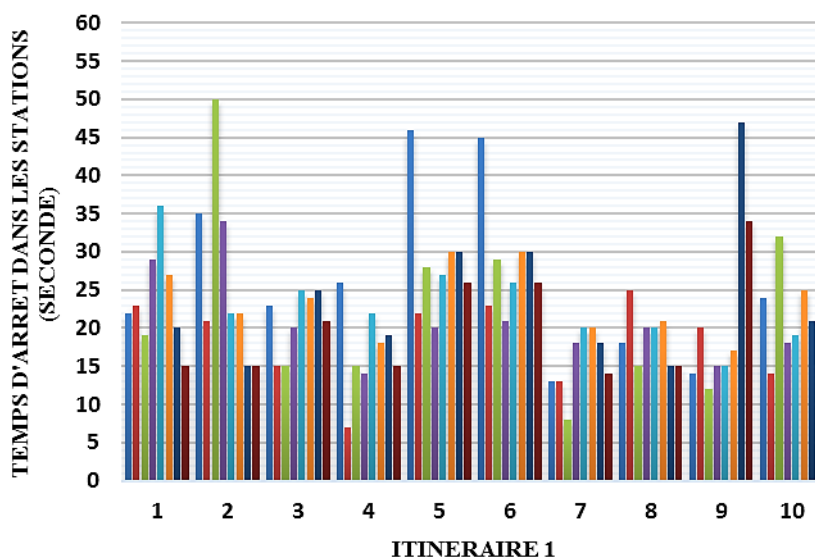


Figure V.19. Le temps d'arrêt des tramways dans les stations, voie 1.

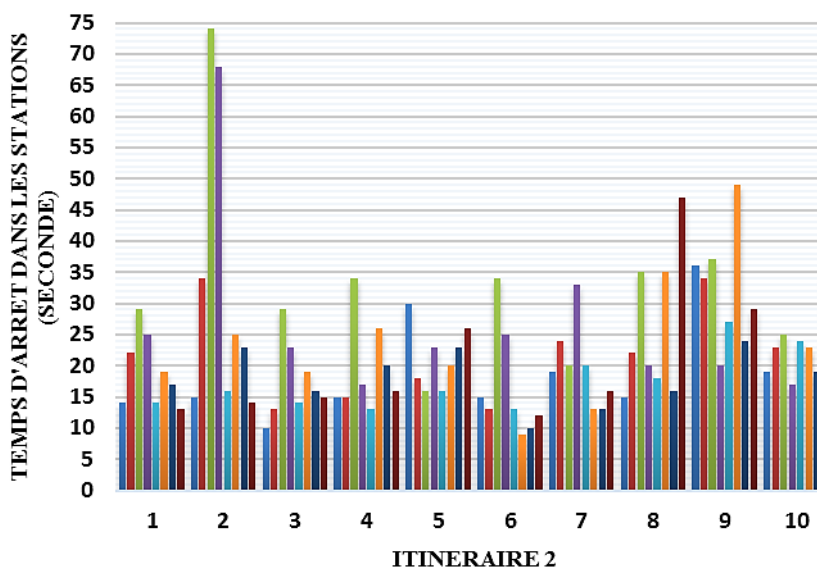


Figure V.20. Le temps d'arrêt des tramways dans les stations, voie 2.

#### **V.4.4 L'intervalle optimal de temps de parcours et le gain de temps pour les usagers de la route aux intersections**

Dans le tableau 1, le nouveau temps d'intervalle est suggéré, ce qui vise à l'optimiser pour répondre à la demande réelle des passagers. D'autre part, ce nouvel horaire aura un effet positif sur la circulation routière dans les intersections, en raison de la diminution du nombre de tramways et de l'augmentation du temps du feu vert des usagers de la route. Par conséquent, le délai pour les automobilistes aux feux de circulation sera réduit. Le temps vert gagné à l'heure de pointe, dans la situation théorique, a dépassé les 33.20 minutes (2000 secondes) et 18.40 minutes (1120 secondes) par rapport à l'opération réelle. Les trams mettent 40 secondes pour passer par l'intersection commune.

Les résultats calculés dans le tableau 1 sont issus des équations ci-dessous :

$$N_T = \frac{P_T}{C_T} \quad (V.1)$$

Capacité du tramway dans les situations de confort = 302 passagers/ tram, la charge maximale : 414/ tram. Les données sont calculées dans des situations de confort.

$N_T$  = nombre de trams par heure.

$P_T$  = la demande réelle des passagers par heure.

$C_T$  = la capacité du tramway en situation de confort.

$$T_{\text{int}} = \frac{t}{N_T} \quad (V.2)$$

$T_{\text{int}}$  = l'intervalle de temps optimal par heure

$t$  = temps (3600 secondes)

Le temps vert dont bénéficient les automobilistes est calculé selon la formule suivante :

$$B_{GT} = (N - N_T) * T_p \text{ (secondes)} \quad (V.3)$$

$N$  = le nombre théorique de tramways, ou le nombre réel de tramways calculé à partir de la figure V.2 et V.3 (associé au temps d'intervalle réelle des tramways)

$T_p$  = le temps nécessaire pour que le tramway traverse l'intersection.

Par exemple, pour un intervalle de 8 minutes, le nombre de trams en deux heures pour deux directions est de 30 trams. Le temps vert dont bénéficient les automobilistes aux

carrefours (associé à l'horaire théorique et aux passages réels des tramways) est de 30 minutes:

$$B_{GT(07-00\text{to}09-00)} = (80 - 30) * 40 = 2000 \text{ secondes}$$

$$B_{GT(07-00\text{to}09-00)} = (58 - 30) * 40 = 1120 \text{ secondes}$$

Notons que l'intervalle de temps sera plus efficace, si le temps d'attente aux stations, le temps de parcours et la vitesse des tramways seront respectés.

Jours ouvrables	Le nouvel intervalle de temps suggéré pour le tramway de Constantine (minutes)	Le temps vert que bénéficient les automobilistes aux intersections. (associé aux horaires théoriques)	Le temps vert que bénéficient les automobilistes aux intersections (associé au temps de passage réel des tramways)
07:00 à 09:00	8	2000	1120
09:00 à 10:00	6	160	280
10:00 à 11:00	6	160	320
11:00 à 12:00	6	160	80
12:00 à 14:00	8	720	800
14:00 à 15:00	10	1120	600
15:00 à 16:00	10	1120	640
16:00 à 17:00	15	1280	880
17:00 à 18:00	15	1280	920

**Tableau V.1.** Le nouvel intervalle de temps suggéré pour le tramway et le temps vert dont bénéficient les usagers de l'intersection pour les jours de semaine.

## V.5. Conclusion

L'objectif de cette étude est d'évaluer et d'optimiser l'exploitation du tramway, en effectuant une mesure approfondie de ses différents indicateurs clés de performance. Ajoutant à cela le fait que la particularité de cette étude est de proposer un nouveau tableau horaire d'exploitation pour les jours ouvrables, ainsi que de montrer comment la performance du tramway peut influencer sur l'état de la circulation dans les intersections communes.

Cette étude a montré qu'il existe un écart important entre l'offre de tramways et la demande réelle. De plus, le temps d'attente dans les stations ne correspond pas à la durée théorique, et le temps de parcours du tramway varie d'un conducteur à l'autre en raison des

différentes vitesses moyennes appliquées sur l'ensemble du trajet. C'est pour ces raisons que le tramway ne respecte pas l'intervalle de temps et qu'il n'est pas régulier.

En outre, cette recherche révèle qu'avec une exploitation en tant que telle, la situation de congestion, surtout aux heures de pointe, s'aggraverait aux carrefours, en raison du passage de 40 tramways aux heures de pointes, ce qui équivaut à plus de 26 minutes de blocage pour les automobilistes qui traversent les lignes de tram. Aussi, l'heure d'étude a été choisie entre 7 :00 et 18 :00, parce que la congestion du trafic aux carrefours traversés par la ligne de tramway commence à 7 :30 et se résorbe à partir de 18 :00.

L'ensemble des résultats obtenus montre que le système d'aide à l'exploitation est mal géré, ce qui s'explique par le manque de régularité des tramways et le déséquilibre entre la capacité offerte et la demande horaire des passagers.

Des solutions multiples sont recommandées pour résoudre ces problèmes cruciaux. Le système intelligent de tramway doit être géré efficacement, afin d'assurer la régularité des trams, d'éviter les perturbations des intervalles de temps et de gérer de manière optimale les trams en fonction de la demande des passagers. Ce qui va aider à éviter l'arrivée des tramways les uns après les autres en même temps dans la même station.

Aussi, afin de pouvoir contrôler l'exploitation du tramway, un traitement statistique de tous les indicateurs clés de performance est nécessaire, à la fin de chaque journée, de chaque semaine, de chaque mois, de chaque saison et de chaque année pour pouvoir établir un tableau horaire optimal de l'exploitation.

De plus, le respect du temps d'intervalle entre les trams n'est possible que si le temps de trajet suggéré est respecté pour tous les trams. C'est pour cela que le temps d'attente du tram doit être fixé pour chaque station, aussi, le temps de parcours optimal et la vitesse moyenne optimale doivent être définis en fonction des performances réelles des conducteurs sur chaque tronçon de tramway. En outre, les superviseurs de la salle de contrôle centralisée doivent gérer efficacement le système intelligent pour communiquer en temps réel avec les conducteurs afin de maintenir la même distance entre tous les tramways.

De plus, l'intervalle entre les trams doit être augmenté afin de répondre de manière optimale à la demande réelle des passagers, ce qui permet d'organiser davantage les horaires

des trams. De plus, cela contribue à minimiser le temps d'attente des voitures aux carrefours signalisés, ce qui réduira la congestion dans ces derniers.

Finalement, ce chapitre peut contribuer à améliorer, de manière efficace, l'exploitation du tram, et à réduire les embouteillages dans d'autres intersections complexes traversées par la ligne de tram. Cette étude représente une contribution à notre prochain chapitre, qui portera sur la régulation du trafic dans les intersections complexes situées sur la ligne du tramway.

# **Chapitre VI**



---

*Chapitre VI Evaluation et optimisation de la régulation du trafic mixte.  
Cas d'étude : Intersection de Che Guevara.*

---

<b>VI.1 Introduction.....</b>	<b>104</b>
<b>VI.2 Problème de la congestion aux intersections situées sur la ligne du tramway .....</b>	<b>104</b>
<b>VI.3 Matériels et Méthodologie.....</b>	<b>106</b>
<b>VI.4 Résultats.....</b>	<b>107</b>
VI.4.1 L'analyse de l'enquête .....	107
VI.4.1.1 Les caractéristiques des répondants .....	107
VI.4.1.2 Le problème de la congestion du trafic .....	108
VI.4.2. L'évaluation de la régulation actuelle et la situation du trafic à l'intersection .....	109
VI.4.2.1L'évaluation de la régulation actuelle en heure de pointe la plus critique .....	110
VI.4.2.2 Comparaison entre la demande réelle du trafic et la capacité dans la journée la plus critique .....	111
VI.4.2.3L'optimisation de la régulation du trafic.....	113
<b>VI. 5 Conclusion .....</b>	<b>119</b>

## **VI.1 Introduction**

Dans le chapitre V, nous avons évalué et optimisé l'exploitation du tramway, cette dernière influe directement sur l'état de la congestion du trafic.

Dans ce chapitre, nous présenterons les résultats d'analyse de la situation de la circulation routière aux intersections traversées par la ligne de tramway, ainsi que d'évaluer et d'optimiser la régulation du trafic mixte. Nous allons connaître les causes de l'embouteillage dans le carrefour le plus critique qui se situe sur le tracé du tramway de Constantine. C'est pour cette raison que nous avons démarré notre travail de recherche, par connaître l'opinion des automobilistes qui utilisent constamment cet itinéraire, par rapport à la gestion du trafic mixte à la même intersection choisie. Ensuite, nous présenterons les résultats de la demande de trafic et la capacité de l'intersection, ces derniers ont été calculés à partir de la synchronisation réelle des feux de circulation à l'intersection étudiée.

Finalement, nous allons présenter le résultat de l'optimisation des feux de circulation en appliquant la méthode de « Webster ». Cette méthode est la plus connue pour calculer le cycle de feux fixes optimums et pour réduire le retard des usagers de la route dans les intersections. De plus, nous allons analyser le taux de fluidité du trafic, en comparant le cycle de feux actuel avec le nouveau cycle trouvé, en gardant l'ancien tableau d'intervalle de temps entre les tramways. Puis, en rapprochant le résultat trouvé de la combinaison du cycle de feux optimal avec le nouveau tableau horaire du tram qui était développé et présenté à la fin du chapitre V.

## **VI.2 Problème de la congestion aux intersections situées sur la ligne du tramway**

L'application du contrôle des feux de circulation aux intersections a principalement le même objectif que l'investissement dans les tramways ; parce que ces deux procédures visent à diminuer la congestion du trafic dans les villes. Certainement, la mise en place de feux de circulation pour contrôler les intersections communes est très importante, car ils organisent le trafic et réduisent le retard des conducteurs [206, 207]. Mais sans un contrôle efficace, ils deviennent une source de congestion [208, 209, 32] car lorsque la synchronisation des feux de circulation et la durée du cycle ne répondent pas efficacement à la demande, cela va augmenter le temps d'attente pour les usagers de la route aux intersections [210, 211].

En conséquence, le comportement des conducteurs va se dégrader, ce qui va avoir un impact négatif sur l'état de la circulation, ainsi de causer de probables accidents [212, 213]. Etant donné que, de diverses études antérieures ont montré que le changement de file sur une

route est une manœuvre dangereuse qui provoque souvent des accidents et aggrave la situation de saturation, en particulier dans les zones urbaines [214, 215, 216, 217, 218].

Par ailleurs, la haute fréquence de passage des tramways est devenue une source d'une énorme congestion dans les intersections communes, surtout dans les heures de pointe parce que comme de nombreux trams dans plusieurs pays du monde, les trams algériens ont la priorité par rapport aux autres usagers, ce qui va réduire le temps vert effectif pour ces derniers [219, 220, 221].

En outre, par rapport à d'autres travaux précédents, cette recherche ne se concentrera pas seulement sur le contrôle du trafic routier [58, 222, 223, 224, 225], mais elle vise à montrer l'effet des tableaux d'intervalles entre les tramways qui sont étudiés dans les chapitre II et V, sur l'état de circulation et de fluidité dans les intersections communes, ce qui va nous permettre de trouver la solution la plus optimale.

Enfin, plusieurs solutions issues de cette analyse expérimentale seront proposées, afin d'optimiser la gestion de l'infrastructure actuelle, et en exploitant les données réelles et sans ajout d'aucun autre outil technologique. Cela permettra de satisfaire tous les utilisateurs, soit les passagers du tramway par sa régularité, soit les autres usagers de la route en minimisant le retard aux intersections communes. La zone d'étude se trouve dans la ville de Constantine (Algérie), plus précisément dans une intersection complexe qui est située sur la ligne d'exploitation du tramway, en raison de la grande demande de trafic et de son emplacement stratégique qui mène aux différentes régions importantes de la ville (figure VI.1).

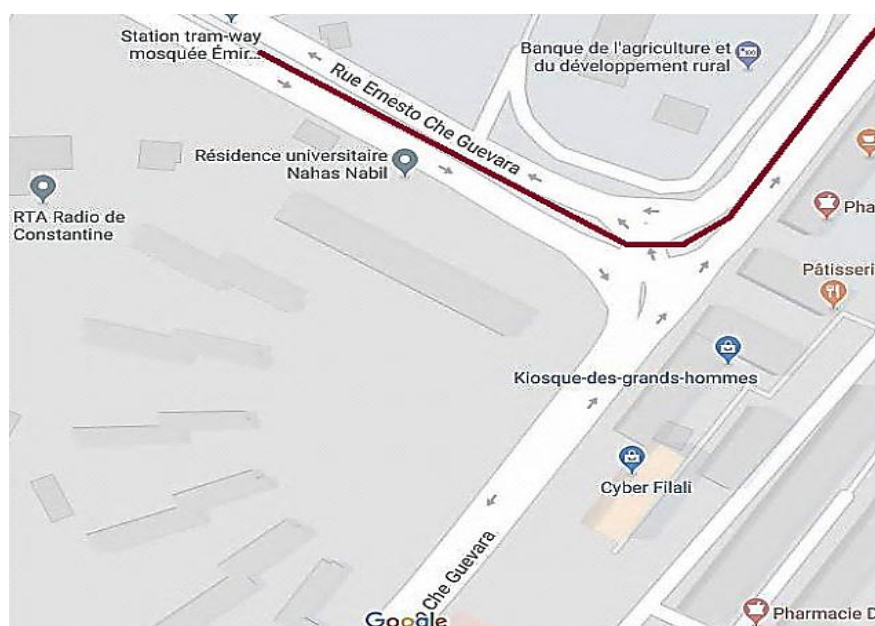


Figure VI. 1. Carte de l'intersection de Che Guevara, ville de Constantine, Algérie.



### VI.3 Matériels et Méthodologie

Jusque-là, nous avons évalué les différents indicateurs de performance du tramway, et montré leurs impacts sur la congestion du trafic, surtout sur l'état de circulation dans les intersections communes, nous arrivons maintenant à la dernière phase qui est l'évaluation et l'optimisation de la régulation du trafic mixte.

Dans la première étape de cette étude, 250 conducteurs qui passent par l'intersection de « Che Guevara » ont été interrogés en mois d'avril 2019 pour donner leurs avis sur la congestion. Ceci, afin de confirmer cette dernière et de connaître les principales causes de ce problème.

Dans la section suivante, après avoir connu l'avis des usagers par rapport à cette zone, nous allons présenter les données réelles recueillies à l'intersection, en effectuant un comptage des véhicules au cours de la première semaine du mois de mai 2018, dans les situations les plus critiques, pour connaître la demande du trafic routier.

Ainsi que pour connaître le cycle actuel des feux de circulation, les phases et le temps du feu vert effectif. Ces derniers ont été mis à jour plusieurs fois au cours de l'année 2019, afin de les confirmer. Ensuite, selon les données collectées précédemment, l'objectif est d'évaluer le flux de trafic à l'intersection, ceci par une comparaison de la capacité réelle de la route et des demandes de débit de trafic de chaque voie aux heures de pointe, dans les conditions les plus compliquées.

La méthode Webster est la plus couramment utilisée pour calculer le cycle de temps optimal fixe pour réduire le retard [226, 227, 228]. C'est pour cela que nous avons choisi cette méthode pour évaluer et connaître le temps de cycle optimal de l'intersection de Che Guevara.

Puis, nous avons combiné les deux résultats optimaux de l'intervalle du tramway et du cycle de temps pour obtenir les meilleurs résultats dans ce type d'intersection. Pour tester l'efficacité de notre solution, nous avons appliqué les conditions les plus critiques en utilisant la plus grande demande de trafic enregistrée dans chaque voie.

Le calcul de la capacité est basé sur un temps inter-véhiculaire de 2 secondes. Le temps moyen perdu par les conducteurs, lorsque le signal est vert ou lors du moment de décharge à l'intersection de Che Guevara est de 4 secondes par phase.

## VI.4 Résultats

### VI.4.1 L'analyse de l'enquête

#### VI.4.1.1 Les caractéristiques des répondants

La première partie de l'échantillon représente les caractéristiques des répondants, elle est composée de 68 % d'hommes et 32 % de femmes ; 83.60 % ont entre 18-36 et 37-55 ans. 66.40 % des automobilistes passent par cette zone pour rejoindre leurs travaux.

En outre, ce qui est remarquable sur le tableau ci-dessous, est que 66.40 % des conducteurs prennent cet itinéraire quotidiennement, ainsi que 15.20 % entre 3 et 4 fois par semaine. Cela prouve que les usagers sélectionnés connaissent bien cet endroit.

		Nombre de conducteurs	Pourcentage
Genre	Femme	80	32.00%
	Homme	170	68.00%
	Somme	250	100%
Age	18-36 ans	75	30.00%
	37-55 ans	134	53.60%
	56-75 ans	41	16.40%
	Somme	250	100%
Position	Étudiant	10	4.00%
	Travailleur	216	86.40%
	Retraité	17	6.80%
	Sans emploi	7	2.80%
	Somme	250	100%
La raison d'utilisation de l'itinéraire	École/Université	6	2.40%
	Emploi	166	66.40%
	Achats	40	16.00%
	Autres utilisations	38	15.20%
Somme	250	100%	
Fréquence de passage par l'intersection de Che Guevara	Tous les jours	166	66.40%
	3-4 utilisations par semaine	38	15.20%
	1 à 2 utilisations par semaine	13	5.20%
	De temps en temps	33	13.20%
Somme	250	100%	

**Tableau VI.1.** Les caractéristiques des répondants.

#### VI.4.1.2 Le problème de la congestion du trafic

Le tableau VI.2 présente le problème de la congestion du trafic et ses causes aux intersections, 87.60 % des personnes interrogées sont d'accord que la congestion dans les intersections leurs a toujours causé des retards et que personne ne l'a nié.

Selon les données de ce tableau, il apparaît que 45.20 % des conducteurs estiment que le temps minimum nécessaire pour traverser l'intersection entre 7 h 30 et 18 h est de 16 minutes, 32.40 % disent 11-15 minutes et 22.40 % des conducteurs estiment qu'il est de 5-10 minutes.

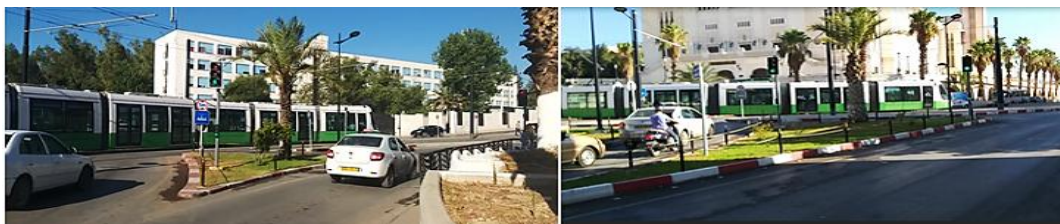
La principale cause de ce problème à l'intersection de Che Guevara est l'exploitation du tramway, 63.60 % des automobilistes affirment que le tramway de Constantine n'est pas bien utilisé et que son passage n'est pas régulier à l'intersection. Ce dernier est l'une des causes de la congestion du trafic. En outre, la synchronisation des feux de circulation est également une cause de ce souci, la synchronisation des signaux et les phases ne sont pas optimales et ne sont pas cohérentes avec le fonctionnement du tram.

		Nombre de conducteurs	Pourcentage
Le retard causé par la congestion du trafic	Toujours	219	87.60%
	Quelquefois	31	12.40%
	Jamais	0	0.00%
	Somme	250	100%
Le temps nécessaire pour traverser l'intersection aux heures de pointe (minutes)	5- 10	56	22.40%
	11- 15	81	32.40%
	16-20	67	26.80%
	21-25	22	8.80%
	26-30	24	9.60%
	Somme	250	100%
L'exploitation du tramway provoque de la congestion à l'intersection	Toujours	159	63.60%
	Quelquefois	51	20.40%
	Jamais	40	16.00%
	Somme	250	100%
la synchronisation des feux de circulation est une cause de la congestion à l'intersection	Toujours	179	71.60%
	Quelquefois	42	16.80%
	Jamais	29	11.60%
	Somme	250	100%

**Tableau VI.2.** Problèmes et causes de congestion du trafic à l'intersection.

Enfin, 90 % des conducteurs ne sont pas satisfaits de la gestion actuelle du trafic mixte à l'intersection, ils trouvent que la gestion de ce dernier est mauvaise. Parfois, le tram passe par l'intersection et le signal de ceux qui traversent la ligne de tram est vert (Fig. 12), ce qui est dangereux.

Cette mauvaise gestion du système de contrôle des tramways a des conséquences négatives pour les conducteurs dans les intersections.

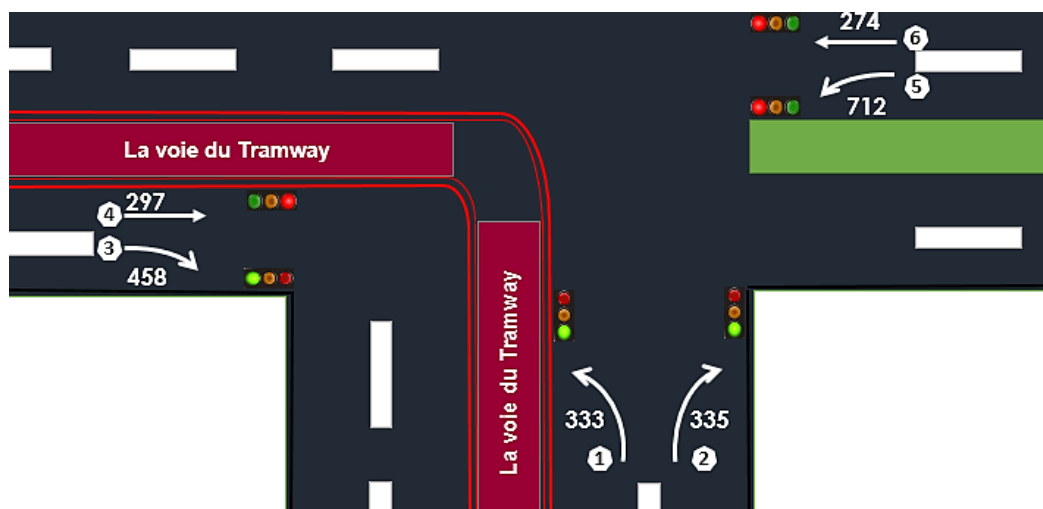


**Figure VI 2.** La perturbation de la synchronisation des feux de circulation (le feu vert lorsque le tramway passe pour ceux qui traversent la ligne de tramway).

#### VI.4.2. L'évaluation de la régulation actuelle et la situation du trafic à l'intersection

La figure VI.3 montre le schéma de l'intersection de Che Guevara. C'est une des intersections la plus critique située le long de la ligne de tram. La demande est très élevée par rapport à toutes les autres intersections, car elle relie la vieille ville à d'autres zones importantes, de plus, elle est localisée à proximité de l'université et d'une zone touristique.

Les valeurs du flux de trafic mentionnées dans cette intersection sont les valeurs les plus élevées enregistrées durant une semaine pour chaque voie. C'est à partir de ces valeurs que nous allons évaluer l'état actuel et calculer le nouveau cycle de feux.



**Figure VI.3.** La demande du trafic à l'intersection de Che Guevara en heure de pointe en unité de véhicule particulier par heure (uvp/h).

Le tram traverse les intersections 40 fois aux heures de pointe. 40 (sec) est le temps nécessaire au tramway pour passer à travers l'intersection de Che Guevara, ce qui donne 1600 secondes par heure pour le tramway et 2000 secondes par heure pour les usagers de la route à l'intersection. La durée du cycle à l'intersection de Che Guevara est de 100 secondes, et elle est divisée en 3 phases (tableau VI.3).

	Phase K	Phase L	Phase M
Les directions	1-2-3	4-6	5-6
La durée du feu vert effectif (secondes/ cycle)	30	30	40
La durée du feu vert effectif (Seconde/heure)	600	600	800

**Tableau VI.3.** Les données des phases réelles et de la synchronisation des feux dans l'intersection de Che Guevara.

#### VI.4.2.1L'évaluation de la régulation actuelle en heure de pointe la plus critique

Nous avons calculé la capacité réelle par heure en appliquant la règle de 2 secondes pour le temps inter-véhicules. Le temps moyen perdu par les conducteurs lorsque le signal est vert à l'intersection de Che Guevara est en moyenne de 4 secondes par phase.

Le tableau VI.4 montre que la capacité ne répond pas de manière optimale à la demande. Pour cela, il est nécessaire de trouver une solution à ce problème de congestion à l'intersection.

Voies	1	2	3	4	5	6
Le temps vert effectif (Seconde /cycle)	30	30	30	30	40	70
Le temps vert effectif par direction (Seconde/heure)	600	600	600	600	800	1400
Le temps vert effectif par direction sans temps perdu (Seconde/heure)	520	520	520	520	720	1240
La capacité réelle par heure (uvp/h)	260	260	260	260	360	620

**Tableau VI.4.** Les données du vert effectif réel et de la capacité par voie dans l'heure la plus critique.

VI.4.2.2 Comparaison entre la demande réelle du trafic et la capacité dans la journée la plus critique

À partir du comptage réalisé en jours ouvrables de 7 h à 18 h, ainsi qu'en utilisant les mêmes étapes et les conditions présentées précédemment, nous allons étudier l'état de la circulation durant la journée la plus critique de la semaine. Nous avons choisi ce créneau horaire parce que la congestion commence vers 7 h 15, puis l'intersection devient plus fluide vers 17 h 45. Les graphiques ci-dessous montrent clairement que les itinéraires 3 et 5 sont ceux qui enregistrent la plus grande demande. C'est pour cela que le cycle doit être optimal pour gérer cette demande en privilégiant ces deux voies. La figure VI.4 montre que la congestion existe sur l'itinéraire 1, surtout aux heures de pointe qui sont entre 7 h - 9 h et 16 h - 18 h. Le taux minimal de dissipation aux heures de pointe est entre 78.77 % le matin de 7 h à 8 h, ainsi que 78.02 % de 16 h à 17 h.

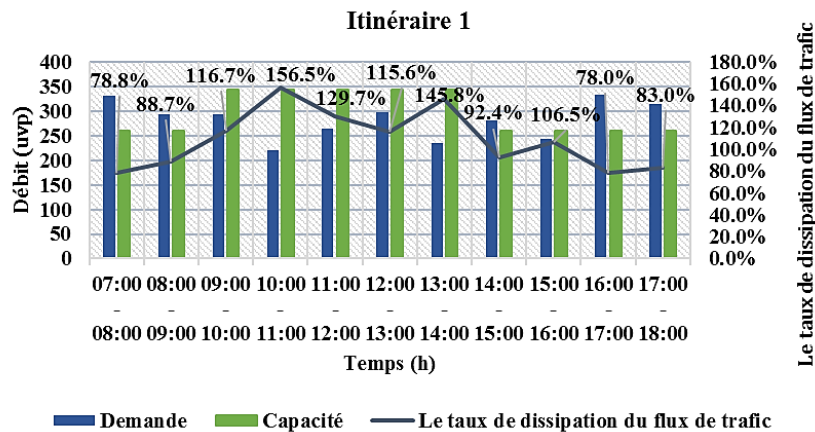


Figure VI.4. La demande de trafic et la capacité moyennes pour les itinéraires 1 par heure.

Dans la figure VI.5, la demande sur l'itinéraire 2 dépasse la capacité entre 16 h et 18. Les autres heures de la journée, le trafic s'écoule facilement.

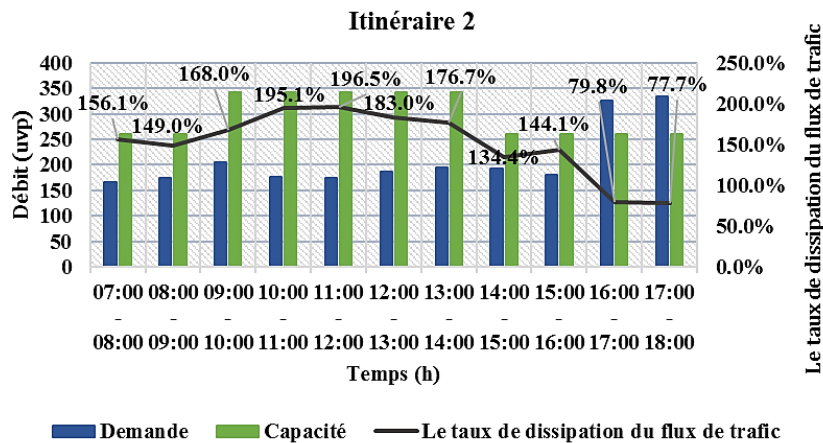
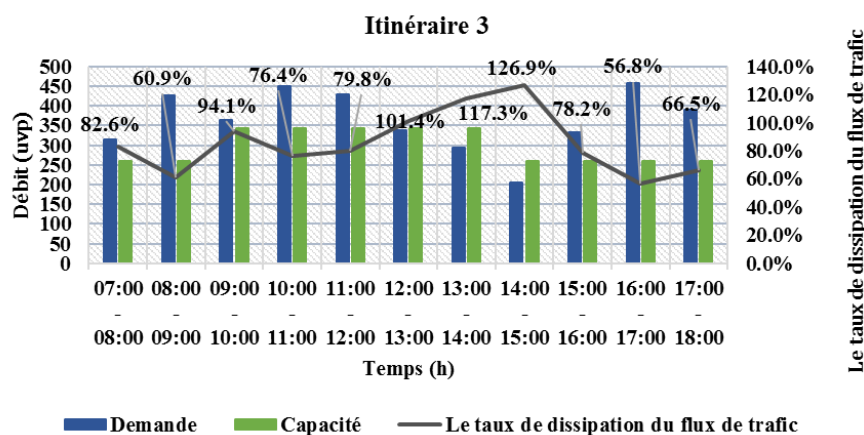


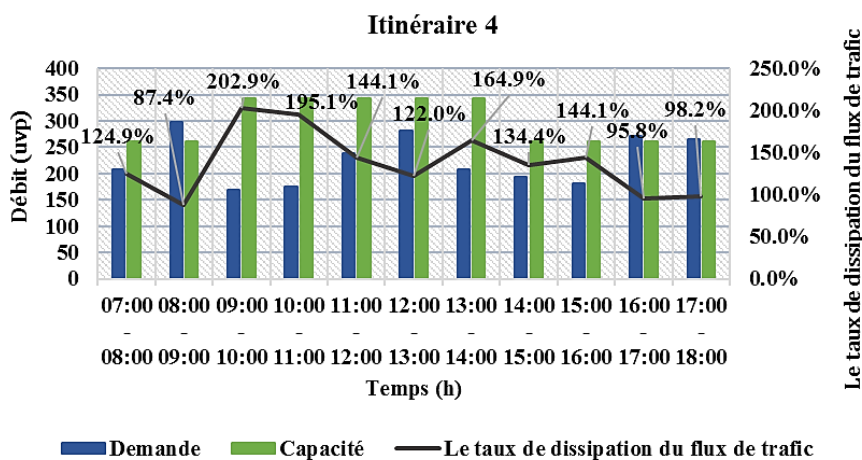
Figure VI.5. La demande de trafic et la capacité moyennes des itinéraires 2 par heure.

La figure VI.6 montre que dans l'itinéraire 3, la demande dépasse la capacité presque toute la journée, sauf entre 12 h et 15 h.



**Figure VI.6.** La demande de trafic et la capacité moyennes des itinéraires 3 par heure.

La figure VI.7 présente la demande de trafic et la capacité pour l'itinéraire 4. Dans ce dernier cas, la congestion n'existe pas pendant toute la journée, sauf entre 8 h et 9 h, lorsque la demande de trafic est supérieure à la capacité. Entre 16 h et 18 h, le taux de dissipation est acceptable, car la valeur se situe entre 95.79 % et 98.19 %.



**Figure VI.7.** La demande moyenne de trafic et la capacité des itinéraires 4 par heure.

La figure VI.8 illustre clairement la situation critique sur l'itinéraire 5, car il contient la demande la plus élevée par rapport à toutes les autres voies. Nous observons que la capacité est inférieure à la demande pendant presque toute la journée. Dans la situation la plus cruciale, le taux de dissipation est de 50.54 %.

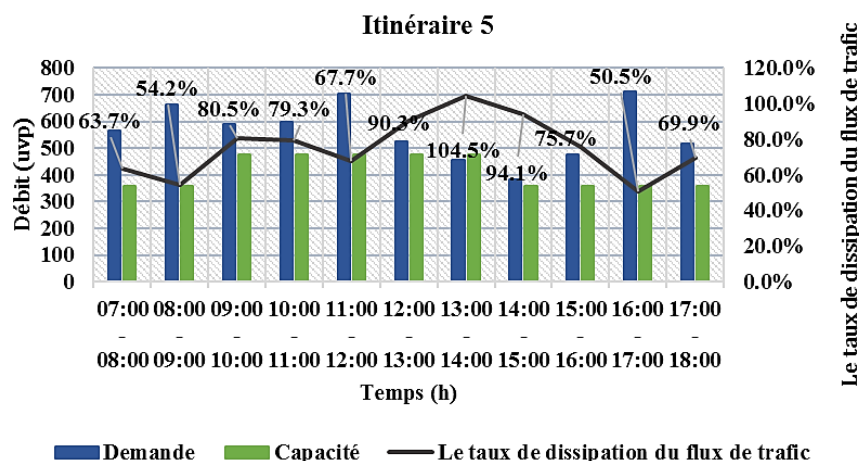


Figure VI.8. La demande moyenne de trafic et la capacité des itinéraires 5 par heure.

La figure VI.9 montre que sur l'itinéraire 6, la capacité dépasse largement la demande de trafic, de cette façon, le trafic est fluide. Le temps du feu vert attribué en deux phases consécutives pour cet itinéraire a permis d'avoir cette grande capacité de flux de trafic à tout moment de la journée de 7 h à 18 h.

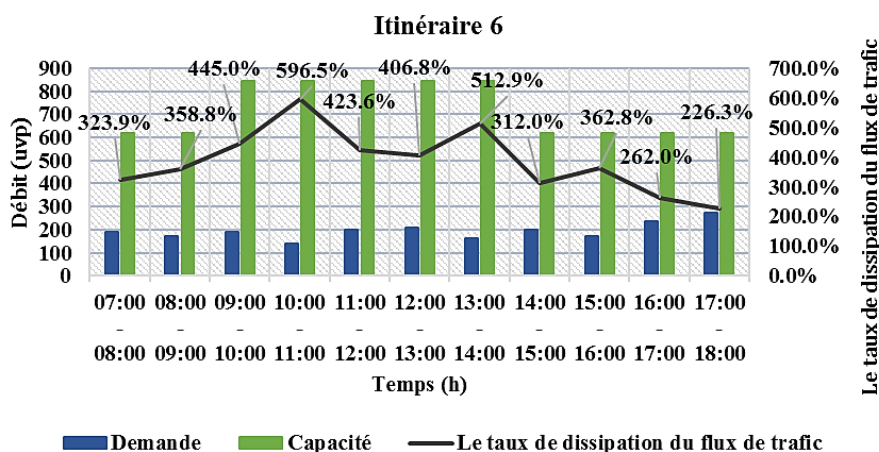


Figure VI.9. La demande moyenne de trafic et la capacité des itinéraires 6 par heure.

### VI.4.2.3 L'optimisation de la régulation du trafic

#### VI.4.2.3.1 Optimisation du cycle de feux par la méthode de Webster

Pour résoudre ce problème, nous proposons dans un premier temps d'appliquer la méthode 'Webster', pour calculer le cycle optimal.

Dans un deuxième temps, nous pouvons améliorer les phases avec un fonctionnement optimal du tram. En appliquant l'équation (I.17) présentée dans le chapitre 1, nous obtenons les résultats des ratios des flux présenté dans le tableau qui suit :



	Phase K			Phase L		Phase M	
Y <sub>i</sub>	Y1	Y2	Y3	Y4	Y6	Y5	Y6
Valeur	0.185	0.186	0.255	0.165	0.152	0.396	0.152

**Tableau VI.5.** Le résultat du ratio Y<sub>i</sub> pour toutes les voies.

Tout ceci nous donne :

$$\begin{aligned} \sum Y_i &= 0.255 + 0.165 + 0.396 \\ \sum Y_i &= 0.816 \end{aligned} \quad (VI.1)$$

À partir de l'équation (I.16) du chapitre 1, le temps total perdu L est calculé ci-dessous. Notons que R est égal à 0, ainsi qu'il y a 3 phases.

$$L = 4 \times 3 = 12 \text{ (sec)} \quad (VI.2)$$

En utilisant l'équation (I.15) présentée dans le chapitre 1, on obtient la longueur de cycle optimale :

$$C_{Opt} = \frac{(1.5 \times 12) + 5}{1 - 0.816} = 125 \text{ (sec)} \quad (VI.3)$$

Pour ce cas, nous avons donc choisi un cycle optimal de 125 (sec).

Le calcul du temps vert total on utilise la formule (VI.4) [44] :

$$G_{Tot} = C - L \quad (VI.4)$$

$$G_{Tot} = 125 - 12 = 113 \text{ (sec)} \quad (VI.5)$$

Ainsi, en utilisant les formules (VI.6) et (VI.7), nous calculons le temps vert réel pour les trois phases. De plus, le temps jaune est de 3 (sec) dans l'intersection [44].

$$G_{act.i} = G_{eff.i} + l_i - 3.0 \quad (VI.6)$$

$$G_{eff.i} = \frac{Y_i}{\sum Y_i} \times G_{Tot} \quad (VI.7)$$

	Phase K	Phase L	Phase M
Le temps vert réel	G <sub>act.K</sub>	G <sub>act.L</sub>	G <sub>act.M</sub>
Valeur (sec)	36	24	56

**Tableau VI.6.** Le temps vert réel par phase.

Le tableau VI.7 montre que la méthode Webster a amélioré la situation du trafic. Le flux de trafic total avec la méthode Webster est de 2120 uvp/h. Mais il est encore insuffisant pour résoudre ce problème de congestion dans toutes les voies.

Le tableau VI.7 montre que la méthode Webster a amélioré la situation du trafic. Le flux de trafic total avec la méthode Webster est de 2120 uvp/h. Mais il est encore insuffisant pour résoudre ce problème de congestion dans toutes les voies.

Voies	1	2	3	4	5	6
Le temps vert effectif (Seconde /cycle)	39	39	39	27	59	86
Le temps verte effective par direction (Seconde/heure)	624	624	624	432	944	1376
Le temps vert effectif par direction sans temps perdu (Seconde/heure)	560	560	560	368	880	1312
La capacité réelle par heure (uvp/h)	280	280	280	184	440	656

**Tableau VI.7.** Le temps vert effectif et la capacité utilisant la méthode Webster.

#### *VI.4.2.3.2 Optimisation du cycle par la méthode Webster et l'intervalle optimal entre tramway*

Dans l'évaluation de l'exploitation du tramway, plus exactement l'intervalle optimal de temps, il a été constaté dans le chapitre V que l'intervalle optimal est de 6 minutes en heures de pointe. C'est pourquoi nous appliquons dans le tableau VI.8 un nouveau temps d'intervalle des trams, soit 6 minutes. Le nombre de trams devient 20 trams par heure, au lieu de 40. Cela contribuera à donner plus de temps aux usagers de la route et à répondre de manière optimale à la demande des passagers.

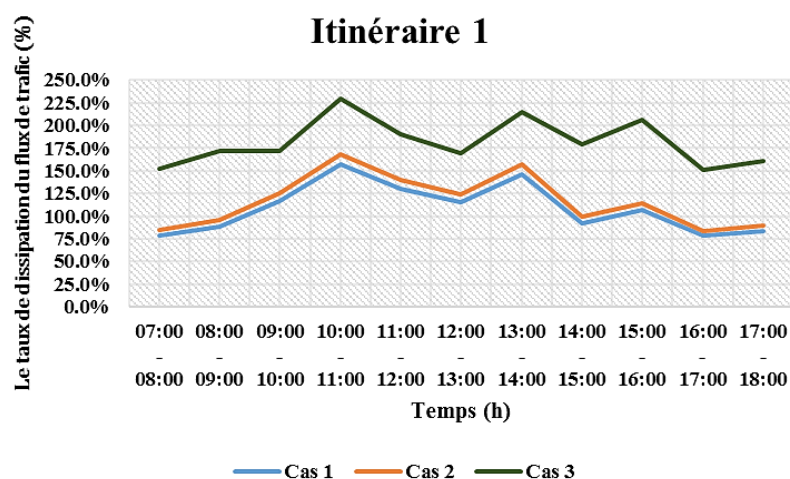
De plus, nous ajoutons une nouvelle phase lorsque le tram passe l'intersection en 40 secondes. Il est nécessaire d'utiliser à nouveau la phase K quand le tram traverse l'intersection, car ces voies sont parallèles à la voie de tram. Cette solution nous fournit les meilleurs résultats. Dans le tableau VI.8, la capacité augmente et dépasse la demande pour les voies 1, 2, 4 et 6. Les voies 4 et 5, doivent respectivement attendre 3 à 4 autres cycles, donc le temps est entre 6 et 8 minutes environ pour pouvoir dissiper tous les embouteillages.

Pour bien évaluer ces solutions, nous avons appliqué les résultats trouvés précédemment sur la journée la plus chargée de la semaine pour tous les itinéraires. Cela a pour objectif de connaître le taux de dissipation de la circulation à l'intersection dans les conditions les plus critiques, et de connaître l'efficacité des mesures proposées.

Voies	1	2	3	4	5	6
Le temps vert effectif (Seconde /cycle)	39	39	39	27	59	86
Le temps vert effectif par direction (Seconde/heure)	1123.2	1123.2	1123.2	604.8	1321.6	1926.4
Le temps vert effectif par direction sans temps perdu (Seconde/heure)	1008	1008	1008	515.2	1232	1747.2
La capacité réelle par heure (uvp/h)	504	504	504	258	616	874

**Tableau VI.8.** Le temps vert effectif et la capacité utilisant la méthode Webster et l'intervalle optimal de tramway.

Dans les figures ci-dessous, le cas 1 représente la dissipation du trafic initiale, le cas 2 est la dissipation du trafic après l'optimisation du cycle par la méthode de « Webster », et pour ce qui est du cas 3, il indique la dissipation du trafic après l'application du nouveau cycle optimum et de l'intervalle optimal du tramway que nous avons trouvé dans le tableau V.1. La figure VI.10 présente le taux de dissipation du flux de trafic pour l'itinéraire 1. Les résultats prouvent qu'en appliquant le nouveau cycle, la capacité routière s'est améliorée en passant de 78.8 % et 88.7 % aux heures de pointe du matin à 84.8 % et 95.5 %, ainsi que de 78 % et 83 % à 84 % et 89.3 % respectivement aux heures de pointe du soir. Cependant, l'application du cycle optimum et de l'intervalle optimale entre les tramways a montré plus d'efficacité, en offrant une capacité plus supérieure que les 100 %, cette dernière varie entre 151 % et 172 % dans les heures de pointe, ainsi qu'elle a atteint les 230 % en dehors des heures de pointes.



**Figure VI.10.** Le taux de dissipation du flux de trafic pour itinéraire 1.

La figure VI.11 montre le taux de dissipation du flux de trafic pour l'itinéraire 2. Nous remarquons que cette direction est fluide de 7 h du matin jusqu'à 16 h. Le cycle optimum a amélioré la capacité de la voie en passant de 79.8 % et 77.7 % à 86 % et 83.6 %, mais nous constatons que l'application du cycle et l'intervalle optimal ont augmenté la capacité qui est devenue entre 150.5 % et 154.7 % aux heures de pointe du soir.

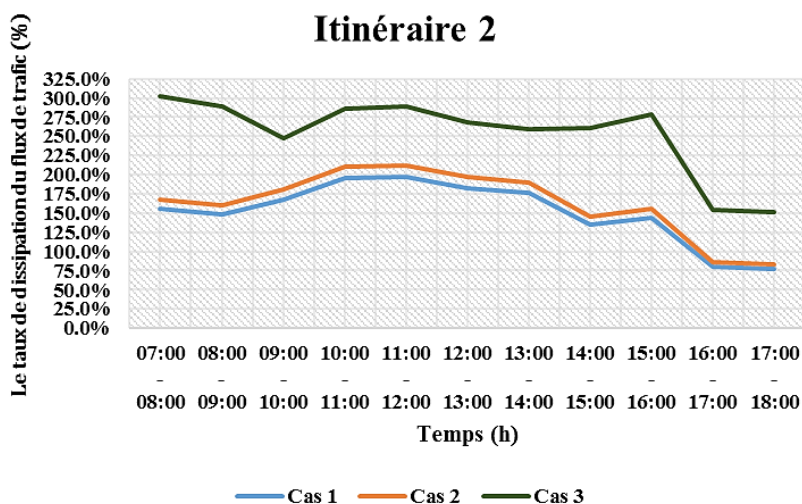


Figure VI.11. Le taux de dissipation du flux de trafic pour itinéraire 2.

La figure VI.12 présente le taux de dissipation du flux de trafic pour l'itinéraire 3. Nous observons que le nouveau cycle a changé en mieux la capacité, mais il reste insuffisant dans les heures de pointe entre 8 h et 9 h ; ce qui a connu un taux de fluidité de 65.5 %, ainsi qu'entre 16 h et 17 h avec un taux de 61.1 %. L'application de la combinaison entre le cycle optimal calculé et le nouveau tableau horaire du tramway, nous a donné une meilleure fluidité surtout dans les deux heures de pointe critiques, parce que le taux obtenu a atteint les 118% et 110%.

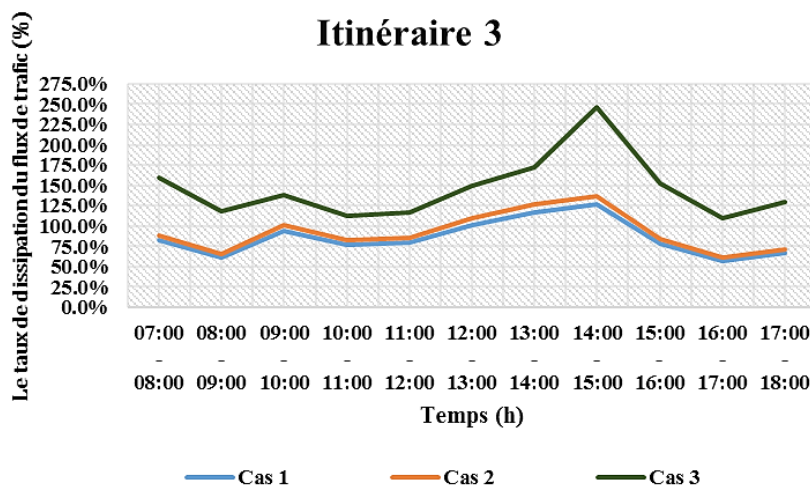


Figure VI.12. Le taux de dissipation du flux de trafic pour itinéraire 3.

La figure VI.13 indique le taux de dissipation du flux de trafic pour l'itinéraire 4. Ce dernier est le seul qui a enregistré moins de capacité lors de l'application du nouveau cycle calculé, surtout aux heures de pointe entre 8:00 et 9:00 ainsi qu'entre 16:00 et 18:00, qui ont connu des valeurs entre 61.9 %, 67.8 % et 69.5 %. Mais avec l'utilisation du cycle et l'intervalle optimal, le taux a atteint respectivement les 102%, 111 % et 114 % aux heures les plus congestionnées.

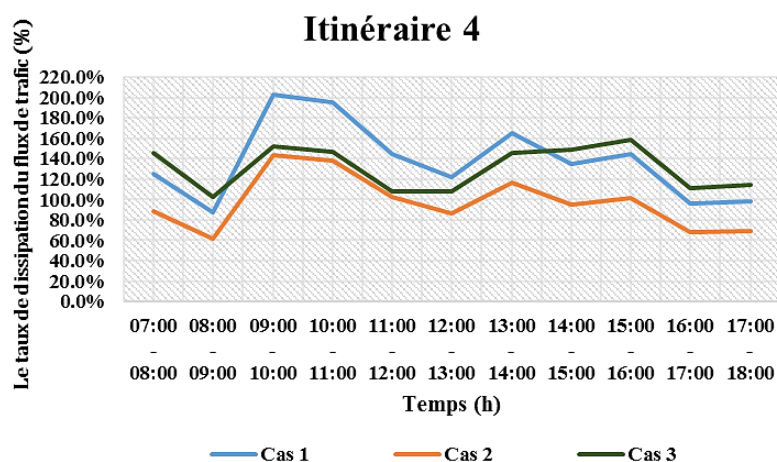


Figure VI.13. Le taux de dissipation du flux de trafic pour itinéraire 4.

La figure VI.14 représente le taux de dissipation du flux de trafic pour l'itinéraire 5. La demande du trafic de cette voie est la plus grande. Nous remarquons que le nouveau cycle a bien amélioré la capacité, mais il reste insuffisant pour les heures de pointe surtout entre 8 h - 9 h, ainsi qu'entre 16 h -17 h, qui ont enregistré respectivement un taux de 66.2 % et 61.8 %. Aussi, et après l'application de la combinaison entre le cycle optimal et le nouvel intervalle de temps, le taux de dissipation a atteint 99.3 % et 101 % dans les deux heures citées précédemment.

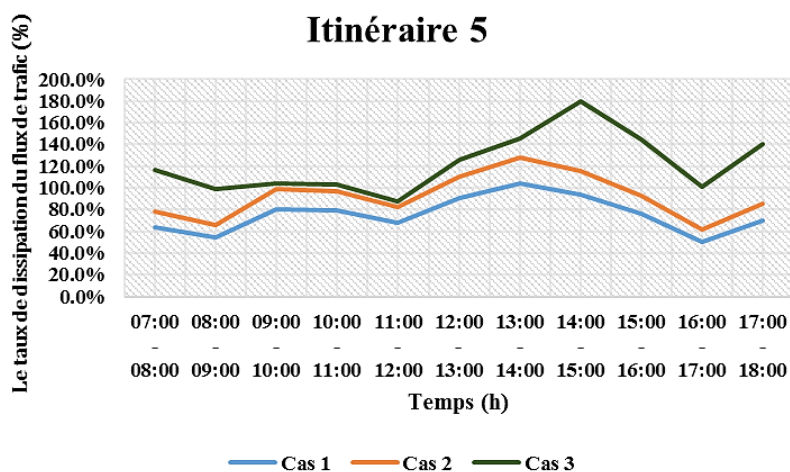


Figure VI.14. Le taux de dissipation du flux de trafic pour itinéraire 5.

La figure VI.15 représente le taux de dissipation du flux de trafic pour l'itinéraire 6. Notant que cette direction est dès le début fluide, mais dans les deux cas, nous observons que le cycle obtenu a augmenté un peu la capacité de la voie. De plus, après l'application du cycle et l'intervalle de temps optimaux la capacité a encore augmenté.

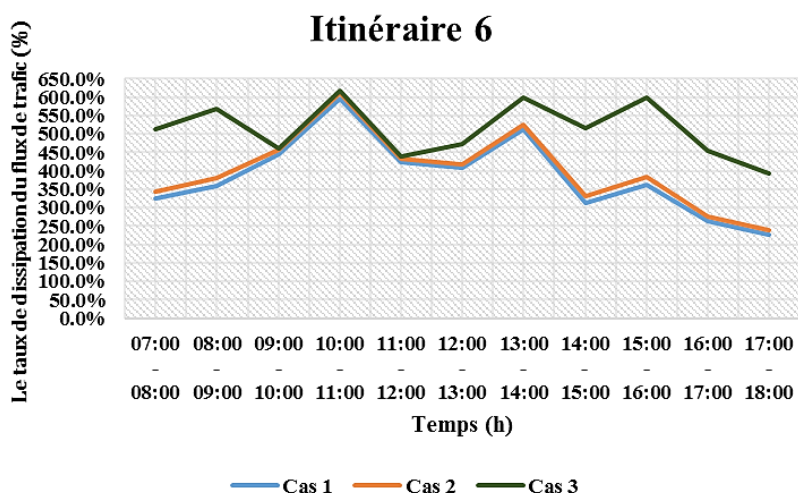


Figure VI.15. Le taux de dissipation du flux de trafic pour itinéraire 6.

## VI.5 Conclusion

La particularité de ce travail est d'évaluer et de connaître les causes réelles de la congestion dans les intersections complexes qui sont traversées par le tramway. Nous avons choisi l'intersection de Che Guevara, parce qu'elle se trouve dans une zone stratégique, ainsi qu'elle est l'intersection la plus complexe située sur la ligne du tramway, car il est impossible de modifier sa géométrie, en raison de plusieurs contraintes. Il était donc nécessaire de gérer de manière optimale l'infrastructure actuelle.

L'importance de cette étude aussi, est que le nouveau tableau horaire du tramway et le contrôle des feux de circulation optimaux sont appliqués en même temps, cela sans faire recours à un autre outil technologique qui aide à améliorer la régulation du trafic mixte.

L'évaluation de la situation au niveau de l'intersection de Che Guevara par l'opinion des automobilistes, a montré que 87.6 % des conducteurs se trouvent toujours bloqués dans la congestion lorsqu'ils passent par cette intersection. Les usagers de ces itinéraires ont confirmé que la synchronisation non optimale des feux et l'exploitation du tramway sont les principales causes de la congestion. Ainsi, à cause de la mauvaise gestion de ces deux systèmes, près de 50 % d'automobilistes ont déclaré prendre une décision plutôt dangereuse, qui est de changer la voie ou de traverser l'intersection quand le tramway est proche du carrefour. Tout cela peut

être une source supplémentaire de congestion et complique davantage le problème, notamment en raison d'un probable accident.

Ainsi, l'exploitation du tramway n'est pas la seule cause d'embouteillage ; La synchronisation des feux de circulation est également l'une de ces principales causes. La comparaison entre la demande réelle du trafic et la capacité dans la journée critique, a montré que la durée du cycle n'est pas optimale pour répondre à la demande réelle. En outre, la régulation du trafic est mauvaise à cause de l'existence de certaines anomalies dans la synchronisation des signaux lorsque le tramway passe par l'intersection.

C'est pourquoi, un contrôle optimal de ce système multimodal est nécessaire pour réduire la congestion du trafic et de limiter son impact négatif sur les usagers de la route. Finalement nous pouvons avancer clairement, que l'analyse de la demande de trafic est importante, et que par l'application de la méthode « Webster » ; nous avons pu améliorer la fluidité au niveau de l'intersection de Che Guevara.

Cependant, elle n'est pas suffisante pour la dissipation de tout le trafic existant, c'est pour cela que nous avons appliqué l'intervalle optimal du tram que nous avons présenté dans le chapitre V, pour avoir un résultat meilleur. Cette étape a augmenté encore plus la capacité de l'intersection, ce qui diminue le retard causé aux usagers de la route pour qu'au final ; cette étude peut contribuer à réduire les embouteillages dans d'autres intersections complexes traversées par la ligne de tram.

---

# *Conclusion Générale*

---



## **Conclusion générale et perspectives**

L'option de l'extension des infrastructures est une solution coûteuse, voire impossible dans certains cas par le manque d'espace. Le meilleur moyen pour réduire la congestion routière est de mieux gérer l'infrastructure existante en régulant le trafic selon les différentes contraintes en vigueur, tout en cherchant un équilibre entre l'offre et la demande qui ne cessent d'augmenter.

Dans notre étude, nous avons choisi une zone stratégique à trafic mixte (Tramways-véhicules routiers) dans la ville de Constantine. Elle a pour but d'évaluer et d'optimiser la fluidité du trafic. C'est ce qui nous a conduits d'une part, à analyser d'une façon approfondie la performance du tramway, pour savoir si le tramway contribue d'une manière optimale à la décongestion de la circulation et de connaître ses différentes qualités qui peuvent attirer la population qui pourra le privilégier par rapport à d'autres modes de transport, ce qui va aider à réduire les flux de circulations le long de son tracé. D'une autre part, la recherche nous a permis d'avoir une vision sur la situation du trafic futur. Par ailleurs, l'étude des effets directs du tramway sur les autres usagers dans les intersections communes, nous a permis de connaître les principaux facteurs qui provoquent cette situation de congestion dans les intersections mixtes ; c'est-à-dire savoir si l'exploitation du tramway est ou non l'une des causes de la congestion dans les intersections afin de l'optimiser. Ensuite, nous avons analysé l'écoulement du flux du trafic et la synchronisation actuelle des feux de circulation afin d'évaluer et d'optimiser la régulation du trafic à l'intersection.

La particularité de notre travail se trouve justement dans l'évaluation et l'optimisation de deux systèmes de régulation du trafic mixte en même temps. Le premier, est le système d'exploitation du tramway et le deuxième est le système de contrôle des feux de circulation. Cela dans le but de satisfaire tous les usagers et réduire la congestion du trafic dans des zones stratégiques, sans rajout d'un nouvel outil ou système technologique et sans modification de l'infrastructure.

La première partie de nos résultats a prouvé que les utilisateurs du tramway ne sont pas complètement satisfaits de la qualité du service du tramway surtout en termes de régularité et confort, sachant que ces derniers sont les deux facteurs primordiaux qui les incitent à l'utiliser et le préférer à d'autres moyens de transport. Ceci s'est répercuté négativement sur le choix modal des passagers.

Puisque ces derniers préfèrent prendre un taxi ou utiliser leurs véhicules particuliers s'ils en possèdent. Cela augmente la demande du trafic et aggrave la situation de la congestion dans les zones urbaines.

Par rapport à l'indicateur de confort que nous avons étudié, il a été observé que le niveau de bruit ne respecte pas les normes à l'intérieur des différentes cabines du tramway, ce qui dérange un taux considérable d'utilisateurs. Cette non-satisfaction des passagers va influencer leurs choix modaux, surtout si le bruit ressenti ne cesse pas d'augmenter à l'intérieur du tramway, ce qui les pousse à opter pour d'autres moyens de transport dans le futur.

Parmi les plus importantes recommandations et solutions que nous avons proposées, soit par rapport à la qualité du service ou pour le confort acoustique, c'est l'optimisation de l'exploitation du tramway, afin de limiter l'usure rapide de la voie et du matériel roulant, réduire le niveau du bruit, aussi de maîtriser la régularité des tramways et satisfaire les passagers. C'est ce qui nous a poussé à étudier profondément l'exploitation du tramway pour évaluer et savoir si l'offre répond de façon optimale à la demande, voir si l'indicateur de ponctualité est respecté, et connaître son impact direct sur les autres usagers de la route dans les intersections communes et de l'améliorer.

Les résultats ont montré que malgré les systèmes intelligents dont les tramways disposent, la gestion de ces derniers est mauvaise parce que l'offre est très supérieure à la demande. Les tramways ne sont pas réguliers parce que l'intervalle entre eux n'est pas respecté. De plus, le nombre de tramways est très élevé par rapport au nombre nécessaire. Tout cela a eu un impact négatif sur l'état de la circulation dans les intersections communes qui se trouvent alors toujours congestionnées à cause de la priorité et le fort trafic des tramways surtout aux heures de pointe.

Nous avons proposé dans cette étude un modèle d'optimisation de l'intervalle de temps entre les tramways, en utilisant comme référence, la plus grande demande enregistrée dans la journée la plus chargée de l'année. Le modèle proposé a permis de garder presque une capacité double pour répondre à la demande future, tout en respectant l'indicateur de confort des passagers. Par ailleurs, le nouvel intervalle que nous avons suggéré a eu un effet positif sur la fluidité du trafic routier car il a donné plus de temps vert aux automobilistes dans les différentes heures de la journée.

Enfin nous pouvons avancer ici que l'embouteillage dans l'intersection la plus complexe qui se situe sur la ligne du tramway (intersection de Che Guevara) est dû principalement au franchissement aléatoire des tramways, la haute fréquence de passage des rames et la mauvaise synchronisation des feux. Nos résultats ont prouvé que le débit des véhicules dépasse la capacité de l'intersection. L'application de la méthode de « Webster » pour le calcul d'un cycle de feux optimal a amélioré la fluidité, mais reste insuffisante sans une exploitation optimale du tramway.

L'application de l'intervalle optimale avec le nouveau cycle de feux a montré une grande efficacité, soit pour la satisfaction des utilisateurs du tramway ou par rapport à la nouvelle capacité des lignes de feux. Malgré l'utilisation de cette solution dans les conditions les plus critiques pour chaque voie de circulation, la congestion était dissipée sur toutes les lignes. De plus, cette nouvelle capacité permet de répondre à la demande du trafic futur d'une façon optimale dans cette intersection et même pour d'autres carrefours. De ce fait, l'application d'une synchronisation optimale des feux de signalisation et l'optimisation de l'exploitation du tramway en fonction de la demande réelle des passagers sont nécessaires pour satisfaire tous les usagers. Quant au trafic mixte, il faut améliorer toutes les contraintes, pour pouvoir avoir des résultats optimaux. C'est ce qui nous a conduits à étudier aussi d'une façon approfondie les performances du tramway et la situation réelle de la circulation routière pour pouvoir réduire le problème de congestion dans les zones à trafic mixte.

A l'issue de ce travail, nous pourrions ouvrir la perspective de développer dans le futur un modèle d'optimisation adaptative de la régulation du trafic multimodal, ce qui nous permettra de faire une comparaison en termes d'efficacité avec le modèle appliqué dans cette thèse.

---

# *Références Bibliographiques*

---

## Références Bibliographiques

- [1] Downs, A. (2004). *Still Stuck in Traffic: Coping with Peak-Hour Traffic Congestion*. Washington, D.C.: Brookings Institution Press.  
<http://www.jstor.org/stable/10.7864/j.ctt1vjqrpt>
- [2] Aftabuzzaman, Md. (2007). Measuring Traffic Congestion- A Critical Review, *Measuring Traffic Congestion*. 30th Australasian Transport Research Forum, pp.1-16.
- [3] Duy, Q., Nguyen-Phuoc, Young, W., Currie, G., & De Gruyter, C. (2020). Traffic congestion relief associated with public transport: state-of-the-art, *Public Transport*, vol.12, pp.455–481. <https://doi.org/10.1007/s12469-020-00231-3>
- [4] Afrin, T., & Yodo, N. (2020). A Survey of Road Traffic Congestion Measures towards a Sustainable and Resilient Transportation System, *Sustainability*, 12, 4660, pp.1-23; [doi:10.3390/su12114660](https://doi.org/10.3390/su12114660)
- [5] Lay, M. (2012). An historical review of the assessment and management of congestion, *Road & Transport Research*, vol.21, no.2, pp.32-45.
- [6] Ye, L., Hui, Y., & Yang, D. (2013). Road traffic congestion measurement considering impacts on travelers, *J. Mod. Transport*. vol.21, no.1, pp.28–39.  
[DOI10.1007/s40534-013-0005-z](https://doi.org/10.1007/s40534-013-0005-z).
- [7] Rosenbloom, S. (1978). Peak-period traffic congestion: a state-of-art analysis and evaluation of effective solution, *Transportation*, vol.7, no.2, pp.167-191.
- [8] Rothenberg, M.J. (1985). Urban congestion in the United States-what does the future hold, *ITE Journal*, vol.55, no.7, pp.22-39.
- [9] Miller, M.A., & Li, K. (1994). An investigation of the costs of roadway traffic congestion: a preparatory step for IVHS benefits' evaluation, California PATH research report UCB-ITS-PRR-94-15, Berkley: Institute of Transport Studies, University of California.
- [10] Vuchic, V.R. & Kikuchi, S. (1994). *The bus transit system: its underutilized potential*, Report DOT-T-94-29, Washington, D.C.: Federal Transit Administration.
- [11] ECMT (ed.) (1999). *The spread of congestion in Europe*, Report on the 110th Round Table on Transport Economics, Paris: OECD Publication Service.
- [12] Piet H.L. Bovy & Salomon, I. (2002). Congestion in Europe: Measurements, patterns and policies, Chapters, in: Eliahu Stern & Iian Salomon & Piet H.L. Bovy (ed.), *Travel Behaviour*, chapter 8, Edward Elgar Publishing.
- [13] OCDE (2010). *Gérer la congestion urbaine*, Éditions OCDE. Page-34. Source : <http://dx.doi.org/10.1787/9789282101315-fr>.

- [14] Bourque, J.P. (2013). *Combattre la Congestion Routière à Montréal par l'Implantation d'un Système de Péage Automobile*. Thèse. Centre Universitaire de Formation en Environnement, Université de Sherbrooke.
- [15] Lomax, T., Turner, S., Shunk, G., Levinson, H.S., Pratt, R.H., Bay, P.N. & Douglas, G.B. (1997). *Quantifying congestion, vol.1 & 2*, NCHRP Report 398, Washington, DC: Transportation Research Board.
- [16] Weisbrod, G., Vary, D., & Treyz, G. (2001). *Economic Implications of congestion*, NCHRP Report 463, Washington, DC. Transportation Research Board.
- [17] Kockelman, K. (2004). *Traffic congestion*, in Kutz, M. (ed.), *Handbook of Transportation Engineering*, McGraw-Hill Education.
- [18] Cambridge Systematics Inc. and Texas Transportation Institute. (2005). *Traffic Congestion and Reliability: Trends and Advanced Strategies for Congestion Mitigation*, Washington, DC.: Federal Highway Administration.
- [19] Wismans, L., Rompha,E., Frisoa,K., & Zantemaa, K.(2014). Real time traffic models, decision support for traffic management, 12th International Conference on Design and Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning, *Procedia Environmental Sciences* 22, pp.220-235. [doi: 10.1016/j.proenv.2014.11.022](https://doi.org/10.1016/j.proenv.2014.11.022)
- [20] Cheng, T., Tanaksaranond,G., Brunson, C., & Haworth, J. (2013). Exploratory visualisation of congestion evolutions on urban transport networks, *Transportation Research Part C* 36, pp.296–306.
- [21] Bhattacharjee, S., & Goetz, A.R. (2012). Impact of light rail on traffic congestion in Denver, *Journal of Transport Geography* 22, pp.262–270.
- [22] Chow, A.H.F., Santacreu, A., Tsapakis, I., Tanasaranond, G., & Cheng, T. (2014). Empirical assessment of urban traffic congestion, *Journal of Advanced Transportation*, vol.48, pp.1000–1016, [DOI: 10.1002/atr.1241](https://doi.org/10.1002/atr.1241)
- [23] Akyuz, E. (2015). The solutions to traffic congestion in Istanbul, *The Journal of Academic Social Science* vol.3, no.16, pp. 442-449  
[DOI : 10.16992/ASOS.792](https://doi.org/10.16992/ASOS.792)
- [24] Falcocchio, J.C., & Levinson, H.S. (2015). *Road Traffic Congestion: A Concise Guide*, Part of the Springer Tracts on Transportation and Traffic book series (STTT, vol.7), <https://doi.org/10.1007/978-3-319-15165-6>.
- [25] Hallenbeck, M.E., Ishimaru, J.M., & Nee,J. (2003). *Measurement of Recurring Versus Non-Recurring Congestion*, Final Report Research Project T2695, Task 36, Congestion Measurement.

- [26] MVRPC. (2015). Congestion Management Process Technical Report. Page 7 & 33.
- [27] Congestion Management Process. (2016). Lancaster County Transportation Coordinating Committee (LCTCC).
- [28] Skabardonis, A., Varaiya, P., & Petty, K.F. (2003). Measuring Recurrent and Nonrecurrent Traffic Congestion, Transportation Research Record Paper no. 03-4261. Page 1.
- [29] Fernando, R. (2019). The impact of Planned Special Events (PSEs) on urban traffic congestion, EAI Endorsed Transactions on Scalable Information Systems, EAI Endorsed Transactions on Scalable Information Systems, vol.6, issue.23.  
[doi: 10.4108/eai.13-7-2018.159624](https://doi.org/10.4108/eai.13-7-2018.159624)
- [30] Pioneer Valley Planning Commission. Appendix Congestion RTP, page web consulté le 30-08-2020.  
Source: <http://www.pvpc.org/sites/default/files/Congestion%20RTP%20appendix.pdf>.
- [31] D. Bennett. (2008). Guide to traffic management: part 2: traffic theory. Austroads Incorporated. <http://worldcat.org/isbn/9781925854763>.
- [32] Jain, V., Sharma, A., & Subramanian, L. (2012). Road traffic congestion in the developing world, In Proceedings of the 2nd ACM Symposium on Computing for Development, Atlanta, GA, United States. pp. 1–10.  
<https://doi.org/10.1145/2160601.2160616>.
- [33] Traffic Congestion and Reliability. (2005). Trends and Advanced Strategies for Congestion Mitigation, Cambridge Systematics, Inc. with Texas Transportation Institute.  
Source: [www.camsys.com](http://www.camsys.com).
- [34] Geotab. (2018). What causes traffic congestion? Page consultée le 02-08-2020  
Source: <https://www.geotab.com/blog/traffic-congestion/>
- [35] Chung, Y. (2011). Assessment of non-recurrent traffic congestion caused by freeway work zones and its statistical analysis with unobserved heterogeneity, Transport Policy, vol.18, pp.587–594, [doi: 10.1016/j.tranpol.2011.02.003](https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2011.02.003)
- [36] Chung, Y., (2012). Assessment of non-recurrent congestion caused by precipitation using archived weather and traffic flow data, Transport Policy, vol.19, pp. 167–173, [doi: 10.1016/j.tranpol.2011.10.001](https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2011.10.001)
- [37] Baher A., Lina Kattan (2004) Traffic congestion, in K. Myer (ed.), Handbook of transportation engineering, New York: McGraw-Hill.
- [38] Mannering, F.L., & Washburn, S.S. Principles of Highway Engineering and Traffic Analysis. Engineering Books.

- [39] Buisson, C. & Lesort, J-B. (2010). Comprendre le trafic routier : méthodes et calculs. Éditions du CERTU, Paris.
- [40] Cohen S. (1990). Ingénierie du Trafic Routier : Eléments de théorie du trafic et applications. Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées.
- [41] Equipements des routes et des rues, (2020). Systèmes de recueil de données, Ministère de la Transition écologique et solidaire. Support de cours, INRETS-GRETTIA (SC & MDP).
- [42] Denos C. Gazis, (2002).Traffic Theory, Kluwer Academic Publishers New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow. <http://ebooks.kluweronline.com>
- [43] BELARB, F. (2004). Les Systèmes de Communication entre les Véhicules et l'Infrastructure : leur contribution aux pratiques d'exploitation de la route. Le cas d'une application pour l'information des autoroutes (AIDA). Thèse.Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- [44] Garber, N.J. & Hoel, L.A. (2009), Traffic and Highway Engineering. 4th Edition, Cengage Learning, USA.
- [45] O'Flaherty, C. (Ed.). (1997). Transport Planning and Traffic Engineering. London: CRC Press.
- [46] Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques (CERTU). (1999). Guide des carrefours urbains, Librairie Eyrolles - Paris 5e.
- [47] Matthews, P., Slinn, M., & Guest, P. (2005). Traffic Engineering Design: Principles and Practice, Second Edition, Elsevier Ltd.
- [48] Equipements des routes et des rues, (2020). Systèmes de recueil de données, Ministère de la Transition écologique et solidaire. Source <http://www.equipementsdelaroute.developpement-durable.gouv.fr/technologies-r105.html> (page consultée le 30 aout 2020).
- [49] Gaciarz, M. (2016). Régulation de trafic urbain multimodal : une modélisation multi-agents. Thèse. École Doctorale Informatique et Mathématiques. Université Claude Bernard Lyon 1, page 6-7.
- [50] CIV6706A. (2017). Régulation de la circulation – Feux de circulation (carrefours isolées) – feux adaptatifs, École Polytechnique de Montréal, page 4.
- [51] Bai, Y., Li, J., Li, T., Yang, L., & Lyu, C. (2018). Traffic Signal Coordination for Tramlines with Passive Priority Strategy, Mathematical Problems in Engineering, pp.1-14. <https://doi.org/10.1155/2018/6062878>.



- [52] Bhourri, N., & Lotito, P. (2006). Régulation du Trafic Urbain Multimodal avec Priorité pour les Transports en Commun, MOSIM'06 : 6ème conférence francophone de MOdélisation et SIMulation : Modélisation, optimisation et simulation des systèmes : défis et opportunités.
- [53] Ma, W., & Yang, X. (2007). A passive transit signal priority approach for bus rapid transit system, in Proceedings of the IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC '07), pp. 413-418, Seattle, WA, USA.
- [54] Jeong, Y., & Kim, Y. (2001). Bus coordination model for passive signal priority,” in Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Eastern Asia Society for Transportation Studies, vol. 8, pp. 233-238.
- [55] Zhao, J., Ma, W., & Li, P. (2016). Optimal design of midblock crosswalk to achieve trade-off between vehicles and pedestrians, Journal of Transportation Engineering, vol. 143, no. 1, pp. 04016003-1- 04016003-11. Article ID 04016003.
- [56] Mirchandani, P., Knyazyan, A., Head, L., & Wu, W. (2001). An approach towards the integration of bus priority, traffic adaptive signal control, and bus information/scheduling systems, Computer-Aided Scheduling of Public Transport, vol. 505, pp. 319-334.
- [57] Shi, J., Sun, Y., Schonfeld, P., & Qi, J. (2017). Joint optimization of tram timetables and signal timing adjustments at intersections,” Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 83, pp. 104-119. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.07.014>.
- [58] Sermpis, D., Papadakos, P., & Fousekis, K. (2012). Tram priority at signal-controlled junctions, Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Transport, vol. 165, issue. 2, pp. 87-96.
- [59] Zhao, B., Zhang, Y., Zhang, Z., Jin, M., & Li, Z. (2013). Study on signal priority implement technology of tram system. Procedia- Social and Behavioral Sciences, vol. 96, pp. 905-913.
- [60] Ardiansyah, A. (2017). Determination of location and numbers of tram stops in Surabaya with model set covering problem. International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture, and Industrial Automation (ICAMIMIA). pp. 337-341.  
[DOI: 10.1109/ICAMIMIA.2017.8387614](https://doi.org/10.1109/ICAMIMIA.2017.8387614)
- [61] Arnet, K., Guler, S.I. & Menendez, M. (2015). Effects of Multimodal Operations on Urban Roadways, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, vol. 2533, pp. 1-7.

- [62] Essadeq, I., Dubail, E. & Jeanniere, E. (2016). Modelling passenger congestion in transit system – benchmark and three case studies, 6th Transport Research Arena, Transportation Research Procedia, vol. 14, pp. 1792-1801.
- [63] Mnif, S., Galoui, S., Elkosantini, S., Darmoul, S. & Ben Said, L. (2015). Ontology based performance evaluation of public transport systems, 4th International Conference on Advanced Logistics and Transport (ICALT), pp. 205-210.
- [64] Sun, Z., Dai, L. & He, G. (2015). Signal Priority Control Methods of Modern Trams at Intersections, Proceeding of Fifth International Conference on Transportation Engineering (ICTE), pp. 520-527.
- [65] Fujii, H., Uchida, H. & Yoshimura, S. (2017). Agent-based simulation framework for mixed traffic of cars, pedestrians and trams, Transportation Research Part C, vol. 85, pp. 234-248.
- [66] LESLEY, L. (1987). The Role of Tramways in the Future Budapest Transport System, Periodica Polytechnica Transportation Engineering, vol.15, no.2, pp. 147-160.
- [67] Kormanyos, L., Tanczos, K. (2007). Conditions of a Quality Public Rail Service in Hungary. Periodica Polytechnica Transportation Engineering, 35(1-2), pp. 23-34.
- [68] Ghariani, N., Elkosantini, S., Darmoul, S. & Ben Said, L. (2016). Assessment of public transport control systems: a comparative analysis of platforms and a new platform architecture, International Journal of Shipping and Transport Logistics, vol.8, no.5, pp.509-530.
- [69] García Sánchez, I. M. (2009). Technical and scale efficiency in spanish urban transport: estimating with data envelopment analysis, Advances in Operations Research, pp.1-15. <http://dx.doi.org/10.1155/2009/721279>.
- [70] Lea, T.P.L., & Trinhb, T.A. (2016). Encouraging Public Transport Use to Reduce Traffic Congestion and Air Pollutant: A Case Study of Ho Chi Minh City, Vietnam, Sustainable Development of Civil, Urban and Transportation Engineering Conference, Procedia Engineering, vol. 142, pp. 236 -243.
- [71] Ha, S.T., Wan Hashim, W.I., Lo, M.C., & Mah,Y. S. (2019). Factors Affecting Satisfaction and Loyalty in Public Transport using Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM), International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE), ISSN: 2278-3075, vol.8, issue.12.
- [72] Pencheva, V., Tsekov, A., Georgiev, I., & Kostadinov, S. (2018). Analysis and assessment of the regularity of mass urban passenger transport in the conditions of the city of Ruse, Transport Problems, vol.13, issue.3, DOI: [10.20858/tp.2018.13.3.10](https://doi.org/10.20858/tp.2018.13.3.10).

- [73] Kozakova, P. (2015). The Factors Influencing Satisfaction with Public City Transport: A Structural Equation Modelling Approach, *Journal of Competitiveness*, vol. 7, issue.4, pp. 18 - 32, DOI: [10.7441/joc.2015.04.02](https://doi.org/10.7441/joc.2015.04.02).
- [74] Jarboui, S., Forget, P., & Boujelbene, Y. (2015). Efficiency evaluation in public road transport: A stochastic frontier analysis, *TRANSPORT*, ISSN 1648-4142 vol. 30, issue.1, <https://doi.org/10.3846/16484142.2013.785019>.
- [75] Abir, A. T. M., Mostafizur Rahman, MD, Farjana, I., Raisa, B., & Sirajul, I., (2018). User Response – based Sustainable Solutions to Traffic Congestion Problem Using Public Transport: The Case of Uttara, Dhaka, *International Journal of Traffic and Transportation Engineering*, vol.7, no.2, pp. 32-41, DOI: [10.5923/j.ijtte.20180702.03](https://doi.org/10.5923/j.ijtte.20180702.03).
- [76] Matulin, M., Mrvelj, Š., & Jelušić, N. (2011). Two-Level Evaluation of Public Transport Performances, *Promet – Traffic & Transportation*, vol. 23, no. 5, pp.329-339.
- [77] Stone, J. (2020). How to avoid cars clogging our cities during coronavirus recovery, *The Conversation*, page consultée le 26-07-2020.  
Source: <https://findanexpert.unimelb.edu.au/news/12497-how-to-avoid-cars-clogging-our-cities-during-coronavirus-recovery>.
- [78] Zhao, X., Li, Y., Xu, S., & Zhai, H. (2018). Modeling a modern tram system integrated with a road traffic simulation, *Simulation*, vol. 94, no. 1, pp. 77-90. <https://doi.org/10.1177/0037549717734420>.
- [79] Hõimoja, H., Vinnikov, D., Lehtla, M., Rosin, A., & Zakis, J. (2010). Survey of loss minimization methods in tram systems, *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, pp.1356-1361.
- [80] Guerrieri, M. (2018). Tramways in Urban Areas: An Overview on Safety at Road Intersections, *Urban Rail Transit*, vol.4, no.4, pp. 223–233. <https://doi.org/10.1007/s40864-018-0093-5>
- [81] Khelf, M., & Boukebbab, S. (2016). The effect of vibration inside the Constantine’s tramway on the comfort of passengers, *Proceedings of the 23rd International Conference Vibroengineering*, vol.9, pp. 33-38.
- [82] Li, Y., Cai, Q., Y. Xu. W. Shi., & Chen, Y. (2018). Design of real-time actuated control system for modern tram at arterial intersections based on logic rules, *Advances in Mechanical Engineering*, vol.10, pp.1-14. <https://doi.org/10.1177/1687814018815423>.
- [83] Beaudoin, J., & Lin Lawell, C.Y. C. (2017). The Effects of Urban Public Transit Investment on Traffic Congestion and Air Quality, *Urban Transport Systems*, pp.113-123, <http://dx.doi.org/10.5772/66834>.

- [84] Tae-Woo Lee, P., Chung, Y.S. & Siu Lee Lam, J. (2016). Transportation research trends in environmental issues: a literature review of methodology and key subjects, *International Journal of Shipping and Transport Logistics (IJSTL)*, vol. 8, no. 6.
- [85] Fang, Y., Jiang, Y., & Fei, W. (2020). Disruption Recovery for Urban Public Tram System: An Analysis of Replacement Service Selection, *Special Section on Big Data Technology and Applications in Intelligent Transportation*, vol.8, doi [10.1109/ACCESS.2020.2972445](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2972445).
- [86] Les transports en commun pour découvrir Melbourne, page consultée le 26-07-2020. Source :<https://www.australia-australie.com/articles/les-transports-en-commun-melbourne/>
- [87] Le tramway, un mode de transport efficace et moderne, d'Île-de-France Mobilités, page consultée le 25-07-2020. Source :<https://www.iledefrance-mobilites.fr/le-reseau/services-de-mobilite/tram>.
- [88] Liste des tramways du monde. Wikipedia, page consultée le 23-07-2020. Source : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste\\_des\\_tramways\\_du\\_monde](https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_tramways_du_monde).
- [89] Liste des tramways en France. Wikipedia, page consultée le 23-07-2020. Source : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste\\_des\\_tramways\\_en\\_France](https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_tramways_en_France).
- [90] Les tramways en service, Transbus, page consultée le 23-07-2020. Source : [https://www.transbus.org/dossiers/tramway\\_service.html](https://www.transbus.org/dossiers/tramway_service.html).
- [91] Etat des lieux des tramways en France. (2019), *Transport Urbain*, page consultée le 26-07-2020.  
Source : <http://transporturbain.canalblog.com/archives/2015/02/06/31474266.html>.
- [92] Lionel, S., David, E., Guillaume, D., & Jean-François, P. (2010). Directivité locale pour trois tramway français. 10th *Congres Francais d'Acoustique*. Lyon, France. hal-00551144v1.
- [93] La Société d'Exploitation des Tramways. (2017). SETRAM, page consultée le 26-07-2020. Source : <https://www.setram.dz/site/fr/setram>.
- [94] Le tramway circule enfin à Sidi Bel-Abbès, Algérie Presse Service. (2017), page consultée le 26-07-2020. Source : <http://www.aps.dz/regions/67517-2017-le-tramway-circule-enfin-a-sidi-bel-abbes>.
- [95] Liste des tramways en Algérie. (2020). Wikipedia, page consultée le 26-07-2020.  
Source : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste\\_des\\_tramways\\_en\\_Alg%C3%A9rie](https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_tramways_en_Alg%C3%A9rie).
- [96] New tramways for 2020, *Tramways & Urban Transit*, page consultée le 26-07-2020.  
Source: <http://www.tautonline.com/new-tramways-2020/>

- [97] Tivadar, M., & Heddebaut, O. (2017). A commuting model for the analysis of the impacts of a tramway project: application to the Lens area, *Transportation Planning and Technology*, ISSN: 0308-1060 , vol.40, no.3, pp.374-392  
DOI : [10.1080/03081060.2017.1283161](https://doi.org/10.1080/03081060.2017.1283161).
- [98] Constantine | Tramway | News, Photos, Developments. Pinterest, page consultée le 26-07-2020. Source : <https://www.pinterest.com/pin/654288652092397436/>
- [99] Source Entreprise Metro Alger (EMA). (2013). Tramway de Constantine-Présentation générale du système, p.8, Algérie.
- [100] Pallas M.A., Lelong J., & Chatagnon R. (2011). Characterisation of tram noise emission and contribution of the noise sources. *Applied Acoustics*, vol. 72, issue.7, pp. 437-450.
- [101] Source Entreprise Metro d'Alger (EMA). (2010). Spécification fonctionnelles et techniques générales du matériel roulant, pp. 12-14, Algérie.
- [102] Source Entreprise Metro d'Alger (EMA). (2008). Présentation générale du système de transport, pp. 24.
- [103] Maldonado M., Chiello O., & Le Houedec D. (2008). Propagation of vibrations due to a tramway line. Noise and vibration mitigation. *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*, vol. 99. pp. 158-164.
- [104] Source Entreprise Metro Alger (EMA). (2010). Tramway de Constantine. Principes d'exploitation, Algérie.
- [105] Source Entreprise Metro Alger (EMA). (2011). Présentation Générale du Système de Signalisation et de Télécommunication SAEIV, Algérie.
- [106] Krajnc, R. & Sever, D. (2010). Model Approach to Quality Provision of Public Passenger Transport, *Promet – Traffic & Transportation*, vol. 22, no. 1, pp.65-74.
- [107] Seco, A. J. M. & Gonçalves, J. H. G. (2007). The quality of public transport: relative importance of different performance indicators and their potential to explain modal choice, *WIT Transactions on The Built Environment*, vol.96, pp.313-325.
- [108] Redman, L., Friman, M., Garling, T., & Hartig, T. (2013). Quality attributes of public transport that attract car users: A research review, *Transport Policy*, vol. 25, pp.119-127.
- [109] Olivková, I., (2016). Evaluation of quality public transport criteria in terms of passenger satisfaction, *Transport and Telecommunication*, vol.17, no. 1, pp.18–27, DOI 10.1515/ttj-2016-0003.
- [110] Cascetta, E., & Carteni, A. (2014). A quality-based approach to public transportation planning: theory and a case study. *International Journal of Sustainable Transportation*, vol.8, no.1, pp.84-106.

- [111] Román,C., Martín, J.C., & Espino, R. (2014).Using Stated Preferences to Analyze the Service Quality of Public Transport, *International Journal of Sustainable Transportation*, vol. 8, no.1, pp.28-46, DOI: 10.1080/15568318.2012.758460
- [112] Soza-Parraa,J., Raveaua,S., Muñozza, J.C., & Catsb, O. (2019). The underlying effect of public transport reliability on users’ satisfaction, *Transportation Research Part A*, vol. 126, pp.83–93.
- [113] De Oña, J., Toledo, E.E., & De Oña, R. (2020). Perception of Public Transport Quality of Service among Regular Private Vehicle Users in Madrid, Spain, *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2674, no. 2, DOI: 10.1177/0361198120907095.
- [114] Eboli, L. & Mazzulla, G. (2009). A New Customer Satisfaction Index for Evaluating Transit Service Quality, *Journal of Public Transportation*, vol. 12, no. 3, pp. 21-37.
- [115] Machado, J.L., De Oña, R., Diez-Mesa, F., & De Oña, J. (2018). Finding service quality improvement opportunities across different typologies of public transit customers, *Transportmetrica A: Transport Science*, vol.14, pp. 761-783, DOI: 10.1080/23249935.2018.1434257.
- [116] Fujii, S., & Kitamura, R. (2003). What does a one-month free bus ticket do to habitual drivers? An experimental analysis of habit and attitude change. *Transportation*, vol.30, pp.81 95.
- [117] Mackett, R. L., & Edwards, M. (1998). The impact of new public transport systems: Will the expectations be met? *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 32, pp.231-245.
- [118] Anderson, E. W., & Sullivan, M. W. (1993). The antecedents and consequences of customer satisfaction for firms. *Marketing Science*, vol.12, pp.125–143.
- [119] Eboli, L., & Mazzulla, G. (2011). A methodology for evaluating transit service quality based on subjective and objective measures from the passenger's point of view, *Transport Policy*, vol.18, pp.172–181.
- [120] Tyrinopoulos, Y., & Antoniou, C., (2008). Public transit user satisfaction: variability and policy implications. *Transport Policy*, vol.15, no.4, pp.260–272.
- [121] Del Castillo, J. M. & Benitez, F. G. (2013).Determining a public transport satisfaction index from user surveys, *Transportmetrica A: Transport Science*, vol. 9, no. 8, pp.713-741, DOI: 10.1080/18128602.2011.654139.
- [122] De Oña, J., & De Oña, R. (2014) .Quality of service in public transport base on customer satisfaction surveys: A review and assessment of methodological

- approaches. *Transportation Science*, vol. 49, no. 3, pp.433-719, DOI: 10.1287/trsc.2014.0544
- [123] Fua, X.-m., Zhangb, J.-h., & Chanc, F.T.S. (2018). Determinants of loyalty to public transit: A model integrating Satisfaction-Loyalty Theory and Expectation-Confirmation Theory, *Transportation Research Part A*, vol. 113, pp.476–490.
- [124] Jamal, E., Scott, D., Idris, A. & Lovegrove, G. (2019) Investigating factors affecting the mode choices of commuters in Kuwait city & surrounding urban areas: Strategies for a higher quality and more sustainable public transport system, *Urban Development*, vol. 63, pp. 65–76, 10.2478/udi-2019-0017.
- [125] Jiang, S. (2011). Household planning of transportation use, *International Journal of Business and Social Science*, vol. 2, no.14, pp.61–70.
- [126] Friman, M., & Fellesson, M. (2009). Service Supply and Customer Satisfaction in Public Transportation: The Quality Paradox, *Journal of Public Transportation*, vol. 12, no. 4. pp. 57-69, DOI: <http://doi.org/10.5038/2375-0901.12.4.4>.
- [127] Beirao, G., &Sarsfield Cabral, J.A. (2007). Understanding attitudes towards public transport and private car: A qualitative study, *Transport Policy*, vol. 14, pp.478–489.
- [128] De Oña, J., De Oña, R., Eboli, L., Forciniti, C., &Mazzulla, G. (2016): Transit passengers' behavioural intentions: the influence of service quality and customer satisfaction, *Transportmetrica A: Transport Science*, vol.12, no.5, pp.385-412 DOI: 10.1080/23249935.2016.1146365.
- [129] Marinov, M., Agajere, O.D. , Bigotte, M. , Proietti, D., &Gerenska, I. (2014). Customer satisfaction factors for light rail: what can we learn from a successful case? *Transport problems*, vol.9, pp. 45-58.
- [130] Thøgersen, J. (2009). Promoting public transport as a subscription service: effects of a free month travel card. *Transport Policy*, vol.16, pp.335–343.
- [131] Thøgersen, J., Møller, B., (2008). Breaking car use habits: The effectiveness of a free one-month travelcard. *Transportation*, vol.35, pp.329–345.
- [132] Nagy, E., & Csiszár, Cs. (2015). Analysis of Delay Causes in Railway Passenger Transportation, *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, vol.43, no.2, pp. 73-80, DOI: 10.3311/PPtr.7539.
- [133] Aydin, N., Celik, E., & Gumus, A. T. (2015). A hierarchical customer satisfaction framework for evaluating rail transit systems of Istanbul. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol.77, pp.61–81.

- [134] Givoni, M., & Banister, D. (2012). Speed: The less important element of the high-speed train. *Journal of Transport Geography*, vol.22, pp.06–307.
- [135] Holmgren, J. (2007). Meta-analysis of public transport demand. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol.41, pp.1021–1035.
- [136] Özgür, Ö. (2011). Performance analysis of rail transit investments in Turkey: İstanbul, Ankara, İzmir and Bursa. *Transport Policy*, vol.18, pp.147–155.
- [137] Scherer, M. (2010). Is light rail more attractive to users than bus transit? Arguments based on cognition and rational choice. *Transportation Research Record*, vol.2144, pp.11-19.
- [138] Wang, Y., Zhang, Z., Zhu, M., & Wang, H. (2020). The Impact of Service Quality and Customer Satisfaction on Reuse Intention in Urban Rail Transit in Tianjin, China, pp.1-10, DOI: 10.1177/2158244019898803.
- [139] Paunović, K., Belojević, G., & Jakovljević, B. (2014). Noise annoyance is related to the presence of urban public transport. *Science of The Total Environment*, vol. 481, pp.479-487.
- [140] Portela, B.S., & Zannin, P.H.T. (2010). Analysis of factors that influence noise levels inside urban buses. *Journal of Scientific and Industrial Research (JSIR)*, vol. 69, pp. 684-687.
- [141] Dudkin, E.P., Andreeva, L.A., & Sultanov, N.N. (2017). Methods of Noise and Vibration Protection on Urban Rail Transport. *Transportation Geotechnics and Geoecology, Procedia Engineering*, vol. 189, pp. 829-835.
- [142] Sandrock, S., Griefahn, B., Kaczmarek, T., Hafke, H., Preis, A., & Gjestland, T. (2008). Experimental studies on annoyance caused by noises from trams and buses. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 313, issues 3–5, pp. 908-919.
- [143] Panulinova, E., Harabinová, S., & Argalášová, L. (2016). Tram squealing noise and its impact on human health. *A Bimonthly Inter-disciplinary International Journal Noise health*, vol. 18, issue.85, pp. 329-337.
- [144] Panulinová, E.(2017). Input Data for Tram Noise Analysis. *Structural and Physical Aspects of Construction Engineering, Procedia Engineering*, vol. 190, pp. 371-376.
- [145] Heutschi, K., Bühlmann, E., & Oertli, J. (2016). Options for reducing noise from roads and railway lines, *Transportation Research Part A* 94, pp.308–322, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2016.09.019>.
- [146] Rylander, R., Björkman, M., hrlin U., & Sörensen, S. (1977). Tramway noise in city traffic. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 53, issue 3, pp. 353-358.



- [147] Öhrström, E.(1997). Effects of exposure to railway noise – A comparison between areas with and without vibration. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 205, issue 4, pp. 555-560.
- [148] Miedema, H.M.E., & Van den Berg, R. (1988). Community response to tramway noise. *Journal of Sound and Vibration*,vol. 120, issue 2, pp.341-346.
- [149] Gidlöf-Gunnarsson, A., Ögren, M., Jerson, T., & Öhrström, E. (2012). Railway noise annoyance and the importance of number of trains, ground vibration, and building situational factors. *A Bimonthly Inter-disciplinary International Journal Noise & health*, vol. 14, issue 59, pp. 190-201.
- [150] Cik, M., & Lercher, P. (2014). Ground-borne vibrations, sounds and secondary airborne sounds from tramways: A psychoacoustic evaluation including health aspects. *Improving the World Through Noise Control. 43rd International Congress on Noise Control Engineering*, pp. 1–9.
- [151] Ľubica, A., Jana J., Ľudmila, S., Zuzana, S., Katarína, H., Jana, B., &Andrea, K., (2014). Alexandra, F. Environmental Noise and Annoyance in the Urban Area at Different Time Intervals. *Applied Mechanics and Materials*, vol. 617, pp. 110-115.
- [152] Dratva, J., Phuleria, H.C., Foraster, M., Gaspoz, J.M., Keidel, D., Künzli, N., Liu, L.J.S., Pons, M., Zemp, E., Gerbase, M.W., &Schindler, C. (2012). Transportation Noise and Blood Pressure in a Population-Based Sample of Adults. *Environmental Health Perspectives*, vol. 120, issue 1, pp. 50–55.
- [153] UHL, T.,Wszolek, W., Wszolek, T., &Karpinski, J. (1999). Noise and vibration problems in tram design. *Proceedings of internoise 99 – The 1999 international congress on noise control engineering held in fort lauderdale Florida, USA*, vol. 1, pp. 283-8.
- [154] Prud'homme, R., Koning, M., & Kopp, P. (2011). Substituting a tramway to a bus line in Paris: Costs and benefits. *Transport Policy*, vol. 18, issue 4, August 2011, pp. 563–572.
- [155] Abdo, J. (2011). Construction of new roads infrastructures: the solution of congestion? technical collection Cimbéton T32. Center of information about cement and its applications, Edition December, Paris, France. (in french).
- [156] Forstall, R.L., Greene, P.R., & Pick, J.B. (2009). Which are the largest? Why lists of major urban areas vary so greatly. *Tijdschrift voor economische en sociale geografie*, vol. 100, issue 3, pp.277–297.
- [157] Zeng, A.Z., Durach, C.F., Fang, Y. (2012). Collaboration decisions on disruption recovery service in urban public tram systems. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 48, issue 3, pp.578–590.

- [158] Burdzik, R., Kuminek, T., Mańka, A., Młyńczak J., & Mikulski, J. (2014). Research on vibroacoustic phenomena of tram vehicles for the changeable dynamics conditions. *Vibroengineering PROCEDIA*, vol. 3, pp. 408-412.
- [159] Crayon Bleu. (2009). Alipur's Report of Activities. Field of Evaluation of Used Tyres. Aliapur, France, pp. 35, (in French)
- [160] Apte, J.S., Bombrun, E., Marshall, J.D., & Nazaroff, W.W. (2012). Global Intraurban Intake Fractions for Primary Air Pollutants from Vehicles and Other Distributed Sources. *International journal of Environmental Science Technology*, vol. 46, issue 6, pp.3415–3423.
- [161] Motyl, M., Nowakowski, T., Czechyra, B., & Firlik, B. (2017). Certification Requirements For Tram Noise Measurements In Terms Of Today's Expectations In Cities. *Sustainable Development and Planning VIII, WIT Transactions on Ecology and the Environment*, vol. 210, pp. 591 – 596.
- [162] Lakušić, S., & Ahac, M. (2012). Rail traffic noise and vibration mitigation measures in urban areas. *Technical Gazette*, vol. 19, issue 2, pp. 427-435.
- [163] Mandula, J., Salaiova, B., & Koval'akova, M.(2002). Prediction of noise from trams. *Applied Acoustics*, vol. 63, pp. 373–389.
- [164] Lakušić, S., Haladin, I., & Ahac, M. (2016). The Effect of Rail Fastening System Modifications on Tram Traffic Noise and Vibration. *Hindawi Publishing Corporation Shock and Vibration*, Article ID 4671302, vol. 2016, pp.15.
- [165] Dua, Y., Zhao, C., Zhang, X., & Sun, L. (2015). Microscopic simulation evaluation method on access traffic operation. *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 53, pp. 139-148.
- [166] Panulinová, E., & Harabinová, S. (2014). Monitoring of Tram Traffic Noise in the Small Curve Radius. *Applied Mechanics and Materials*, vol. 617, pp. 120-123.
- [167] Une oreille avertie. Le son et la perception de bruit, page consultée le 17-05-2020. Source : <https://www.uneoreilleavertie.com/comprendre/le-son-et-la-perception-de-bruit>.
- [168] Scetauroute – Département Environnement. (2005). Contournement de Nice, étude d'environnement, pp.58-62.
- [169] Aménagement de la Francilienne entre A4 et RN4. (2015). La construction du mur antibruit a commencé!, INFOCHANTIER N°1.
- [170] Panulinová, E., & Harabinová, S.(2017). Strategy for tram noise reduction, *MATEC Web of Conferences* 107, 00071, DOI:10.1051/mateconf/201710700071.

- [171] Nowakowski, T., Komorski, P., & Tomaszewski, F. (2017). The Efficiency of Tram Articulations Compared to Vibroacoustic Emissions, *Archives of Transport*, vol.44, issue 4, DOI: [10.5604/01.3001.0010.6161](https://doi.org/10.5604/01.3001.0010.6161).
- [172] Criteres d'hygiene de l'environnement 12. Le bruit (1980). Organisation mondiale de la Sante, Geneve, ISBN 92 4 254072 2.
- [173] The Effects of Environmental Noise on Health.Noise Measurement. Gouvernement du Québec, page consultée le 17-05-2020. Source :<https://www.quebec.ca/en/health/advice-and-prevention/health-and-environment/the-effects-of-environmental-noise-on-health/noise-measurement/>.
- [174] Pallas, M.A., Lelong, J., & Chatagnon, R. (2011). Characterisation of tram noise emission and contribution of the noise sources. *Applied Acoustics*, vol. 72, issue 7, pp. 437-450.
- [175] Maldonado, M., Chiello, O., & Le Houedec, D. (2008). Propagation of vibrations due to a tramway line. In *noise and vibration mitigation, NNFM vol. 99*. Springer Publications, pp. 158–164.
- [176] Source Entreprise Metro d'Alger (EMA). (2008). Système de transport, cahier 5 matériel roulant, pp. 30.
- [177] CA832 –Chauvin Arnoux. Notice de fonctionnement.Source : <https://manualzz.com/doc/5607370/ca832---chauvin-arnoux>.
- [178] Tests du khi-deux - E-Formation/ Moodle UHA. (2017).Université haute-Alsace. Source : [https://e-formation.uha.fr/pluginfile.php/16418/mod\\_resource/content/0/15Chi2.pdf](https://e-formation.uha.fr/pluginfile.php/16418/mod_resource/content/0/15Chi2.pdf).
- [179] Korve, H.W., Farran, J.I., & Mansel, D.M. (1995). Integration of light rail transit into city streets. In *Transportation Research Board Conference Proceedings*, vol.1.
- [180] Currie, G., & Shalaby, A. (2007). Success and challenges in modernizing street car systems: experiences in Melbourne, Australia, and Toronto, Canada. *Transp.Res. Rec.: J. Transp. Res. Board*, pp.31–39.
- [181] Korve, H.W., & Siques, J. (2000). Light rail service: pedestrian and vehicular safety. In: *Light Rail: Investment for the Future*. 8th Joint Conference on Light Rail Transit.
- [182] Naznin, F., Currie, G., Sarvi, M., & Logan, D. (2015). An empirical Bayes safety evaluation of tram/streetcar signal and lane priority measures in Melbourne. *Traffic Injury Prevention*, pp. 91-97, DOI: [10.1080/15389588.2015.1035369](https://doi.org/10.1080/15389588.2015.1035369).

- [183] Budzynski, M., Tubis, A., & Jamroz, K. (2019). Identifying Selected Tram Transport Risks, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 603, issue 4, [doi:10.1088/1757-899X/603/4/042053](https://doi.org/10.1088/1757-899X/603/4/042053).
- [184] Nguyen-Phuoc, Q.D., Currie, G., De Gruyter, C., & Young, W. (2017). Net Impacts of Streetcar Operations on Traffic Congestion in Melbourne, Australia, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, vol. 2648, pp. 1-9.
- [185] Tubis, A., Rydlewski, M., & Budzynski, M. (2019). Safety Assessment of Tram Stops, Journal of KONBiN, vol. 49, issue 2. [DOI 10.2478/jok-2019-0044](https://doi.org/10.2478/jok-2019-0044).
- [186] Cheung C., Shalaby A.S., Persaud B.N., & Hedayeghi A. (2008). Models for safety analysis of road surface transit. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, vol. 2063, issue 1. <https://doi.org/10.3141/2063-20>.
- [187] Currie G., & Shalaby A. (2007). Success and challenges in modernizing street car systems: experiences in Melbourne, Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, vol. 2006, issue 1, pp. 31-39. [DOI: 10.3141/2006-04](https://doi.org/10.3141/2006-04).
- [188] Grzebieta R., Reznitzer G., Daly D., Little P., & Enever, D. (1999). Crash Compatibility of Trams. Road Safety Research, Policing, Education Conference. Canberra, Act, Australia.
- [189] Royko Y., Bura, R. & Kindrat, V. (2019). Investigation of tram movement indicators in general structure of traffic flow, Proceedings of ICCPT, Ukraine, pp. 57-65.
- [190] Li, D., Luo, M., & Kang, S. (2017). Research on tram signal priority control scheme design and implementation, Proceedings of the 2nd International Conference on Civil, Transportation and Environmental Engineering (ICCTE), China, pp. 419- 422.
- [191] Zhou, W., Bai, Y., Li, J., Zhou, Y., & Li, T. (2019). Integrated Optimization of Tram Schedule and Signal Priority at Intersections to Minimize Person Delay, Journal of Advanced Transportation, Article ID 4802967, pp.1-18. <https://doi.org/10.1155/2019/4802967>
- [192] Moutchou, F., Cherkaoui, A., & El kourssi, E.M. (2012). Integrating humans factors in the analysis of the interaction “Tram- car drivers”, CETRA, 2nd International Conference on Road and Rail Infrastructure, France. 9p. [ffhal-00853274f](https://doi.org/10.1080/00853274f).
- [193] Zhang, L., & Garoni, T. M. (2013). A Comparison of Tram Priority at Signalized Intersections, PdeVis: Pedestrian Flow Visualisations, pp.587-594.
- [194] Molecki, A., & Gaska, D. (2012). Calculations of tramway track capacity in the wide area networks, Transport, vol. 27, pp. 428-433.
- [195] Ou, D., & Liu, S. (2019). Tram Network Modeling for Optimizing Timetable, CICTP, pp.1810-1822. <https://doi.org/10.1061/9780784482292>.

- [196] Zhang, T., Mao, B., Xu, Q., & Feng, J. (2017). Timetable Optimization for a Two-Way Tram Line with an Active Signal Priority Strategy. *IEEE Access*.  
[DOI 10.1109/ACCESS.2019.2957437](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2957437).
- [197] Audikana, A., Kaufmann, V., & Messer, M.A. (2015). Governing the Geneva Tram Network: Making Decisions without Making Choices, *Journal of Urban Technology*, vol. 22, pp. 103-124.
- [198] Lorenc, A., Michnej, M., & Szkoda, M. (2016). Information system aiding the logistics processes of loading and securing in railway transport, *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, vol. 8, No. 5, pp. 568 – 589.
- [199] Janušová, L., & Čičmancová, S. (2016). Improving safety of transportation by using intelligent transport systems, *Procedia Engineering*, vol. 134, pp. 14-22.  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.031>
- [200] Oskarbski, J., Birr, K., Miszewski, M., & Źarski, K. (2015). Estimating the average speed of public transport vehicles based on traffic control system data, *International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS)*, pp. 287-293. Corpus ID: 17881747. [DOI:10.1109/MTITS.2015.7223269](https://doi.org/10.1109/MTITS.2015.7223269).
- [201] Ullrich, O., Lückerath, D., & Speckenmeyer, E. (2015). Do regular timetables help to reduce delays in tram networks? It depends, *Public Transport*.  
[DOI: 10.1007/s12469-015-0115-6](https://doi.org/10.1007/s12469-015-0115-6).
- [202] Begen, M.A., Fung, R., Granot, D., Granot, F., Hall, C., & Kluczny, B. (2018). Evaluation of a centralised transportation assistance system for passengers with special needs at a Canadian airport, *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, vol. 10, No. 3, pp. 355 – 376.
- [203] Stopka, O., Kampf, R., Lizbetin, J., & Hlatka, M. (2016). Proposal for optimizing the timetables within tram subsystem of urban public transport from the international conception, proceeding of the 16th International Scientific Conference Globalization and Its Socio-Economic Consequences, pp. 2135-2142.
- [204] Yildirimoglu, M. & Geroliminis, N. (2013). Experienced travel time prediction for congested freeways, *Transportation Research Part B*, vol. 53, issue C, pp. 45–63.  
[DOI: 10.1016/j.trb.2013.03.006](https://doi.org/10.1016/j.trb.2013.03.006).
- [205] Gershenson, C., & Pineda, L.A. (2009). Why Does Public Transport Not Arrive on Time? The Pervasiveness of Equal Headway Instability, *PLoS ONE*, vol. 4, issue. 10, e7292.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0007292>.

- [206] Nigarnjanagool, S., & Dia, H. (2005). Evaluation of a dynamic signal optimisation control model using traffic simulation, *IATSS Research*, vol. 29, pp. 22-30.  
[https://doi.org/10.1016/S0386-1112\(14\)60115-1](https://doi.org/10.1016/S0386-1112(14)60115-1).
- [207] Chen, S., Xu, H., & Liu, H. (2013). Timing Oversaturated Signals: What Can We Learn from Classic and State-of-the-Art Signal Control Models, *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, vol.13, pp. 97-110.  
[https://doi.org/10.1016/S1570-6672\(13\)60093-8](https://doi.org/10.1016/S1570-6672(13)60093-8).
- [208] Chentoufi, M.A., & Ellaia, R. (2018). Adaptive traffic signal optimization considering emergency vehicle preemption and tram priority using PVS algorithm, *Proceedings of the 3rd International Conference on Smart City Applications SCA '18, Morocco*, no. 76, pp. 1–8, <https://doi.org/10.1145/3286606.3286853>.
- [209] Ghanbarikarekani, M., Zeibots, M., & Zou, Y. (2019). An Algorithm for Reducing Vehicles' Stop Behind the Bus Pre-signals, *Smart Transportation Systems*, vol. 149, pp. 1–8.
- [210] Moutchou, F., Cherkaoui, A., & El Koursi, E.M. (2013). Human factors in the analysis of the “tram-car drivers” at intersections, *Journal of Civil Engineering and Architecture*, ISSN 1934-7359, pp. 562-569.  
[DOI: 10.17265/1934-7359/2014.04.007](https://doi.org/10.17265/1934-7359/2014.04.007).
- [211] Nguyen-Phuoc, D. Q., Currie, G., & De Gruyter, C. (2017). Net Impacts of Streetcar Operations on Traffic Congestion in Melbourne, Australia, *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2648, pp. 1-9.  
<https://doi.org/10.3141/2648-01>.
- [212] Farooq, D., & Moslem, S. (2020). Evaluation and Ranking of Driver Behavior Factors Related to Road Safety by Applying Analytic Network Process, *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*. 48(2), pp. 189–195. <https://doi.org/10.3311/PPtr.13037>.
- [213] Srikanth, S., Mehar, A., & Praveen, K.G.N.V. (2020). Simulation of Traffic Flow to Analyze Lane Changes on Multi-Lane Highways under Non-Lane Discipline, *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, vol.48, issue 2, pp. 109–116.  
<https://doi.org/10.3311/PPtr.10150>.
- [214] Farooq, D., Moslem, & S., Duleba, S. (2019). Evaluation of Driver Behavior Criteria for Evolution of Sustainable Traffic Safety, *Sustainability*, 11, 3142, pp.1-15,  
<https://doi.org/10.3390/su11113142>.

- [215] Qi, W., Wen, H., Wu, Y., & Qin, L. (2017). Effect model of urban traffic congestion on driver's lane-changing behaviour, *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 9(9), pp.1–12. DOI: [10.1177/1687814017724087](https://doi.org/10.1177/1687814017724087).
- [216] Wu, X., & Yang, Y. (2013). A Lane Change Model with the Consideration of Car Following Behavior, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol.96, pp. 2354-2361. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.264>.
- [217] Ding, Z., Peng, H., Nobukawa, K., Bao, S., LeBlanc, D.J., & Pan, C.S. (2017). Analysis of mandatory and discretionary lane change behaviors for heavy trucks, proceeding of the 12th International Symposium on Advanced Vehicle Control, AVEC'14.
- [218] Knoop, V. L., Keyvan-Ekbatani, M., de Baat, M., Taale, H., & Hoogendoorn, S. P. (2018). Lane Change Behavior on Freeways: An Online Survey Using Video Clips, *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2018, pp.11.
- [219] Christian, M. M., Kupferschmid, J., Schwertner, M., Nash, A., & Weidmann, U. (2016). Tram Safety in Mixed Traffic, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, no. 2540, pp. 125–137. DOI: [10.3141/2540-14](https://doi.org/10.3141/2540-14).
- [220] Iatrou, S., & Stavrakakis, I. (1997). An Integrated Regulation and Scheduling Scheme for Real-Time Traffic Management. DOI: [10.1109/GLOCOM.1997.644361](https://doi.org/10.1109/GLOCOM.1997.644361).
- [221] Scheffler, R., & Strehler, M. (2017). Optimizing Traffic Signal Settings for Public Transport Priority, 17th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems ATMOS. DOI: [10.4230/OASIS.ATMOS.2017.9](https://doi.org/10.4230/OASIS.ATMOS.2017.9).
- [222] Zhou, W., Bai, Y., Li, J., Zhou, Y., & Li, T. (2019). Integrated Optimization of Tram Schedule and Signal Priority at Intersections to Minimize Person Delay, *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2019.
- [223] Zhao, X., Li, Y., Xu, S. & Zhai, H. (2017). Modeling a modern tram system integrated with a road traffic simulation, *SAGE Journals*, vol. 94, issue.1, pp. 77-90. <https://doi.org/10.1177/0037549717734420>.
- [224] Christofa, E., & Skabardonis, A. (2011). Traffic Signal Optimization with Application of Transit Signal Priority to an Isolated Intersection, *Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2259, issue.1, pp. 192-201.
- [225] Yang, M., Ding, J., Wang, W., & Ma, Y. Y. (2018). A coordinated signal priority strategy for modern trams on arterial streets by predicting the tram dwell time, *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 22, issue 2, pp.823–836.

<https://doi.org/10.1007/s12205-017-1187-4>.

- [226] Anusha, S.P., Anand, R.A., & Vanajakshi, L. (2012). Data Fusion Based Hybrid Approach for the Estimation of Urban Arterial Travel Time, *Journal of Applied Mathematics*, vol. 2012, pp. 17.
- [227] Radhakrishnan, P., & Mathew, T.V. (2011). Passenger car units and saturation flow models for highly heterogeneous traffic at urban signalised intersections, *Transportmetrica*, vol. 7, pp. 141-162.
- [228] Preethi, P., Varghese, A., & Ashalatha, R. (2016). Modelling Delay at Signalized Intersections under Heterogeneous Traffic Conditions, *Transportation Research Procedia*, vol. 17, pp. 529-538. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.11.107>.



## **Résumé**

L'Algérie comme tous les pays du monde, connaît une explosion considérable du parc automobile due à la croissance de la population et le besoin de déplacement, ce qui a créé un déséquilibre dans l'état du trafic routier dans la plupart des villes algériennes, par conséquent, causant le phénomène de congestion du trafic routier. L'objectif de cette thèse consiste à trouver une solution à l'embouteillage dans les intersections complexes urbaines en croisement avec une ligne de tramway, ceci par une gestion optimale du trafic mixte. La méthodologie qui a été suivie est basée sur l'évaluation et l'optimisation de deux grands axes, qui sont la performance du tramway et la régulation du trafic dans les intersections à trafic mixte (tramways - véhicules). Cela a été fait à travers une étude approfondie sur la performance du tramway pour montrer comment elle peut aggraver ou améliorer l'état de la circulation, ainsi par une combinaison de deux modèles statiques qui permettent de fluidifier le trafic dans ce type d'intersections, en se basant sur des données réelles de l'exploitation du tramway et de la régulation actuelle du trafic. Les résultats trouvés ont prouvé d'une part que le tramway de Constantine est mal géré et que sa performance est mauvaise surtout sur le plan confort et régularité. C'est ce qui s'est répercuté négativement sur la fluidité de la circulation dans les intersections à trafic mixtes. D'autre part, la régulation du flux de circulation dans l'intersection ne répond pas d'une façon optimale aux conditions existantes, surtout que la synchronisation des feux ne répond pas à la demande réelle. Les deux modèles combinés appliqués dans notre étude ont permis d'améliorer la fluidité du trafic et de réduire efficacement la congestion à l'intersection la plus complexe. De plus, les recommandations suggérées permettent d'améliorer encore plus la performance du tramway et de fluidifier la circulation. Enfin, ce travail a prouvé la possibilité de réduire la congestion du trafic tout en optimisant la gestion des systèmes de contrôle du trafic mixte, simultanément, sans l'utilisation de nouvelles infrastructures ou de technologies supplémentaires.

**Mots- clés :** congestion, intersections complexes urbaines, régulation du trafic, performance, exploitation du tramway, confort, régularité.

## **Abstract**

Algeria, like all countries around the world, is experiencing a considerable explosion of the automobile fleet due to population growth and the need for travel, which have created an imbalance in the state of road traffic in most Algerian cities, consequently causing the phenomenon of road traffic congestion. The objective of this thesis is to find a solution to congestion in complex urban intersections crossing with a tramway line, through optimal management of mixed traffic. The methodology that has been followed is based on the evaluation and optimization of two main axes, which are the performance of the tramway and the traffic control in mixed traffic intersections (tramways - vehicles). This has been done through an in-depth study of the tramway performance to show how it can worsen or improve the traffic condition, thus through a combination of two static models that allow fluidifying the traffic in this type of intersections, based on real data of the tramway operation and the actual traffic regulation. The results found proved, on the one hand, that Constantine tramway is badly managed and that its performance is weak, especially in terms of comfort and regularity. This has had a negative impact on traffic flow in mixed traffic intersections. On the other hand, the traffic flow regulation in the intersection does not respond optimally to the existing conditions, especially because the timing of the traffic lights does not respond to the actual demand. The two combined models applied in our study improved traffic flow and effectively reduced congestion at the most complex intersection. In addition, the suggested recommendations allow further improvement of the tramway's performance and traffic fluidity. Finally, this work has proved that it is possible to reduce traffic congestion while optimizing the management of mixed traffic control systems, simultaneously, without the use of new infrastructure or additional technologies.

**Keywords:** congestion, complex urban intersections, traffic control, performance, tram operation, comfort, regularity.

## ملخص

تشهد الجزائر كغيرها من دول العالم، نمواً معتبراً في حاضرة السيارات بسبب النمو السكاني والحاجة للتنقل، وهو الأمر الذي خلق خللاً في حركة المرور في معظم المدن الجزائرية، وتسبب في ظاهرة الازدحام المروري. يتمثل الهدف من هذه الأطروحة في إيجاد حل للاختناقات المرورية في التقاطعات الحضرية المعقدة التي تتقاطع مع خط الترامواي، وذلك من خلال الإدارة المثلى لحركة المرور المختلطة. وقد اعتمدت المنهجية المتبعة على تقييم وتحسين محورين رئيسيين هما أداء الترامواي، وتنظيم حركة المرور في التقاطعات ذات حركة المرور المختلطة (المركبات- الترامواي). تم ذلك من خلال دراسة معمقة لأداء الترامواي لإظهار كيف يمكن أن يؤدي إلى تفاقم أو تحسين حالة حركة المرور، بالإضافة إلى الجمع والمزج بين نموذجين ثابتين يسمحان لحركة المرور بالتدفق بسلاسة أكبر في هذا النوع من التقاطع، استناداً إلى البيانات الفعلية من تشغيل الترامواي وتنظيم حركة المرور الحالية. وقد أثبتت النتائج، من ناحية أن ترامواي قسنطينة يُدار بشكل سيء وأن أدائه ضعيف لاسيما من حيث الراحة والانتظام. وهو ما أثر سلباً على تدفق حركة المرور في التقاطعات المختلطة. من ناحية أخرى، لا يستجيب تنظيم حركة المرور في التقاطع بالشكل الأمثل للظروف الحالية، خاصة وأن تزامن الأضواء لا يستجيب للطلب الحقيقي. ساعد النموذجان المشتركان المطبقان في الدراسة على تحسين تدفق حركة المرور وتقليل الازدحام بشكل فعال في أكثر التقاطعات تعقيداً. وبالإضافة إلى ذلك، تعمل التوصيات المقترحة على تحسين أداء الترامواي وجعل حركة المرور أكثر مرونة. أخيراً، أثبت هذا العمل إمكانية تقليل الازدحام المروري مع تحسين إدارة أنظمة التحكم في حركة المرور المختلطة، في آن واحد، دون استخدام بنية تحتية جديدة أو تقنيات إضافية.

**الكلمات المفتاحية:** الازدحام، التقاطعات الحضرية المعقدة، تنظيم حركة المرور، الأداء، التنظيم، تشغيل الترامواي، الراحة، الانتظام.

## **Liste de Publications et Communications Scientifiques**

### **1- Publications scientifiques**

**Khelf Mouloud, Boukebbab Salim and Bhourri Neila.** “Evaluation of the tram intelligent system management by an analysis of its key performance indicators for an optimal mixed traffic control in Algeria.” International Journal of Shipping and Transport Logistics. Accepted in 31 July 2020 (in press).

**Mouloud Khelf, Salim Boukebbab.** “The effect of noise on the comfort of passengers inside the tramway and its impact on traffic congestion in the urban area”. Journal of Vibroengineering, ISSN Print 1392-8716, February 2018. Volume 20, Issue 1, Pages (530-540).

### **2- Communications Scientifiques**

**Khelf Mouloud, Boukebbab Salim, Bhourri Neila and Boulahlib Mohamed Salah.** “The Effect of the Operating Support System Control on the Tram Performance and its Influence on the Traffic Regulation in Constantine, Algeria.” The IEEE 7th edition of the 2019 International Conference on Advanced Logistics and Transport (IEEE ICALT 2019), Marrakech, Morocco, 14-16 June 2019.

**Khelf Mouloud, Boukebbab Salim, Bhourri Neila and Boulahlib Mohamed Salah.** “Tram Service Quality and Its Impact On the Passengers' Modal Choice in Constantine City (Algeria).” The 18th International Multi-Conference Reliability and Statistics in Transportation and Communication, Riga, Latvia, October 17 – October 21, 2018. Published in Springer.

**Mouloud Khelf, Salim Boukebbab.** “The effect of vibration inside the Constantine’s tramway on the comfort of passengers.” Proceeding of the 23rd International Conference Vibro-Engineering in Istanbul, Turkey, October 7-9th 2016, At Istanbul, Turkey.