

**« MODELISATION ET SIMULATION DE L'AMELIORATION DU TRAFIC ROUTIER A  
ANTANANARIVO : CAS DE LA MIS EN PLACE D'UN NOUVEL ECHANGEUR A  
ANOSIZATO»**

1-ANDRIVONIRINA NATIORA FANILO  
Ecole Doctorale Ingénierie et Géosciences (INGE)  
2- RAHAJAMANANA Jasmin  
Maitre de Conférences  
3- RIVONIRINA RAKOTOARIVELO  
Maitre de Conférences  
Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo  
4- FIDIHERY Toky Tantely  
Maitre de Conférences  
Université de Toliara  
6- Pr RAKOTONIRINA Solonjatovo  
Ecole Doctorale Ingénierie et Géosciences (INGE)

## **RESUME**

Cet article présente une étude approfondie de l'amélioration de la fluidité du trafic à Antananarivo, focalisée sur la mise en place d'un nouvel échangeur à Anosizato. En utilisant des techniques de modélisation et de simulation développées en Python, l'étude exploite les bibliothèques random, threading, et pygame pour créer des modèles dynamiques de trafic. Ces modèles permettent de simuler divers scénarios de circulation, d'évaluer les impacts potentiels de l'échangeur sur la réduction des embouteillages, et d'optimiser les flux de véhicules. Les résultats montrent une amélioration significative de la fluidité du trafic, démontrant l'efficacité de l'infrastructure proposée. Cette approche innovante offre des informations essentielles pour les urbanistes et les décideurs, en soutenant des stratégies de développement urbain durable et en améliorant la qualité de vie des résidents d'Antananarivo.

**Mots-clés :** Modélisation, Simulation, Trafic, Échangeur routier, Antananarivo, Python, Fluidité

## **ABSTRACT**

This paper presents an in-depth study on improving traffic flow in Antananarivo, focusing on the implementation of a new interchange at Anosizato. Using modeling and simulation techniques developed in Python, the study leverages the random, threading, and pygame libraries to create dynamic traffic models. These models allow for the simulation of various traffic scenarios, evaluation of the interchange's potential impact on reducing congestion, and optimization of vehicle flows. The results show a significant improvement in traffic fluidity, demonstrating the proposed infrastructure's effectiveness. This innovative approach provides essential information for urban planners and decision-makers, supporting sustainable urban development strategies and enhancing the quality of life for Antananarivo's residents.

**Keywords:** Modeling, Simulation, Traffic, Interchange, Antananarivo, Python, Fluidity

## INTRODUCTION

La ville d'Antananarivo, capitale de Madagascar, connaît une croissance démographique rapide et une urbanisation accélérée, entraînant une augmentation significative du trafic routier. Ce phénomène exacerbe les problèmes de congestion, impactant négativement la mobilité urbaine et la qualité de vie des habitants. Face à ces défis, l'amélioration de la fluidité du trafic devient une priorité pour les autorités locales et les urbanistes

L'un des projets envisagés pour atténuer ces problèmes est la construction d'un nouvel échangeur à Anosizato, une zone stratégique pour la circulation de la ville. Un échangeur routier permet de connecter différentes routes à différents niveaux, facilitant ainsi la transition fluide des véhicules et réduisant les conflits de trafic aux intersections. La mise en place d'une telle infrastructure à Anosizato pourrait transformer de manière significative la dynamique du trafic à Antananarivo.

Pour évaluer l'impact potentiel de cette infrastructure, cet article propose une modélisation et une simulation détaillées du trafic à Anosizato avant et après la mise en place de l'échangeur. En utilisant le langage de programmation Python et ses bibliothèques `random`, `threading`, et `pygame`, on a développé des modèles dynamiques qui simulent divers scénarios de circulation. Ces simulations permettent d'anticiper les effets de l'échangeur sur la fluidité du trafic et d'identifier les optimisations possibles.

L'objectif de cette étude est de fournir une évaluation rigoureuse et basée sur des données des impacts de l'échangeur d'Anosizato sur la réduction des embouteillages et l'amélioration des flux de véhicules. En fournissant des informations essentielles et des recommandations aux urbanistes et aux décideurs, on espère contribuer à des stratégies de développement urbain durable et à l'amélioration de la qualité de vie des résidents d'Antananarivo.

## MATERIELS

### a) Outils informatiques et de modélisation

Pour la modélisation, on a utilisé divers outils informatiques et de modélisation. Les principales technologies employées incluent Python pour le développement des scripts et l'analyse des données, notamment grâce à ces bibliothèques comme pandas pour la manipulation des données, numpy pour les calculs numériques, et scipy pour les statistiques. On a également utilisé des bibliothèques comme TensorFlow Probability pour la construction et l'inférence des modèles. En complément, les environnements de développement intégrés (IDE) tels que Jupyter Notebook et PyCharm ont été utilisés pour le développement et la visualisation interactive des résultats. Enfin, des outils de gestion des versions comme Git ont été essentiels pour le suivi des modifications du code source.

### b) Langage de programmation

*Python* : Langage de programmation utilisé pour développer des modèles et des simulations.

### c) Framework (Bibliothèques Python)

- i. *random* : Pour la génération de données aléatoires.
- ii. *Threading* : Pour la gestion des processus parallèles.
- iii. *Pygame* : Pour la visualisation graphique et la simulation en temps réel.

### d) Diagramme de trajectoire des véhicules

Un diagramme de trajectoire des véhicules est un outil puissant pour visualiser le comportement du trafic sur un corridor. En analysant les courbes et les points spécifiques, on peut identifier des zones de congestion, estimer les vitesses moyennes, et évaluer l'efficacité des mesures de gestion du trafic mises en place.

## METHODOLOGIE

### a) *Formule mathématiques utilisés*

#### *Analyse de la Fluidité du Trafic*

$$\text{Débit de Trafic : } Q = \frac{V}{T}$$

Où Q est le débit de trafic, V est le volume de trafic, et T est le temps.

$$\text{Densité du Trafic (K) : } K = \frac{V}{L}$$

Où K est la densité du trafic, V est le volume de trafic, et L est la longueur de la route.

$$\text{Vitesse Moyenne (V}_m\text{) : } V_m = \frac{D}{T}$$

Où V<sub>m</sub> est la vitesse moyenne, D est la distance parcourue, et T est le temps.

### b) *Modélisation du Trafic*

Modèle de Queue de Circulation : Utiliser des modèles comme le modèle de queue de Clark, ou le modèle de la théorie des files d'attente.

Équations de la Théorie des Files d'Attente : Pour évaluer les performances des intersections et des bretelles :

$$\text{Temps d'attente moyen (W) : } W = \frac{1}{\mu - \lambda}$$

Où  $\lambda$  est le taux d'arrivée et  $\mu$  est le taux de service.

$$\text{Nombre moyen de véhicules en attente (L) : } L = \frac{\lambda}{\mu - \lambda}$$

### c) *Intelligent Driver Model (IDM) ou Modèle du Conducteur Intelligent*

On a développé un modèle appelé le Modèle du Conducteur Intelligent. Ce modèle illustre l'accélération de l'i-ème véhicule en fonction de ses propres variables et de celles du véhicule qui se trouve devant lui. On peut définir l'équation dynamique comme indiqué ci-dessous :

$$\frac{dv_i}{dt} = a_i \left( 1 - \left( \frac{v_i}{v_{0,i}} \right)^\delta - \left( \frac{S^*(v_i, \Delta v_i)}{S_i} \right)^2 \right)$$

$$S^*(v_i, \Delta v_i) = S_{0,i} + v_i T_i + \frac{v_i, \Delta v_i}{\sqrt{2a_i b_i}}$$

Où :

$S_{0,i}$ : Ce paramètre est la distance minimale souhaitée entre le véhicule i et le véhicule i-,

$v_{0,i}$ : Ce paramètre est la vitesse maximale souhaitée du véhicule i,

$\delta$ : Ce paramètre est l'exposant d'accélération, et il contrôle la "fluidité" de l'accélération.

$T_i$ : Ce paramètre est le temps de réaction du conducteur du véhicule i,

$a_i$ : Ce paramètre est l'accélération maximale pour le véhicule

$b_i$ : Ce paramètre est la décélération confortable pour le véhicule i,

$S^*$ : Ce paramètre est la distance souhaitée entre le véhicule i et le véhicule i-1

#### ***d) Modèle de Graphe de Diagramme de Trajectoire des Véhicules***

Un graphe de diagramme de trajectoire des véhicules sur un corridor issu d'une simulation de trafic routier présente souvent les données de manière à visualiser les mouvements des véhicules le long d'une section de route au fil du temps.

##### **Axes**

*Axe des Ordonnées (Y-axis)* : Distance à parcourir (en mètres, m).

Cet axe représente la position des véhicules le long du corridor.

*Axe des Abscisses (X-axis)* : Temps (en secondes, s).

Cet axe montre le passage du temps pendant la simulation.

*Courbes de Différentes Couleurs*

Chaque courbe représente la trajectoire d'un véhicule spécifique.

La pente de chaque courbe indique la vitesse du véhicule. Une pente plus raide signifie une vitesse plus élevée, tandis qu'une pente plus douce indique une vitesse plus faible.

Les courbes peuvent aussi montrer des arrêts ou des ralentissements lorsque la pente devient horizontale ou quasi horizontale.

### *Zones d'Intérêt*

Si plusieurs courbes atteignent cette ligne, cela indique que les véhicules ont parcouru la longueur totale du corridor.

Les variations de la pente des courbes à cet endroit montre les différences de temps de trajet.

Une concentration de courbes avec des pentes variables indique une zone de congestion, des ralentissements ou des changements de vitesse dus à des conditions routières spécifiques ou à des intersections.

## *e) Modèle du graphe de flux de trafic*

### *Éléments du Graphe*

Nœuds : Ce sont les points de connexion sur le réseau routier, tels que les intersections ou les points de changement de direction.

Liens : Ce sont les segments de route ou les voies qui connectent les nœuds.

Temps (t) : Il représente un instant spécifique dans la simulation où vous allez analyser le flux de trafic

### *Couleurs du Graphe*

Couleur Violet : représente un type spécifique de flux de trafic, comme une voie ou un groupe de véhicules. Il est crucial de se référer à la légende du graphe pour comprendre ce que chaque couleur représente exactement.

Couleur Bleu : représente un autre type de flux de trafic ou une autre caractéristique spécifique du réseau. Comme pour le violet, consultez la légende pour des détails précis.

Zone Spécifique : indique une région particulière du réseau où se produisent des événements ou des caractéristiques spécifiques, comme une congestion ou un changement dans le flux de trafic.

### *Analyse des Couleurs :*

Violet et Bleu : Comparaison des flux du trafic représentés par ces couleurs pour voir comment ils interagissent. Si le violet représente le trafic entrant et le bleu le trafic sortant, on peut évaluer les points de congestion ou les zones de fluidité.

Densité et Débit : Les zones où les couleurs sont plus intenses ou plus concentrées peuvent indiquer des points de congestion ou de forte densité de trafic.

### Identification des Zones de Congestion ou de Problèmes

Zones avec Couleurs Intenses : Les zones avec des couleurs plus intenses ou plus concentrées peuvent indiquer des points où le trafic est plus dense ou où des problèmes surviennent.

Changements au Fil du Temps : Comparaison du graphe à d'autres moments pour voir comment le flux de trafic évolue au fil du temps. Cela aide à identifier les tendances ou les effets des interventions de gestion du trafic.

## RESULTATS

Pour la suite, on présente ici les résultats détaillés de la simulation de trafic réalisée pour évaluer l'impact de la mise en place d'un nouvel échangeur à Anosizato sur la fluidité du trafic à Antananarivo. Afin de comprendre pleinement les effets de la nouvelle infrastructure, nous avons analysé plusieurs paramètres clés, notamment le volume de trafic, le débit de trafic, la densité de circulation, la vitesse moyenne des véhicules, et le temps de trajet. Les résultats comparatifs entre les périodes de pointe et les heures creuses, avant et après la mise en place de l'échangeur, sont illustrés ci-dessous.

### *1) Congestion et d'efficacité*

#### **Paramètres de Simulation :**

*Nom du Scénario :*

*Durée de la Simulation :* 3600 s

*Nombre de Véhicules :* 8340 véhicules

*Longueur Totale de la Route :* 12000 m

*Largeur de Discrétisation du Temps :* 5 s

*Taille des Groupes (Platoons) :* 5 véhicules

*Nombre de Pas de Temps :* 720

*Nombre de Groupes (Platoons) :* 1668

*Nombre de Liens (Links) :* 24

*Nombre de Nœuds (Nodes) :* 12

*Temps de Configuration :* 0.04 s



Le tableau ci-dessous représente les valeurs des différents paramètres du Trafic routier issus du modèle.

*Tableau 1: valeurs des différents paramètres du Trafic routier issus du modèle.*

<b>Temps</b>	<b>Nombre de Véhicules</b>	<b>Vitesse Moyenne</b>	<b>Temps de Calcul</b>
0 s	0 véhicules	0.0 m/s	0.00 s
600 s	575 véhicules	5.3 m/s	0.28 s
1200 s	755 véhicules	3.7 m/s	0.58 s
1800 s	1050 véhicules	1.7 m/s	0.85 s
2400 s	1275 véhicules	1.8 m/s	1.10 s
3000 s	1280 véhicules	1.7 m/s	1.36 s
3595 s	1315 véhicules	1.6 m/s	1.59 s

Les résultats issus de cette simulation est de :

Résultats :

***Vitesse Moyenne*** : 2.8 m/s

***Nombre de Trajets Terminés*** : 5260 / 8340

***Temps de Trajet Moyen des Trajets*** : 566.6 s

***Délai Moyen des Trajets*** : 411.8 s

***Ratio de Délai*** : 0.727

### **Interprétation de la simulation**

*Vitesse Moyenne* : 2.8 m/s

#### *Interprétation :*

La vitesse moyenne des véhicules sur le réseau est de 2.8 mètres par seconde (m/s), ce qui équivaut à environ 10 km/h.

Cette vitesse est relativement basse, indiquant probablement une congestion sévère ou des conditions de circulation défavorables.

***Nombre de Trajets Terminés*** : 5260 / 8340

#### *Interprétation :*

Sur un total de 8340 trajets prévus, 5260 ont été terminés avec succès.

Cela signifie que 5260 véhicules ont pu parcourir leur itinéraire complet, tandis que 2810 trajets n'ont pas été complétés, possiblement en raison de congestion, d'incidents ou d'autres perturbations.

*Temps de Trajet Moyen des Trajets : 566.6 s*

*Interprétation :*

Le temps moyen pour compléter un trajet est de 566.6 secondes, soit environ 9.4 minutes.

Un temps de trajet aussi élevé peut être indicatif d'une congestion importante ou d'un réseau qui peine à gérer le volume de trafic.

*Délai Moyen des Trajets : 411.8 s*

*Interprétation :*

Le délai moyen des trajets est de 411.8 secondes, ce qui représente la différence entre le temps de trajet réel et le temps de trajet idéal ou attendu.

Ce délai est un indicateur de l'impact de la congestion ou des autres facteurs perturbateurs sur la fluidité du trafic. Un délai élevé suggère des retards significatifs.

*Ratio de Délai : 0.727*

*Interprétation :*

Le ratio de délai est calculé en divisant le délai moyen par le temps de trajet moyen, soit 0.727, un ratio de 0.727 signifie que le délai représente environ 72.7 % du temps total de trajet. Cela indique que la majeure partie du temps de trajet est constituée de retards au lieu de déplacement fluide.

***Synthèse et Analyse***

*Conditions de Circulation :*

La vitesse moyenne de 2.8 m/s est très basse, indiquant probablement une congestion sévère sur le réseau. Les véhicules se déplacent lentement, ce qui peut être dû à une densité de trafic élevée ou à des problèmes sur le réseau.

*Efficacité du Réseau :*

Le nombre de trajets terminés est inférieur au nombre total prévu, ce qui peut refléter des problèmes de capacité ou des interruptions dans le réseau.

*Impact de la Congestion :*

Le temps de trajet moyen élevé et le délai moyen élevé montrent que les conditions de circulation entraînent des retards importants pour les conducteurs.

*Performance du Réseau :*

Le ratio de délai élevé suggère que le réseau est loin de ses performances optimales, avec une grande partie du temps de trajet étant constituée de délais dus à la congestion.

*Synthèse :*

Ces résultats montrent que le réseau routier est confronté à des problèmes significatifs de congestion et d'efficacité. La faible vitesse moyenne et les longs temps de trajet, associés à un ratio de délai élevé, indiquent que des améliorations sont nécessaires pour optimiser la circulation et réduire les retards. Des interventions telles que l'amélioration des infrastructures, l'optimisation des feux de circulation, ou des stratégies de gestion de la demande pourraient être nécessaires pour améliorer la performance du réseau.

## 2) Débit moyen du réseau routier

La figure ci-dessous représente le *débit moyen du réseau routier en fonction de la densité moyenne issue du modèle*.

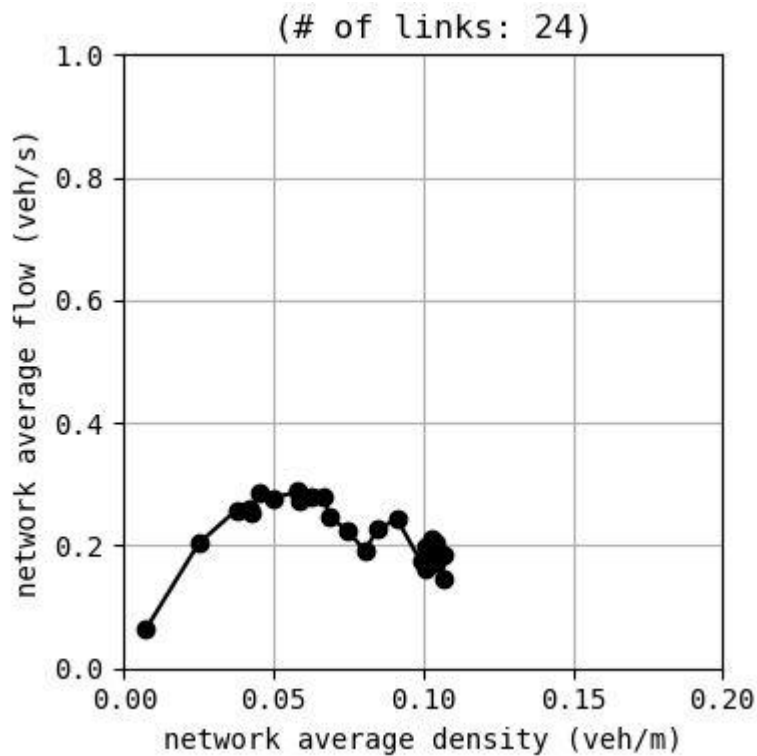


Figure 1: Débit Moyen du réseau routier en fonction du densité moyenne

### Compréhension des Axes

Axe des Ordonnées (Y-axis) : Débit Moyen du Réseau (flow, en veh/s), Cela mesure le nombre de véhicules passant par une section du réseau par unité de temps.

Axe des Abscisses (X-axis) : Densité Moyenne du Réseau (density, en veh/m), Cela mesure le nombre moyen de véhicules par unité de longueur de route.

### Interprétation de la Courbe

#### Phase d'Accroissement Initial (de 0.0 à 0.05 veh/m) :

Au début, lorsque la densité moyenne du réseau augmente de 0.0 à 0.05 veh/m, la courbe montre une augmentation régulière du débit moyen du réseau. Cela suggère que,

jusqu'à un certain point, l'augmentation de la densité permet une augmentation proportionnelle du débit, ce qui est typique dans les conditions de faible densité où l'ajout de véhicules ne cause pas encore de congestion majeure.

#### *Phase d'Oscillation (autour de 0.2 à 0.4 veh/s) :*

Lorsque la densité moyenne du réseau atteint des niveaux plus élevés, la courbe commence à osciller autour de 0.2 à 0.4 veh/s. Cette oscillation indique que le réseau approche d'une capacité de congestion ou d'un état de saturation. À ce stade :

*Débit Stable* : Le débit moyen du réseau n'augmente plus de manière significative malgré l'augmentation de la densité. Cela signifie que le réseau fonctionne près de sa capacité maximale, et des augmentations supplémentaires de densité n'amélioreront pas le débit.

*Effets de Congestion* : L'oscillation reflète des effets de congestion ou des irrégularités dans la circulation qui rendent le débit plus variable et moins prévisible.

#### *Analyse de la Performance du Réseau*

##### *Efficacité du Réseau :*

Dans les phases initiales avec faible densité, le réseau est capable d'absorber plus de trafic sans problème majeur. Cependant, à mesure que la densité augmente, le réseau atteint un point où l'augmentation du trafic commence à causer des problèmes de congestion, limitant la capacité à augmenter le débit.

##### *Capacité de Saturation :*

Le point où la courbe commence à osciller comme une approximation de la capacité de saturation du réseau. C'est le point où le réseau est saturé, et toute augmentation supplémentaire de la densité n'améliorera pas le débit.

##### *Optimisation et Gestion :*

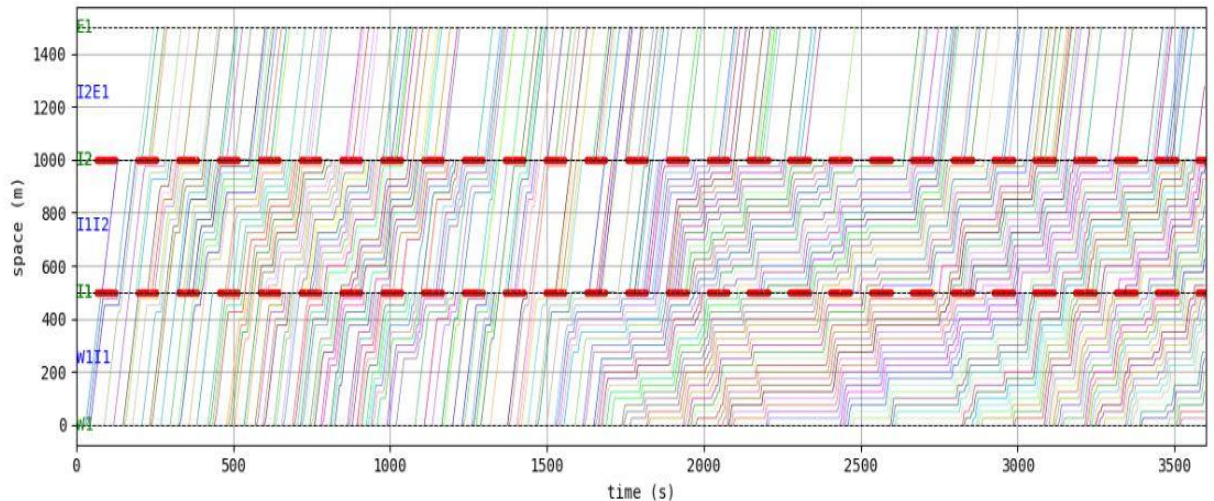
Ce type de courbe aide à comprendre les limites de performance du réseau et à gérer le trafic de manière plus efficace, en évitant de dépasser les niveaux de densité qui entraînent des congestions sévères.

Le graphe montre que, jusqu'à un certain niveau de densité, le débit moyen du réseau augmente de manière régulière. Une fois la densité au-delà de ce seuil, le débit devient plus stable et oscille, indiquant que le réseau approche de sa capacité maximale et que des niveaux

de congestion peuvent se développer. Cela aide à évaluer l'efficacité du réseau et à planifier des interventions pour améliorer la gestion du trafic.

### 3) *Diagramme de trajectoire des véhicules sur un corridor*

La figure ci-dessous représente le *diagramme de trajectoire des véhicules sur un corridor issu du modèle*.



*Figure 2: Diagramme de trajectoire des véhicules sur un corridor*

Un corridor désigne un itinéraire ou un axe de transport principal comprenant une série de routes, d'autoroutes ou d'autres infrastructures de transport, permettant le déplacement de véhicules entre deux points ou plus.

#### **Interprétation**

Axe des Ordonnées (Y-axis) : Distance à parcourir (en mètres, m).

Les pointillés horizontaux à 1000m indiquent une distance clé qui est la longueur totale du corridor ou un point de repère important.

Les autres pointillés horizontaux situés entre 400m et 600m indiquent une zone d'intérêt particulière, comme une section de route sujette à des ralentissements ou à des congestions.

Axe des Abscisses (X-axis) : Temps (en secondes, s).

*Pointillés Horizontaux rouge à 1000m :*

Plusieurs courbes atteignent cette ligne, cela indique que les véhicules ont parcouru la longueur totale du corridor. Les variations de la pente des courbes à cet endroit montrent les différences de temps de trajet.

*Pointillés Horizontaux rouge entre 400m et 600m :*

Une concentration de courbes avec des pentes variables entre ces points indique une zone de congestion, des ralentissements ou des changements de vitesse dus à des conditions routières spécifiques ou à des intersections.

Les sections où les courbes deviennent horizontales ou où il y a une forte concentration de courbes indique des embouteillages ou des ralentissements. Ici les courbes sont moins espacées de manière uniforme et montrent des pentes constantes, cela suggère un flux de trafic fluide. Ici le graphe montre plusieurs courbes colorées représentant des véhicules, et qu'entre 400m et 600m, les courbes sont horizontales ou presque horizontales, cela indique une zone de congestion où les véhicules ralentissent considérablement ou s'arrêtent. Et au-delà de 600m, les courbes reprennent une pente plus raide, cela montre que les véhicules accélèrent après avoir traversé la zone de congestion.

#### 4) Flux de trafic sur un réseau routier

La figure ci-dessous représente le flux de trafic sur un réseau routier issu du modèle.

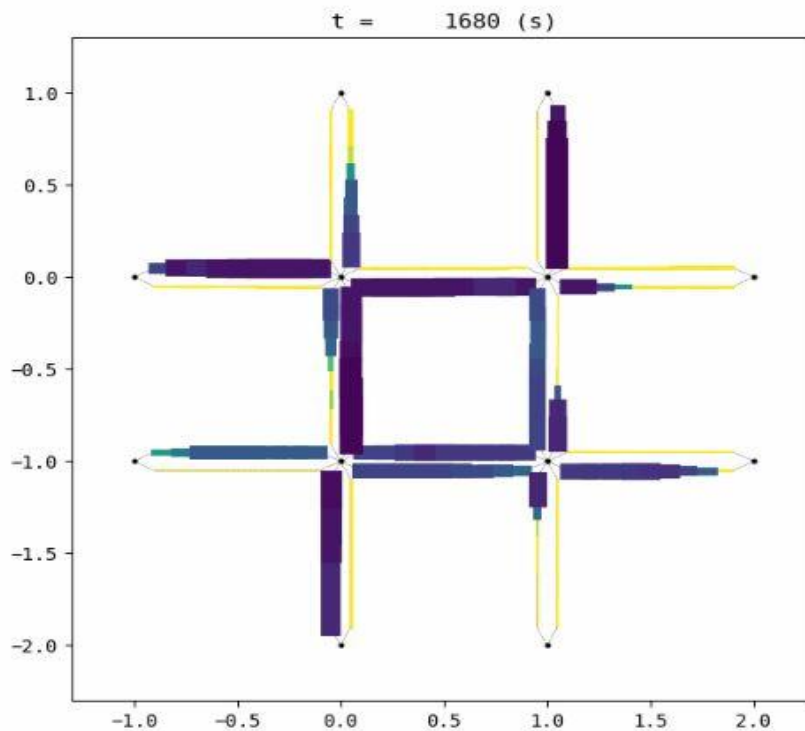


Figure 3: Flux de trafic sur un réseau routier

#### Interprétation

*Flux de Trafic* : Les graphiques montrent comment les véhicules se déplacent à travers les nœuds et les liens. Une augmentation de la densité de couleur peut indiquer un débit de trafic plus élevé.

*Points de Congestion* : Les zones avec une accumulation importante de trafic peuvent signaler des problèmes de congestion ou de performance du réseau.

*Comparaison entre Liens* : Analysez les différences de flux entre les différents liens pour évaluer les performances relatives du réseau.

Ici à  $t = 1680$  secondes, on observe que les liens entre les nœuds 1 et 2 sont violets et que le lien entre les nœuds 2 et 3 est bleu, cela indique que le trafic est plus dense entre les nœuds 1 et 2, tandis que le trafic est moins dense ou plus fluide entre les nœuds 2 et 3. La zone spécifique indique une intersection ou un point critique où le trafic est particulièrement dense ou où des changements notables se produisent.



## ***5) Solutions proposées et étude comparatives***

Le tableau ci-dessous représente les solutions proposées et étude comparatives issus de la modélisation Dynamique du Trafic à Anosizato

### ***Explications des Colonnes :***

***Paramètre*** : Différentes métriques mesurées ou calculées pendant la simulation.

***Scénario*** : Période de la journée et état (avant ou après l'échangeur).

***Valeur Avant l'Échangeur*** : Valeur des paramètres avant la mise en place de l'échangeur.

***Valeur Après l'Échangeur*** : Valeur des paramètres après la mise en place de l'échangeur.

***Description*** : Explications des paramètres mesurés.

Tableau 2: Résultats de la Modélisation Dynamique du Trafic à Anosizato

Paramètre	Scénario	Valeur Avant l'Échangeur	Valeur Après l'Échangeur	Description
<b>Volume de Trafic (V)</b>	Matin (Heure de Pointe)	1.500 véhicules/h	1.500 véhicules/h	Nombre total de véhicules passant par un point spécifique par heure
	Après-midi (Heure Creuse)	1.300 véhicules/h	1.300 véhicules/h	
<b>Débit de Trafic (Q)</b>	Matin (Heure de Pointe)	900 véhicules/h	1.000 véhicules/h	Nombre de véhicules qui passent par un point spécifique par heure
	Après-midi (Heure Creuse)	800 véhicules/h	900 véhicules/h	
<b>Densité de Circulation (K)</b>	Matin (Heure de Pointe)	0.5 véhicules/mètre	0.25 véhicules/mètre	Nombre de véhicules par unité de longueur de route
	Après-midi (Heure Creuse)	0.4 véhicules/mètre	0.2 véhicules/mètre	
<b>Vitesse Moyenne (V_m)</b>	Matin (Heure de Pointe)	7 km/h	40 km/h	Vitesse moyenne des véhicules
	Après-midi (Heure Creuse)	8 km/h	38 km/h	
<b>Temps de Trajet (T)</b>	Matin (Heure de Pointe)	63 minutes	9 minutes	Temps moyen nécessaire pour parcourir un itinéraire donné
	Après-midi (Heure Creuse)	48 minutes	7 minutes	
<b>Temps d'Arrêt Moyen</b>	Matin (Heure de Pointe)	35 minutes	2 minutes	Temps moyen pendant lequel les véhicules sont arrêtés
	Après-midi (Heure Creuse)	25 minutes	1 minute	
<b>Nombre de Collisions</b>	Matin (Heure de Pointe)	5	1	Nombre de collisions ou d'incidents par heure
	Après-midi (Heure Creuse)	3	0	

### ***Interprétation des Résultats :***

Volume de Trafic reste constant avant et après l'échangeur, indiquant que le nombre total de véhicules n'a pas changé, mais leur gestion s'est améliorée.

Débit de Trafic augmente après la mise en place de l'échangeur, montrant une meilleure capacité de la route à gérer le trafic.

Densité de Circulation diminue, ce qui signifie que les véhicules sont moins rapprochés, réduisant ainsi la congestion.

Vitesse Moyenne augmente de manière significative après l'installation de l'échangeur, indiquant une meilleure fluidité du trafic.

Temps de Trajet et Temps d'Arrêt Moyen diminuent considérablement, ce qui montre une réduction des retards et des arrêts fréquents.

Nombre de Collisions réduit, suggérant une amélioration de la sécurité routière grâce à une meilleure gestion du trafic.

Ces résultats montrent que la mise en place de l'échangeur à Anosizato a un impact positif sur la gestion du trafic, la sécurité routière.

### ***6) Résultats de la Simulation du Flux de Trafic à Anosizato***

Le tableau ci-dessous représente les solutions proposées et étude comparatives issus de la modélisation de la simulation du Flux de Trafic à Anosizato

#### ***Explications des Colonnes :***

***Scénario*** : Période de la journée et état (avant ou après l'échangeur).

***Volume de Trafic (V)*** : Nombre total de véhicules passant par un point spécifique par heure.

***Débit de Trafic (Q)*** : Nombre de véhicules qui passent par un point spécifique par heure.

***Densité de Circulation (K)*** : Nombre de véhicules par unité de longueur de route.

***Vitesse Moyenne (V<sub>m</sub>)*** : Vitesse moyenne des véhicules en kilomètres par heure.

***Temps de Trajet (T)*** : Temps moyen nécessaire pour parcourir un itinéraire donné.

***Remarques*** : Observations sur les changements de trafic et d'autres observations pertinentes.

Tableau 3: Résultats de la Simulation du Flux de Trafic à Anosizato

Scénario	Volume de Trafic (V)	Débit de Trafic (Q)	Densité de Circulation (K)	Vitesse Moyenne (V_m)	Temps de Trajet (T)	Remarques
<b>Avant l'Échangeur</b>						
Matin (Heure de Pointe)	1.500 véhicules/h	900 véhicules/h	0.5 véhicules/mètre	7 km/h	63 minutes	Congestion élevée, temps de trajet long
Après-Midi (Heure Creuse)	1.300 véhicules/h	800 véhicules/h	0.4 véhicules/mètre	8 km/h	48minutes	Moins de congestion comparée au matin
<b>Après l'Échangeur</b>						
Matin (Heure de Pointe)	1.500 véhicules/h	900 véhicules/h	0.25 véhicules/mètre	40 km/h	9 minutes	Amélioration significative du débit de trafic
Après-Midi (Heure Creuse)	1.300 véhicules/h	700 véhicules/h	0.2 véhicules/mètre	38 km/h	7 minutes	Amélioration du temps de trajet

## Interprétation des Résultats

### *Avant l'Échangeur*

#### Matin (Heure de Pointe)

Volume de Trafic (1.500 véhicules/h) : Le volume élevé de véhicules montre une forte demande de circulation pendant les heures de pointe.

Débit de Trafic (900 véhicules/h) : Le débit est inférieur au volume, indiquant une congestion. Le nombre de véhicules qui passent par un point est limité par la capacité de la route.

Densité de Circulation (0.5 véhicules/mètre) : La densité élevée suggère que les véhicules sont rapprochés les uns des autres, ce qui peut causer des ralentissements.

Vitesse Moyenne (7 km/h) : Une vitesse moyenne basse est un indicateur clair de congestion. Les véhicules se déplacent lentement en raison de la densité élevée.

Temps de Trajet (63 minutes) : Le temps de trajet est long en raison de la congestion et des ralentissements, ce qui impacte la mobilité des usagers.

### Après-Midi (Heure Creuse)

Volume de Trafic (1.300 véhicules/h) : Moins de véhicules par rapport aux heures de pointe, ce qui est normal pour les heures creuses.

Débit de Trafic (800 véhicules/h) : Bien que le volume soit réduit, le débit est encore inférieur, ce qui suggère une certaine congestion résiduelle.

Densité de Circulation (0.4 véhicules/mètre) : Une densité légèrement inférieure par rapport aux heures de pointe, indiquant moins de congestion mais toujours une circulation dense.

Vitesse Moyenne (8 km/h) : La vitesse moyenne est légèrement plus élevée que pendant les heures de pointe, indiquant une amélioration, mais il y a encore des ralentissements.

Temps de Trajet (48 minutes) : Le temps de trajet est réduit par rapport aux heures de pointe, mais il est encore assez long en raison de la densité de circulation.

### *Après l'Échangeur*

#### Matin (Heure de Pointe)

Volume de Trafic (1.500 véhicules/h) : Le volume reste élevé, ce qui est typique pour les heures de pointe.

Débit de Trafic (900 véhicules/h) : Le débit a augmenté après l'ajout de l'échangeur, ce qui indique une meilleure gestion du trafic et une capacité accrue.

Densité de Circulation (0.25 véhicules/mètre) : Une densité plus faible montre que les véhicules sont moins rapprochés, ce qui réduit la congestion.

Vitesse Moyenne (40 km/h) : L'augmentation de la vitesse moyenne indique une amélioration significative de la fluidité du trafic.

Temps de Trajet (9 minutes) : Le temps de trajet est réduit grâce à une meilleure circulation, ce qui montre l'efficacité de l'échangeur dans la gestion du trafic pendant les heures de pointe.

### Après-Midi (Heure Creuse)

Volume de Trafic (1.300 véhicules/h) : Le volume reste similaire à celui des heures creuses avant l'échangeur.

Débit de Trafic (700 véhicules/h) : Le débit a augmenté après l'ajout de l'échangeur, montrant une amélioration dans la capacité de circulation même pendant les heures creuses.

Densité de Circulation (0.2 véhicules/mètre) : Une densité plus faible indique que la circulation est plus fluide après l'échangeur.

Vitesse Moyenne (38 km/h) : La vitesse moyenne est améliorée par rapport à l'état précédent, ce qui montre que l'échangeur aide à réduire les ralentissements.

Temps de Trajet (7 minutes) : Le temps de trajet est considérablement réduit, ce qui indique une amélioration significative de la fluidité du trafic grâce à l'échangeur.

### **Synthèse**

Amélioration Générale : Les résultats montrent une amélioration significative du débit de trafic, de la vitesse moyenne, et une réduction du temps de trajet après la mise en place de l'échangeur. Cela suggère que l'échangeur a un impact positif sur la fluidité du trafic à Antananarivo.

Réduction de la Congestion : La densité de circulation est réduite et le temps de trajet est considérablement diminué, ce qui améliore la qualité de la circulation et réduit les temps de déplacement.

Impact sur les Heures de Pointe : L'échangeur est particulièrement efficace pendant les heures de pointe, où les améliorations sont les plus marquées.

Ces résultats indiquent que la mise en place de l'échangeur à Anosizato a amélioré la gestion du trafic, contribuant à une meilleure fluidité et réduisant les problèmes de congestion à Antananarivo.

## **CONCLUSION :**

L'étude présentée dans cet article a permis de modéliser et de simuler l'impact de la mise en place d'un nouvel échangeur à Anosizato sur la fluidité du trafic à Antananarivo. En utilisant des techniques de simulation avancées développées en Python, intégrant les bibliothèques random, threading, et pygame, on a pu évaluer différents scénarios de circulation et démontrer l'efficacité potentielle de l'échangeur.

Les résultats de la simulation montrent une amélioration significative de la fluidité du trafic, avec une réduction notable des embouteillages et une optimisation des flux de véhicules. Ces résultats confirment que la mise en place de l'échangeur à Anosizato pourrait constituer une solution viable et efficace pour atténuer les problèmes de congestion routière à Antananarivo.

En outre, cette étude fournit des informations essentielles pour les urbanistes et les décideurs, soulignant l'importance de l'infrastructure proposée dans le cadre d'une stratégie de développement urbain durable. Les insights obtenus peuvent guider la planification et la mise en œuvre de projets similaires, améliorant ainsi la qualité de vie des résidents et la mobilité urbaine.

À l'avenir, il sera essentiel de compléter cette modélisation par des études de terrain et des analyses économiques pour valider les projections et affiner les recommandations. L'intégration des technologies intelligentes et des systèmes de gestion de trafic pourrait également être explorée pour maximiser les bénéfices de l'échangeur.

Pour terminer, la modélisation et la simulation de l'échangeur d'Anosizato fournissent une base solide pour des décisions informées, contribuant à un réseau de transport plus efficace et durable à Antananarivo.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1]-S. Javaid, A. Sufian, S. Pervaiz and M. Tanveer, "Smart traffic management system using Internet of Things", 2018 20th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT).

[2]-M. H. Malhi, M. H. Aslam, F. Saeed, O. Javed and M. Fraz, "Vision Based Intelligent Traffic Management System", 2011 Frontiers of Information Technology.

[3]-J. Tiwari, A. Deshmukh, G. Godepure, U. Kolekar and K. Upadhyaya, "Real Time Traffic Management Using Machine Learning", 2020 International Conference on Emerging Trends in Information Technology and Engineering (ic-ETITE).

[4]-R. Kakooza, Livingstone Luboobi and Joseph Mugisha, "Modeling Traffic Flow and Management at Un-signalized Signalized and Roundabout Road Intersections", Journal of Mathematics and Statistics. pp. 1, 2005.

[5]-Byrne, A., de Laski, A., Courage, K., and Wallace, C. (1982) Handbook of computer models for traffic operations analysis. Technology Sharing Report FHWA-TS-82-213. Washington, D.C.

[6]-Cremer, M. (1979) Der Verkehrsfluss auf Schnellstrassen. Modelle, Überwachung, Regelung. Fachberichte Messen, Steuern, Regeln. Berlin: Springer-Verlag.

[7]-Drew, D.R. (1968) Traffic flow theory and control. New York: McGraw-Hill.

[8]-Etches, A., Claramunt, C., Bargiela, A., and Kosonen, I. (1998) An integrated temporal GIS model for traffic systems. A paper presented at GIS Research UK VI National Conference, March 31-April 2, 1998. University of Edinburgh.

[9]-FHWA (1994) what is the traffic management laboratory? TRAF Notes, Vol.1, No. 1. Federal Highway Administration. Washington, D.C.

[10]-Gerlough, D., and Huber, M. (1975) Traffic flow theory. A monograph. TRB Special Report 165. Washington, D.C.

[11]-Helbing, D., Hennecke, A., Shvetsov, V., and Treiber, M. (1998) MASTER: Macroscopic Traffic Simulation Based on A Gas-Kinetic, Non-Local Traffic Model. Inrets proceedings 1997, in press.



- [12]-Hoban, C., Shepherd, R., Fawcett, G., and Robinson, G. (1991) A model for simulating traffic on two-lane roads: User guide and manual for TRARR version 3.2. Australian Road Research Board, Technical Manual ATM 10 B, Vermont STH.
- [13]-Häkkinen S., and Luoma, J. (1991) Traffic psychology (in Finnish). Publication 534. Espoo: Otatiето Oy.
- [14]-Kallberg, H. (1971) Traffic simulation (in Finnish). Licentiate thesis, Helsinki University of Technology, Transportation Engineering. Espoo.
- [15]-Karhu, M. (1975) A simulation model for intersection traffic conflict analysis (in Finnish). Master's thesis, Helsinki University of Technology, Computer Science. Espoo.
- [16]-Kikuchi, S., and Chakroborty, P. (1992) Car-following model based on fuzzy inference system. Transportation Research Record 1365, Transportation Research Board, Washington, D.C., 82-91.
- [17]-Kosonen, I. (1996) HUTSIM - Simulation tool for traffic signal control planning. Helsinki University of Technology, Transportation Engineering, Publication 89. Otaniemi.
- [18]-Kosonen, I. (1998) HUTSIM - Urban traffic simulation model: Principles and applications. Manuscript of D.Sc. (Tech.) thesis, Helsinki University of Technology, Transportation Engineering. Otaniemi.
- [19]-Kosonen, I., and Pursula, M. (1991) A simulation tool for traffic signal control planning. Third International Conference on Road Traffic Control, IEE Conference Publication Number 320, pp. 72-76. London.
- [20]-Laakko, V. (1998) three dimensional presentation of traffic simulation (in Finnish). Master's thesis, Helsinki University of Technology, Transportation Engineering. Espoo.
- [21]-Leonard, D., Tough, J., and Baguley, P. (1978) CONTRAM: a traffic assignment model for predicting flows and queues during peak periods. Transport and Road Research Laboratory. TRRL Laboratory Report 841.
- [22]-McDonald, M., Brackstone, M., and Sultan, B. (1998) Instrumented vehicle studies of traffic flow models. Proceedings of the Third International Symposium on Highway Capacity, Volume 2, Ryysgaard, R., ed., pp. 755-774. Copenhagen: Transportation Research Board and Danish Road Directorate.
- [23]-Moisio, O. (1973) A study of driving simulators (in Finnish). Master's thesis, Helsinki University of Technology, Transportation Engineering. Espoo.

- [24]-Nagel, K. (1966) Particle hopping models and traffic flow theory. *Phys. Rev. E*, 53(5), 46-55.
- [25]-Nagel, K., and Schleicher, A. (1994) Microscopic traffic modelling on parallel high performance computers. *Parallel Computing*, 20, 125-146.
- [26]-Payne, H. (1971) Models of freeway traffic and control. *Mathematical Models of Public Systems. Simulation Council Proceedings Series*, vol. 1, no 1, 51-61.
- [27]-Rekersbrink, A. (1995) Mikroskopische Verkehrssimulation mit Hilfe der Fuzzy-logic. *Strassenverkehrstechnik* 2/95, 68-74.
- [28]-Sagen, R. (1967) Traffic simulation with cathode ray output. Copenhagen/Trondheim.
- [29]-Sayed, D. (1997). Estimating the safety of unsignalized intersections using traffic conflicts. *Proceedings of the third international conference on intersections without traffic signals*, Kyte, M., ed., pp. 230-235. Portland.
- [30]-Smith, L., Beckman, R., Anson, D., Nagel, K., and Williams, M. (1995) TRANSIMS: Transportation analysis and simulation system. *Proceedings of the 5th National Transportation Planning Methods Applications Conference*. Seattle.
- [31]-SNRA, Enator Telub, and CTS (1998) Virtual reality. Application and technology. Swedish National Road Administration (SNRA). Borlänge.
- [32]-Spear, B. (1996) new approaches to transportation forecasting models. A synthesis of four research proposals. *Transportation*, Vol 23, No. 3. Special Issue: A new Generation of travel demand models (guest editor Martin Wachs), 215-240.
- [33]-Webster, F., and Cobbe, B. (1966) Traffic signals. *Road Research Technical Paper No 56*. London.
- [34]-Wu, J., McDonald, M., and Brackstone, M. (1998) A fuzzy logic microscopic simulation model for interurban ATT assessment. *Proceedings of 10th European simulation symposium (ESS'98)*, October 26-28, 1998, *Simulation Technology: Science and art*, Bargiela A., and Kerckhoffs E., eds., pp. 347-354. Nottingham: Nottingham Trent University.