

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Badji Mokhtar Annaba University  
Université Badji Mokhtar – Annaba  
Faculté de Technologie



جامعة باجي مختار – عنابة

كلية التكنولوجيا

قسم الاعلام الالي

Département Informatique

## Thèse

Présentée pour obtenir le diplôme de

## Doctorat Troisième Cycle

Filière : Informatique

Spécialité : Systèmes Informatiques

Par :

**BRAHMIA Hanene**

Thème :

## Conception d'un système coopératif basé sur les réseaux ad hoc véhiculaires

N°	Nom et prénom	Grade	Etablissement	Qualité
01	SARI Toufik	Prof.	Université Badji Mokhtar -Annaba	Président
02	TOLBA Chérif	Prof.	Université Badji Mokhtar -Annaba	Rapporteur
03	FARAH Nadir	Prof.	Université Badji Mokhtar -Annaba	Examineur
04	BEY Anis	MCA	École Supérieure Des Sciences De Gestion Annaba	Examineur

Année universitaire 2023/2024

# DÉDICACE

*À la mémoire de mon cher père*

# Remerciements

Ma réussite n'est due qu'à Allah. Avant d'exprimer ma gratitude envers les personnes qui ont contribué à la réalisation de cette thèse, je tiens à remercier humblement Dieu, source de toute sagesse et de toute grâce. En cette étape cruciale de ma vie académique, je suis profondément reconnaissante pour les bénédictions, la guidance et la force qu'Il m'a accordées tout au long de ce parcours. Je rends grâce à Dieu de m'avoir dotée de la détermination nécessaire pour entreprendre et accomplir ce travail de recherche. Sa lumière a éclairé mon chemin et m'a inspirée à persévérer face aux défis et à rechercher la vérité dans mes explorations académiques.

Je prie pour que ma démarche académique puisse être guidée par des principes éthiques et moraux, et que mes contributions puissent servir à l'avancement de la science et au bien-être de la société. Que ma gratitude envers Dieu soit une humble reconnaissance de Sa grâce et de Sa miséricorde dans cette entreprise académique.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers ma famille pour leur soutien indéfectible, leurs encouragements constants et leur compréhension pendant cette période intense de recherche. Chacun d'entre vous a joué un rôle essentiel dans la réussite de cette thèse, et je suis reconnaissante de pouvoir partager ce succès avec une communauté aussi exceptionnelle. Merci infiniment pour votre contribution et votre soutien tout au long de ce voyage académique.

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de thèse, Professeur **TOLBA Cherif**, pour son mentorat, pour les discussions stimulantes, les échanges d'idées qui ont contribué à l'évolution et à l'amélioration de ce travail. Je le remercie également pour son dévouement envers le bon déroulement de ce projet tout au long de ce parcours de recherche.

Mes remerciements vont également à tous les membres de mon comité de thèse, Professeur **SARI Toufik**, Professeur **FARAH Nadir** et Dr. **BEY Anis** pour leurs évaluations critiques, leurs suggestions constructives et leurs engagements envers l'excellence académique. Leurs commentaires ont grandement enrichi le contenu de cette thèse.

# Conception d'un système coopératif basé sur les réseaux ad hoc véhiculaires

## Résumé

Un système de communication basé sur les réseaux ad hoc véhiculaires (VANETs) est une infrastructure de communication sans fil spécifiquement conçue pour les véhicules en mouvement. Il vise à améliorer la sécurité routière, l'efficacité du trafic et à fournir des services intelligents aux conducteurs.

Le système de communication basé sur les VANETs conçus repose sur des technologies avancées pour créer un écosystème intelligent, contribuant à la sécurité routière et à l'efficacité du transport. Intégrer une architecture de réseaux définie par logiciel (SDN) représente une avancée significative dans le domaine des réseaux de communication véhiculaires. Ce système vise à établir une infrastructure intelligente permettant une communication efficace entre les véhicules et l'infrastructure routière, tout en exploitant les avantages du SDN pour une gestion dynamique et optimale du réseau.

Dans ce but nous proposons un écosystème de communication capable de s'adapter rapidement aux changements dans l'environnement routier, tout en fournissant des fonctionnalités avancées telles que l'optimisation du trafic et des services intelligents. Cela permet une gestion proactive du trafic, optimisant les itinéraires en temps réel pour minimiser les congestions et améliorer l'efficacité du réseau routier. L'architecture proposée offre une évolutivité qui permet d'intégrer de nouvelles fonctionnalités et applications au fur et à mesure de l'évolution des besoins des VANETs. Ainsi, la combinaison des VANETs avec l'architecture SDN apporte des améliorations substantielles en termes d'efficacité opérationnelle, et de réactivité du système, offrant ainsi une solution innovante pour les réseaux de communication véhiculaires. Afin de valider les idées proposées dans ce travail, nous choisissons un scénario intégrant un tronçon de route très fréquenté de notre ville Annaba sur le quelle est appliqué l'architecture proposée.

**Mots clés:** SDN, VANETs, STI, architecture réseau.

# تصميم نظام تعاوني يعتمد على شبكات المركبات

## اللاسلكية المؤقتة

### ملخص

نظام الاتصال المبني على الشبكات العرضية للمركبات المتنقلة (VANETs) هو بنية تحتية للاتصالات اللاسلكية مصممة خصيصًا للمركبات المتحركة بغرض تعزيز سلامة الطرقات، فعالية التنقلات وتزويد مستخدمي الطرقات بخدمات ذكية .

نظام الاتصال المبني على الشبكات العرضية للمركبات المتنقلة المصمّم، يركز على تكنولوجيا متقدمة لإنشاء بيئة ذكية، تساهم في تعزيز أمن الطرقات وفعالية التنقلات. دمج هيكل الشبكات المعرفة بالبرمجيات SDN تمثل خطوة متقدمة في مجال شبكات التواصل بين المركبات. هذا النظام يهدف الى انشاء بنية تحتية ذكية تسمح بإقامة اتصالات فعالة بين المركبات والبنى التحتية للطرقات، باستغلال مزايا الشبكات المعرفة بالبرمجيات SDN لإدارة ديناميكية أمثل للشبكات .

لهذا الغرض نقتراح نظام للاتصال قائم على بيئة متكاملة قابلة للتكيف بسلاسة وسرعة مع تغيرات بيئة الطرقات. مع توفير ميزات متقدمة مثل تحسين حركة المرور وتقديم خدمات ذكية. يتيح ذلك إدارة نشطة لحركة المرور، مع تحسين المسارات في الوقت الحقيقي لتقليل الازدحام وتحسين كفاءة الشبكة الطرقية. يوفر الهيكل المقترح قابلية للتطوير تسمح بدمج وظائف وتطبيقات جديدة تبعًا مع تطور احتياجات شبكات الاتصال العرضية للمركبات (VANET) .

بالتالي فان الجمع بين شبكات VANET و بنية SDN يؤدي إلى تحسينات كبيرة من حيث الكفاءة التشغيلية واستجابة النظام، بتوفير حل مبتكر لشبكات اتصالات المركبات. من أجل التحقق من صحة الأفكار المقترحة في هذا العمل، اخترنا سيناريو يدمج قسمًا مزدحمًا من الطريق في مدينتنا عنابة والذي يتم تطبيق الهندسة المعمارية المقترحة عليه.

الكلمات المفتاحية: الشبكات المعرفة بالبرمجيات، شبكات الاتصال العرضية، نظام النقل الذكي، هندسة الشبكات.

# Design of a Cooperative System based on Vehicular Ad Hoc Networks

## Abstract

A vehicular ad hoc network (VANET) communication system is a wireless communication infrastructure specifically designed for moving vehicles. It aims to enhance road safety, traffic efficiency, and provide intelligent services to drivers.

The designed VANET-based communication system, relies on advanced technologies to create an intelligent ecosystem, contributing to road safety and transport efficiency. Integrating a software-defined networking (SDN) architecture represents a significant advance in the field of vehicular communication networks. This system aims to establish an intelligent infrastructure enabling efficient communication between vehicles and road infrastructure, while exploiting the advantages of SDN for dynamic and optimal network management.

To this end we offer a communications ecosystem capable of quickly adapting to changes in the road environment, while providing advanced functionalities such as traffic optimisation and intelligent services. This enables proactive traffic management, optimising routes in real time to minimise congestion and improve the efficiency of the road network. The proposed architecture provides scalability that allows new features and applications to be integrated as VANET needs evolve. Thus, the combination of VANETs with SDN architecture brings considerable improvements in terms of operational efficiency and system responsiveness, thus offering an innovative solution for vehicular communication networks. In order to validate the ideas proposed in this work, we choose a scenario integrating a very crowded section of road in our city Annaba on which the proposed architecture is applied.

**Keywords:** SDN, VANETs, ITS, network architecture.

# Table des matières

Introduction générale.....	1
CHAPITRE I : Généralités sur les réseaux VANETs	
I.1. Introduction .....	3
I.2. Les systèmes de transport intelligents.....	3
I.2.1. Définition.....	3
I.2.2. Composants et services des STI.....	4
I.2.3. Les applications des STI .....	5
I.2.4. La sécurité routière au sein des systèmes de transport intelligents .....	5
I.3. Les réseaux mobiles Ad-hoc (MANET).....	7
I.3.1. Généralités sur les réseaux mobiles Ad-hoc (MANET).....	7
I.3.1.1 Définition des réseaux mobiles Ad-hoc (MANET) .....	7
I.3.1.2 Les caractéristiques des réseaux mobiles Ad-hoc MANET .....	8
I.3.1.3 Les applications des réseaux mobiles Ad-hoc MANET .....	8
I.3.2 Les réseaux Ad-hoc véhiculaires VANET (Vehicular Ad hoc NETwork).....	10
I.3.2.1 Définition des réseaux VANETs.....	10
I.3.2.2 Les véhicules intelligents .....	11
I.3.2.3 Les environnements de trafic dans les VANETs.....	12
I.3.2.4 Composants d'un réseau VANET.....	13
I.3.2.5 Caractéristiques des VANETs.....	14
I.3.2.6 Les technologies de communication véhiculaire .....	15
I.3.2.7 Les architectures de communication dans les VANETs.....	16
I.3.2.8 Les applications des VANETs.....	19
I.4. Conclusion .....	20
CHAPITRE II : Les protocoles de routage dans les VANETs	
II.1. Introduction .....	22
II.2. Problématique de routage dans les réseaux VANETs.....	22
II.3. Classification des protocoles de routage dans les réseaux VANETs .....	23
II.3.1. Les protocoles de routage basés sur la topologie .....	24
II.3.1.1. Les protocoles réactifs .....	24

II.3.1.2. Les protocoles proactifs .....	26
II.3.1.3. Les protocoles hybrides .....	28
II.3.2. Les protocoles basés sur la localisation géographique .....	31
II.3.2.1. Les protocoles géographiques tolérant aux délais (DTN).....	31
II.3.2.2. Les protocoles géographiques non tolérants aux délais (NON- DTN).....	32
II.3.2.3. Les protocoles géographiques hybrides.....	34
II.3.3. Les protocoles de routage basés sur la classification .....	34
II.3.4. Les protocoles de routage basés sur la diffusion ( <i>Broadcast</i> ) .....	36
II.3.5. Les protocoles de routage basés sur la diffusion géographique ( <i>Geocast</i> ) .....	38
II.4. L'évaluation des protocoles de routage .....	40
II.5. Conclusion .....	42

### CHAPITRE III : Mobilité et environnements de simulations des réseaux VANETs

III.1. Introduction .....	43
III.2. Simulation de la mobilité.....	44
III.2.1. Modèle de mobilité dans les VANETs.....	44
III.2.2. Les caractéristiques d'un modèle de mobilité .....	45
III.2.3. Types de modèles de mobilité dans les VANETs .....	47
III.3. Simulation du réseau .....	52
III.3.1. Notions préliminaires .....	52
III.3.2. Les simulateurs réseau .....	54
III.4. Simulateurs supportant les nouvelles technologies .....	58
III.5. Conclusion.....	60

### CHAPITRE IV: Système coopératif basé sur SDN

IV.1. Introduction.....	61
IV.2. Amélioration des performances du protocole AODV en utilisant SDN .....	61
IV.2.1. Principe générale de la technologie SDN.....	62
IV.2.2. La technologie SDN dans les réseaux VANETs.....	63
IV.2.3. Méthode adoptée .....	65
IV.3. Passage à l'échelle grâce à l'architecture SDVN .....	69
IV.3.1. Système proposé .....	70
IV.3.2. Extraction d'une carte réelle par OpenStreetMap .....	70
IV.3.3. Préparation de la carte en vue de son utilisation dans SUMO .....	72
IV.3.4. Génération du flux de trafic avec SUMO .....	74

IV.3.5. Simulation du réseau avec MiniNet wifi .....	75
IV.3.5.1. Création du script de simulation avec python et intégration d'un contrôleur SDN.....	76
IV.3.5.2. Interrogation du réseau et collecte des résultats de simulation.....	78
IV.3.5.3. Calcul des performances du réseau .....	79
IV.4. Conclusion.....	80
Chapitre V : Résultats et discussions	
V.1. Introduction.....	81
V.2. Les performances du protocole AODV en utilisant SDN .....	82
V.3. Amélioration de l'évolutivité grâce au paradigme SDN .....	85
V.4. Synthèse des résultats obtenus.....	90
V.5. Conclusion.....	90
Conclusion générale.....	92

# Liste des figures

## Chapitre I : Généralités sur les réseaux VANETs

Figure I.1: Exemple d'un système de transport intelligent .....	4
Figure I.2: Les éléments constitutifs d'un système de transport intelligent .....	4
Figure I.3: Evolution des STI pour la sécurité routière .....	6
Figure I.4: Fonctionnement d'un réseau Ad-hoc mobile .....	7
Figure I.5: Les réseaux véhiculaire VANETs .....	10
Figure I.6: Exemple d'un réseau VANET.....	11
Figure I.7: Exemple d'un véhicule intelligent .....	11
Figure I.8: Caractéristiques des trois environnements de trafic dans les VANETs .....	13
Figure I.9: Les modes de communication dans les VANETs.....	16
Figure I.10: Le mode de communication de véhicule à véhicule (V2V).....	17
Figure I.11: Le mode de communication de véhicule à infrastructure (V2I).....	18
Figure I.12: Les applications des VANETs .....	20

## Chapitre II : Les protocoles de routage dans les VANETs

Figure II.1: Catégorisation des protocoles de routage dans les réseaux VANETs .....	23
Figure II.2: Principe de recherche de route AODV.....	25
Figure II.3: Principe de maintenance de route AODV .....	25
Figure II.4: Sélection des MPRs dans OLSR .....	27
Figure II.5: Architecture du protocole ZRP .....	29
Figure II.6: Fonctionnement du protocole ZRP (a) fonctionnement du protocole IARP (b) fonctionnement du protocole IERP .....	30
Figure II.7. Les trois modes du protocole VADD.....	32
Figure II.8. Scénario du protocole GPSR .....	33
Figure II.9. Réseau VANET basé sur les clusters.....	35
Figure II.10. Sélection des relais dans le protocole IVG.....	39

## Chapitre III : Mobilité et environnements de simulation des réseaux VANETs

Figure III.1 : Exemple de la mobilité dans les réseaux VANETs .....	45
Figure III.2: Simulation de la mobilité dans les réseaux VANETs.....	47
Figure III.3: Le modèle de Freeway .....	49

Figure III.4: Le modèle OSI .....	53
Figure III.5: La famille IEEE 1609 et la 802.11P .....	54
Figure III.6: Structure du simulateur ns3 .....	55
Figure III.7: Fonctionnement de VEINS .....	56
Figure III.8: Degré de réalisme et complexité des simulateurs/émulateurs VANET.....	58

### **Chapitre VI : Système coopératif basés sur SDN**

Figure IV.1 : L'architecture SDN/Open Flow .....	62
Figure IV.2: L'architecture SDVN .....	64
Figure IV.3: La conception de notre scénario avec NetEdit.....	67
Figure IV.4: Visualisation de la carte à l'aide de SUMO .....	68
Figure IV.5: Interface NS3 3.35 sous Linux .....	69
Figure IV.6: Processus de simulation des scénarios .....	71
Figure IV.7: Exportation de la carte réelle en utilisant OpenStreetMap (.osm) .....	73
Figure IV.8: Génération du flux de trafic dans la carte avec SUMO .....	74
Figure IV.9: émulation du système proposé et aperçu de la mobilité .....	75
Figure IV.10: Ajout du contrôleur Ryu .....	77
Figure IV.11: Arrêt de l'émulation et du contrôleur RYU dans Mininet-WiFi pour notre réseau..	78

### **Chapitre V : Résultats et discussions**

Figure V.1. Résultats du taux de livraison de paquets (%).....	83
Figure V.2. Résultats du délai de bout en bout (ms).....	83
Figure V.3. Résultats du Throughput (kbps) .....	84
Figure V.4. Architecture SDVN proposé .....	86
Figure V.5. Plateformes d'émulations .....	87
Figure V.6. Taux de livraison entre architecture classique et architecture proposé (%).....	87
Figure V.7. Latence du réseau classique vs réseau défini par logiciel (ms).....	88
Figure V.8. Débit entre architecture classique et architecture proposé (kbps).....	89

# *Liste des tableaux*

Tableau II.1: Comparaison entre les stratégies de routage dans les réseaux VANETs.....	28
Tableau II.2 : Comparaison entre les protocoles de routage dans les réseaux VANETs .....	41
Tableau III.1: Simulateurs/Émulateur et Framework supportant les nouvelles technologies .....	59
Tableau IV.1: Paramètres de simulation .....	66
Tableau IV.2: Comparaison entre les contrôleurs SDN.....	76

# Liste des équations

Equation IV.1. <i>Throughput</i> .....	79
Equation IV.2 : La latence .....	79
Equation IV.3: Le délai de transmission .....	79
Equation IV.4: Le délai de propagation .....	80
Equation IV.5: <i>Packet Delivery Ratio</i> .....	80

# *Liste des Abréviations*

AODV: Ad Hoc On-Demand Distance Vector  
CBLR: Connected Based Location Routing  
CBDRP: Cluster-Based Dynamic Routing Protocol  
DSDV: Destination-Sequenced Distance Vector  
DSR: Dynamic Source Routing  
DRG: Destination Routing Graph  
DVCAST: Dynamic Vehicular Cluster-based Adaptive Seamless Topology  
GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing  
IARP: IntrAzone Routing Protocol  
IVR: Intersection-based Vehicular Routing  
MANET: Mobile Ad Hoc Network  
MDDV: Mobility-Centric Dynamic Vehicular  
NS-3: Network Simulator 3  
OBU: On-Board Unit  
OSI: Open Systems Interconnection  
RSU: Road Side Unit  
Ryu: *Robust Yet Uncomplicated*  
RERR: Route Error Message  
RERR: Route Error Message  
RREP: Route Reply Message  
RREQ: Route Request Message  
RWP: Random Waypoint  
SDN: Software-Defined Networking  
SDVN: Software-Defined Vehicular Network  
STI: System de Transport Intelligent  
TA: Trusted Authority  
UMB: Unified Multicast and Broadcast  
VANET: Vehicular Ad Hoc Network  
VADD: Vehicle-Assisted Data Delivery  
V2I: Vehicle-to-Infrastructure  
V2V: Vehicle-to-Vehicle  
V2X: Vehicle-to-Everything  
ZRP: Zone Routing Protocol

# *Introduction générale*

*D*epuis quelques années, l'attention des chercheurs et des constructeurs automobiles s'est portée sur le concept de la voiture intelligente, visant à améliorer le confort, le divertissement et la sécurité à bord des véhicules.

*L*es exigences technologiques des systèmes de transport sont devenues plus prononcées, divers équipements et applications ont été développés pour rendre ces systèmes plus intelligents et plus sécurisés. C'est ainsi que les réseaux ad hoc véhiculaires ont été mis en place. Ces réseaux interconnectent les véhicules au moyen d'ondes radio, fonctionnant de manière centralisée dans le cas d'une infrastructure en place, que l'on désigne alors comme une communication véhicule-infrastructure (V2I). Ils peuvent également fonctionner via des liaisons point à point.

*C*ette thèse se concentre particulièrement sur la conception d'un écosystème de communication, tout en offrant des fonctionnalités avancées telles que l'optimisation dans les systèmes de transport et la disponibilité en temps réel de certains services intelligents. La contribution principale de cette recherche réside dans le développement d'une architecture qui présente une évolutivité permettant l'intégration progressive de nouvelles technologies dans les VANETs.

*A*lors que les réseaux VANET présentent des défis uniques liés à la communication entre véhicules en mouvement, le SDN propose des avantages significatifs qui peuvent améliorer l'efficacité, la gestion, et la sécurité de ces réseaux dynamiques.

*L*e SDN se distingue par sa capacité à centraliser la gestion du réseau, offrant ainsi une visibilité complète sur les ressources et les flux de données.

*A*insi, nous avons effectué le jumelage VANETs, SDN afin d'apporter des améliorations significatives en termes d'efficacité opérationnelle et de réactivité du système, proposant ainsi une solution novatrice pour les réseaux de communication véhiculaires.

*C*e manuscrit est composé de cinq chapitres. Commenant par, le chapitre I qui abordera les notions générales concernant les réseaux VANETs. Le deuxième chapitre présente les protocoles de routage dans les VANETs. Le troisième chapitre aborde la mobilité et les simulateurs des réseaux VANETs.

*L*e quatrième chapitre présente notre approche pour les réseaux VANETs, en nous appuyant sur le paradigme SDN. Enfin, le dernier chapitre mettra en lumière les résultats expérimentaux obtenus au cours de cette étude.

*U*ne conclusion générale résumera les points essentiels et abordera les perspectives qui ont guidé nos recherches.

# Chapitre I

## Généralités sur les réseaux VANETs

### I.1.Introduction

Les VANETs ont suscité un intérêt croissant de la part de la communauté scientifique. Ceci est dû principalement au besoin incessant en matière de sécurité routière, et du confort du conducteur. Les réseaux VANET offrent des solutions concrètes aux accidents de la route en proposant des alternatives capables d'éviter les accidents de la route.

Dans ce chapitre, nous commençons par examiner les fondements des systèmes de transport intelligents. Puis, nous illustrons les principes fondamentaux des réseaux VANETs.

Nous allons aussi mettre l'accent sur les différents concepts des communications liés aux réseaux mobiles sans fil.

### I.2. Les systèmes de transport intelligents

#### I.2.1. Définition

Le système de transport intelligent [1] propose des solutions aux défis du transport en permettant l'échange d'informations entre les diverses entités qui composent les systèmes de transport routier : véhicules, personnes, routes, équipements, etc.

Les applications des STI débutent par la collecte d'informations avant le processus de traitement et de diffusion.

Ces applications offrent plusieurs services comme la gestion de la circulation et la transmission d'informations aux conducteurs [3]. La figure ci-dessous illustre un exemple de ces systèmes.

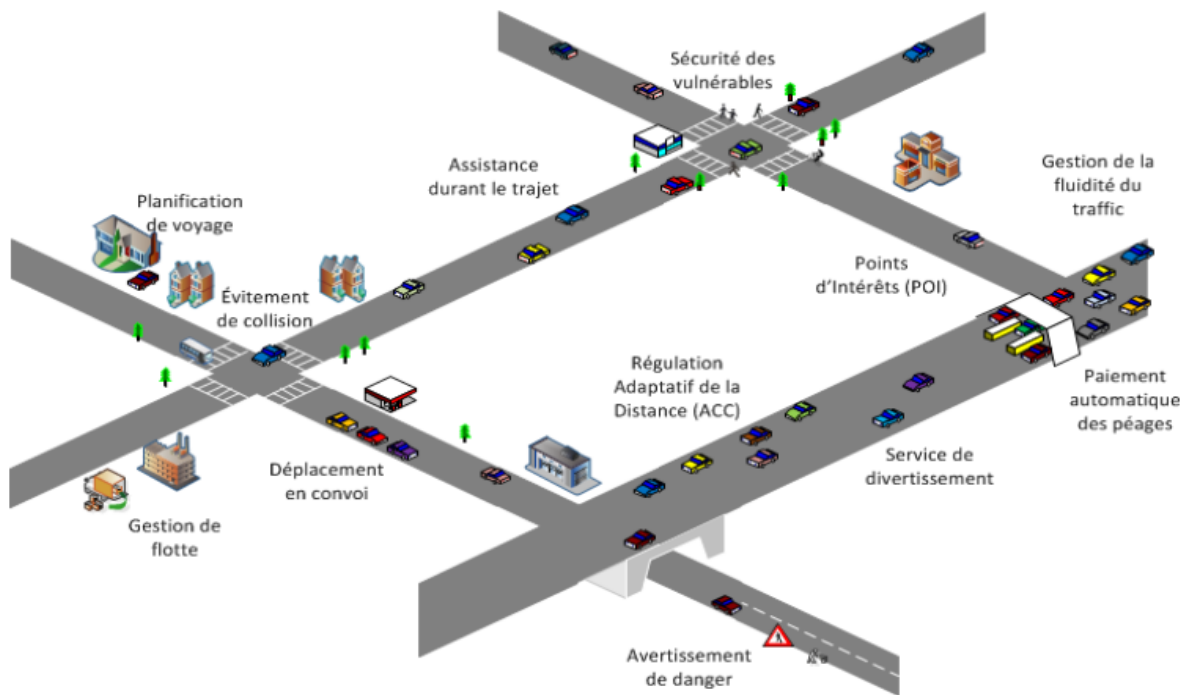


Figure I.1 :Exemple d'un système de transport intelligent [2].

### I.2.2. Composants et services des STI

Les STI utilisent des techniques qui simplifient la gestion des informations issues de réseaux humains ou véhiculaires, garantissant ainsi une fonctionnalité liée au transport. La figure ci-dessous illustre les composants d'un système de transport intelligent :

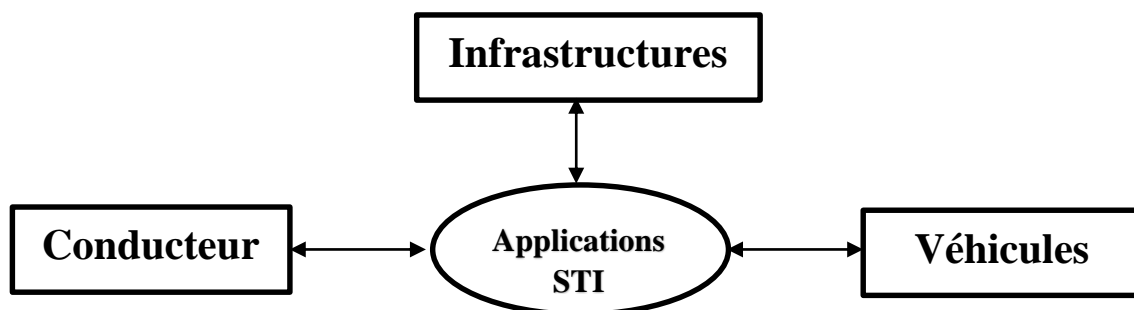


Figure I.2 : Les éléments constitutifs d'un système de transport intelligent.

L'objectif principal des STI est d'aider les conducteurs à prendre des décisions en utilisant les données provenant du réseau de transport ainsi que celles fournies par les autres utilisateurs de ces réseaux.

Ce principe implique l'utilisation d'approches et de techniques qui seront mises au service des utilisateurs par le moyen d'applications technologiques autonomes.

### **I.2.3. Les applications des STI**

Actuellement, le nombre de véhicules dans le monde ne cessent d'augmenter. Par conséquent, plusieurs défis et challenges majeurs se posent. Il existe deux types d'applications [4]:

- **Les applications de sécurité routière :**

Ces applications diminuent le risque d'accidents de voiture et minimisent les dommages causés par les accidents inévitables. Ces applications comportent la sensibilisation des composants du système [5].

- **Les applications de l'efficacité du trafic**

Ces applications [6] cherchent à apporter plus de fluidité à la circulation automobile. Ces applications informent les utilisateurs sur le trafic en utilisant une diffusion par infrastructures comme par exemple la localisation des véhicules transportant des marchandises dangereuses.

### **I.2.4. La sécurité routière au sein des systèmes de transport intelligents**

Elle représente un enjeu majeur dans le secteur des transports. Elle est considérée comme un objectif principal de n'importe quel système. Elle focalise sur l'ensemble des connaissances, dispositifs et mesures qui ont pour but de faire une prévention efficace contre les accidents de la route ou bien limiter au maximum leurs impacts.

L'information routière vise à améliorer la sécurité routière en essayant de réduire les situations à risques, effectuer une gestion efficace des situations critiques et des situations de saturations. Elle consiste aussi à rendre le trafic plus fluide en proposant plusieurs itinéraires alternatifs.

Les STI apportent une contribution considérable à la sécurité routière. Les STI ont commencé par proposer des outils qui minimisent les accidents. Ces applications sont appelées des systèmes d'aide à la conduite qui visent à contrôler les erreurs des conducteurs [7].

Les STI offrent également des applications qui permettent de protéger directement les utilisateurs de la route en installant des contrôleurs automatisés.

Les STI cherchent à réduire au maximum les accidents en informant le conducteur des risques potentiels et en intervenant directement sur les commandes du véhicule autonome [8]. Cela implique le développement de systèmes de surveillance et d'alerte, capables de signaler aux conducteurs toute difficulté rencontrée pendant la conduite.

Récemment, une méthode alternative pour contribuer à la sécurité routière est créée en adoptant le principe de la route intelligente et interactive. La figure I.3 suivante illustre cette évolution.



**Figure I.3 :** Évolution des STI pour la sécurité routière.

### I.3. Les réseaux mobiles Ad-hoc (MANET) :

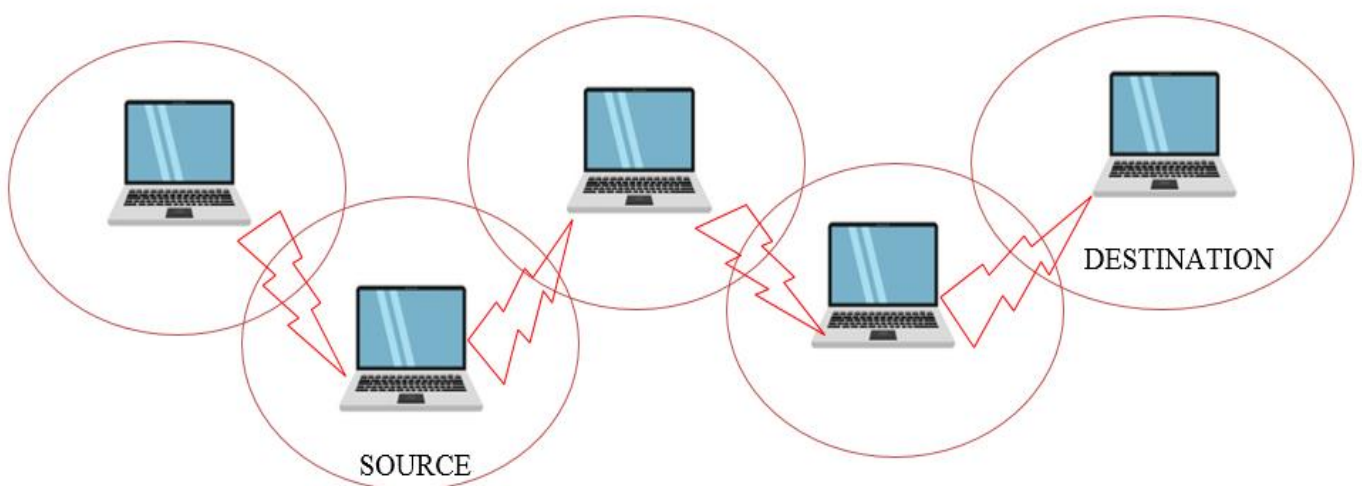
#### I.3.1 Généralités sur les réseaux mobiles Ad-hoc MANET :

##### I.3.1.1 Définition des réseaux mobiles Ad-hoc MANET :

Un réseau Ad-hoc [9] est formé par des nœuds mobiles qui communiquent via des ondes radio. Ces réseaux, catégorisés comme temporaires, ne dépendent pas d'une infrastructure fixe ni d'une administration centralisée, signifiant qu'ils peuvent s'organiser de manière spontanée et autonome dans leur environnement sans nécessiter une infrastructure préalablement définie. La gestion du réseau est distribuée entre toutes les entités communicantes par liaison sans fil, souvent désignées sous le terme de « nœuds » [10].

Dans ces réseaux, chaque station peut contribuer avec d'autres stations afin d'effectuer le routage de données.

Un réseau de ce type doit être facilement déployé, les nœuds ont le choix de rejoindre ou de déconnecter du réseau d'une façon totalement dynamique sans avoir l'obligation de transmettre des informations au réseau sans influencer les communications des autres membres. Dans un tel réseau, il n'existe aucune infrastructure et la topologie du réseau peut être modifiée d'une manière dynamique et imprévisible puisque les nœuds peuvent se déplacer librement et que chaque nœud a une puissance d'émission limitée.



**Figure I.4 :** Fonctionnement d'un réseau Ad-hoc mobile.

### **I.3.1.2 Les caractéristiques des réseaux mobiles Ad-hoc MANET :**

Nous allons détailler quelques caractéristiques des réseaux MANET :

- **Topologies dynamiques :** Les entités se déplacent librement dans le réseau. En conséquence, la topologie du réseau est modifiée de manière aléatoire et imprévisible et consiste principalement en liaisons bidirectionnelles. Dans certains cas où la puissance de transmission des deux nœuds est différente, une liaison unidirectionnelle peut exister.
- **Fonctionnement à énergie limitée :** certains ou tous les nœuds d'un MANET peuvent compter sur des batteries ou d'autres moyens épuisables en énergie.
- **Sécurité physique limitée :** les MANET sont vulnérables aux menaces de sécurité physique que les réseaux filaires [11]. La possibilité accrue d'attaques doit être étudiée minutieusement [12].

### **I.3.1.3 Les applications des réseaux mobiles Ad-hoc MANET**

- **Gestion de situations d'urgence:**  
Elles sont utilisées à la suite de catastrophes naturelles dans lesquelles l'ensemble de l'infrastructure de communication est en désarroi. La restauration rapide des communications est essentielle.
- **Télémédecine :**  
Le paramédical qui assiste la victime d'un accident de la route dans un endroit éloigné doit accéder aux dossiers médicaux (par exemple : Rayons X) et peut avoir besoin de l'assistance par vidéoconférence d'un chirurgien pour une intervention d'urgence.  
En fait, le personnel paramédical peut avoir besoin de renvoyer instantanément à l'hôpital les radiographies de la victime et d'autres tests diagnostiques à partir du site de l'accident.
- **Application de télé géotraitement :**  
La combinaison de GPS (Guide par satellites), de SIG (Systèmes d'Information Géographique) et de systèmes mobiles sans fil à haute capacité permet un nouveau type d'application appelé télétraitement.

- **Éducation via Internet :**

Possibilités de formation disponibles sur Internet ou dans des régions éloignées en raison de l'impossibilité économique de fournir à tous les abonnés un accès Internet par ligne filaire onéreuse du dernier kilomètre dans ces régions.

- **Réseau de zone véhiculaire :** Il s'agit d'une application croissante et très utile du réseau Ad-hoc pour la fourniture de services d'urgence et d'autres informations. Ceci est tout aussi efficace en configuration urbaine et rurale.

- **Applications de collaborations:**

Ce sont des applications destinées aux utilisateurs professionnels qui ont besoin d'applications particulières au cours de réunions ou de conférences. Ainsi, ces utilisateurs ont besoin de créer un réseau dans n'importe quel lieu afin d'échanger des informations, ou faire une vidéoconférence. Cela rend les réseaux Ad hoc les plus appropriés pour répondre à ces besoins.

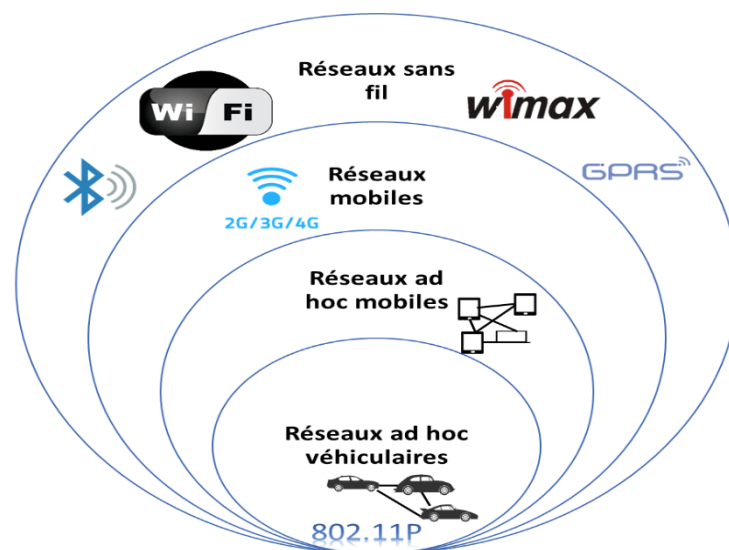
- **Jeux vidéo :**

Ce type de réseau est très approprié pour le partage d'informations entre des applications personnelles.

## I.3.2 Les réseaux Ad-hoc véhiculaires VANET (*Vehicular Ad hoc Network*)

### I.3.2.1 Définition des réseaux VANETs

Les réseaux Ad-hoc véhiculaire (VANETs) ont suscité un grand intérêt au sein de la communauté scientifique. Les VANETs ont attiré l'attention tant du milieu universitaire que de l'industrie à cause de leurs caractéristiques uniques.



**Figure I.5** : Les réseaux véhiculaires VANETs.

Nous pouvons dire que les réseaux VANET transforment chaque véhicule en un nœud sans fil en permettant aux voitures distantes de 100 à 300 mètres de se connecter les unes aux autres. Ces véhicules créent à leurs tours un large éventail de réseaux. Lorsque les voitures tombent en panne en raison de la portée du signal et quittent le réseau actuel, d'autres voitures prennent le relai [13].

Les VANETs évoluent rapidement pour le développement d'applications nouvelles et habituels [14].

Ils se caractérisent par une topologie en évolution rapide et une mobilité élevée [15].

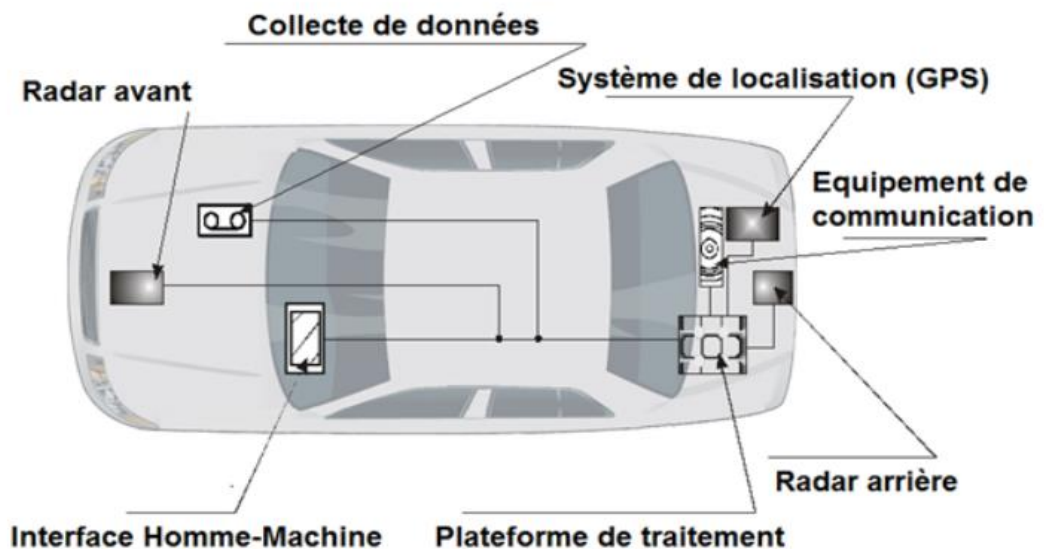


**Figure I.6 :** Exemple d'un réseau VANET [16].

### I.3.2.2 les véhicules intelligent

Le nombre de véhicules équipés d'appareils sans fil embarqués (par exemple, UMTS, IEEE 802.11p, Bluetooth, etc.) et de capteurs (par exemple, radar, etc.) est en nette croissance afin de garantir un transport efficace.

Le radar présent à bord pourrait être utilisé pour détecter les embouteillages et ralentir automatiquement le véhicule. Dans d'autres systèmes d'avertissement d'accident, des capteurs peuvent être utilisés pour déterminer qu'un accident peut se produire. La figure suivante démontre un exemple d'un véhicule intelligent :



**Figure I.7 :** Exemple d'un véhicule intelligent [17].

### **I.3.2.3 Les environnements de trafic dans les VANETs**

On peut catégoriser l'environnement de circulation des VANETs en trois principales classes : urbain [18], routier [19] et rural [20]. La connaissance des caractéristiques de chacune de ces catégories présente un élément essentiel pour le développement de protocoles et d'outils dans un environnement de trafic spécifique.

#### **➤ Environnement urbain**

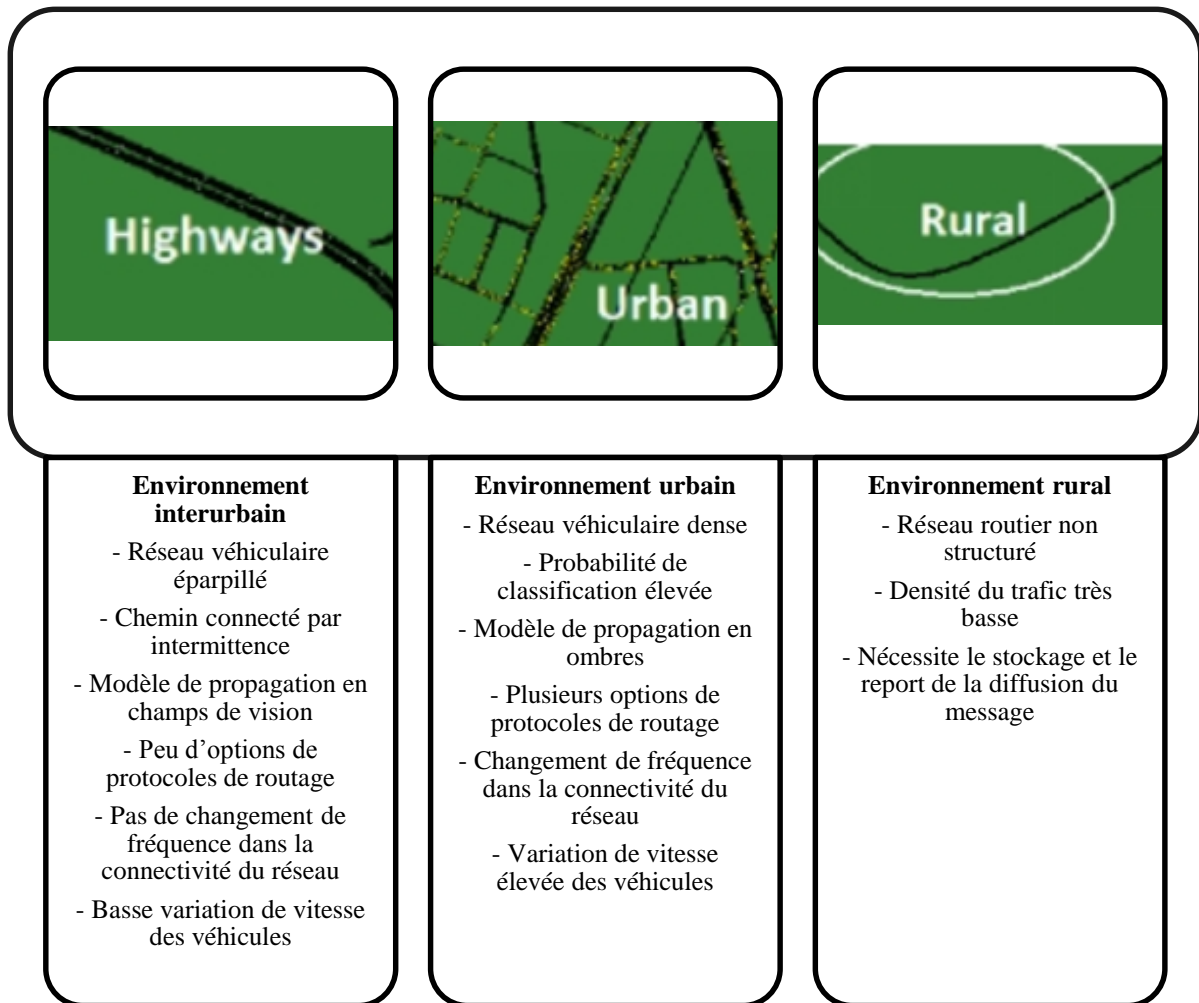
Ce milieu comporte des intersections et des points d'arrêts comme les panneaux Stop ainsi que les feux tricolores [21]. Cela impose de circuler à une vitesse qui ne dépasse pas 50 km/h en ville. L'avantage principal dans ce milieu réside dans le fait d'avoir une bonne connectivité entre les véhicules ainsi qu'une communication fluide à cause de la faible distance entre les nœuds. En revanche, cet environnement présente un inconvénient important. En effet, il présente une forte perturbation des ondes radio causée par les obstacles comme les bâtiments, les immeubles. De plus, l'installation des infrastructures routières dans ce milieu s'avère compliquée à cause des espaces restreints dans cet environnement.

#### **➤ Environnement interurbain**

Dans le milieu interurbain, la vitesse de circulation varie entre 60 et 100 km/h [22]. La distance qui sépare les voitures est importante à cause de la vitesse importante de certains nœuds mobiles. Cela provoque une perte de connectivité entre les véhicules du réseau. En conséquence, la communication en mode Ad-hoc s'avère très complexe. Afin de remédier à ce problème, on doit utiliser des entités fixes afin de garantir une meilleure connectivité. Cela va permettre à tous les nœuds de bénéficier de tous les services du réseau.

#### **➤ Environnement rural**

Dans ce milieu peu fréquenté, la vitesse de circulation ne dépasse pas les 80 km/h. Ce milieu est constitué de routes très étroites [23]. Dans cet environnement, le réseau routier est non structuré. La figure suivante résume les caractéristiques de ces trois environnements.



**Figure I.8** : Caractéristiques des trois environnements de trafic dans les VANETs.

#### I.3.2.4 Composants d'un réseau VANET

Un réseau VANET est composé des éléments suivants [23]:

- **RSU (Road Side Unit)** : ce sont des équipements situés en bordure des routes. Leur rôle consiste à aider dans la gestion du trafic. Ces équipements sont des points d'accès réseau dispatchés sur la route dans le but de fournir des informations diverses sur le trafic routier (accidents, enlacement des véhicules...).

- **OBU (On-Bord Unit)** : Il s'agit d'un ensemble de capteurs comme les caméras, le GPS et les radars.
- **TA (Trusted Authority)** : C'est un système d'authentification des informations qui circulent dans le réseau. Ce système doit être capable de reconnaître et d'authentifier tous les véhicules du réseau et les communiquer en cas de besoin.

### **I.3.2.5 caractéristiques des VANETs**

Les VANETs se distinguent par quelques caractéristiques spécifiques dans leurs fonctionnements, la façon d'échanger les informations ainsi que la topologie du réseau. Dans ce qui va suivre, nous allons détailler ces caractéristiques propres au VANETs [24]:

#### ➤ **Topologie et mobilité du réseau**

La vitesse d'un véhicule dans le réseau fluctue en fonction de l'environnement. La vitesse varie aussi en fonction des informations reçues par le conducteur sur les incidents de la route. Cela causera un changement dynamique de la topologie du réseau. Sur une autoroute, la vitesse maximale peut atteindre 120 km/h.

#### ➤ **Collecte d'informations**

La collecte d'informations s'effectue grâce à différents types de capteurs. Ils fourniront au conducteur du véhicule la possibilité de réagir d'une façon efficace aux changements de circonstances de la route grâce au flux important d'informations à sa disposition.

#### ➤ **La tempête de diffusion**

Le problème *broadcast storm* [25] influe sur le niveau des applications. Les services assurés par ces réseaux sont conditionnés de services de sécurité. De plus, cette question devient plus complexe dans des réseaux densément peuplés, particulièrement dans des contextes particuliers.

### ➤ **Gestion d'énergie**

Dans les réseaux ad hoc mobiles, le problème d'énergie se pose d'une façon persistante, car les ressources d'énergie sont limitées. Cette problématique ne se rencontre pas dans un réseau VANET, étant donné que les véhicules ne sont pas restreints en termes d'énergie et bénéficient d'une capacité de traitement significative [26].

### **I.3.2.6 Les technologies de communication véhiculaire**

La communication entre les véhicules peut s'effectuer selon trois méthodes [27] :

#### ➤ **Communication par infrastructures**

Il s'agit d'une approche basée sur le principe du modèle client-serveur. Dans ce schéma, les véhicules agissant en tant que clients, tandis que les stations RSU se comportent comme des serveurs.

Ces stations sont interconnectées par des liaisons filaires ou sans fil. Tout échange entre véhicules doit absolument passer par eux.

#### ➤ **Communication par réseaux cellulaires**

Cette technique utilise les réseaux cellulaires. Cette approche est fondée sur le principe du modèle client-serveur. Le véhicule échange avec la station en cas de besoin d'informations ou d'assistance. Cette méthode présente deux inconvénients majeurs :

- Les stations ne sont pas capables de gérer un grand nombre de véhicules connectés simultanément.
- Les équipements réseau sont très coûteux.
- L'absence de couvertures dans les zones rurales.

#### ➤ **Communication directe**

C'est la méthode la plus appropriée où aucune infrastructure n'est nécessaire pour communiquer. Avec cette approche, chaque véhicule est pourvu de la capacité de communiquer en mode full duplex de manière directe avec les autres.

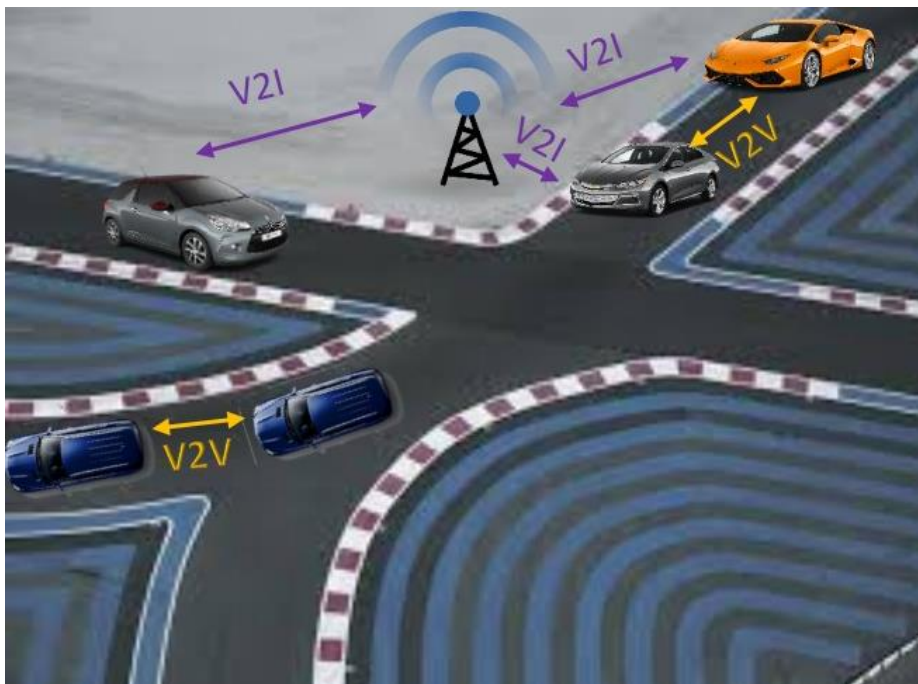
Cela veut dire qu'on n'a pas besoin d'utiliser des serveurs tant que les voitures peuvent communiquer deux à deux.

À l'encontre des deux approches précédentes, cette approche ne nécessite aucune installation sur les routes, ce qui rend la communication moins coûteuse. Les véhicules peuvent ainsi communiquer dans n'importe quel environnement. Cette approche présente les inconvénients suivants :

- Les délais des communications sont importants à cause de l'utilisation du *multihop*.
- Les interruptions de connexion sont fréquentes.

### I.3.2.7 Les architectures de communication dans les VANETs

Les VANETs disposent de trois modes de communication. : communication Véhicule-à-Véhicule (V2V) [28], communication Véhicule-à-Infrastructure (V2I) [29], et le mode hybride (V2X) [30]. La figure ci-dessous illustre ces architectures de communication au sein des réseaux véhiculaires (VANETs).



**Figure I.9** : Les modes de communication dans les VANETs.

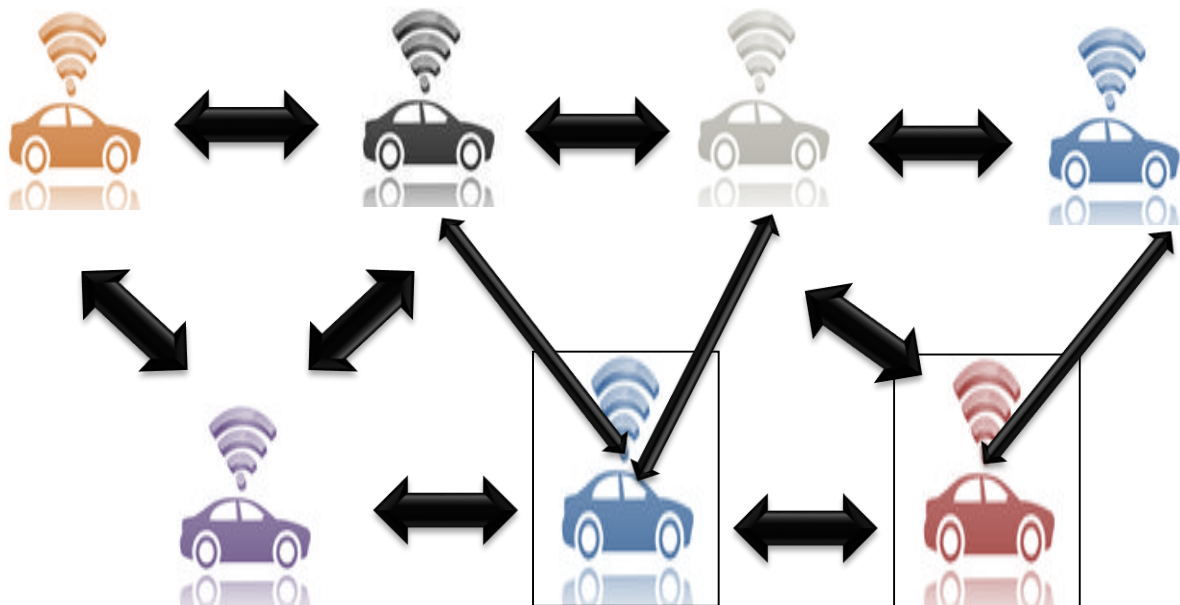
Dans ce qui va suivre, nous allons examiner en détail chaque mode de communication :

➤ **Communication de véhicule à véhicule (V2V)**

Les réseaux VANETs sont fondés sur la communication entre les véhicules sans avoir recours aux infrastructures.

Un véhicule peut se connecter directement à un autre véhicule s'il est à portée. Dans le cas contraire, il peut recourir à un protocole multisauts pour acheminer les messages par le biais des véhicules voisins. Ce mode de communication se distingue par une faible latence et un débit élevé.

Ce mode est particulièrement efficace pour transmettre les informations relatives aux services de sécurité routière. En revanche, ce mode n'assure pas une connectivité constante entre les véhicules.



**Figure I.10** : Le mode de communication de véhicule à véhicule (V2V).

➤ **Communication de véhicule à Infrastructure (V2I)**

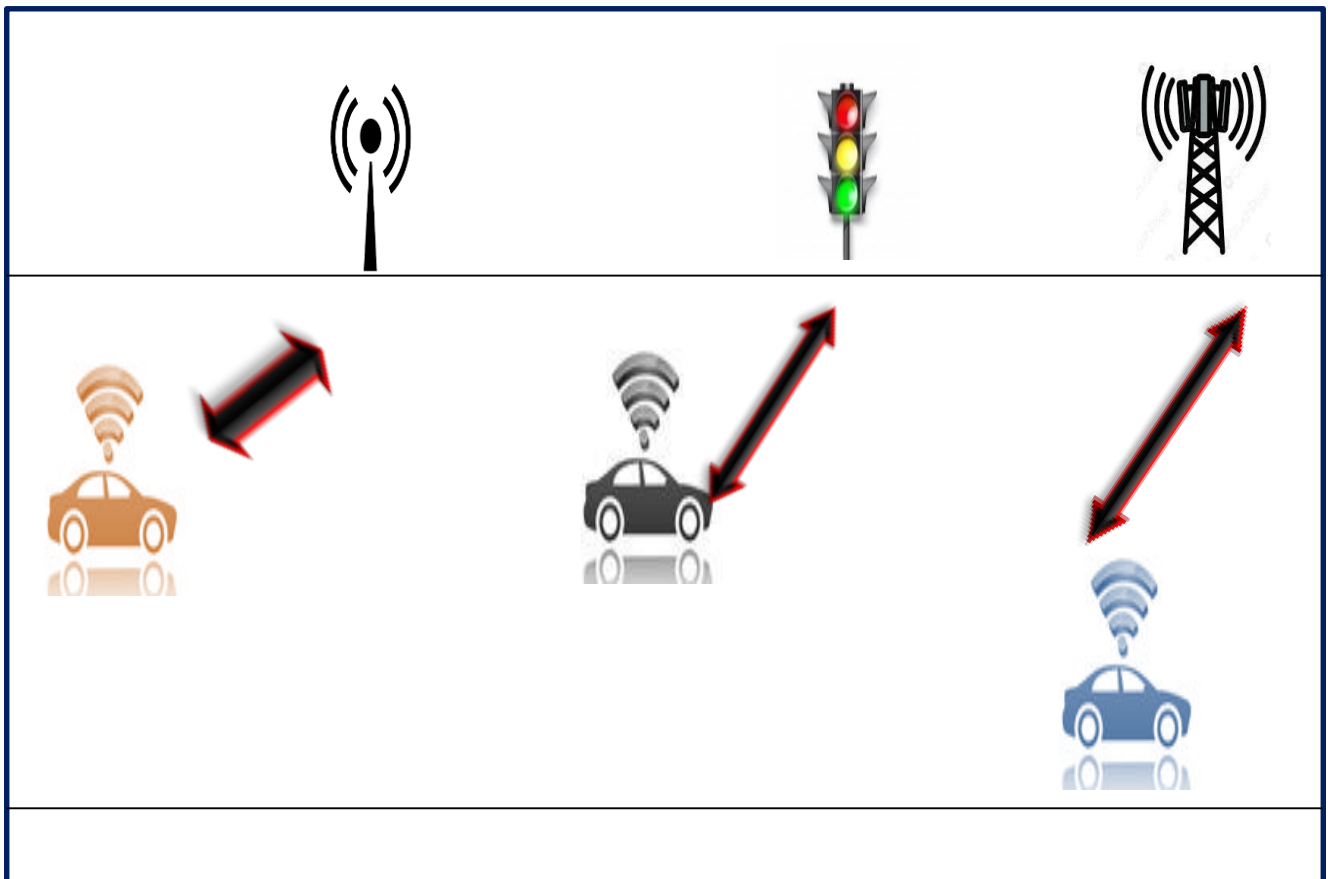
Ce mode permet l'échange des informations avec les composants responsables du système routier d'un pays.

La communication V2I est généralement sans fil et bidirectionnelle : les données des composants de l'infrastructure peuvent être transmises au véhicule via un réseau Ad-hoc et vice

versa. Semblable au mode (V2V), le mode V2I utilise des fréquences courtes pour transférer les données.

L'inconvénient majeur de ce mode de communication réside incontestablement dans son coût de déploiement.

En effet, l'installation des stations en bordure de route représente une opération onéreuse qui demande beaucoup de temps, sans négliger les dépenses engendrées par la maintenance de ces stations [31]. La figure ci-dessous présente l'architecture de ce mode.



**Figure I.11** : Le mode de communication de véhicule à infrastructure (V2I).

➤ **Communication hybride (V2X)**

Ce mode de communication [32] fusionne les deux modes de communication précédents à savoir le mode V2I et le mode V2V.

Cette approche garantit une communication très efficace tout en optimisant l'utilisation des infrastructures.

### **I.3.2.8 Les applications des VANETs**

Les réseaux véhiculaires apportent une multitude d'applications servant à des fins différentes. Catégoriquement, toutes ces applications sont regroupées en trois directions principales à savoir : la sûreté, l'efficacité des transports et les services offerts aux véhicules.

L'objectif majeur des deux premières catégories est d'assister le conducteur afin d'améliorer la sécurité, d'assister en cas de panique dans différentes conditions de conduite et environnements. Des informations spécifiques concernant la situation du trafic sont mises à la disposition des conducteurs en temps réel afin d'augmenter l'efficacité.

Cette dernière catégorie vise à tirer parti du système VANETS pour intégrer différentes caractéristiques de confort et des transactions commerciales dans les véhicules. Voici une explication détaillée de ces trois catégories :

- **Applications de sécurité routière**

Les véhicules peuvent émettre des alertes (accidents, routes coupées...) entre eux dans le but d'anticiper et prévenir d'un danger potentiel.

Cette méthode permet une détection plus rapide des accidents, accélérant ainsi les interventions et réduisant considérablement le risque de décès après un accident.

- **Applications de l'efficacité des transports**

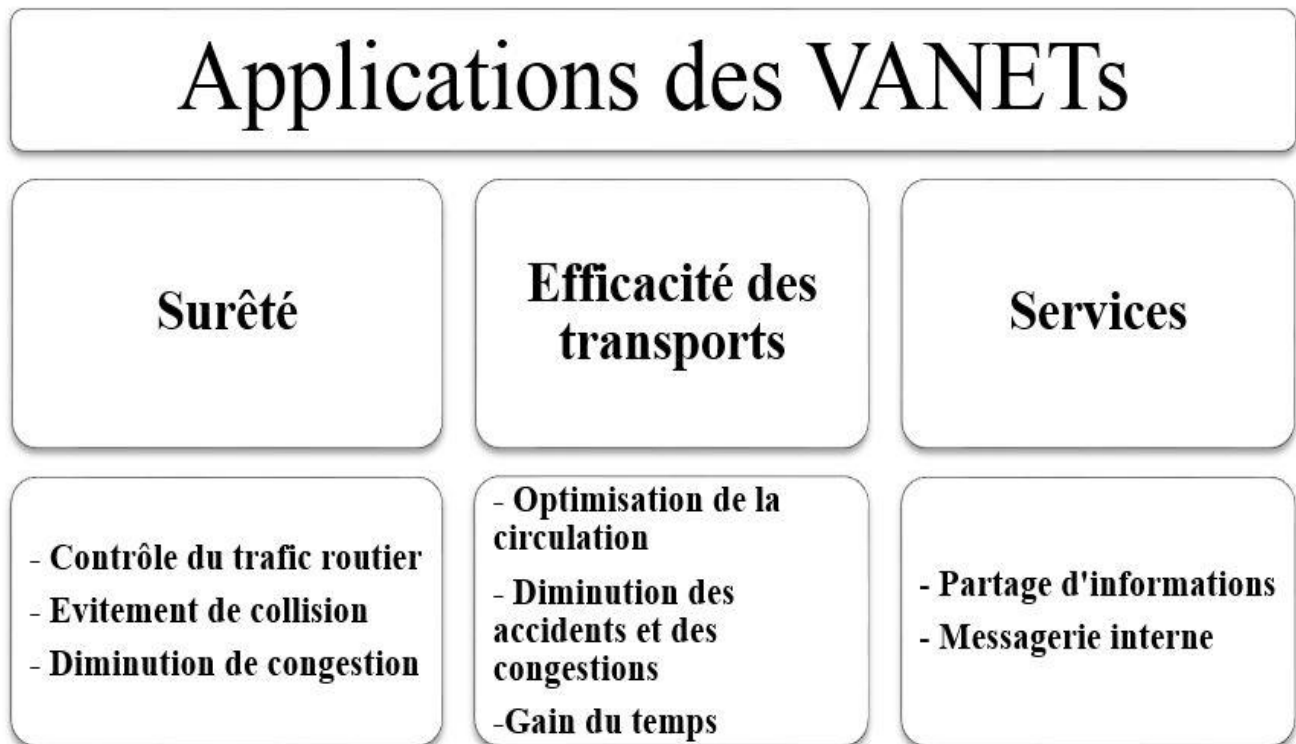
Ces applications informent les conducteurs pour leur permettre d'adapter leurs trajets selon la situation du trafic routier. Ces applications ont pour but d'optimiser la fluidité du trafic routier en favorisant l'utilisation efficace des intersections et des voies. Elles contribuent également à réduire les pertes humaines, les retards temporels et la consommation d'énergie, parmi d'autres bénéfices.

- **Application services offerts aux véhicules**

Les réseaux véhiculaires offrent aussi des services et des applications afin d'accroître le confort tant pour les conducteurs que pour les passagers.

Les conducteurs vont avoir énormément d'informations sur le temps du trajet, la météo, la vitesse des véhicules voisins ...etc. Les passagers aussi peuvent communiquer entre eux pour jouer en réseau ou partager des informations par exemple, ou bien ils peuvent échanger avec

des stations fixes pour se procurer un accès à internet ou utiliser un logiciel de messagerie. Le schéma suivant résume ces applications.



**Figure I.12** : Les applications des VANETs.

## **I.4 Conclusion**

Les nœuds mobiles dans les VANETs sont des véhicules dotés d'équipements embarqués sophistiqués, se déplaçant sur des chemins contraints et communiquant entre eux pour l'échange de messages via la communication de véhicule à véhicule (V2V) ainsi qu'entre les véhicules et les points d'accès fixes en bord de route dans le cas des communications véhicule à infrastructure (V2I).

Dans ce chapitre, nous avons discuté des réseaux mobiles ad hoc en mettant l'accent sur les réseaux véhiculaires VANET, qui constituent un cas spécifique des réseaux MANET.

Nous avons examiné leurs propriétés, utilisations, et contraintes, en mettant en lumière les divers modes de communication au sein des réseaux véhiculaires (V2I, V2V, V2X), jouant un rôle crucial dans l'amélioration de la sécurité routière. Dans le chapitre suivant, nous examinerons les divers concepts liés au routage dans les réseaux VANETs.

# Chapitre II

## Les protocoles de routage dans les VANETs

### II.1 Introduction

Le routage est un acheminement de données vers leurs destinations appropriées au sein d'un réseau donné. Cela s'effectue par le biais de plusieurs protocoles qui ont un seul but, mais avec des philosophies différentes.

Ces protocoles doivent garantir l'acheminement de données en minimisant le temps et l'énergie consommée.

Ce chapitre examinera différentes approches et techniques sur lesquelles reposent ces protocoles dans les VANETs.

### II.2 Problématique de routage dans les réseaux VANETs

Un nombre de protocoles de routage provoque des modifications de topologie fréquentes, tandis que d'autres nécessitent une durée considérable pour effectuer la recherche d'une route.

L'autre problème majeur est l'absence d'infrastructure fixe. Cela oblige les réseaux VANETs de définir leurs propres façons de transmettre les données entre les nœuds mobiles.

En conséquence, cette transmission doit employer des protocoles de routages spécifiques afin d'effectuer un acheminement de données performant compte tenu des caractéristiques particulières de ces réseaux [33].

Plusieurs solutions de routage ont été proposées en combinant les approches basées sur la localisation avec l'intégration de la cartographie [34-35].

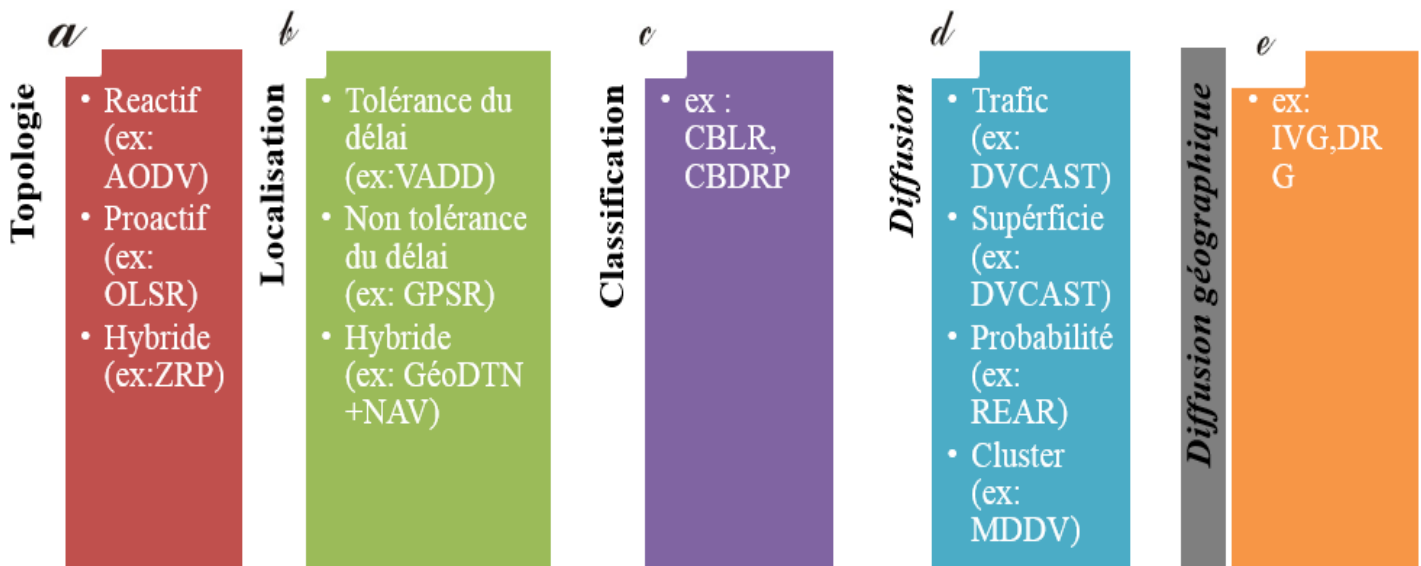
## II.3 Classification des protocoles de routage dans les réseaux VANETs

Les protocoles de routage dans les VANETs sont classés en quatre grandes classes [36].

La classification de ces protocoles est soumise à :

- La structure du réseau (homogène ou hétérogène).
- La méthodologie de routage (protocole proactif, réactif ou hybride).
- L'algorithme mis en œuvre : algorithmes à la demande ou algorithmes dynamiques.

Ces catégories de protocoles de routage, comme illustré dans la figure II.1, sont :



**Figure II.1 :** Catégorisation des protocoles de routage dans les réseaux VANETs.

Dans ce qui va suivre, nous allons détailler ces catégories en mettant l'accent sur quelques protocoles de chaque catégorie.

### II.3.1. Les protocoles de routage basés sur la topologie :

Ces protocoles [37] récoltent des données sur les liens entre les nœuds afin d'effectuer l'acheminement des paquets. En général, ce type de protocoles ne supporte pas les réseaux qui dépassent quelques centaines de nœuds. Cette famille de protocoles est composée de trois catégories (figure II.1-a) : les protocoles proactifs [38], réactifs [39] et hybrides [40].

#### II.3.1.1. Les protocoles réactifs

Les protocoles réactifs opèrent en utilisant des algorithmes traditionnels. Avec ces protocoles, le chemin n'est établi que lorsqu'il est requis. Ainsi, les routes sont calculées uniquement en réponse à une demande spécifique.

Quand un nœud veut envoyer des paquets, il démarre en initiant une recherche de routes en diffusant un message de découverte de routes. Tous les nœuds qui reçoivent ce message et qui n'ont pas d'informations sur la destination relaient à leur tour le message de recherche. Parmi les protocoles les plus couramment utilisés de cette catégorie, on trouve :

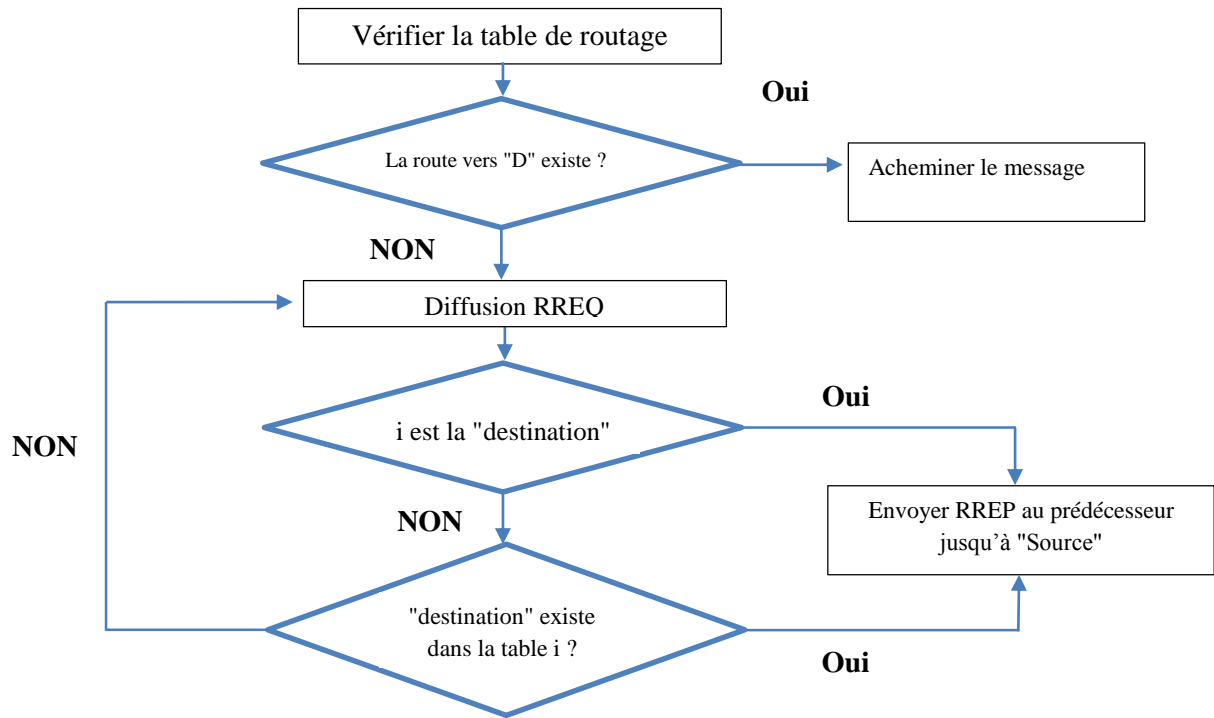
- **Le protocole AODV (*Ad hoc On-demand Distance Vector*)**

Le protocole AODV [41] est un protocole réactif. La table de routage de chaque nœud doit être mise à jour régulièrement à chaque modification de la topologie du réseau.

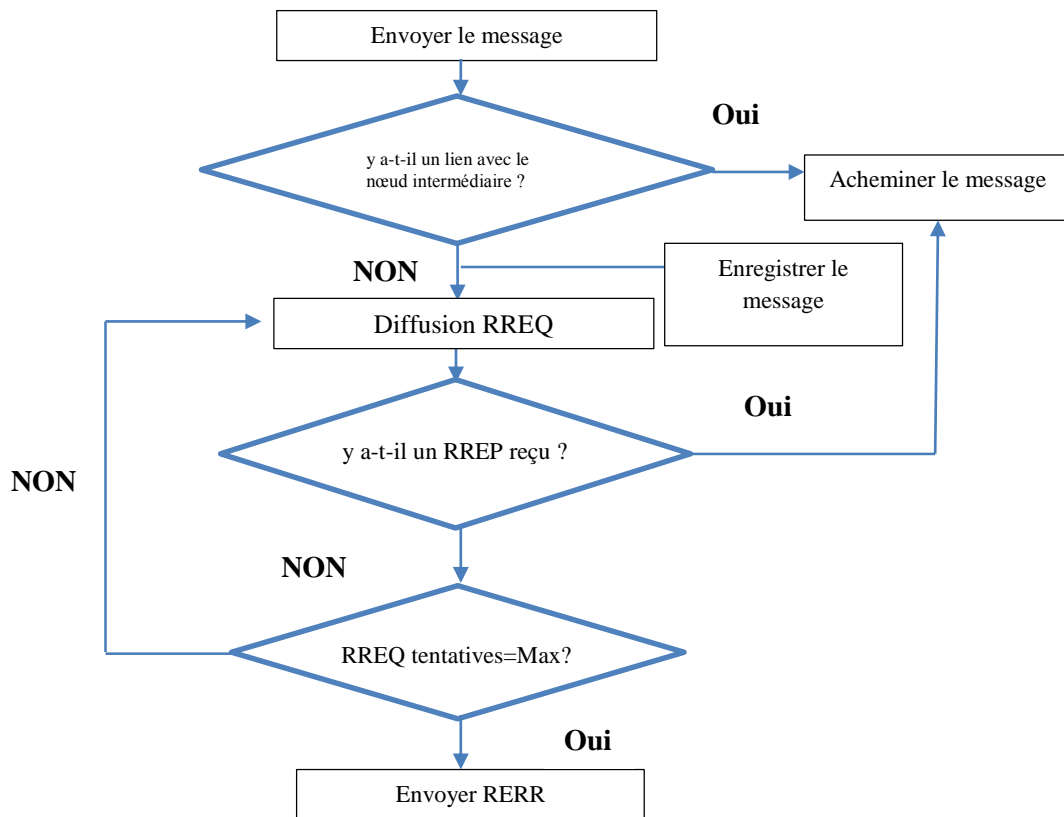
En d'autres termes, ce mécanisme établit des itinéraires selon les besoins et utilise le principe des numéros de séquence pour favoriser l'utilisation des routes les plus récentes.

Par ailleurs, la métrique utilisée pour différencier plusieurs itinéraires disponibles repose sur le nombre de sauts.

AODV utilise trois types de messages : les messages de demande d'itinéraire (*RREQ - Route Request Message*), les messages de réponses d'itinéraire (*RREP - Route Reply Message*), et les messages signalant des erreurs d'itinéraire (*RERR - Route Error Message*). Les deux figures suivantes détaillent les deux procédures (maintenance et recherche de routes) de ce protocole.



**Figure II.2 :** Principe de recherche de route AODV.



**Figure II.3 :** Principe de maintenance de route AODV.

- **Le protocole DSR (*Dynamic Source Routing*)**

Le protocole de routage DSR (*Dynamic Source Routing*) [42] est un protocole qui repose sur l'approche de routage à la source [43] l'émetteur intègre dans l'en-tête du paquet l'itinéraire complet que le paquet doit suivre pour parvenir à sa destination.

Dans cette situation, les nœuds intermédiaires entre l'émetteur et le récepteur ne sont pas tenus de mettre constamment à jour les données relatives au chemin emprunté, car l'ensemble de l'itinéraire est inclus dans l'en-tête du paquet.

### **II.3.1.2. Les protocoles proactifs**

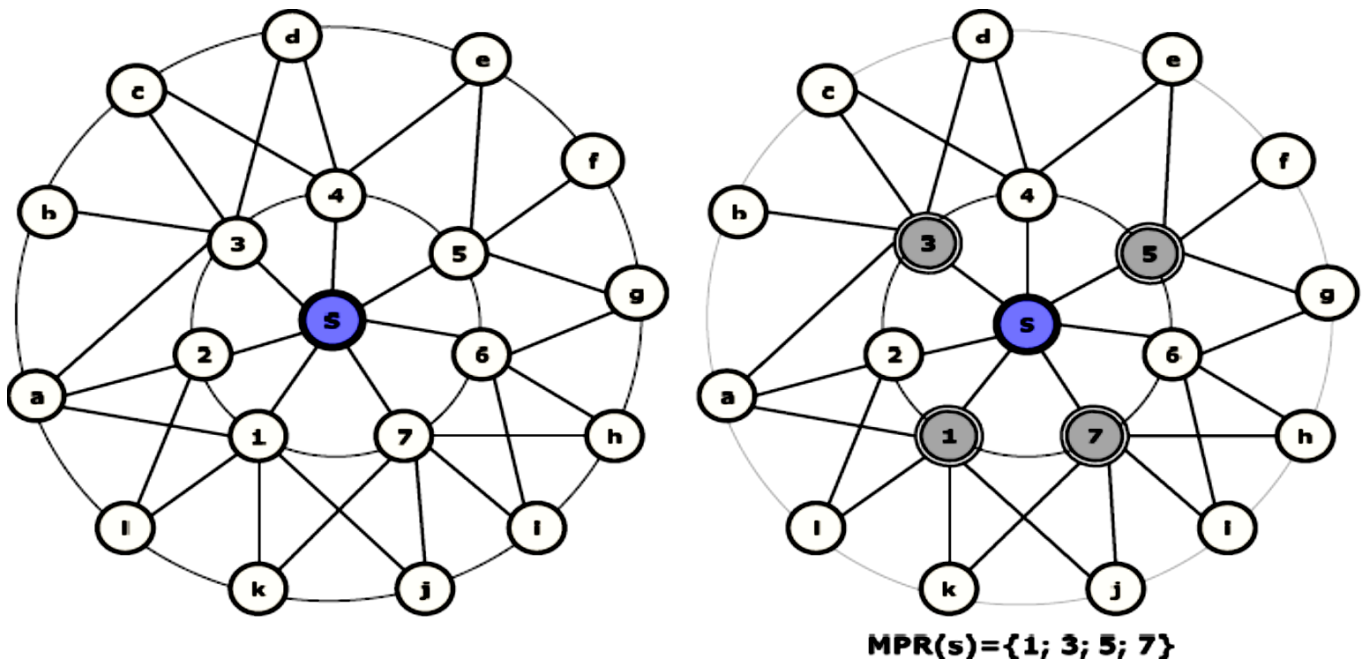
Les protocoles proactifs [44] reposent sur le principe suivant : chaque nœud conserve une vue de la topologie complète du réseau. Cette vue est constamment mise à jour si on observe un changement de la topologie. En conséquence, les itinéraires sont définis selon cette vue. Les protocoles proactifs les plus couramment utilisés sont :

- **Le protocole OLSR (*Optimized Link State Routing*)**

Le protocole OLSR [45] construit des itinéraires en se basant sur des critères d'optimisation. Effectivement, ces chemins représentent la route la plus courte vers une destination en termes de nombre de sauts, conformément aux principes de l'algorithme de Dijkstra [46].

Le point fort de ce protocole réside incontestablement dans son approche économique de ressources. Cette économie est rendue possible par l'approche des relais multipoints (MPR : *Multi-Point Relaying*) [47] illustrés par la figure II.4.

Avec cette technique, chaque point crée un sous-ensemble parmi ses voisins appelés MPR afin de se permettre de rejoindre tous les voisins en deux sauts. Les voisins non désignés comme MPRs se contentent de lire et de traiter les paquets, sans toutefois les relayer.



**Figure II.4 :** Sélection des MPRs dans OLSR [47].

- **Le protocole DSDV (Destination-Sequenced Distance-Vector) [48]**

Chaque nœud établit une table de routage contenant des données complètes sur toutes les destinations possibles. Ces données sont :

- Le nœud suivant permettant d'arriver à destination.
- Le nombre de sauts.
- Le numéro de séquence est assigné par le destinataire et joue un rôle crucial en distinguant entre les itinéraires récemment établis et ceux qui sont antérieurs.

La table de routage est affichée uniquement si les deux critères suivants sont remplis :

- Les données reçues sont plus récentes que les antérieurs.
- Les deux données utilisent le même numéro de séquence, et la version reçue affiche une distance plus courte.

La table de routage est mise à jour par le biais d'une unité mobile. Par conséquent, il est lent pour répondre aux changements de la topologie.

Les points forts et faibles des deux stratégies de routage (réactive et proactive) sont synthétisés dans le tableau II.1.

Protocoles proactifs		Protocoles réactifs	
Les points forts	Les points faibles	Les points forts	Les points faibles
<ul style="list-style-type: none"> <li>• La topologie est préalablement connue, permettant une disponibilité instantanée des routes.</li> <li>• Ils disposent d'une route dédiée pour chaque destination au sein du réseau.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Il est impératif de signaler tous changements de topologie.</li> <li>• Un volume de signalisations important.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les nœuds n'enregistrent pas d'information concernant la topologie.</li> <li>• Ils génèrent un volume moins important de signalisations.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les protocoles réactifs entraînent un délai significatif lors de la mise en place des routes et génèrent moins aisément des itinéraires optimaux.</li> </ul>

**Tableau II.1 :** Comparaison entre les stratégies de routage dans les réseaux VANETs.

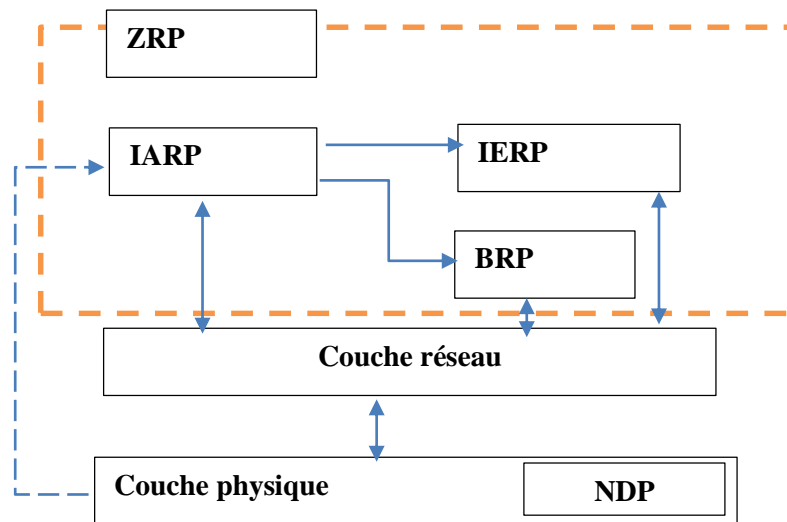
### II.3.1.3. Les protocoles hybrides

Les protocoles hybrides [49] regroupent les avantages des protocoles des deux catégories précédentes. Par exemple, ils emploient un protocole réactif pour réduire la charge des messages de contrôle et un protocole proactif pour diminuer le temps de mise en place de la connexion.

Les protocoles hybrides présentent également certains inconvénients hérités des catégories précédentes, comme l'envoi régulier des messages de contrôle. Parmi les protocoles hybrides les plus réputés :

- **Le protocole ZRP (*Zone Routing Protocol*)**

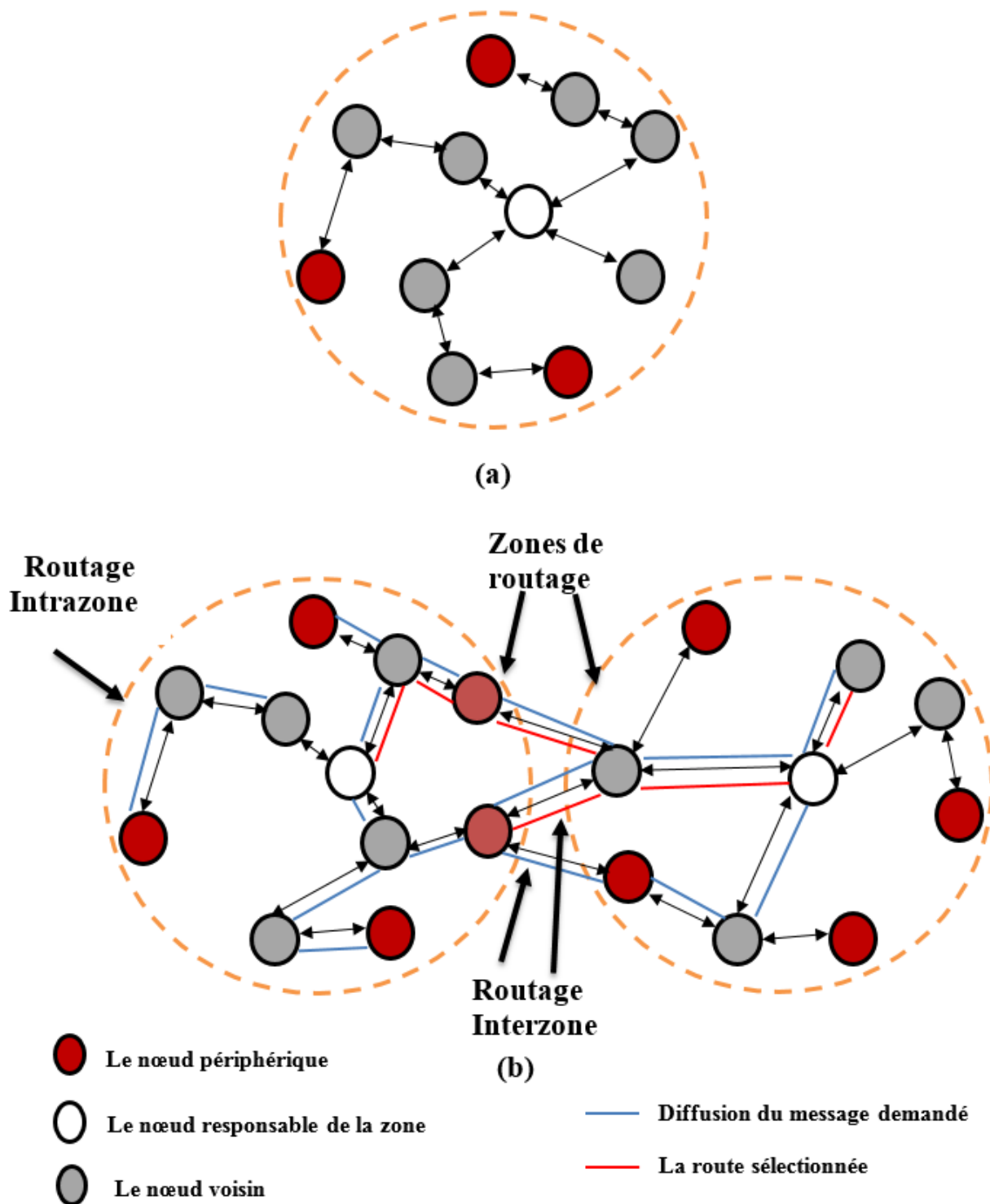
Le protocole ZRP [50] intègre dans son fonctionnement des éléments des deux catégories proactives et réactives. Le protocole ZRP consiste à diviser l'ensemble du réseau en plusieurs zones différentes. En effet, ce mécanisme crée une zone de routage dédiée à chaque point en se basant sur un nombre maximal de sauts, noté  $\beta$ . Ainsi, cette zone englobe tous les nœuds situés à une distance maximale de  $\beta$  sauts. À l'intérieur de cette zone, le protocole ZRP utilise un protocole proactif, et à l'extérieur, il emploie un protocole réactif [51]. Le schéma suivant (Figure II.5) illustre le principe de fonctionnement de ce protocole :



**Figure II.5 :** Architecture du protocole ZRP.

ZRP utilise le protocole proactif IARP (*Intrazone Routing Protocol*) [52], tandis que le protocole réactif est l'IERP (*Interzone Routing Protocol*) [53] comme montre la figure II.6. Tout d'abord, chaque nœud du réseau commence par identifier ses voisins. Cette opération est réalisée par le biais du protocole NDP (*Neighbour Discovery Protocol*) [54], qui supervise la transmission et l'administration des échanges de messages HELLO.

Enfin, le protocole IARP est employé pour définir des itinéraires vers tous les autres nœuds de sa région. IERP est employé de manière réactive pour découvrir les itinéraires entre un nœud et une destination située en dehors de sa région. Le protocole BRP (*Bordercast Resolution Protocol*) [55] est employé en conjonction avec le protocole IERP pour diffuser les requêtes de recherche d'itinéraire à travers le réseau. BRP utilise des données topologiques pour identifier les nœuds périphériques et déterminer la façon de les joindre.



**Figure II.6 :** Fonctionnement du protocole ZRP (a) fonctionnement du protocole IARP (b) fonctionnement du protocole IERP.

### **II.3.2. Les protocoles basés sur la localisation géographique**

Les protocoles basés sur la localisation géographique [56] sont particulièrement adaptés aux réseaux VANETs. Cela est dû à leurs principes fondés sur la collecte des données géographiques des nœuds. Ces protocoles exigent que chaque nœud source du réseau intègre la position du destinataire dans l'en-tête de l'ensemble des messages envoyés. Les nœuds destinataires de ces paquets exploitent les données géographiques intégrées, ainsi que celles inscrites dans leurs propres tables de routage, pour relayer le message. Cette procédure se répète jusqu'à ce que le paquet parvienne en fin de compte à sa destination.

Le routage basé sur la localisation géographique se révèle extrêmement attrayant pour les réseaux dynamiques.

Le routage géographique se divise en trois grandes catégories principales (voir Figure II.1-b) :

#### **II.3.2.1. Les protocoles géographiques tolérants aux délais (DTN)**

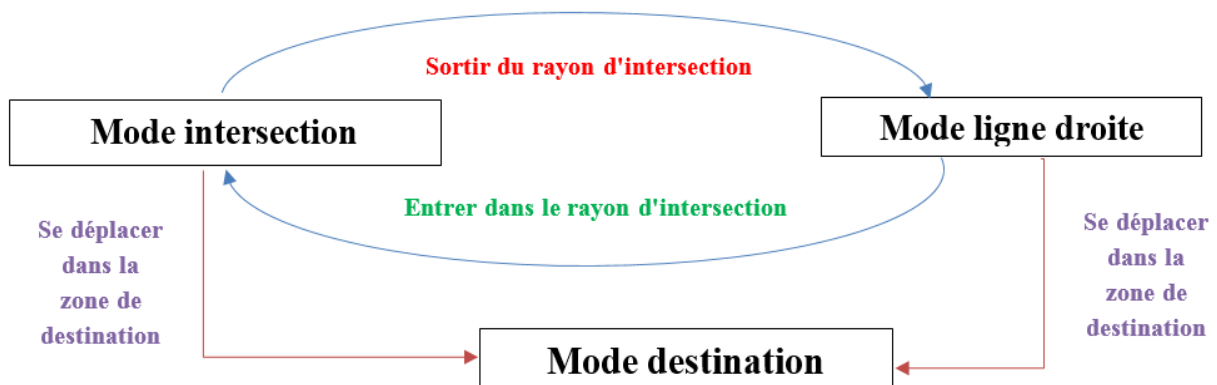
Ces protocoles [57] prennent en considération la déconnexion des nœuds du réseau. Ces protocoles utilisent les coordonnées géographiques récupérées à partir d'un système de positionnement géographique comme le GPS pour calculer un itinéraire vers la destination. Dans cette catégorie de protocoles, en absence d'itinéraire entre deux nœuds, alors on procède selon les deux méthodes suivantes :

- Les messages envoyés sont stockés en mémoire jusqu'à ce que la prochaine route disponible soit établie.
- Diffuser les messages entre les nœuds adjacents et accessibles, dans l'espoir qu'un d'entre eux entre à un moment donné en contact avec le nœud de destination. Par contre, elle présente une perte énorme en matière de temps de connexion. Parmi les protocoles les plus utilisés, on trouve le protocole VADD :

- **Le protocole VADD (*Vehicle-Assisted Data Delivery*)**

Ce protocole [58] est tolérant aux délais. Il cherche à exploiter l'éventuel mouvement des véhicules afin de décider s'il doit effectuer la retransmission d'un message ou pas. Afin d'atteindre cet objectif, ce protocole collecte principalement des données sur la circulation routière le long d'une route, dans le but d'obtenir une estimation approximative du temps moyen nécessaire à un message pour parcourir cette route spécifique. Comme illustré dans la Figure II.7, le protocole VADD dispose de trois modes: Intersection, ligne droite, et Destination, basées sur la position du porteur de paquet.

Il existe également des variantes du protocole VADD [59], pour trouver le lien qui offre le délai de livraison le plus court. Dans l'une de ces variantes, appelé *Location VADD* [60], le prochain lien est déterminé en fonction de la localisation, tandis que dans l'autre variante, *Direction VADD*, il est déterminé en fonction de la direction. [61]. VADD offre un taux de réception plus élevé que DSR et GPSR.



**Figure II.7 :** Les trois modes du protocole VADD.

### II.3.2.2. Les protocoles géographiques non tolérants aux délais (NON- DTN)

Ces protocoles [62] ne prennent pas en considération la déconnectivité des nœuds dans le réseau. Ces protocoles sont fondés sur le principe qu'un nœud achemine son message au nœud adjacent. Le transfert peut échouer si aucun voisin n'est plus proche du destinataire. Ces protocoles possèdent leurs propres stratégies de récupération pour faire face à un tel échec. Ces protocoles sont très répondus pour les réseaux VANETs avec une densité très élevée. Parmi les protocoles les plus utilisés de cette catégorie, on trouve :

- Le protocole GPSR (*Greedy Perimeter Stateless Routing*)

Le protocole GPSR [63] est basé sur la position non tolérant aux délais. Son fonctionnement est basé sur l'hypothèse que tous les nœuds se situent dans un même plan. Dans ce protocole, la transmission des messages est effectuée selon deux modes de fonctionnement. La première méthode est *Greedy Forwarding* [64].

Les coordonnées de localisation du nœud voisin sont envoyées au nœud actuellement actif. La deuxième méthode appelée *Perimeter* [65] est employée dans le cas où on est face à un blocage.

Dans cette situation, le nœud qui n'a pas de voisin plus proche de la destination délègue la tâche à ses voisins. Le GPSR produit de bons résultats dans un environnement routier par rapport à une zone urbaine. La figure suivante montre un scénario de ce protocole:

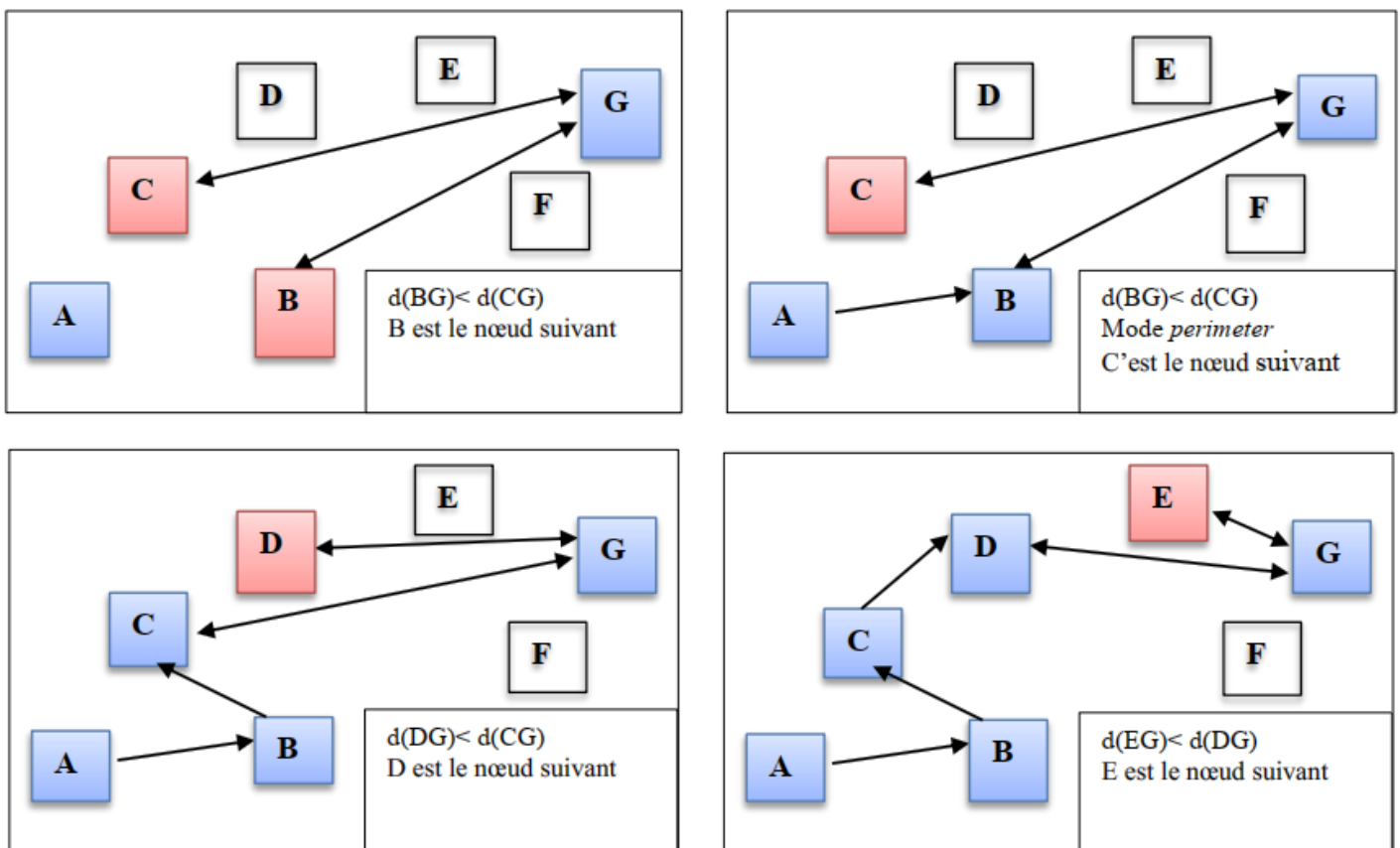


Figure II.8 : Scénario du protocole GPSR.

### II.3.2.3. Les protocoles géographiques hybrides

Ces protocoles fusionnent les deux classes de protocoles précédentes. Cette fusion a pour but d'exploiter la connectivité partielle au sein du réseau. Parmi les protocoles les plus répondus de cette catégorie, on trouve :

- **Le protocole GéoDTN+NAV (*Geographic DTN Routing with Navigator Prediction for Urban Vehicular Environments*) :**

Ce protocole est un protocole géographique de type hybride qui repose sur les trois modes d'acheminement de données décrits précédemment [66].

Les deux modes *greedy* et *perimeter* ne sont pas toujours suffisants dans les réseaux VANETs. Dans ces réseaux, on a souvent des situations où le réseau est déconnecté ou bien partitionné.

Pour cela, on fait appel à un troisième mode en occurrence le DTN (*Delay Tolerant Network*). Ce mode peut assurer l'acheminement de messages même en cas de perte de connexion dans le réseau.

### II.3.3. Les protocoles de routage basés sur la classification

Dans cette catégorie de protocole (figure II.1-c), les nœuds mobiles adjacents forment une classe. Pour chacune de ces classes, un nœud est désigné comme chef de classe (*Cluster Head*). Ces mécanismes sont soumis à des paramètres bien définis [67].

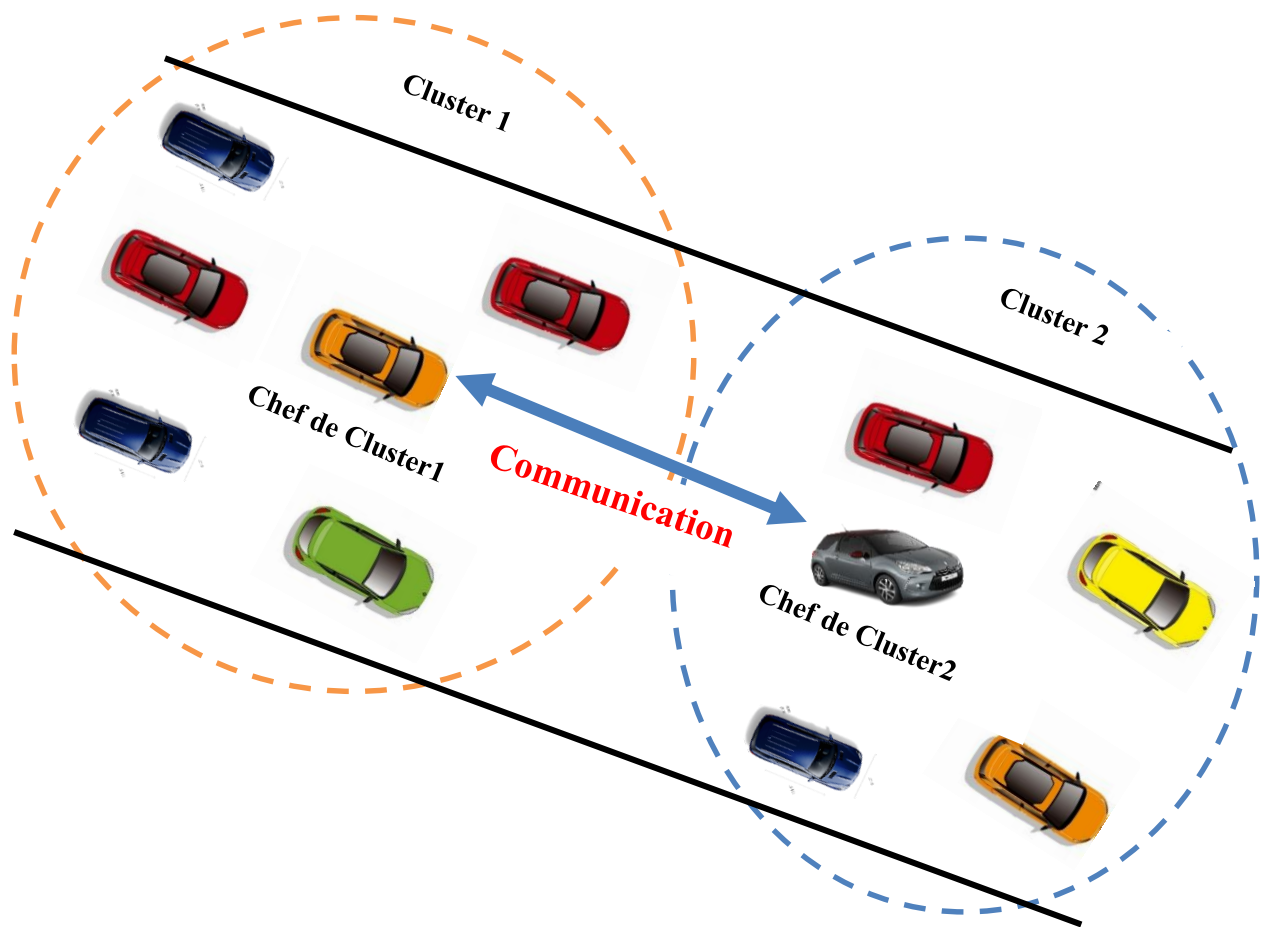
Le chef de classe prend en charge la gestion des points d'intersection au sein de son cluster, ainsi que la coordination avec les autres points d'intersection.

On distingue deux modes de communication : la communication intracluster, réalisée par des liaisons directes entre les points d'intersection du même cluster, et la communication interclusters, qui se fait à travers les chefs de cluster. Parmi les protocoles les plus populaires de cette catégorie, on trouve :

- **Le protocole CBLR (*Cluster Based Location Routing*) :**

Ce protocole [68] est basé sur la classification en clusters. Dans ce protocole, chaque responsable de cluster élabore une table de routage englobant les éléments suivants : les adresses et les positions géographiques des points d'intersection du cluster, les adresses et la table de routage des classes adjacentes.

Lorsqu'un nœud souhaite transmettre un message à une destination, le responsable de cluster doit examiner si cette dernière se trouve dans le même cluster ou non.



**Figure II.9 :** Réseau VANET basé sur les clusters.

- **Le protocole CBDRP (*Cluster-Based Directional Routing Protocol*)**

Le protocole de routage directionnel CBDRP [69] classe les voitures en différentes catégories en fonction de leur mouvement dans la même direction, en fonction de leurs vitesses et leurs directions.

L'émetteur transfère le paquet au responsable de son cluster pendant un échange. Il incombe au chef de cluster de le transmettre au chef de cluster de la destination qui le transfère ensuite jusqu'à atteindre la destination finale. Ce schéma de transmission permet de diriger efficacement les paquets dans la direction souhaitée.

#### **II.3.4. Les protocoles de routage basés sur la diffusion (*Broadcast*)**

Ces protocoles de routage (figure II.1-d) sont largement utilisés dans les VANETs pour partager des messages d'urgence ainsi que la diffusion des publicités et annonces [70].

Dans ce mode de routage, un message est propagé à tous les points d'intersection du réseau. Chaque nœud, à son tour, relaye le message à l'ensemble des autres nœuds du réseau. En contrepartie, cette technique peut engendrer une tempête de diffusion qui va provoquer une surcharge sur la capacité limitée du canal.

Cela va certainement réduire la fiabilité des communications dans le réseau [71]. Cette catégorie peut être divisée en quatre sous-catégories à savoir : trafic, superficie, classe et probabilité [72]. A présent, nous allons examiner en détail un protocole de chaque sous-catégorie :

- **Le protocole DVCAST (*Distributed vehicular broadcast protocol*)**

DVCAST [73] est un protocole de la sous-catégorie trafic. En effet, ce protocole focalise sur les informations du trafic routier. Afin de vérifier si le paquet est redondant ou pas, chaque nœud du réseau se serre d'un drapeau (*flag*).

Il utilise aussi des données locales sur la topologie du réseau en envoyant périodiquement des messages "hello" [74].

- **Le protocole UMB (*Urban Multihop Broadcast Protocol*)**

UMB [75] est un protocole de la sous-catégorie superficie. En effet, ce protocole focalise sur les informations de la superficie de la route. Ce protocole divise une route en petits segments et achemine le message multisauts reçu aux véhicules situés dans le segment non vide le plus éloigné.

Il est basé sur une diffusion multisaut afin de réduire au maximum les collisions. L'envoi des messages est effectué par les nœuds les plus éloignés sans disposer au préalable d'informations

sur la topologie du réseau. Néanmoins, cette méthode présente des désavantages, à cause de la sélection du nœud le plus distant qui entraîne une latence significative et restreint son utilité dans des situations d'urgence. Le protocole UMB se déroule en deux étapes :

- **Diffusion directionnelle** : Le nœud source choisit un nœud afin de transmettre les données, sans disposer d'indications préalables sur la topologie du réseau.
  - **Diffusion aux intersections** : La deuxième étape consiste à diffuser l'information aux intersections, pour diffuser les messages dans toutes les directions possibles [76].
- **Le protocole MDDV (*Mobility-Centric Data Dissemination Algorithm for Vehicular Networks*)**

Le protocole MDDV [77] est un protocole de diffusion de la sous-catégorie cluster. En effet, ce protocole focalise sur la répartition des nœuds en zone.

Dans le cadre du protocole MDDV, les nœuds sont représentés par les intersections et les liens correspondent aux tronçons routiers. A chaque lien est attribué un poids indiquant à la fois la distance et la densité de trafic associée. MDDV utilise ensuite une méthode d'optimisation pour atteindre la destination. Le chemin optimal est celui qui affiche la somme la plus basse des poids dans le graphe orienté.

Bien que ce protocole contribue significativement à réduire la redondance, il n'apporte aucune amélioration pour prévenir les collisions éventuelles, telles que celles dues à des stations cachées.

- **Le protocole REAR (*Reliable and Efficient Alarm Message Routing*)**

Le protocole REAR (*Reliable and Efficient Alarm Message Routing*) [78] est un protocole de diffusion de la sous-catégorie probabilité . En effet, ce protocole focalise sur l'utilisation de modèle et méthode fondés sur un aspect probabiliste. Ce protocole s'applique aux autoroutes.

### II.3.5. Les protocoles de routage basés sur la diffusion géographique (*Geocast*)

Les protocoles *Geocast* [79] visent à transmettre des données à tous les points se trouvant dans une zone géographique particulière, désignée comme zone d'intérêt (*Zone of relevance*) [80].

L'objectif principal de cette méthode est de faire parvenir les messages à tous les points dans la zone. Ce type de routage repose sur la localisation des nœuds du réseau et se caractérise par un routage multicast, permettant la diffusion des données à plusieurs destinataires. Pour participer aux échanges dans le réseau, un nœud doit simplement se trouver à l'intérieur de cette zone d'intérêt.

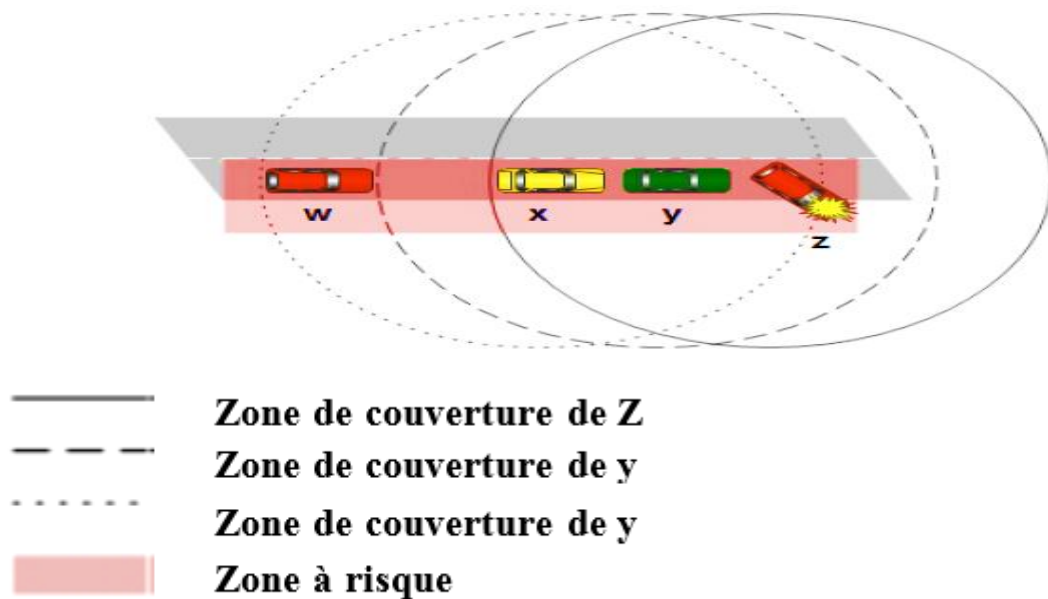
En routage *Geocast*, les véhicules situés en dehors de la zone ne reçoivent pas de message depuis la source afin d'éviter les échanges inutiles. Il délimite généralement une zone de diffusion dans laquelle il guide la propagation des paquets.

On peut avoir recours au routage unicast dans la zone de destination pour transférer le message. L'inconvénient majeur de ce type de routage est sans doute le partitionnement du réseau ainsi que la présence de voisins défavorables qui peut gêner la bonne transmission des messages. Parmi les protocoles les plus populaires de cette catégorie (figure II.1-e), on trouve :

- **Le protocole IVG (*Inter-Vehicle Geocast*) :**

Le protocole IVG [81] est basé sur la diffusion géographique. Ce protocole choisit de manière dynamique les points relais pour retransmettre les messages d'alerte périodiquement. Ce protocole informe tous les véhicules présents dans la zone à risque de toute situation dangereuse, telle qu'un accident.

En fonction de leur emplacement par rapport à la zone risquée, les points voisins qui interceptent ce paquet d'alertes réalisent une estimation d'un intervalle de temps (*Differ Time Backoff*) pour recevoir une confirmation de leurs voisins à un saut. Cela permet au voisin le plus éloigné d'agir en tant que relais pour la transmission, assurant ainsi une propagation efficace des alertes dans la région concernée. Chaque nœud qui reçoit un message d'alerte ne doit pas le rediffuser rapidement, mais doit plutôt attendre un certain temps afin de diminuer le nombre de messages d'avertissement inutiles. La figure II.9 illustre la sélection de relais dans IVG. X est plus éloigné de z que de y, alors x est considéré comme un relais. X permet d'atteindre X alors que Y empêche cela.



**Figure II.10 :** Sélection des relais dans le protocole IVG [79].

- **Le protocole DRG (*Distributed Robust Geocast*) :**

Ce protocole [82] est adaptable dans des environnements dynamiques. Il gère les changements de topologie fréquents et réduit le nombre de sauts. Il est basé sur une approche entièrement distribuée dans laquelle les messages sont maintenus en vie à la destination pour assurer la livraison fiable des messages.

Par conséquent, les nouveaux nœuds entrant dans cette région peuvent également recevoir des messages. DRG réduit le nombre de transmissions redondantes, car les nœuds ne rediffusent pas le message tant que leur distance par rapport à l'expéditeur dépasse une valeur spécifiée.

La transmission est divisée en deux régions : zone de couverture (*Zone of Relevance ZOR*) et la zone d'expédition (*Zone of Forwarding ZOF*).

La zone de couverture de l'expéditeur est la zone dans laquelle les véhicules peuvent recevoir les messages de l'expéditeur.

La zone d'expédition (*Zone of Forwarding ZOF*) se compose des nœuds qui peuvent transmettre les messages de géodiffusion de manière fiable aux nœuds suivants.

Ces nœuds doivent absolument se situer dans la région d'intérêt (*Region of Interest*) sinon les messages sont supprimés.

Ce protocole a des applications pour la livraison fiable de messages d'urgence dans une région géographique spécifiée.

L'avantage principal de ce protocole est qu'il évite la fragmentation du réseau par des retransmissions planifiées et en utilisant l'approche la zone d'expédition ZOF.

#### **II.4. L'évaluation des protocoles de routage**

La simulation offre la possibilité d'évaluer les protocoles dans diverses conditions et en modifiant différents paramètres.

Grâce à la simulation, il est possible de tester les protocoles dans une multitude de scénarios, ce qui permet d'analyser leur efficacité et leur fiabilité dans des situations variées.

Elle permet de manipuler plusieurs aspects de l'environnement comme le nombre de nœuds, la superficie du réseau, ainsi que la répartition des véhicules dans cet environnement.

Les paramètres d'évaluation varient en fonction de l'approche de routage mise en œuvre. Toute simulation devrait être capable d'évaluer :

- Le processus d'actualisation du routage.
- Les délais de transmission moyens des messages.
- La moyenne des véhicules traversés par les messages.

Voici un tableau exhaustif qui compare en détail les diverses catégories de protocoles de routage utilisés dans les VANETs:

Catégories	Sous catégories	Protocoles les plus populaires	Scénarios préférés	Avantages	Limites
Topologie	Proactif	OLSR	Urbain	à utiliser dans un réseau dense	Consommation de bande passante
	Réactif	AODV	Urbain	Réduits les besoins en mémoire	Prends du temps pour établir un itinéraire
	Hybride	ZRP	Autoroute	Réduire la surcharge du réseau	Non évolutif
Localisation	Tolérance aux délais	VADD	Urbain	Taux de livraison des paquets élevé	Si la topologie change rapidement, cela entraîne un retard
	Non tolérant aux délais	GPSR	Urbain	Bonne évolutivité	Dépend des nœuds de jonction
	Hybride	GéoDTN+NAV	Urbain	Bonne évolutivité	Plusieurs modes de fonctionnement
Classification		CBLR	Autoroute	Bonne évolutivité	Provoque un retard
<i>Broadcast</i>	Trafic	DV-CAST	Autoroute	Transmission fiable	Consomme une grande quantité de bande passante réseau
	Surface	UMB	Urbain	Peut surmonter les interférences	Perte de bande passante
	Classe	MDDV	Autoroute	Fiabilité dans la livraison des messages	Surcharge de paquet de contrôle élevée
	Probabilité	REAR	Autoroute	Bonne évolutivité	Provoque plus de retard et une surcharge de paquets de contrôle élevée
<i>Geocast</i>		IVG	Autoroute	multidiffusion géographique fiable	Retard élevé et congestion du réseau

**Tableau II.2 :** Comparaison entre les protocoles de routage dans les réseaux VANETs.

## **II.5 Conclusion**

L'étude des divers aspects du routage dans les réseaux VANETs a été abordée dans ce chapitre, en distinguant plusieurs catégories de protocoles de routage. La littérature propose également d'autres protocoles et stratégies de routage qui influent sur les performances du réseau.

Plusieurs études sur le routage dans les VANETs démontrent qu'il n'y a aucune catégorie ou protocole idéal, mais on les emploie selon la topologie et l'environnement des réseaux.

Dans le chapitre à venir, nous étudierons les modèles de mobilité employés dans les réseaux VANETs.

## Chapitre III

# Mobilité et environnements de simulations des réseaux VANETs

### III.1 Introduction

Étant donné que l'expérimentation directement sur le matériel (véhicules, engins ...) est complexe voir dangereuse, la nécessité de faire des essais sur logiciels de simulation est donc primordial.

Le défi réside alors dans l'utilisation d'un environnement de simulation le plus proche possible de l'environnement réel. Un environnement réaliste doit donner des résultats applicables et un prototype facile à déployer.

Les simulateurs existants actuellement ont été adaptés pour simuler les réseaux VANETs et les technologies émergentes et nouvelles comme le *software-defined networking* SDN, la 5G.... , quoique les réseaux véhiculaires ont des spécificités particulières qui engendrent la nécessité de combiner plusieurs simulateurs.

Nombreux sont les logiciels de simulations qui offrent un milieu d'essai pour les réseaux VANETs, mais peu d'entre eux offrent des conditions réalistes d'une vue microscopique et macroscopique.

Dans la vision macroscopique on étudie l'environnement autour du véhicule voir l'interaction entre le véhicule et l'environnement alors que dans la vision microscopique on s'intéresse au véhicule lui-même et ses composants.

Seuls quelques simulateurs commerciaux offrent la possibilité de tout faire sur la même plateforme avec des interfaces graphiques.

Les autres simulateurs, ou émulateurs avec des licences académiques ou gratuites nécessitent un minimum de connaissance en programmation et un matériel puissant pour les réseaux denses.

Ce chapitre met l'accent sur la présentation des simulateurs de mobilité, et des simulateurs de réseaux VANETs. Les différents simulateurs ainsi que leurs principes de fonctionnement sont détaillés. Des comparaisons entre les différents simulateurs seront traitées dans ce chapitre.

## **III.2 Simulation de la mobilité**

### **III.2.1. Modèle de mobilité dans les VANETs**

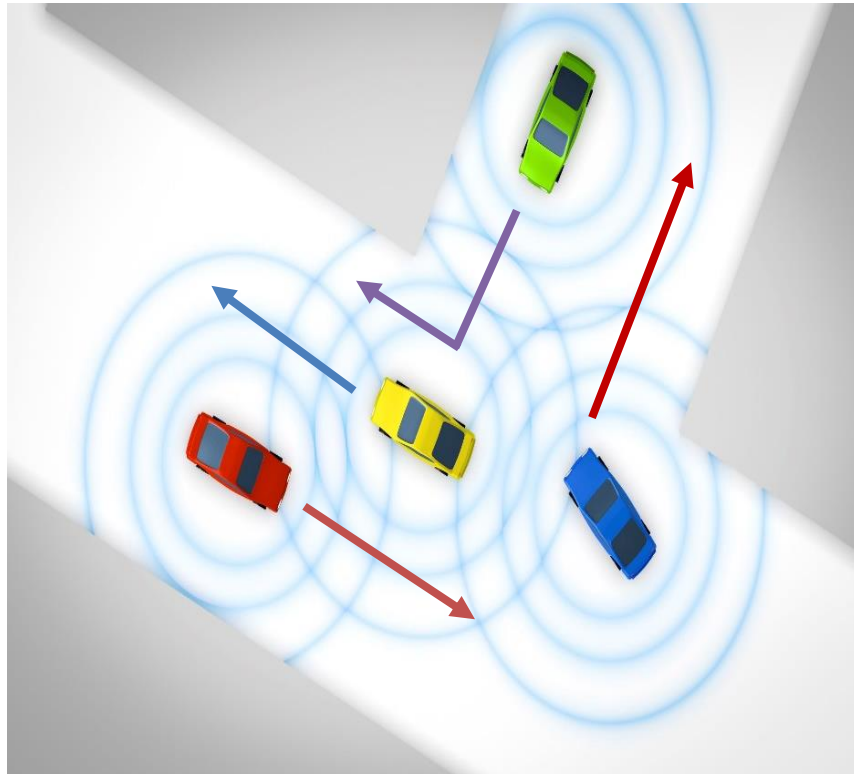
Le modèle de mobilité a pour but de déterminer si deux nœuds sont adjacents et peuvent communiquer.

Pour définir un modèle de mobilité efficace, il est essentiel de prendre en considération les particularités des réseaux VANETs:

- Le mouvement des véhicules.
- La présence des accidents.

En réalité, un modèle de mobilité doit gérer les actions et les trajets des nœuds au sein du réseau VANETs, afin de refléter les conditions du monde réel de cette mobilité [83].

À noter que les déplacements des véhicules sont restreints, car ils doivent toujours obéir au Code de la route.



**Figure III.1 :** Exemple de la mobilité dans les réseaux VANETs.

### III.2.2. Les caractéristiques d'un modèle de mobilité

Afin d'atteindre une meilleure adéquation avec la réalité, il est indispensable que le modèle de mobilité intègre deux niveaux distincts :

La macro-mobilité se concentre sur les paramètres macroscopiques susceptibles d'influencer les déplacements des véhicules. Ces paramètres incluent la description de la configuration du réseau routier, les particularités inhérentes à chaque voie.

Ce niveau de mobilité permet de prendre en compte les éléments clés qui influent sur le déplacement global des véhicules dans un environnement routier.

La micromobilité se focalise sur les manœuvres de chaque conducteur. Elle cherche à modéliser des paramètres liés principalement au comportement du conducteur [84].

Les principaux éléments qui impactent les modèles de mobilité dans les réseaux VANETs sont :

- **Disposition des rues :** les nœuds limitent leurs mouvements à des chemins bien définis. Ce facteur détermine la distribution spatiale des nœuds et leur connectivité. Les rues peuvent avoir une ou plusieurs voies et permettre une circulation à sens unique ou à double sens.
- **Taille du pâté de maisons :** Un pâté de maisons peut être considéré comme la plus petite zone entourée de rues. La taille du bloc détermine le nombre d'intersections dans la zone, qui à son tour détermine la fréquence à laquelle un véhicule s'arrête. Il détermine également si les nœuds aux intersections voisines peuvent entendre la transmission radio des autres.
- **Mécanismes de contrôle de la circulation :** Les panneaux sont les dispositifs les plus couramment utilisés aux intersections pour réguler la circulation routière. Ils sont responsables de la formation de regroupements et de files de véhicules aux intersections ainsi que la réduction subséquente de leur vitesse. D'autre part, la formation de grappes peut également affecter négativement les performances du réseau avec une augmentation des conflits des canaux sans fil.
- **Mouvement interdépendant des véhicules :** Il trouve son inspiration dans la manière dont les véhicules autour de lui se déplacent. Par exemple, un véhicule tenterait de maintenir une distance minimale par rapport à celui qui le précède, augmenterait ou diminuerait sa vitesse et pourrait aussi changer de voie.

### III.2.3. Types de modèles de mobilité dans les VANETs

Le modèle de mobilité dans les VANETs vise à développer des approches pour modéliser les déplacements au sein d'une zone géographique déterminée (carte routière de dimensions prédéfinies).

Il est crucial d'intégrer les caractéristiques de la macro-mobilité et de la micromobilité dans le modèle de mobilité lors de la simulation d'un réseau VANET, afin de représenter de manière précise les déplacements des véhicules. La figure ci-dessous présente les différentes catégories de modèles de mobilité utilisés dans les réseaux VANETs.

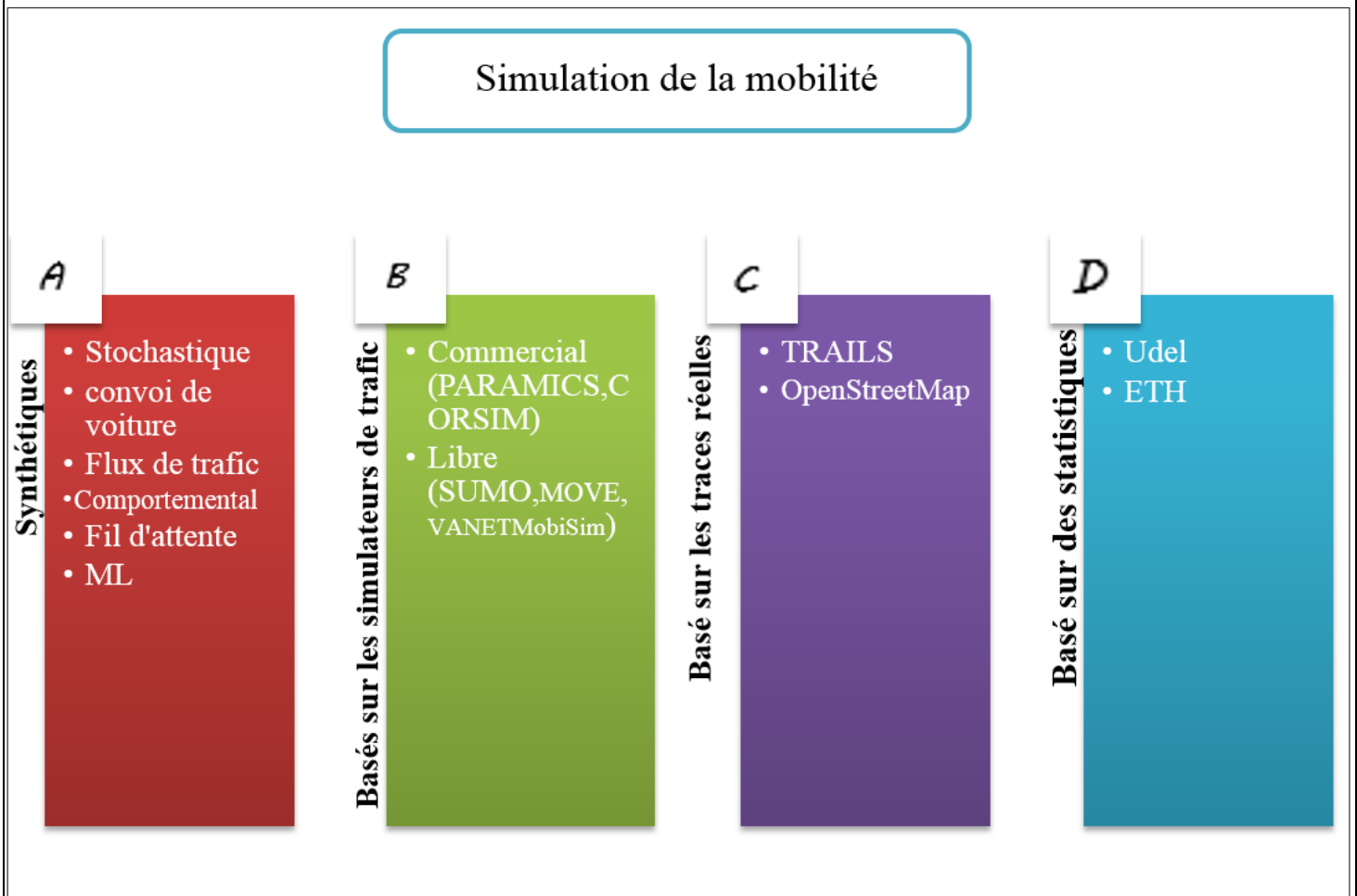


Figure III.2 : Simulation de la mobilité dans les réseaux VANETs [85].

Les modèles de mobilité dans les VANETs sont classifiés en quatre grandes catégories. La classification de ces modèles est soumise à plusieurs critères [86], à savoir :

- L'utilisation d'une base de données ou pas.
- Les échanges entre les véhicules et leurs mouvements
- La stratégie de calcul des chemins et prédiction de trafic.

Dans ce qui va suivre, nous allons détailler ces catégories en mettant l'accent sur quelques modèles existants.

#### ➤ **Les modèles de mobilité synthétique**

Ces modèles reposent sur des approches mathématiques et peuvent être classés en six catégories (figure III.2-a): stochastiques, modèles de flux de trafic, modèles de convoi de voitures, modèles comportementaux, modèles de file d'attente et modèles ML [87].

Nous allons décrire les modèles les plus répandus dans la littérature :

- **Modèles stochastiques** : Ils décrivent le modèle de mobilité comme un processus aléatoire, où la direction et la vitesse sont choisies arbitrairement. C'est les modèles les plus facile à déployer et qui ne demande pas une base de données. Parmi ces modèles on cite :

- ***Random Waypoint (RWP)***

Dans ce modèle, chaque nœud choisit une destination arbitraire avec la vitesse aléatoire à des points appelés *waypoints* [88]. Le résultat de la simulation est que la variable de simulation décroît lentement vers une valeur d'état stable au fur et à mesure que le temps de simulation avance. Ainsi, le problème principal de ce modèle est appelé *velocity decay* [89]. Ce problème a été résolu plus tard dans [90] avec le support de la méthode Palm [91].

- **Modèle de *Freeway***

Inspiré par les autoroutes du monde réel, ce modèle divise virtuellement les routes en voies distinctes pour simuler le mouvement des véhicules. Chaque voie représente un chemin possible qu'un véhicule peut prendre, avec des vitesses et des directions spécifiques. La transition entre les voies est contrôlée par des règles définies.



**Figure III.3 :** Le modèle de *Freeway*.

- **Modèle *Manhattan***

Le modèle *Manhattan* [92] est un autre modèle stochastique. Qui permet de simuler la mobilité urbaine. Il représente une carte de routes horizontale et verticale à double voie. Les véhicules sont mis au hasard dans une route et puis se déplacent le long de la route en suivant le même processus que le modèle de l'autoroute. Lorsqu'il atteint une intersection, le véhicule choisit au hasard une nouvelle destination en utilisant une approche probabiliste. La distance en avant entre les véhicules et le changement de voie est modélisée. Néanmoins, des comportements comme la file d'attente aux intersections et les panneaux de signalisation n'étaient pas inclus dans ce modèle.

- **Modèle de *City Section***

Dans ce modèle [86], la zone de simulation est un réseau routier qui représente un segment de la ville ou le réseau ad hoc existe.

En effet, le chemin est souvent le même, car l'utilisateur fait presque le même trajet au quotidien. Le modèle de *city section* prend tout ça en considération.

Chaque nœud mobile démarre la simulation d'une intersection prédéfinie de deux routes. Le nœud choisit ensuite une destination aléatoire représentée par un point dans une rue. Le déplacement vers cette destination implique (au maximum) un mouvement horizontal et un mouvement vertical. Une fois arrivé à destination, le nœud mobile choisit au hasard une autre

destination (c.-à-d.une intersection de deux rues) et répète le processus. En d'autres termes, le nœud mobile ne fait pas de pause entre les déplacements.

- **Modèles flux de trafic ou *traffic stream*** : c'est un modèle qui contrairement au modèle stochastique prend en compte la vitesse, la densité et le flux de trafic.
- **Modèles convoi de voitures ou *car following*** : comme son nom l'indique, cette catégorie de modèles considère à la fois la distance et la vitesse des véhicules environnants. Krauss [93] est un modèle de convoi de voitures qui manipule l'accélération, la décélération et la distance de sécurité. Plusieurs autres modèles basés sur celui-ci existent dans la littérature.
- **Modèles comportemental ou *behavioural*** : Le behavioural modèle étudie ce qu'on appelle réaction à un stimulus, régi par des règles sociales et culturelles.
- **Modèles file d'attente** : Le modèle file d'attente applique les distributions probabilistes pour modéliser la composition des files d'attente, c'est le modèle qui peut simplifier les scénarios complexes et simule les trafics de très larges densités dans un temps réduit.
- **Modèle de Machine Learning ou *ML based models***: apprend des exemples réels pour prédire les modèles de trafic. *Nearest neighbor* [94] le modèle du plus proche voisin [94] représente l'une des approches fondées sur l'apprentissage automatique.

➤ **Les modèles de mobilité basés sur des simulateurs de trafic**

*Traffic Simulator based models* [95] sont des modèles de mobilité microscopique destinés pour le trafic métropolitain (figure III.2-b).

Étant donné que le trafic est modélisé, les modèles de simulation devront s'adapter aux exigences spécifiques de chaque environnement routier.

Des simulateurs comme SUMO [96], VISSIM [97], SimMobility [98], PARAMICS [99], and CORSIM [100] sont développés selon ces modèles pour l'ingénierie de la circulation urbaine. Parmi ces modèles on trouve : *Car Following Models* [101] et *Lane Changing Models* [102].

➤ **Les modèles de mobilité basés sur des traces réelles**

Ces modèles [87] utilisent des traces de mobilité réelles pour définir un modèle de mobilité. (figure III.2-c). Avec ces modèles, les emplacements ou les trajectoires des utilisateurs sont extraits, ce qui fournit les meilleures informations sur les modèles de mobilité [103].

Il est envisageable de prédire les modèles de mobilité qui ne sont pas rapportés dans les traces dans une certaine mesure en utilisant des modèles mathématiques complexes.

Le principal inconvénient associé à ce genre de modèle est que si des données de déplacement ont été collectées pour un système comprenant des autobus, il serait inapproprié d'appliquer un modèle extrapolé de celui-ci à la circulation des véhicules personnels [86].

*Open street map* [104] est l'un des projets cartographiques les plus connus de cette catégorie.

Les auteurs de [105] ont conçu aussi le *TRAcE based probAbiLiStic mobility*, ce modèle permet de réaliser des scénarios de simulation commercialisables et flexibles.

➤ **Les modèles de mobilité basés sur des statistiques**

Ces modèles sont une source importante d'information pour la vision macroscopique (figure III.2-d).

Ce sont des modèles qui utilisent des études sociales et la théorie du comportement. Dans ces modèles plusieurs paramètres sont introduits comme les heures de pointe et les distances parcourues.

*UDelModels* [106] fait partie de cette catégorie, c'est une suite d'outils qui sert à modéliser les réseaux maillés urbains.

Le modèle ETH [107] crée du trafic des véhicules personnels et publics sur des cartes routières régionales de Suisse avec un haut niveau de réalisme.

Le modèle est calibré à l'aide de données de recensement et autres enquêtes ou statistiques locales ou nationales sur la mobilité.

De nombreux chercheurs travaillent sur la modélisation de ces systèmes en étudiant le comportement des citoyens que ce soit lors des déplacements en public ou privés.

Les modèles basés sur des statistiques exploitent également les traces numériques recueillies par les différents équipements. Des modèles synthétiques sont utilisés pour modéliser ces flux de données.

Pour un environnement plus réaliste, on doit combiner entre les modèles synthétiques et les modèles statistiques.

### **III.3 Simulation du réseau**

À l'heure actuelle il n'existe aucun simulateur libre qui peut reproduire tout l'environnement routier. La simulation de la mobilité permet juste de schématiser ou modéliser le comportement du conducteur ou les déplacements du véhicule.

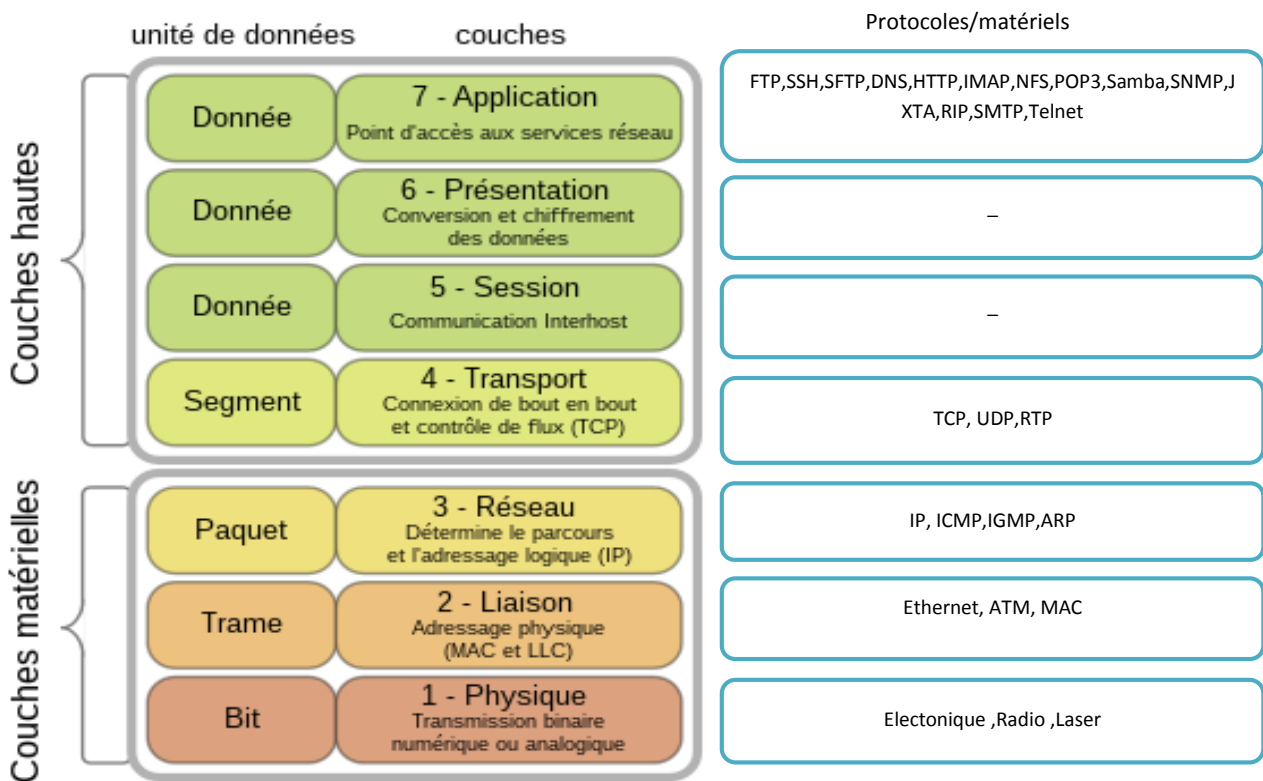
Alors un simulateur qui s'occupe de la communication entre ces individus ou ces véhicules réseau est nécessaire.

Avant de citer les simulateurs qui existent actuellement, on doit faire le point sur la hiérarchie réseau et les technologies ou outils utilisables dans chaque couche.

#### **III. 3.1. Notions préliminaires**

Le modèle OSI [108] orchestre toujours la communication, peu importe le type de réseaux, sauf que pour quelques réseaux les couches se fusionnent

Le modèle **OSI** (*Open Systems Interconnection*) [108] est un modèle conceptuel de communication qui décrit les fonctions de communication d'un système de télécommunication ou d'informatique. Il peut servir de référence pour comprendre le fonctionnement des réseaux de communication.

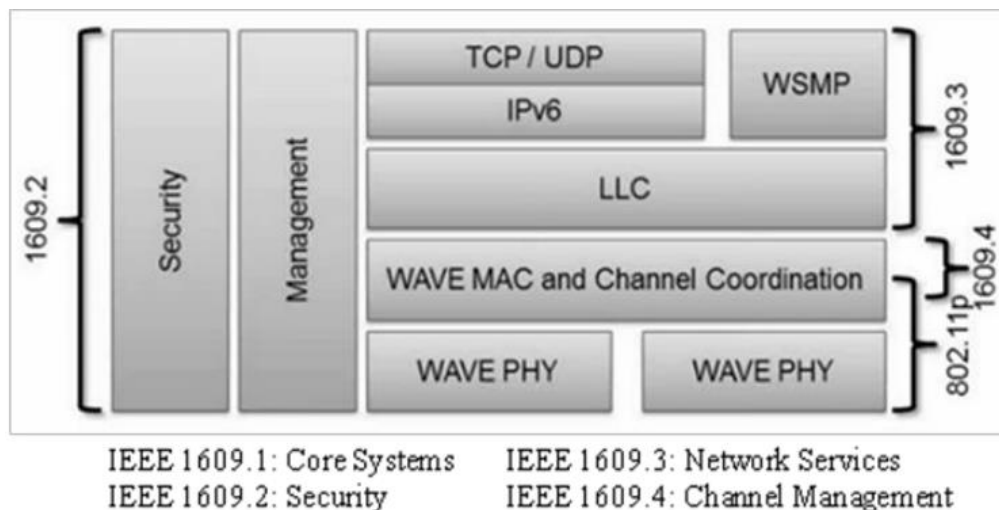


**Figure III.4 :** Le modèle OSI.

Les diverses fonctions de communication dans les réseaux VANETs peuvent être décrites en utilisant les différentes couches du modèle OSI.

Par exemple, la couche physique décrit les caractéristiques physiques du canal de communication sans fil, les soucis sont donc la distorsion du signal causée par la vitesse élevée, la variation de fréquences, ainsi que les exigences en bandes [109].

Tandis que pour la couche liaison de données, qui se divise en deux sous couche LLC (*Logical Link Control*) et MAC (*MEDIUM ACCESS CONTROL*), un nouveau protocole MAC spécifique aux réseaux véhiculaires a été introduit, le IEEE 802.11P [110] ou WAVE (*Wireless Access in Vehicular Environments*). Ensuite, la couche réseau est chargée du routage des messages.



**Figure III.5 :** La famille IEEE 1609 et la 802.11P [110].

Les standards IEEE 1609 [111] et ISO sont deux normes qui définissent des spécifications pour les réseaux de communication véhiculaire (VANETs).

### III. 3.2. Les simulateurs réseau

Vu qu'aucun simulateur VANET libre ou académique ne fournit un environnement de simulation complet, à la fois microscopique et macroscopique qui traite tous les aspects mobilité, protocole de communication dédié, ou extensions vers les nouvelles technologies, l'utilisation de plusieurs simulateurs ou Framework est primordiale.

Lorsqu'on veut reproduire l'environnement véhiculaire le plus réaliste possible on doit veiller à ce que le tous soient paramétrable du choix du modèle de mobilité à la façon de communication V2V et V2I. Un simulateur réseau modélise l'échange de messages entre les entités du réseau.

Après plusieurs essais et années de recherches, on peut distinguer les deux simulateurs réseau VANET libres suivants :

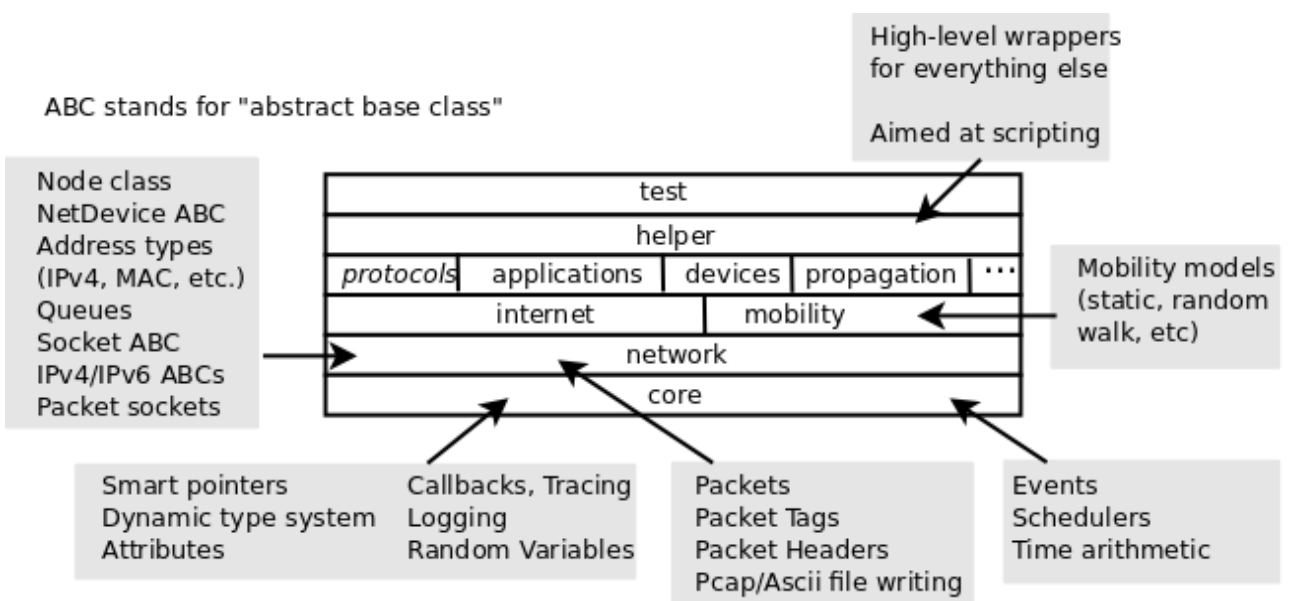
#### ➤ Network Simulator version 3

Network Simulator version 3 [112] est un simulateur à évènement discret, open source largement utilisé pour la simulation des protocoles.

Il propose également une sélection de modèles de protocoles prédéfinis, comme TCP, UDP, IPv4, IPv6, IEEE 802.11, LTE, WiMAX, etc., fournissant aux utilisateurs la capacité de simuler aisément des scénarios de réseau complexes.

NS3 encourage l'élaboration de modèles de simulation authentiques qui peuvent être utilisés en temps réel. C'est un simulateur avec une large communauté d'utilisateurs et de développeur, ce qui peut engendrer des mises à jour fréquentes et des modifications selon les besoins de la communauté.

Ces changements peuvent affecter les scripts déjà utilisés et nécessitent des modifications importantes dans le code. Ce qui implique aussi que les résultats peuvent varier tant que l'expérience ne peut pas être reproduite dans les mêmes conditions.



**Figure III.6 :** Structure du simulateur ns3 [113].

NS 3 offre une exportation presque complète de son API vers Python. Cela permet aux programmes Python d'importer un module "ns3" de la même manière que la bibliothèque NS 3 est liée par des exécutables en C++. Voici une description générale de quelques couches de la structure du simulateur NS 3:

- **Couche de base (Core Layer) :** Les fonctionnalités de base nécessaires à la simulation de réseaux sont fournies par cette couche, incluant la gestion des événements, la gestion du temps, la gestion des nœuds, la gestion des canaux, et bien d'autres.
- **Couche des protocoles (Protocol Layer) :** Cette couche fournit les protocoles de communication réseau pour simuler différents types de réseaux.

➤ **Objective Modular Network Testbed in C++ (OMNeT++)**

OMNeT++ [114] repose sur une méthode de simulation utilisant une approche d'événements discrets. Les événements représentent les actions qui se produisent dans le réseau, comme l'envoi ou la réception de messages. Le simulateur gère une liste ordonnée d'événements et les traite dans l'ordre chronologique.

OMNeT++ utilise un langage de modélisation appelé *NED (Network Description Language)* [115] pour décrire les différents composants du réseau. OMNeT++ fournit une interface de simulation flexible et une bibliothèque de modules pour modéliser et simuler les différents aspects d'un réseau de véhicules

*VEINS (Vehicular Network Simulation)* [116] est une extension basée sur OMNeT++ et utilise également SUMO (Simulation of Urban Mobility) pour la modélisation du trafic routier. Les modèles de VEINS sont conçus pour modéliser les caractéristiques uniques des VANETs.

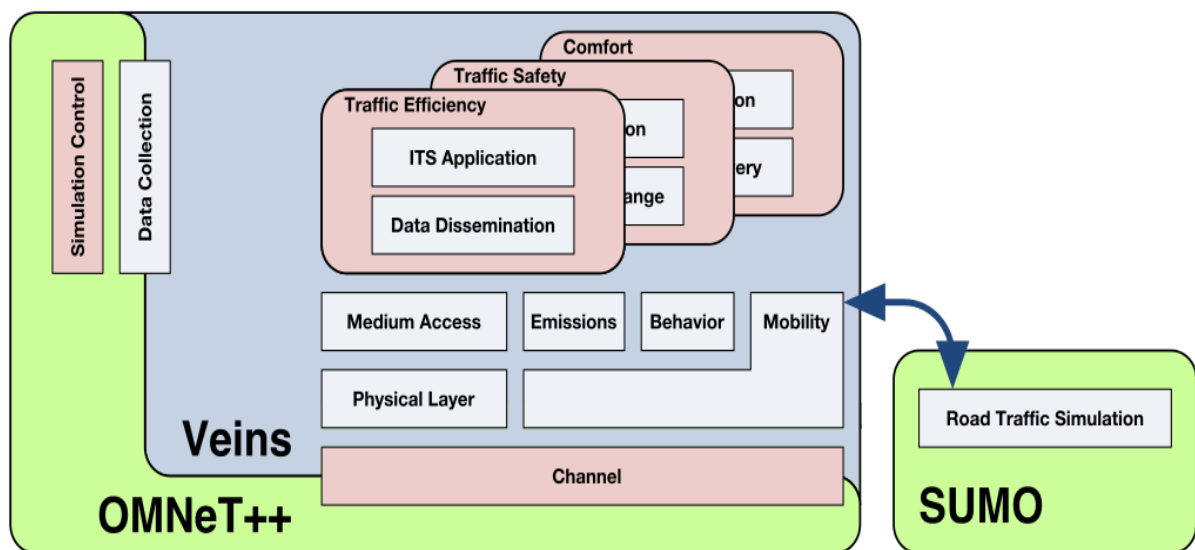


Figure III.7 : Fonctionnement de VEINS [117].

En résumé, OMNeT++ est une plateforme de simulation générique pour les réseaux de communication, tandis que VEINS est une extension spécifique pour la simulation de réseaux de véhicules ad hoc.

Ensemble, ils constituent un outil puissant pour simuler et analyser des réseaux de véhicules dans diverses applications.

La principale différence entre NS-3 et OMNeT++ réside dans leur niveau d'abstraction. NS-3 est souvent utilisé pour modéliser des réseaux de communication à un niveau très détaillé, tandis qu'OMNeT++ est utilisé pour modéliser des réseaux à un niveau plus élevé d'abstraction en utilisant des modèles prédéfinis. Les deux sont open source et sont largement utilisés dans la recherche et l'enseignement en réseau.

#### ➤ MININET

Mininet [118] est un outil de simulation de réseau qui permet la création de topologies virtuelles en incorporant des commutateurs, des hôtes et des contrôleurs logiciels tels que *OpenFlow*. Ces composants peuvent être programmés à l'aide de divers langages de programmation comme Python.

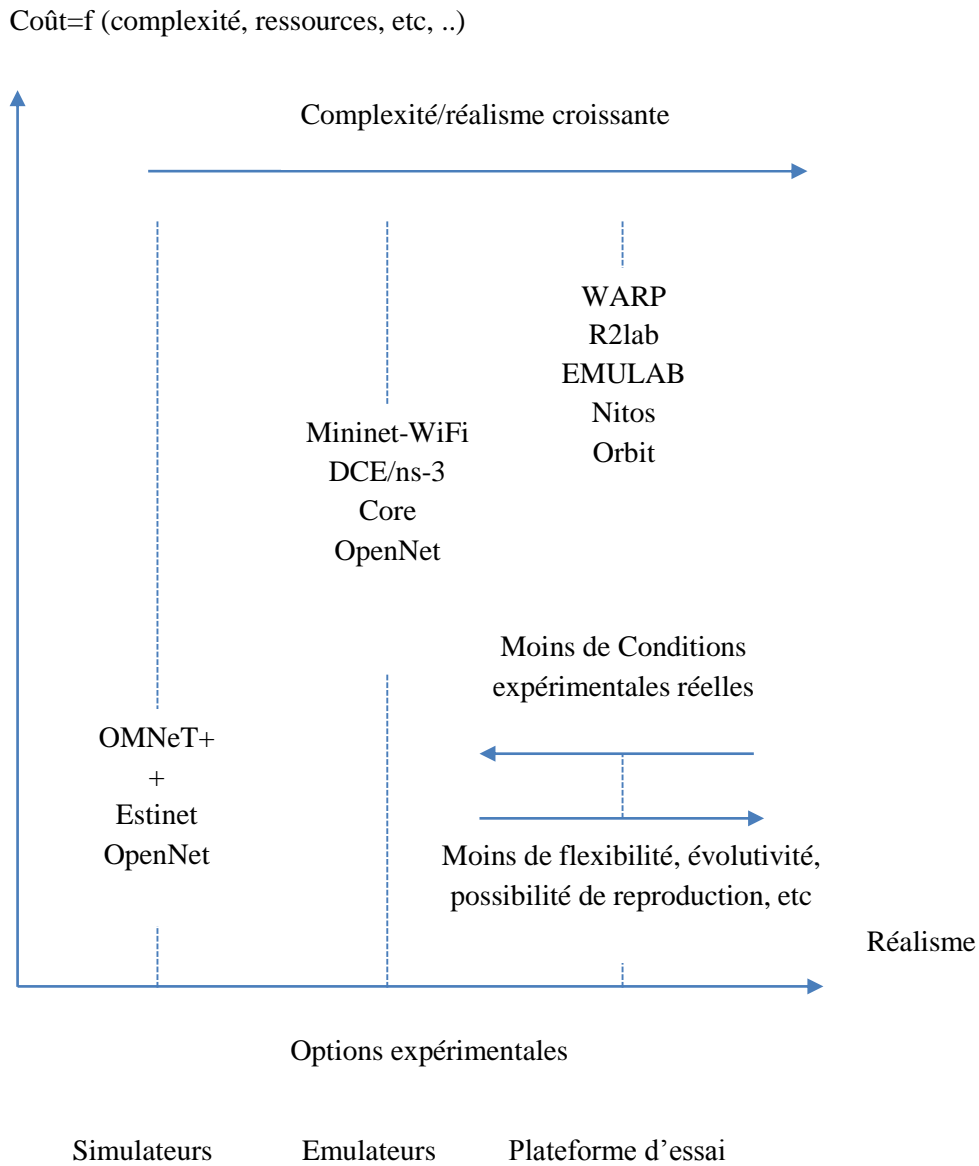
En outre, Mininet offre la possibilité de contrôler le trafic réseau à l'aide de scénarios de test personnalisés, ce qui permet d'optimiser la performance des réseaux.

Il est également compatible avec des outils tels que Open vSwitch et OpenDaylight, ce qui permet d'ajouter des fonctionnalités supplémentaires aux simulations de réseau.

Cependant, Mininet ne prend pas en charge directement la simulation de réseaux véhiculaires (VANETs). Mininet-WiFi [119] est une extension de Mininet qui permet de simuler des réseaux sans fil en utilisant des points d'accès Wi-Fi virtuels et des stations Wi-Fi virtuelles.

Mininet-WiFi supporte divers types de protocoles sans fil, incluant les protocoles de routage sans fil tels que AODV et OLSR.

Les utilisateurs peuvent également évaluer la performance des protocoles sans fil dans des environnements sans fil réalistes.



**Figure III.8 :** Degré de réalisme et complexité des simulateurs/émulateurs VANET [119].

### III.4 Simulateurs supportant les nouvelles technologies

En se basant sur les travaux les plus cités et ceux qui proposent de nouveaux simulateurs ou nouvelles fonctionnalités on présente quelques simulateurs encore en compétition pour offrir une expérience plus réaliste et extensible vers les nouvelles technologies SDN, 5G, Véhicule autonome, etc. le tableau comparatif suivant résume l'évolution des simulateurs au cours de ces dernières années.

Simulateurs/Émulateurs Framework	Type	Système d'exploitation	Dernière mise à jour	Technologies supportées	Atouts
Veins	Framework libre basé sur OMNET++ et SUMO	Linux, Windows, MAC	Avril 2022	SDN, Véhicule autonome, Edge computing, 5G	Modélisation des Interférences/Atténuations
ezCar2X	Framework libre basé sur NS3 et SUMO	Linux, Windows	Avril 2022	Véhicule autonome, Edge computing	Systèmes coopératifs d'aide à la conduite
Ventos	Simulateur libre basé sur OMNET++ et SUMO	Linux, Windows, MAC	2019	Vehicule autonome, Edge computing, 5G	Plusieurs modules préconstruits comme le convoi de véhicules
NetSim	Simulateur et Émulateur commercial qui utilise SUMO pour modéliser la mobilité	Windows	2023	SDN, 5G	Possibilité de connecter des équipements réels pour des expériences réalistes.

**Tableau III.1 :** Simulateurs/Émulateur et Framework supportant les nouvelles technologies.

### **III.5. Conclusion**

Au cours de ce chapitre, nous avons abordé les différents modèles de mobilité dans les réseaux VANETs. Une attention particulière a été portée sur plusieurs simulateurs de réseaux utilisés dans les VANETs, en détaillant leurs avantages et leurs inconvénients.

La simulation de réseaux sans fil est une tâche complexe qui nécessite un travail continu et cohérent.

Dans le prochain chapitre, nous décrirons les approches que nous avons proposées pour construire un système coopératif dans les réseaux VANETs.

## Chapitre IV

# Systeme coopératif basé sur SDN

### IV.1 Introduction

Le routage dans les réseaux véhiculaires (VANETs) est un aspect essentiel pour assurer une communication efficace et fiable. Étant donné la nature dynamique et hautement mobile des VANETs, il est impératif que les protocoles de routage affrontent des défis uniques.

Dans ce chapitre, nous allons nous focaliser sur les détails liés à nos contributions dans les réseaux VANETs. Nous commençons par présenter des descriptions sur l'amélioration des performances du protocole AODV en utilisant la technologie SDN. Puis, nous illustrons notre solution au problème de passage à l'échelle grâce à l'architecture SDVN (*Software Defined Vehicular Networking*) que nous proposons en s'appuyant sur une carte réelle de la ville d'Annaba.

### IV.2 Amélioration des performances du protocole AODV en utilisant SDN

Dans les réseaux VANETs, plusieurs stratégies de routage ont été développées pour répondre aux besoins spécifiques de ces réseaux.

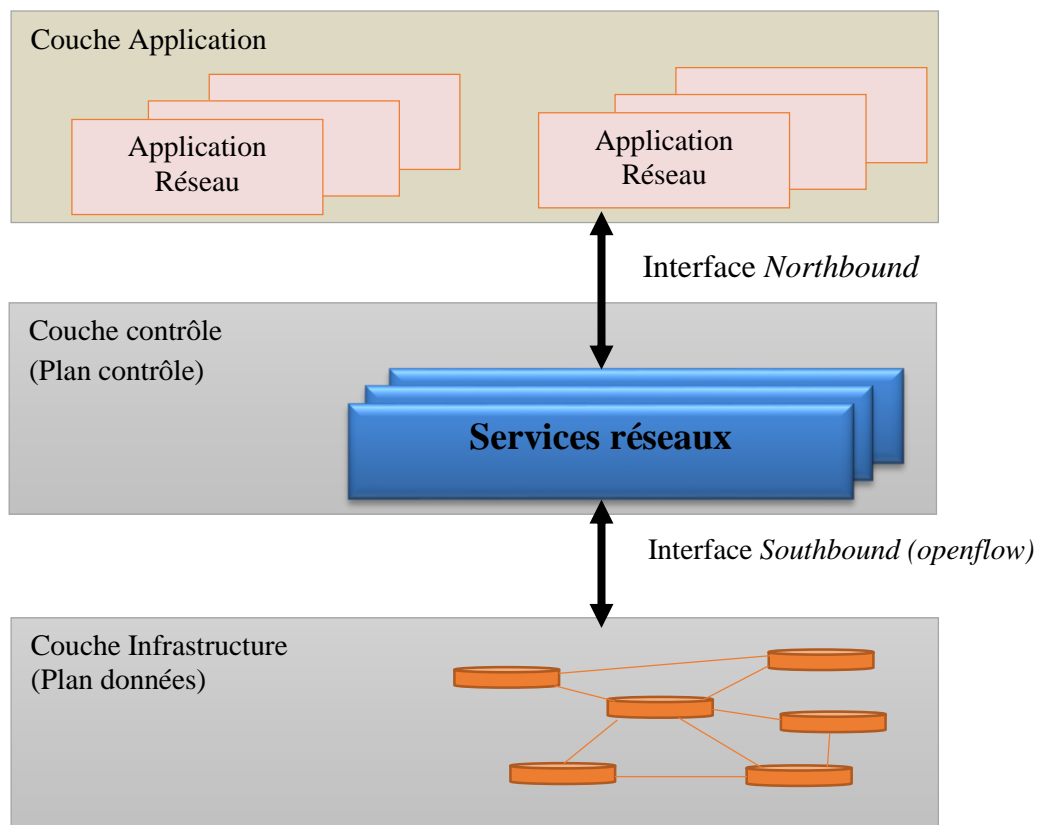
Le protocole AODV est le protocole le plus populaire de sa catégorie [120]. Il est très important dans les VANETs en raison de sa réactivité, de son efficacité énergétique, de son adaptation à la mobilité et de son support pour la communication unicast et multicast.

Il contribue à assurer une connectivité fiable et efficace entre les véhicules dans les réseaux véhiculaires, favorisant ainsi le développement d'applications et de services avancés pour les véhicules connectés.

Cependant, dans les réseaux VANETs, les véhicules sont en mouvement constant, ce qui peut poser des problèmes d'évolutivité au protocole AODV.

SDN (*Software-defined networking*) [121] représente une technologie de réseau programmable qui autorise les applications à interagir directement avec les réseaux de manière bidirectionnelle. L'idée fondamentale sous-tendant cette technologie est de présenter une architecture réseau novatrice, principalement axée sur la distinction physique entre le plan de contrôle et le plan de données. Les contrôleurs bénéficient d'une perspective complète sur l'état du réseau.

Les réseaux SDN promettent d'apporter une souplesse, une vue globale, une évolutivité et une programmabilité aux architectures des réseaux VANETs. Ils simplifient aussi la gestion du réseau et mettent en place de nouveaux services [122]. La figure suivante illustre l'architecture de cette technologie.



**Figure IV.1:** L'architecture SDN/Open Flow.

#### IV.2.1 Principe générale de la technologie SDN

SDN repose sur une architecture à trois niveaux :

- **Couche plan de données** : elle représente tous les équipements de diffusion du réseau, qui ne font qu'envoyer et recevoir des données avec un minimum d'intelligence.
- **Couche plan de contrôle** : cette couche représente les contrôleurs SDN qui centralisent l'intelligence du réseau et gèrent les autres dispositifs de diffusion du plan de données.
- **Couche d'application** : Tous les services et applications des systèmes installés sur le contrôleur SDN sont regroupés dans cette couche.

Pour permettre la communication entre ces trois couches, la technologie SDN établit de nombreuses interfaces de protocoles de communication unifiées :

- **Interface Northbound** : Elle permet la communication et l'échange de données entre le contrôleur SDN au niveau du plan de contrôle et les applications du réseau.
- **Interface Southbound**: Il s'agit des diverses applications qui facilitent la communication entre le plan de contrôle et les dispositifs du plan de données.

*OpenFlow* [123] constitue la norme prédominante pour cette interface. Il s'agit d'une norme de communication pour le SDN qui établit deux catégories d'appareils réseau :

- **Les contrôleurs OpenFlow** : Ce logiciel centralise toutes les opérations de contrôle du réseau.
- **Les vSwitchs OpenFlow** : Ces commutateurs virtuels sont responsables de l'exécution des opérations de transfert des paquets de données.

#### IV.2.2 La technologie SDN dans les réseaux VANETs

SDN se révèle particulièrement bien adaptée aux réseaux VANETs en raison de leur nature extrêmement dynamique, où chaque nœud assume la fonction d'un routeur [124]. Ainsi, la charge de calcul associée au contrôleur est largement déchargée des nœuds routeurs. C'est donc au contrôleur qu'incombe le rafraîchissement de la table de routage.

SDVN (*Software Defined Vehicular Network*) est une technologie prometteuse pour gérer la configuration du réseau [125]. La figure suivante illustre l'architecture de cette technologie dans les réseaux VANETs.

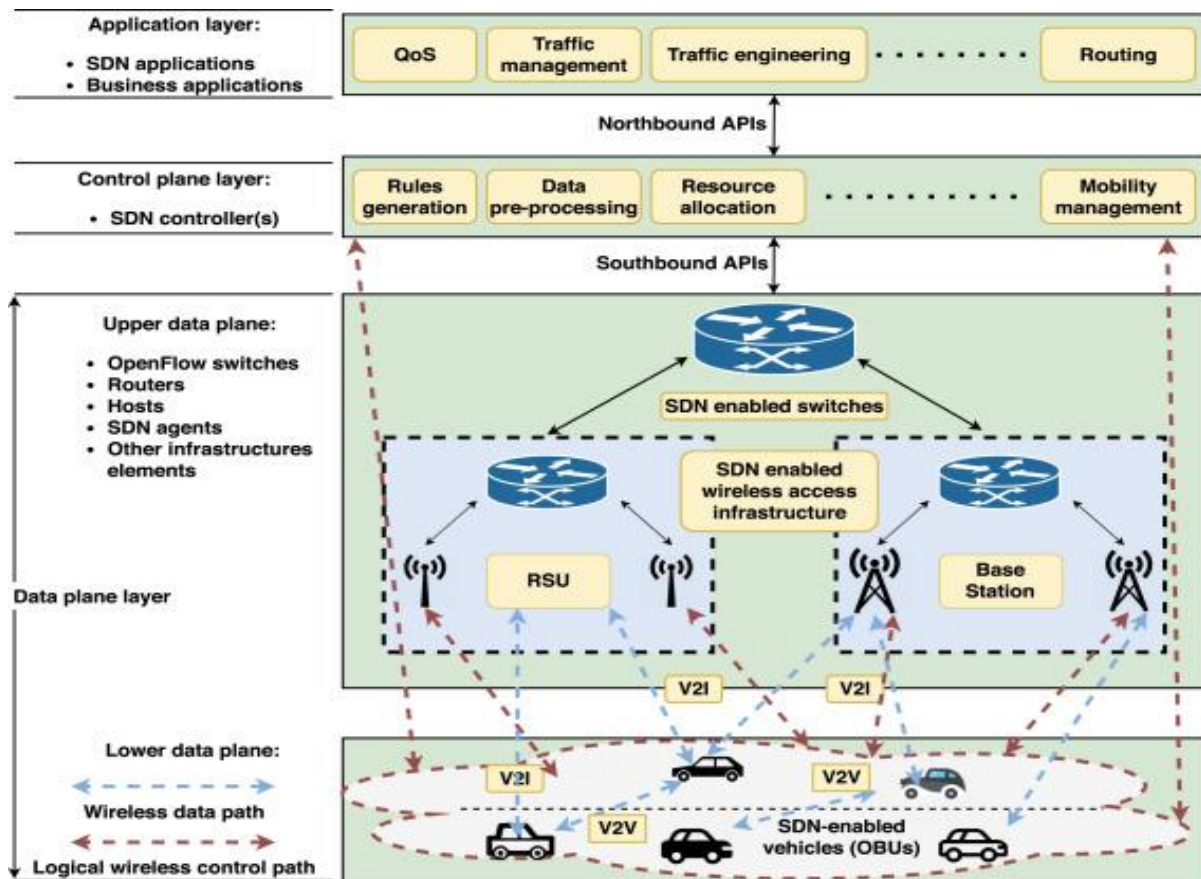


Figure IV.2: L'architecture SDVN [126].

L'utilisation du paradigme SDN dans les réseaux VANET peut permettre une gestion plus efficace du réseau et des ressources. Nous citerons dans ce qui va suivre quelques avantages que porte l'utilisation de cette approche dans les réseaux VANETs:

- **Vue globale :** Avec SDN, le contrôle du réseau peut être centralisé, ce qui facilite la gestion du trafic. Un contrôleur SDN peut prendre des décisions globales pour optimiser les performances du réseau VANET. Dans cette architecture, on a une vue globale sur les réseaux VANET ce qui permet la surveillance et l'analyse du réseau.
- **Flexibilité :** SDN permet de programmer et de reconfigurer facilement les commutateurs réseau. Dans le contexte des VANET, cela peut être utile pour adapter rapidement le réseau aux changements de topologie.

- **Gestion dynamique des ressources et évolutivité** : Avec SDN, il est possible d'allouer dynamiquement les ressources réseau en fonction des besoins changeants des véhicules connectés. Par exemple, dans une situation de trafic dense, le contrôleur SDN peut attribuer davantage de bande passante aux véhicules qui en ont le plus besoin. On peut également créer des réseaux virtuels isolés pour différents services.
- **Sécurité renforcée** : SDN facilite la mise en place de politiques de sécurité centralisées dans les VANET.
- **Intégration avec d'autres technologies** : SDN peut être intégrée à d'autres technologies émergentes [127] telles que *l'Edge Computing* [128] et l'Internet des objets (IoT) [129].

L'application de SDN dans les réseaux VANET doit relever des défis, tels que la latence du contrôleur SDN et la fiabilité des communications sans fil [130]. Néanmoins, en dépit de ces obstacles, l'intégration du SDN dans les réseaux VANETs présente des opportunités prometteuses pour améliorer les performances, la flexibilité et la sécurité de ces réseaux.

#### IV.2.3 Méthode adoptée

L'élaboration du modèle de mobilité constitue une étape cruciale dans le processus de simulation du réseau VANET.

Dans cette section, nous expliquerons notre simulation d'un scénario réaliste en combinant plusieurs simulateurs spécifiques. Notre application vise à améliorer les performances du protocole de routage AODV en tirant parti de la technologie SDN.

Dans notre cas, nous avons effectué de nombreux tests sur le protocole de routage AODV en recourant à deux logiciels de simulation différents, à savoir NS3 pour la modélisation du réseau et SUMO [131] pour la simulation du trafic routier.

- **Configuration de la simulation**

Les paramètres de notre simulation sont répertoriés dans le tableau suivant :

<b>Paramètre</b>	<b>Valeur</b>
<b>Type de canal</b>	Sans fil
<b>Type d'interface réseau</b>	Sans fil physique
<b>Protocole de routage</b>	AODV
<b>Temps de simulation</b>	100 secondes
<b>Nombre de nœuds</b>	9 , 30 et 50
<b>Direction des véhicules</b>	Double voies
<b>Modèle de propagation radio</b>	<i>Two Ray Ground</i>
<b>Protocole MAC</b>	IEEE 802.11

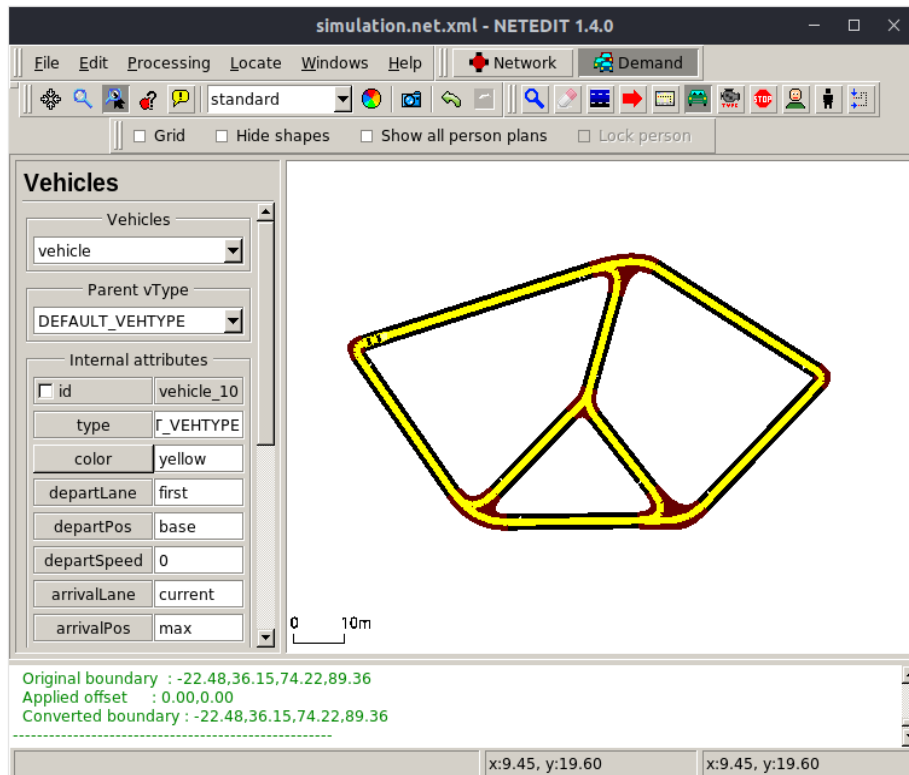
**Tableau IV.1:** Paramètres de simulation.

- **Génération de cartes**

Un modèle de mobilité et de trafic a été généré en utilisant le simulateur SUMO, qui a été choisi pour imiter et simuler une carte réelle. NS3 a été employé pour la modélisation du réseau.

Le scénario de simulation a été mis en place dans un quartier urbain. Une carte a été créée en utilisant NetEdit [132] sous SUMO, comprenant 4 intersections et 8 sections de route, chacune avec deux voies. Cette configuration permet de représenter de manière réaliste le réseau routier du scénario simulé.

La figure ci-dessous illustre la conception de notre carte à l'aide de NetEdit sous SUMO, où les différentes intersections, sections de route et voies sont définies.



**Figure IV.3:** La conception de notre scénario avec NetEdit.

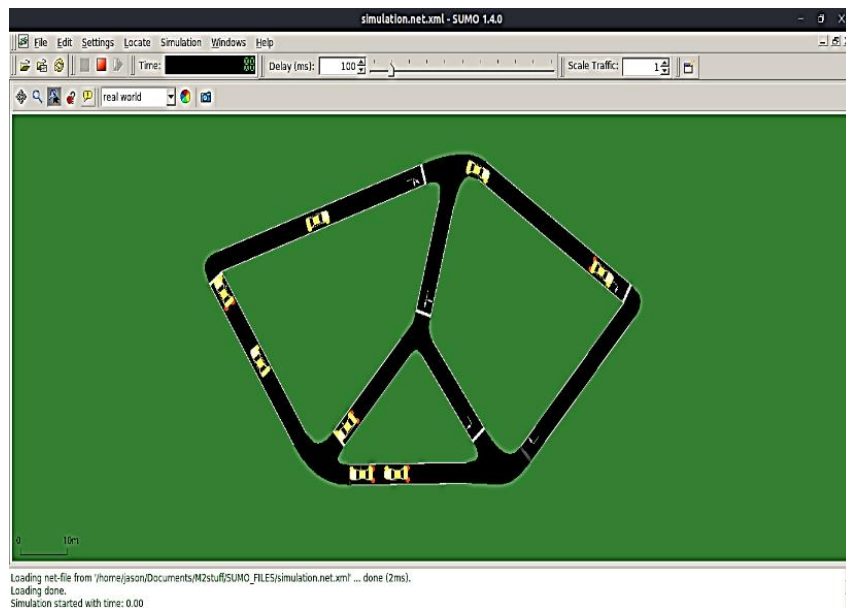
Cette approche permet de modéliser et de simuler efficacement les caractéristiques du réseau routier dans le quartier urbain choisi, en utilisant des outils spécialisés tels que SUMO et NS3 pour garantir une simulation précise et réaliste.

- **Simulation du modèle de trafic**

Pour mener à bien cette étape, nous avons fait usage des outils SUMO et NS3. Grâce à SUMO, nous avons pu générer les véhicules et définir les flux de trafic correspondants sur la carte. Cela nous a permis de reproduire de manière réaliste les conditions de circulation dans le scénario simulé.

NS3, de son côté, a été utilisé pour effectuer la simulation du réseau et évaluer les performances.

La figure ci-dessous illustre une partie de notre carte, où des véhicules sont présents pour représenter le trafic simulé.



**Figure IV.4:** Visualisation de la carte à l'aide de SUMO.

- **Simulation du réseau**

Pour configurer les paramètres de notre réseau, nous avons fait usage du simulateur NS3. Grâce à NS3, nous avons pu définir le protocole de routage, le modèle de propagation et intégrer la technologie SDN/OpenFlow.

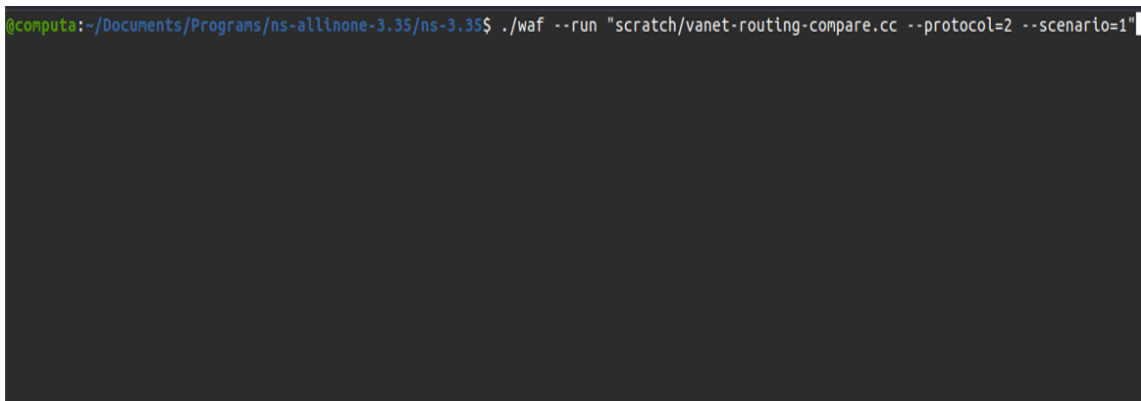
Grâce à NS3, nous avons pu spécifier le protocole de routage adapté à notre scénario, en occurrence AODV.

Par ailleurs, la modélisation de la propagation des ondes radio a été réalisée pour évaluer la connectivité dans le réseau.

Une autre fonctionnalité importante de NS3 est la prise en charge de la technologie SDN /OpenFlow, qui permet une gestion plus flexible du réseau en centralisant le contrôle et en offrant une programmabilité accrue.

En utilisant NS3, nous avons pu évaluer les performances de notre système en calculant diverses mesures. Ces mesures de performances seront présentées dans le chapitre suivant, ce qui nous permettra de mieux comprendre le fonctionnement du réseau et d'optimiser ses performances.

En résumé, NS3 nous a permis de configurer efficacement les paramètres de notre réseau ainsi que l'intégration de la technologie SDN/OpenFlow.

A terminal window screenshot showing a Linux command. The prompt is 'gcomputa:~/Documents/Programs/ns-allinone-3.35/ns-3.35\$'. The command entered is './waf --run "scratch/vanet-routing-compare.cc --protocol=2 --scenario=1"'. The terminal background is dark, and the text is light green and white.

**Figure IV.5:** Commande NS3 3.35 sous Linux.

### IV.3 Passage à l'échelle grâce à l'architecture SDVN

L'incorporation de la technologie SDN dans l'architecture d'un réseau VANET offre des opportunités prometteuses pour améliorer la connectivité et la gestion du trafic dans les environnements de communication véhiculaire.

En utilisant SDN, il devient possible de centraliser le contrôle du réseau VANET, permettant ainsi une programmabilité et une flexibilité accrue. En utilisant des commutateurs compatibles avec *OpenFlow* installés dans les véhicules, le contrôleur SDN peut prendre des décisions efficaces [133].

Ainsi, la couche contrôle peut décider de façon intelligente comment configurer la couche infrastructure pour qu'elle soit optimale et plus efficace.

L'intégration de SDN dans les VANETs offre une gestion plus intelligente et efficace du réseau, favorisant ainsi la connectivité et la sécurité des véhicules dans un environnement en constante évolution.

Dans la suite de ce chapitre, nous allons présenter notre proposition d'architecture qui repose sur l'intégration de la technologie SDN dans un réseau VANET.

Notre objectif est de mettre en évidence les différentes étapes établies pour une intégration efficace de cette technologie, ce qui permettra d'améliorer les performances du réseau de manière significative.

### **IV.3.1 Système proposé**

Dans la figure IV.6, on peut observer les différentes phases de notre système proposé. Contrairement à l'approche précédente qui se concentrait sur la modification du protocole de routage, notre approche vise à transformer l'architecture traditionnelle des réseaux VANET.

Nous avons effectué des tests après intégration la technologie SDN afin d'évaluer son impact sur notre réseau. Pour ce faire, nous avons commencé par importer une carte réelle sur laquelle nous avons configuré les paramètres de simulation et les véhicules.

Ensuite, nous avons procédé à la simulation du réseau en utilisant deux scénarios différents: un réseau dépourvu de la technologie SDN comparé à un réseau intégrant la technologie SDN.

### **IV.3.2 Extraction d'une carte réelle par *OpenStreetMap***

OpenStreetMap [134] est une carte en ligne gratuite et collaborative qui permet à l'utilisateur de contribuer et d'éditer des données géographiques.

Les données sont sous licence libre et peuvent être utilisées pour des projets personnels ou commerciaux.

La création d'une carte pour VANETs sur *OpenStreetMap* offre une opportunité de visualiser et de modéliser les infrastructures routières spécifiques aux VANETs [135].

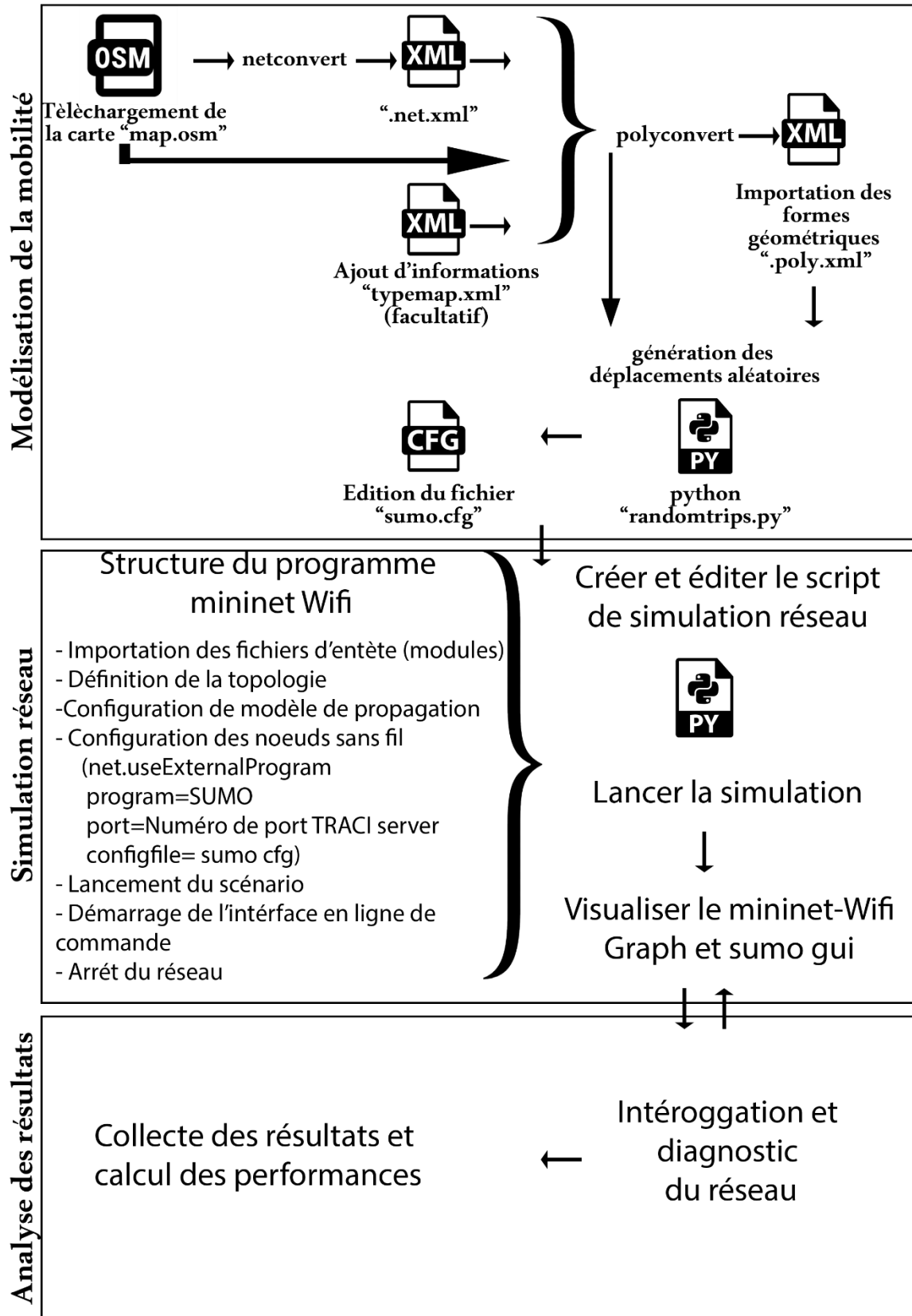


Figure IV.6: Processus de simulation des scénarios.

Les utilisateurs peuvent intégrer des voies, des carrefours et d'autres éléments significatifs en utilisant les outils et les fonctionnalités de *OpenStreetMap*.

En balisant ces éléments avec des tags spécifiques aux VANETs, les contributeurs peuvent enrichir la carte avec des informations contextuelles précieuses.

Créer des cartes VANETs sur *OpenStreetMap* encourage la contribution pour construire une base de données géographiques fiable, cruciale pour l'évolution des VANETs et des véhicules autonomes.

Nous avons eu recours à une carte réelle de notre ville, Annaba, en choisissant une route urbaine très fréquentée : la rue Bouzerad Hocine.

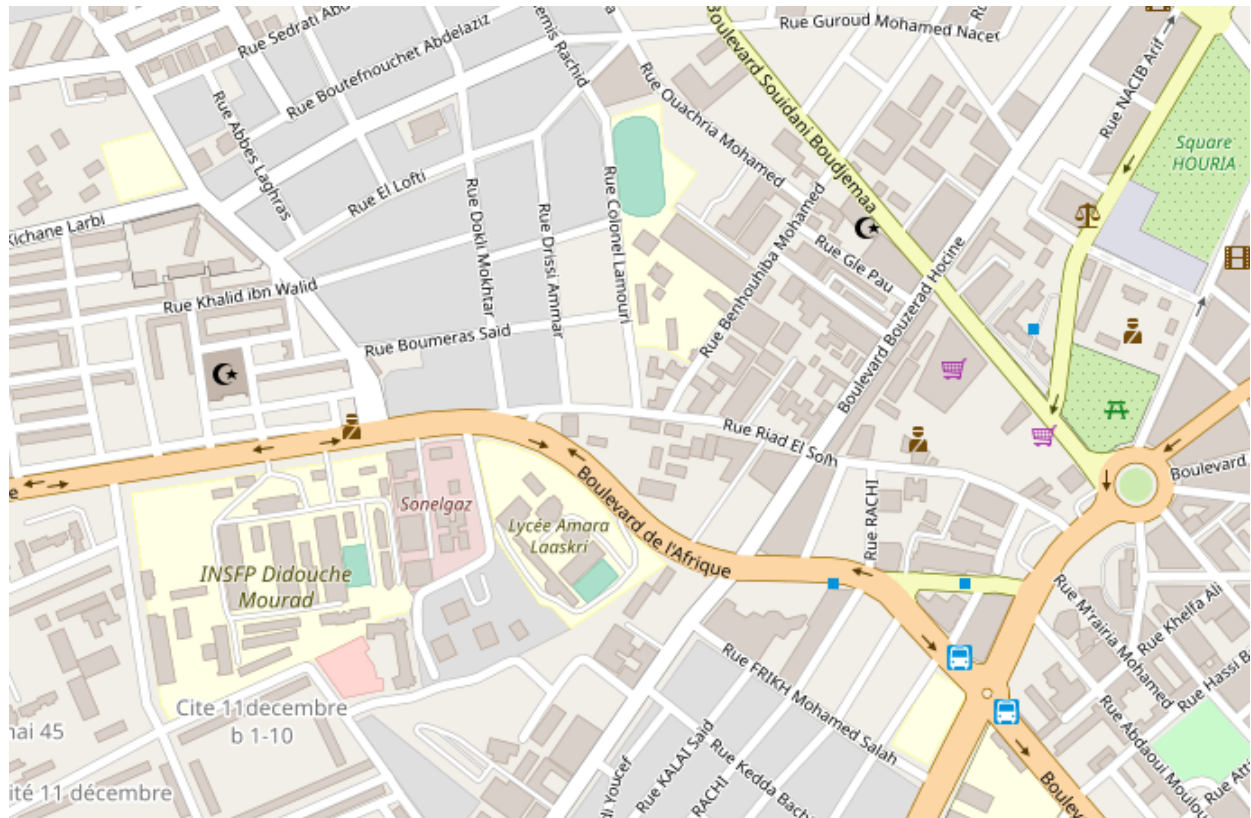
Notre choix s'est basé sur la présence de plusieurs caractéristiques routières telles que les feux de signalisations, des intersections, des déviations et une autoroute.

La figure IV.7 démontre la carte que nous avons exportée depuis *OpenStreetMap*. Cette carte illustre le tronçon de la route dans laquelle notre scénario est réalisé.

### **IV.3.3 Préparation de la carte en vue de son utilisation dans SUMO**

Le passage de données *OpenStreetMap* (OSM) à SUMO nécessite une étape de conversion pour que SUMO puisse lire et utiliser les informations de la carte.

Voici une description des étapes typiques pour convertir les données OSM au format exécutable par SUMO :



**Figure IV.7 :** Exportation de la carte réelle en utilisant *OpenStreetMap* (.osm) .

- **Prétraitement des données OSM :** Les données OSM peuvent être volumineuses et contenir des informations non pertinentes pour SUMO. Il est donc souvent nécessaire de prétraiter les données avant la conversion.
- **Conversion vers le format SUMO :** Une fois les données OSM prétraitées, nous pouvons les convertir dans le format SUMO. SUMO prend en charge le format de fichier *Network Description* (NET) pour la représentation du réseau routier. Il existe plusieurs outils disponibles pour effectuer cette conversion. Nous avons utilisé l'outil "**netconvert**" inclus dans la suite SUMO. Cet outil permet de traduire les informations de la carte OSM en une représentation compatible avec SUMO.
- **Définition des attributs du réseau :** Après la conversion, nous allons définir les attributs du réseau routier dans SUMO. Ces attributs déterminent les caractéristiques du réseau routier dans SUMO, le type de la carte ainsi que l'importation des formes géographiques.

- **Validation et vérification** : Comme pour toute conversion de données, il est essentiel de valider et de vérifier le résultat final. A ce stade, on doit effectuer des simulations de trafic dans SUMO pour assurer que la carte convertie fonctionne correctement. Pour cela, il faut exécuter le fichier (.sumocfg) dans l'interface graphique sumo.

#### IV.3.4. Génération du flux de trafic avec SUMO

Nous avons pu générer des véhicules et définir les flux avec SUMO. Cette approche a permis de reproduire les conditions de circulation dans le scénario simulé de manière réaliste. SUMO nous a fourni une représentation précise et détaillée du trafic urbain.

Nous avons pu simuler diverses situations de circulation, en ajustant les paramètres SUMO, y compris la densité du trafic et les règles de priorité.

Ainsi, l'utilisation de SUMO dans notre projet a été cruciale pour créer un environnement de simulation réaliste. Cela nous a permis de mieux comprendre le comportement du trafic et les effets potentiels de diverses interventions ou scénarios futurs. La figure suivante présente la carte que nous avons construite en utilisant SUMO, où des véhicules sont présents pour représenter le trafic simulé.



**Figure IV.8:** Génération du flux de trafic dans la carte avec SUMO.

### IV.3.5 Simulation du réseau avec MiniNet wifi

Mininet-WiFi facilite la mise en place de scénarios de simulation authentiques en reproduisant des nœuds mobiles qui incarnent les véhicules, des points d'accès sans fil et des contrôleurs réseau.

L'exploitation de Mininet-WiFi dans le cadre des réseaux VANETs à plusieurs avantages. Tout d'abord, cela permet la reproduction de conditions réseau dynamiques en tenant compte du déplacement des véhicules.

De plus, Mininet-WiFi facilite l'analyse des performances du réseau dans différents scénarios, offrant ainsi aux chercheurs et ingénieurs une meilleure compréhension des défis spécifiques liés aux réseaux VANETs tels que la fiabilité de la communication, la latence et la gestion des ressources.

Dans ce qui va suivre, nous allons illustrer les étapes effectuées lors de la simulation du réseau avec MiniNet wifi.

La figure IV.9 montre les interfaces Mininet-WiFi avec l'interface graphique de SUMO montrant l'émulation du système proposé et l'aperçu de la mobilité en même temps.

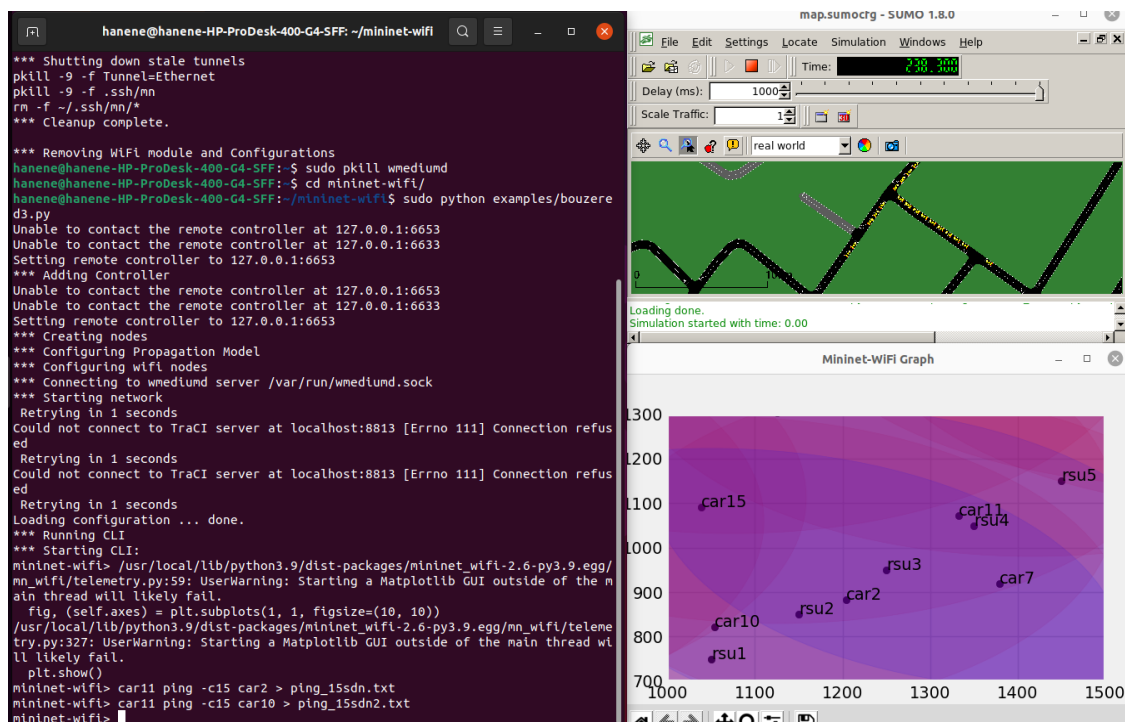


Figure IV.9: émulation du système proposé et aperçu de la mobilité.

#### IV.3.5.1 Création du script de simulation avec python et intégration d'un contrôleur SDN

Pour créer un script de simulation avec Python sous Mininet-WiFi, nous avons suivi les étapes suivantes. Tout d'abord, nous avons installé Mininet-WiFi sur notre système.

Ensuite, nous avons créé un nouveau fichier Python et nous avons importé les modules nécessaires de Mininet, tels que *Mininet*, *Controller*, *OVSKernelSwitch*, *OVSKernelAP*, *CLI* et *setLogLevel*.

Ensuite, pour l'intégration du paradigme SDN dans notre réseau, il est indispensable de mettre en œuvre le protocole openflow qui garantit l'interaction entre la couche de données et la couche de contrôle. Ainsi, l'utilisation d'un contrôleur SDN est primordiale.

Nous avons mené une étude comparative entre les différents types de contrôleurs SDN afin de déterminer celui qui convient le mieux aux besoins de notre scénario. Cette étude est résumée dans le tableau suivant :

	NOX[136]	POX[137]	RYU[138]	FLOODLIGHT[139]	OPENDAYLIGHT[140]
Performances	Rapide	Lent	Lent	Rapide	/
Version OpenFlow supporté	1.0	1.0	1.0,1.1,1.3	1.0	1.3,1.4
Langage de programmation	C++	Python	Python	Java	Java
Plateformes supportés	Linux Windows Mac OS	Linux Windows Mac OS	Linux	Linux Windows Mac OS	Linux
Supporte l'Open stack	Non	Non	Oui	Oui	/

**Tableau IV.2:** Comparaison entre les contrôleurs SDN.

En se référant au tableau ci-dessus, il est possible de conclure que le contrôleur RYU (*Robust Yet Uncomplicated*) est le plus adéquat pour notre système SDN[138]. Le contrôleur RYU est un contrôleur SDN open source qui peut être employé pour contrôler des réseaux VANETs. Ce contrôleur est basé sur le protocole OpenFlow.

Le contrôleur RYU offre un certain nombre de fonctionnalités qui le rendent bien adapté aux VANETs [141], notamment :

- **La programmabilité :** Le contrôleur RYU peut être employé en vue de configurer le fonctionnement du réseau.
- **L'évolutivité :** Le contrôleur RYU est un contrôleur évolutif qui peut être adapté à des réseaux de tailles variables.
- **La sécurité :** Le contrôleur RYU dispose de multiples mécanismes de sécurité qui lui permettent de prévenir les attaques et de protéger le réseau.

Le contrôleur RYU offre ces fonctionnalités, ce qui en fait un choix approprié pour les VANETS. La figure suivante illustre son intégration au script utilisé.

```
# Add a controller
info("*** Adding Controller\n")
ryu_ctrl = net.addController('ryu_ctrl', controller=RyuController)
```

**Figure IV.10:** Ajout du contrôleur Ryu .

Le contrôleur RYU est un outil puissant qui peut être utilisé pour améliorer les VANETS de diverses manières [142]. Le fonctionnement du contrôleur RYU dans les VANETS se déroule de la manière suivante :

- Les véhicules envoient leurs données aux commutateurs de données.
- Les commutateurs de données transmettent les données au contrôleur RYU.
- Le contrôleur RYU analyse les données et prend des décisions sur le routage des données.
- Le contrôleur RYU envoie ses instructions aux commutateurs de données.
- Les commutateurs de données font appel aux instructions du contrôleur RYU pour le routage des données.

La figure suivante illustre les résultats obtenus à l'arrêt de l'émulation et du contrôleur RYU dans Mininet-WiFi pour notre réseau.

```
--- 192.168.0.9 ping statistics ---
15 packets transmitted, 8 received, 46.6667% packet loss, time 14136ms
rtt min/avg/max/mdev = 1.098/2.360/4.926/1.155 ms
mininet-wifi> exit
*** Stopping network
*** Stopping 1 controllers
ryu_ctrl
*** Stopping 50 links
.....
*** Stopping switches/access points
rsu1 rsu2 rsu3 rsu4 rsu5
*** Stopping nodes

*** Connection with SUMO has been closed

*** Removing WiFi module and Configurations
*** Killing mac80211_hwsim

*** Done
```

**Figure IV.11:** Arrêt de l'émulation et du contrôleur RYU dans Mininet-WiFi pour notre réseau.

#### IV.3.5.2 Interrogation du réseau et collecte des résultats de simulation

Une fois les étapes précédentes achevées, nous entamons maintenant la phase d'exploitation et de collecte des résultats. Pour effectuer ces opérations, nous avons utilisé les commandes suivantes sous Mininet-wifi :

- **pingall:** Cette commande est utilisée pour tester la connectivité globale dans le réseau simulé. Elle permet de bien vérifier rapidement si tous les véhicules peuvent se joindre les uns aux autres avec succès.
- **ping :** cette commande est utilisée entre véhicules spécifiques pour évaluer la latence de communication et la fiabilité de la transmission. Cela est particulièrement important dans les VANETs où la communication doit être rapide et fiable.
- **netstat:** cette commande est utilisée pour examiner l'état des connexions V2I. Cela pourrait inclure des informations sur les routes disponibles, les connexions aux points d'accès et d'autres éléments critiques pour la connectivité dans le réseau VANET.

En combinant ces commandes, nous avons pu obtenir des informations détaillées sur la connectivité, les performances et le trafic au sein de notre réseau.

### IV.3.5.3 Calcul des performances du réseau

L'évaluation des performances d'un réseau VANET implique le calcul de plusieurs métriques qui sont cruciales pour déterminer la qualité des communications V2I/V2V.

Les tests dans des scénarios réalistes sont souvent nécessaires pour obtenir une vue globale sur la qualité de service du réseau. Dans notre cas, nous avons évalué notre réseau selon les paramètres suivant :

- **Throughput**

Le *throughput* représente la quantité de données qui peut être transmise avec succès à travers le réseau par unité de temps. Le *throughput* est un indicateur indispensable pour évaluer les performances du réseau, particulièrement dans le contexte des réseaux VANETs. Ce paramètre est calculé selon la formule suivante :

$$\text{Throughput} = \frac{\text{Nombre total de bits transmis}}{\text{Durée totale de transmission}} \quad (\text{Eq. IV.1})$$

Le *throughput* peut être affecté par plusieurs facteurs tels que la densité du trafic, la mobilité des véhicules, les perturbations du canal de transmission, etc. En conséquence, les systèmes de communication dans les VANET ont souvent pour but de maximiser ce paramètre tout en prenant en considération ces différents facteurs pour assurer une communication fiable et efficace.

- **Latence**

La latence est définie comme la durée écoulée entre l'envoi d'un paquet depuis un émetteur jusqu'à sa réception par le destinataire. La latence est exprimée en secondes. Ce paramètre représente la somme des délais suivants :

$$\text{Latence} = \text{délai de transmission} + \text{délai de propagation} + \text{délai de traitement} + \text{délai d'attente} \quad (\text{Eq. IV.2})$$

Le délai de transmission représente le temps nécessaire pour transmettre un paquet sur le support de transmission. Il est donné par :

$$\text{délai de transmission} = \frac{\text{taille du paquet}}{\text{débit du canal}} \quad (\text{Eq. IV.3})$$

Le délai de propagation est le temps que consomme un signal pour se propager du point d'émission au point de réception. Il est donné par :

$$\text{délai de propagation} = \frac{\text{La distance entre les véhicules}}{\text{Vitesse de propagation du signal}} \quad (\text{Eq. IV.4})$$

- **Packet Delivery Ratio (PDR)**

Ce paramètre représente taux de succès de paquets transmis d'un émetteur à un récepteur. Cette mesure est une métrique importante pour évaluer la fiabilité des communications dans un réseau VANET. Il est généralement exprimé comme suit :

$$\text{PDR} = \frac{\text{Nombre de paquet reçus}}{\text{Nombre de paquet émis}} \times 100 \quad (\text{Eq. IV.5})$$

Ce paramètre donne ainsi le ratio des paquets qui ont été transmis avec succès par rapport au nombre total de paquets envoyés. Il est exprimé en pourcentage. Si cette métrique est élevée, cela indique une communication fiable.

## IV.4 Conclusion

Nous avons concentré notre attention sur nos contributions spécifiques apportées aux réseaux VANETs. Nous avons débuté en exposant en détail les améliorations que nous avons apportées aux performances du protocole AODV en intégrant la technologie SDN (*Software Defined Networking*).

Par la suite, nous avons présenté notre solution novatrice pour résoudre le défi du passage à l'échelle, en introduisant l'architecture SDVN (*Software Defined Vehicular Networking*). Cette proposition repose sur une cartographie réelle de la ville d'Annaba, offrant ainsi une approche réaliste et ancrée dans les conditions spécifiques du monde réel.

Notre démarche met en évidence notre volonté de créer des solutions qui sont à la fois robustes et applicables dans des contextes concrets. Le chapitre suivant sera dédié à la présentation et l'analyse de nos résultats expérimentaux obtenus.

# Chapitre V

## Résultats et discussions

### V.1 Introduction

L'évaluation des performances dans les réseaux VANETs revêt une importance cruciale pour assurer un fonctionnement optimal de ces réseaux de communication sans fil dédiés aux véhicules. Étant donné la nature dynamique et hautement mobile des VANETs, il est essentiel de disposer de métriques et de méthodes d'évaluation appropriées pour évaluer leur efficacité.

L'une des principales mesures de performance dans les réseaux VANETs est la latence de communication, qui représente le délai entre l'envoi d'un message par un véhicule et sa réception par les autres véhicules du réseau [143-145].

Les véhicules peuvent se déplacer rapidement et que les conditions du canal sans fil peuvent varier, il est essentiel de prendre en compte la probabilité de réussite de la transmission des messages.

La capacité du réseau est également un aspect clé de l'évaluation des performances dans les VANETs. La capacité fait référence à la quantité maximale des données qui peuvent être transmises avec succès dans le réseau.

Enfin, l'évaluation des performances dans les VANETs peut également inclure des aspects tels que l'efficacité énergétique, l'évolutivité et la sécurité. Le passage à l'échelle est essentiel pour prendre en charge un nombre croissant de véhicules connectés. La sécurité est également une préoccupation majeure, et l'évaluation des performances peut porter sur des aspects tels que la résistance aux attaques.

En résumé, l'évaluation des performances dans les réseaux VANETs est un processus sophistiqué qui requiert la considération de plusieurs aspects clés tels que la latence, la fiabilité, la capacité, l'efficacité énergétique, l'évolutivité et la sécurité [146].

Dans ce chapitre, nous nous consacrerons à exposer et interpréter les résultats issus de nos expérimentations. Initialement, nous détaillerons les performances de notre système suggéré visant à améliorer le protocole AODV grâce à la technologie SDN/OpenFlow. Dans la seconde section de ce chapitre, on s'intéresse à présenter les performances de l'architecture du réseau véhiculaire défini par logiciel (SDVN) proposé.

## V.2 Les performances du protocole AODV en utilisant SDN

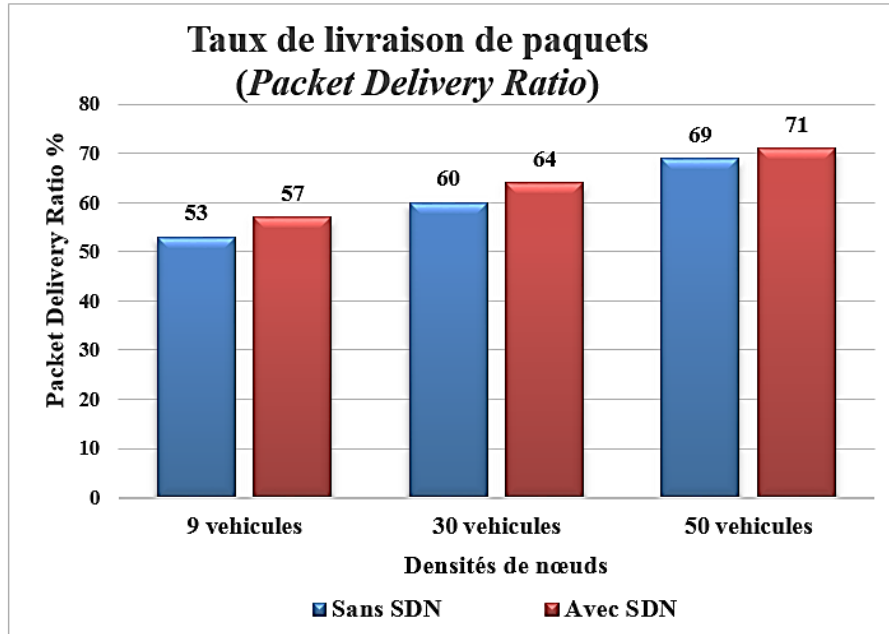
Nous avons réalisé une évaluation des performances d'une version améliorée du protocole de routage AODV, en mettant en évidence notre contribution majeure qui réside dans l'intégration du paradigme SDN dans cette évaluation. Dans des études antérieures, nous avons constaté la dégradation de certaines performances du protocole AODV [147] lors du passage à l'échelle. Nous avons donc proposé d'utiliser le paradigme SDN pour apporter une vue globale et de la programmabilité aux réseaux véhiculaire.

Pour mener à bien notre expérience, nous avons choisi trois densités de nœuds différentes, à savoir 9, 30 et 50 véhicules. Ce choix a été effectué en prenant en considération son influence sur les performances du protocole AODV, à la fois avec et sans l'utilisation de la technologie SDN/OpenFlow. Notre évaluation des performances de la version améliorée du protocole AODV avec l'intégration de l'architecture SDN s'est basée sur des mesures qui ont été soigneusement sélectionnées pour évaluer l'efficacité de notre approche. Afin d'évaluer les performances de manière approfondie, nous avons pris en compte plusieurs paramètres essentiels :

- **Taux de livraison de paquets (*Packet Delivery Ratio*)**

Le taux de livraison de paquets est une mesure qui évalue la fiabilité de la communication dans un réseau. Il représente le pourcentage de paquets envoyés avec succès qui parviennent à destination sans être perdu ou corrompu.

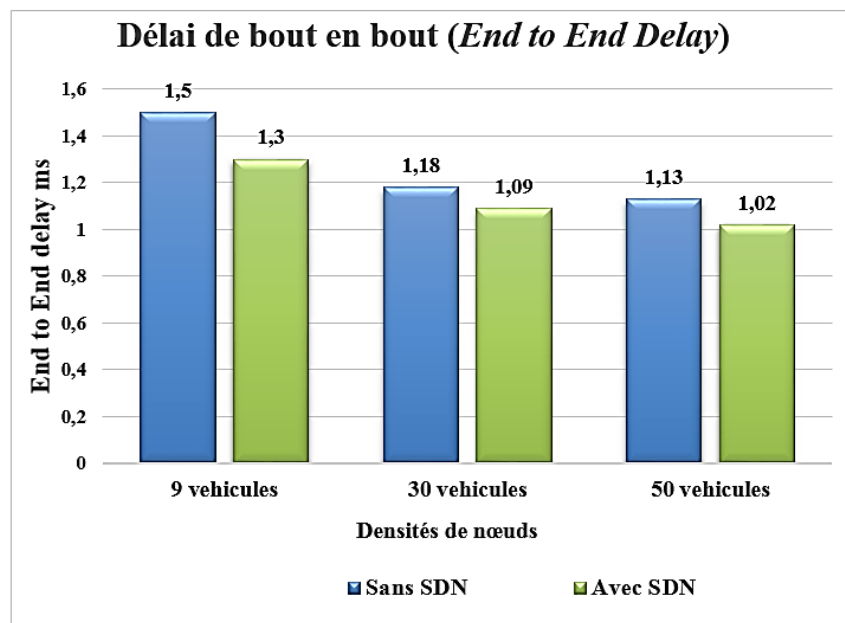
Un taux de livraison de paquets élevé est généralement souhaitable, car il indique une communication plus fiable et une meilleure qualité de service. Dans d'autres cas, des pertes de paquets peuvent être tolérées, notamment dans des environnements avec une congestion élevée ou une connectivité instable. La figure suivante montre nos résultats obtenus en termes de taux de livraison de paquets avec et sans SDN/OpenFlow.



**Figure V.1:** Résultats du taux de livraison de paquets (%).

- **Délai de bout en bout (End to End Delay)**

C'est une mesure qui évalue le temps total écoulé entre l'envoi d'un paquet depuis un point source et sa réception par la destination. C'est une mesure essentielle pour évaluer la performance et la qualité de service d'un réseau ou d'une application. Il représente le temps nécessaire pour qu'une donnée parcoure l'ensemble du réseau, de l'émetteur au récepteur [148]. La figure suivante illustre les résultats obtenus avec ce paramètre pour notre système.



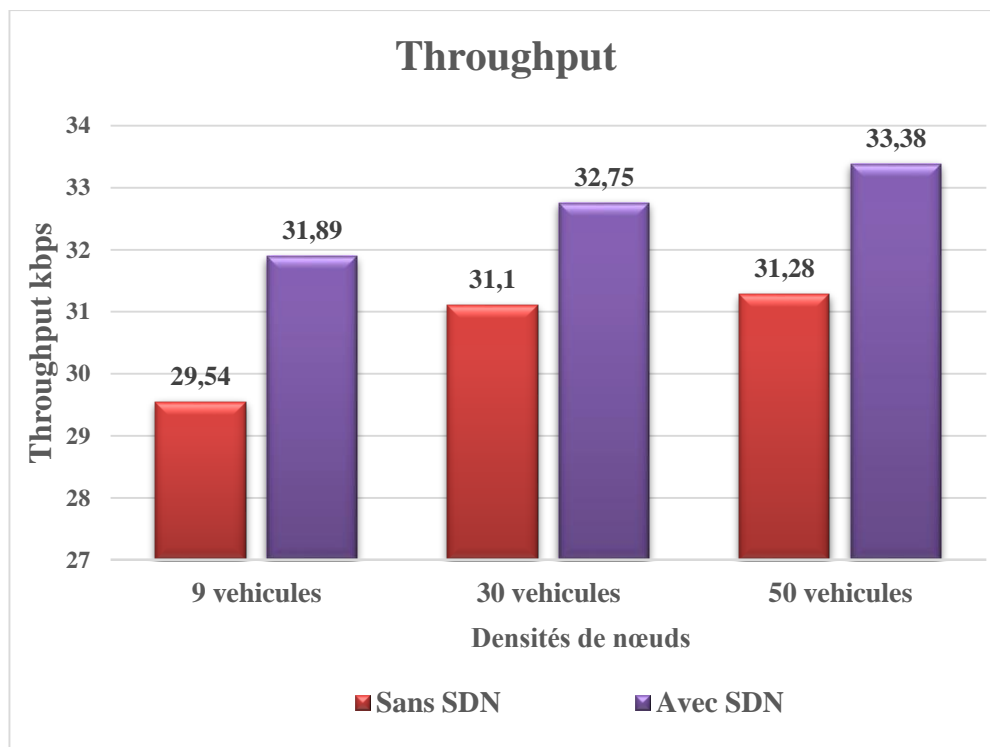
**Figure V.2:** Résultats du délai de bout en bout (ms).

- **Le débit (*Throughput*)**

Le débit (*Throughput*) fait référence à la mesure de la quantité de données qui peuvent être transmises d'un point à un autre sur une connexion réseau pendant une période de temps donnée.

Des tests de débit peuvent être réalisés pour évaluer le *throughput* réel d'une connexion spécifique et vérifier sa conformité par rapport aux attentes [149].

Le *throughput* est un indicateur clé pour évaluer la performance et la capacité d'un réseau de transmission de données. La figure suivante illustre les résultats obtenus avec ce paramètre pour notre système.



**Figure V.3:** Résultats du *Throughput* (kbps).

Sur la base de ces résultats, nous pouvons conclure que l'incorporation de la technologie SDN/*OpenFlow* a entraîné une amélioration significative des performances du protocole de routage AODV dans les réseaux VANETs. L'efficacité de la technologie SDN/*OpenFlow* est davantage observée dans des réseaux VANETs plus saturés, où le nombre de paquets transmis a

plus que doublé par rapport à un réseau non saturé. De plus, le nombre de paquets reçus a augmenté de manière encore plus significative par rapport aux paquets transmis.

Une légère différence a été constatée dans le taux de livraison des paquets (*Packet Delivery Ratio*) entre les deux situations (avec et sans SDN/*OpenFlow*), et cette différence est optimale lorsque le réseau atteint une charge de 50 nœuds. L'incorporation de la technologie SDN/*OpenFlow* a permis d'améliorer le délai de bout en bout du protocole AODV. Cette amélioration s'explique principalement par la capacité de la technologie SDN/*OpenFlow* à offrir une vue globale en temps réel de la topologie du réseau, ainsi qu'un mode de contrôle centralisé, facilitant ainsi l'identification de l'état actuel du trafic et rendant l'allocation des ressources du réseau plus efficace.

Par ailleurs, les paramètres de débit ont également été améliorés grâce à l'utilisation de la technologie SDN/*OpenFlow*. Cette amélioration découle de la flexibilité offerte par SDN/*OpenFlow*, qui permet une réponse plus rapide aux situations d'urgence et aux événements imprévus.

En conclusion, l'intégration de la technologie SDN/*OpenFlow* dans les réseaux VANET a apporté des améliorations significatives aux performances du protocole de routage AODV.

Le taux de livraison des paquets a présenté une légère disparité entre les situations avec et sans SDN/*OpenFlow*, atteignant son niveau optimal lorsque le réseau était chargé avec 50 nœuds. De plus, l'incorporation de la technologie SDN/*OpenFlow* a permis d'améliorer le délai de bout en bout du protocole AODV. Par ailleurs, l'utilisation de SDN/*OpenFlow* a également conduit à une amélioration des paramètres de débit, grâce à la flexibilité offerte par cette technologie.

### **V.3. Amélioration de l'évolutivité grâce au paradigme SDN**

L'intégration du paradigme SDN permet au réseau de répondre plus efficacement aux changements fréquents de topologie, et prendre en charge l'évolutivité rapide du réseau véhiculaire ad hoc.

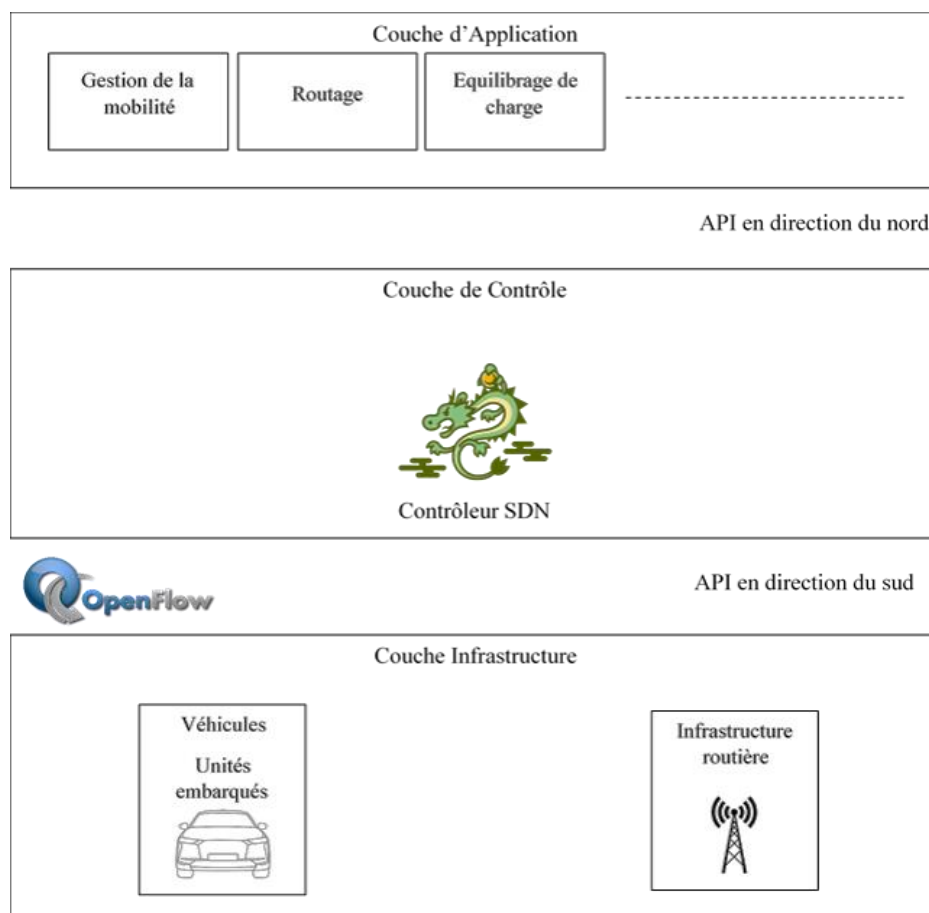
Les décisions de routage sont prises en charge au niveau du contrôleur et communiquées ensuite aux véhicules.

L'expérimentation avec le routage AODV, nous a motivés pour élargir la recherche sur le concept SDN, et profiter de sa programmabilité et vue globale afin d'améliorer l'évolutivité du réseau.

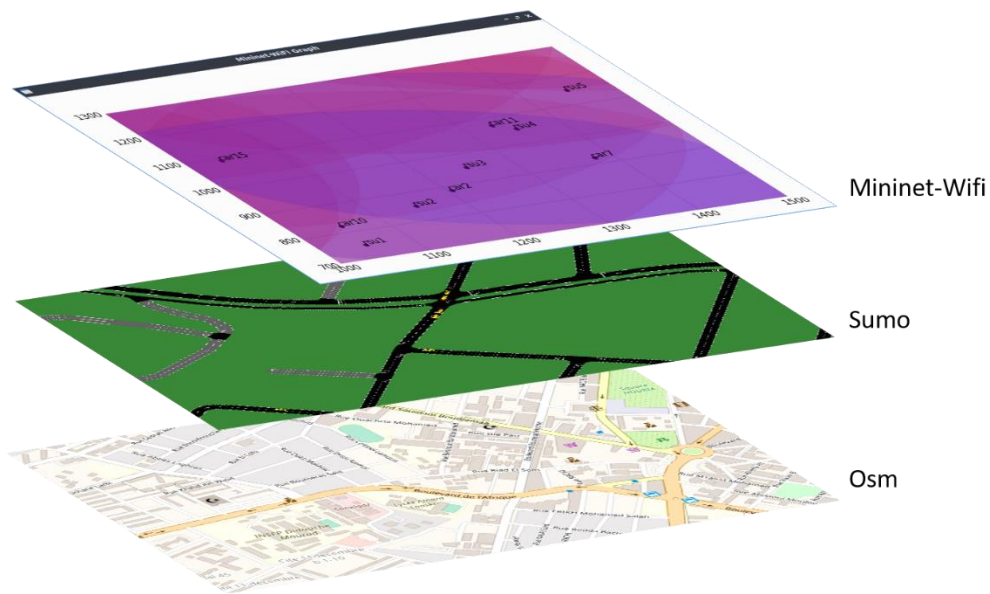
L'idée est de rendre le réseau de communication des véhicules plus flexible, programmable et contrôlable par des logiciels.

Certaines applications potentielles pourraient inclure la gestion dynamique du trafic routier pour les réseaux de transports intelligents ou ITS, la coordination entre les véhicules, la mise en œuvre des services d'urgence basés sur la communication entre les véhicules, etc.

L'architecture du réseau de véhicules défini par logiciel, illustré par la Figure V.4, a été simulé et testé sous l'émulateur dédié SDN Mininet Wifi (Figure V.5), et les résultats ont été schématisés dans ce qui suit. Un bon d'essai ou *testbed* a été conçu spécialement pour effectuer les tests de performance de cette architecture.



**Figure V.4:** Architecture SDVN proposé.

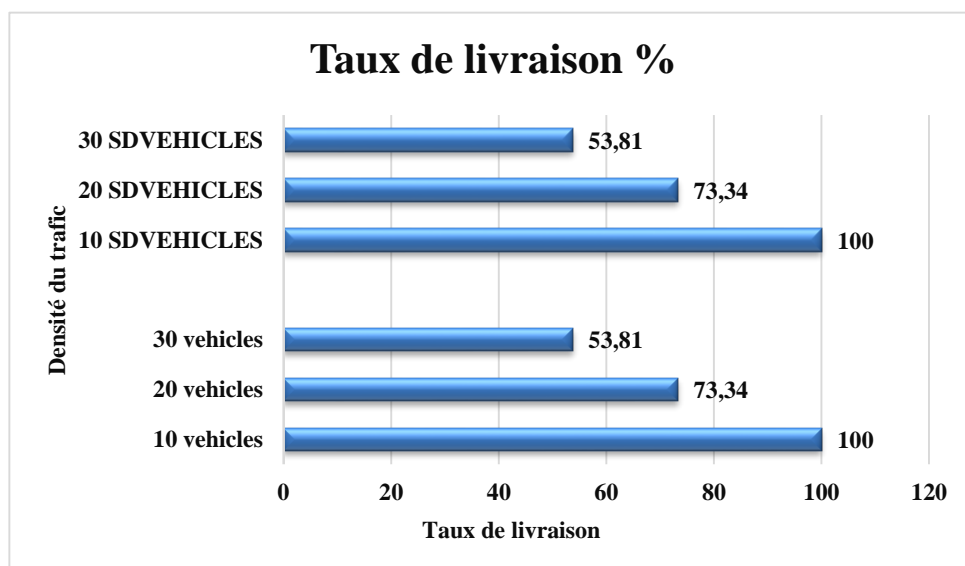


**Figure V.5:** Plateformes d'émulations.

Les résultats montrent les différences entre la qualité de la communication entre les véhicules ad hoc dans une architecture classique et ceux utilisant le réseau véhiculaire défini par logiciel proposé dans chacun des scénarios (10,20,30 véhicules).

- **Taux de livraison de paquets (*Packet Delivery Ratio*)**

La figure suivante illustre les résultats obtenus avec ce paramètre pour notre architecture proposée :



**Figure V.6:** Taux de livraison entre architecture classique et architecture proposé (%).

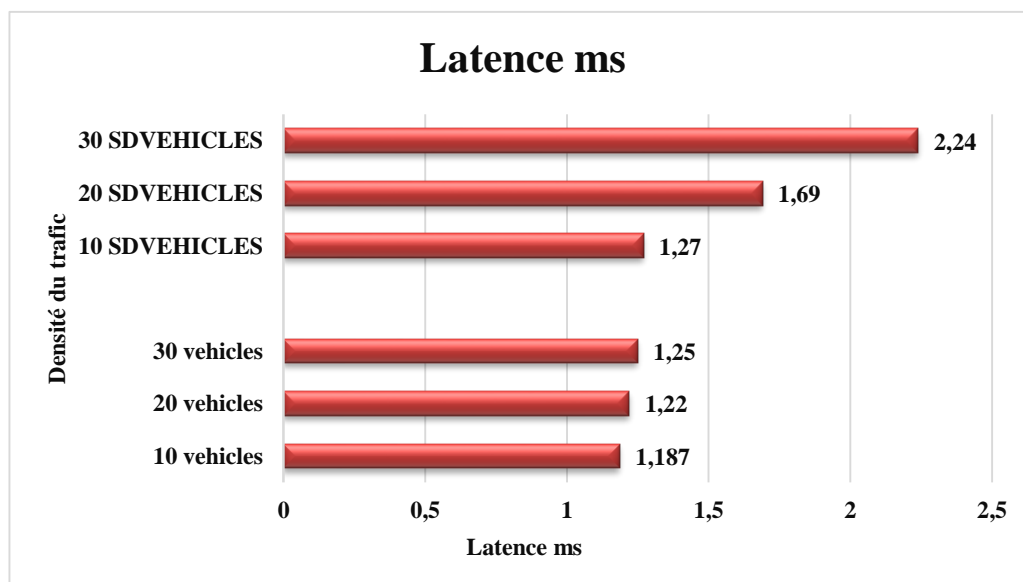
D'après ces résultats obtenus, on a constaté que malgré la nature centralisée de l'architecture proposée, les résultats du taux de livraison de paquets dans le réseau VANET proposé demeurent équivalents à ceux de l'architecture classique. Cette constatation suggère une mise en œuvre efficace de la technologie *Software-Defined Vehicular Networks* (SDVN). La préservation des performances, même avec la centralisation, peut être attribuée à une gestion optimisée des ressources par le contrôleur central.

La centralisation semble s'adapter à la charge du réseau, mettant en place des mécanismes de contrôle pour gérer la congestion et assurer des performances cohérentes. En dépit des préoccupations potentielles liées au principe *overhead* introduit par la centralisation, des techniques appropriées peuvent être employées pour réduire ces impacts négatifs.

Nous avons réussi à intégrer la technologie SDVN de manière judicieuse, démontrant que la centralisation n'a pas affecté le taux de livraison de paquets dans le réseau VANET.

- **Délai de bout en bout (*End to End Delay*)**

C'est le temps total nécessaire pour qu'une donnée soit transmise d'une source à une destination. La figure suivante illustre les résultats obtenus avec ce paramètre pour notre architecture proposée :



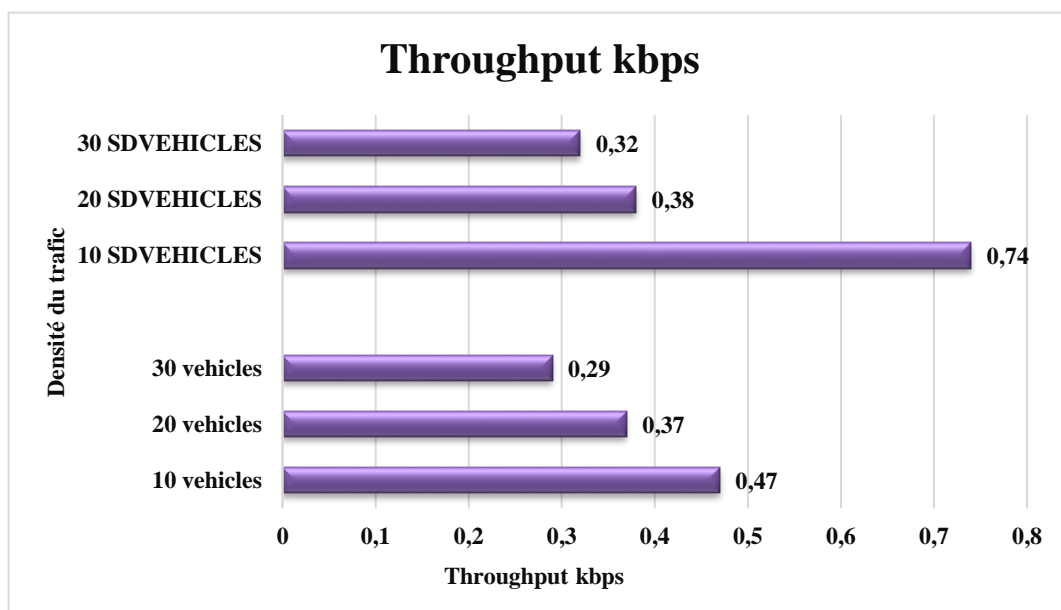
**Figure V.7:** Latence du réseau classique vs réseau définie par logiciel (ms).

Les résultats de latence de notre architecture proposée présentent une perspective intéressante en faveur de l'utilisation de la technologie Software-Defined Vehicular Networks (SDVN) dans le contexte des réseaux VANETs. Sans la technologie SDVN, la latence reste relativement constante, avec des valeurs respectives de 1,18, 1,22 et 1,25 pour 10, 20 et 30 véhicules. Cependant, l'introduction de la technologie SDVN se traduit par une augmentation modérée de la latence, avec des valeurs de 1,27, 1,69 et 2,24 pour les mêmes configurations. Bien que la latence augmente avec l'introduction de la technologie SDVN, cette augmentation peut être justifiée par les avantages significatifs qu'offre cette technologie.

Ces résultats confirment l'efficacité de l'approche proposée parce que ça démontre que la centralisation introduite par SDVN permet une gestion plus intelligente des ressources du réseau, améliorant ainsi la fiabilité de la livraison des paquets.

- **Le débit (*Throughput*)**

C'est la quantité de données transférées avec succès sur le réseau. La figure suivante illustre les résultats obtenus avec ce paramètre pour l'architecture proposée :



**Figure V.8:** Débit entre architecture classique et architecture proposé (kbps).

Les résultats de *Throughput* démontrent clairement les bénéfices significatifs de l'intégration de la technologie Software-Defined Vehicular Networks (SDVN) dans les réseaux

Vehicular Ad Hoc Networks (VANETs). Comparativement à l'absence de SDN, les débits avec les réseaux définis par logiciel sont non seulement plus élevés, mais également plus stables, indiquant une amélioration notable de l'efficacité de la transmission de données.

Pour 10, 20 et 30 véhicules, les débits avec SDN surpassent ceux sans SDN, mettant en évidence la capacité de la technologie SDVN à optimiser la gestion du trafic de données dans des scénarios VANETs diversifiés.

La centralisation offerte par SDVN semble jouer un rôle crucial en améliorant la distribution des paquets, minimisant les pertes et maximisant l'utilisation des ressources du réseau.

Ces résultats soutiennent fermement notre approche proposée basée sur l'adoption de la technologie SDVN pour améliorer significativement le *Throughput* dans les VANETs, renforçant ainsi son rôle dans l'établissement d'une communication efficace et fiable entre les véhicules connectés.

### **V.3 Synthèse des résultats obtenus**

Les résultats globaux obtenus mettent en évidence de manière convergente les avantages de l'adoption de SDVN dans ces environnements.

La technologie SDVN démontre une capacité notable à maintenir des taux de livraison de paquets constants, à réduire la latence, et à améliorer le *Throughput*, même à mesure que le nombre de véhicules augmente. Ces résultats suggèrent que la centralisation introduite par SDVN contribue efficacement à la gestion intelligente des ressources du réseau, minimisant les goulots d'étranglement et optimisant la transmission des données dans des scénarios VANETs complexes.

Ainsi, l'analyse globale des résultats obtenus favorise l'adoption de la technologie SDVN comme une solution prometteuse pour améliorer la fiabilité, la réactivité et l'efficacité des communications dans les VANETs, soulignant son potentiel pour répondre aux exigences croissantes des applications liées aux véhicules connectés.

### **V.4 Conclusion**

Le paradigme Software-Defined Networking (SDN) présente des avantages significatifs pour les réseaux VANETs. Tout d'abord, l'adoption d'une approche SDN permet la gestion centralisée du réseau VANET à travers un contrôleur SDN. De plus, les conditions dynamiques

des VANETs trouvent une solution dans l'adaptabilité dynamique offerte par SDN. Cette approche permet d'ajuster de manière dynamique les politiques réseau en fonction des changements dans l'environnement routier, favorisant ainsi une meilleure adaptation aux conditions changeantes de la route.

Un autre avantage significatif réside dans la facilitation du développement d'applications. SDN fournit une interface de programmation centralisée, simplifiant ainsi le processus de développement d'applications et de services innovants spécifiques aux VANETs.

En intégrant les principes SDN aux VANETs, il devient possible de créer des réseaux plus efficaces et adaptables, répondant de manière proactive aux défis particuliers posés par les communications entre véhicules et les exigences en constante évolution de l'environnement routier. Il est également à souligner l'importance de planifier l'évolutivité du réseau dès le départ en choisissant une architecture réseau évolutive et en mettant en œuvre des stratégies d'évolutivité pour anticiper la croissance future du réseau. Ainsi, l'application judicieuse de l'architecture SDN dans les VANETs offre une perspective prometteuse pour relever les défis complexes liés à la gestion dynamique des communications entre véhicules.

# Conclusion générale

*En* conclusion, cette thèse s'est fixé pour objectif de concevoir un système de communication pour les réseaux véhiculaires (VANETs) capable de s'ajuster rapidement aux modifications de l'environnement routier, tout en proposant des fonctionnalités avancées. La principale contribution de cette étude réside dans la création d'une architecture offrant une évolutivité permettant l'intégration progressive de nouvelles fonctionnalités et applications afin de répondre aux besoins évolutifs des VANETs.

*L'*intégration de l'architecture SDN aux VANETs a été une étape décisive dans cette démarche, engendrant des améliorations notables en termes d'efficacité opérationnelle et de réactivité du système. Cette association novatrice a permis de repousser les limites des performances des réseaux VANETs, ouvrant la voie à des solutions plus efficaces et adaptatives.

*En* résumé, cette étude a démontré que l'introduction de la technologie SDN dans les réseaux VANETs a considérablement amélioré leurs performances, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives pour le domaine des communications véhiculaires. Les conclusions tirées de ce travail soulignent l'importance de cette avancée et ouvrent la voie à des recherches futures visant à perfectionner encore davantage ces systèmes.

*En* regard des résultats encourageants obtenus dans cette thèse par l'intégration réussie de l'architecture SDN aux VANETs, plusieurs perspectives de recherche émergent pour enrichir davantage ce domaine en constante évolution. Une direction prometteuse consiste à approfondir l'optimisation des protocoles SDN spécifiquement adaptés aux caractéristiques dynamiques des réseaux VANETs, visant ainsi à améliorer la gestion des flux de communication et la réactivité du système.

*P*arallèlement, une attention accrue sur l'équilibrage de charge et la gestion des ressources s'avère cruciale, avec un accent particulier sur le développement de mécanismes

d'optimisation. L'exploration des applications potentielles de l'Internet des objets (IoT) et de l'informatique géo-distribuée constitue une piste prometteuse, ouvrant la voie à des avancées significatives dans la prédiction du trafic, l'optimisation des itinéraires et la prise de décision basée sur l'analyse en temps réel.

*En* parallèle, la définition de normes interopérables et de protocoles favoriserait une adoption plus large de l'architecture SDN, facilitant la collaboration entre acteurs variés. L'évaluation pratique du déploiement de cette architecture dans des environnements réels, en mettant l'accent sur l'évolutivité du système, constitue un autre défi passionnant à relever.

*Enfin*, une réflexion sur l'impact environnemental des VANETs améliorées par l'architecture SDN pourrait ouvrir des perspectives innovantes en termes d'efficacité énergétique et de réduction des émissions, contribuant ainsi à un développement durable de ces réseaux de communication véhiculaires.

# Bibliographie

- [1] Johann Andersen, Steve Sutcliffe, Intelligent Transport Systems (ITS) - An Overview, IFAC Proceedings Volumes, Volume 33, Issue 18, 2000, Pages 99-106, doi.org/10.1016/S1474-6670(17)37129-X.
- [2] A.B. Nkoro ,Y.A. Vershinin, Current and Future Trends in Applications of Intelligent Transport Systems on Cars and Infrastructure, IEEE 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC) October 8-11, 2014. Qingdao, China
- [3] L. Bariah, D. Shehada, E. Salahat and C. Y. Yeun, "Recent Advances in VANET Security: A Survey," 2015 IEEE 82nd Vehicular Technology Conference (VTC2015-Fall), Boston, MA, 2015, pp. 1-7, doi: 10.1109/VTCFall.2015.7391111.
- [4] An, Sheng-Hai, Byung-Hyug Lee and Dong Ryeol Shin. "A Survey of Intelligent Transportation Systems." 2011 Third International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks (2011): 332-337.
- [5] S. Chavhan, D. Gupta, B. N. Chandana, A. Khanna, and J. J. P. C. Rodrigues, "IoT-based context-aware intelligent public transport system in a metropolitan area," *IEEE Internet Things J.*, vol. 7, no. 7, pp. 6023–6034, Jul. 2020.
- [6] B. Zhou et al., "Performance limits of visible light-based positioning for Internet-of-vehicles: Time-domain localization cooperation gain," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, early access, Feb. 25, 2020.
- [7] J. Harvey and S. Kumar, "A Survey of Intelligent Transportation Systems Security: Challenges and Solutions," 2020 IEEE 6th Intl Conference on Big Data Security on Cloud (BigDataSecurity), IEEE Intl Conference on High Performance and Smart Computing, (HPSC) and IEEE Intl Conference on Intelligent Data and Security (IDS), Baltimore, MD, USA, 2020, pp. 263-268, doi: 10.1109/BigDataSecurity-HPSC-IDS49724.2020.00055.
- [8] P. Škorput, H. Vojvodić and S. Mandžuka, "Cyber security in cooperative intelligent transportation systems," 2017 International Symposium ELMAR, Zadar, 2017, pp. 35-38, doi: 10.23919/ELMAR.2017.8124429.
- [9] Z.Haas, M. Gerla , D.Johnson, C.Perkins, M.Pursley, M.Steenstrup and C.Toh , "Special issue on wireless ad hoc networks" *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 17, No.8,1999.
- [10] Burgod Céline, Contribution à la sécurisation du routage dans les réseaux ad hoc, Thèse de doctorat, Limoges, 2009.
- [11] M. M. Alani, "MANET security: A survey," 2014 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE 2014), 2014, pp. 559-564, doi: 10.1109/ICCSCE.2014.7072781.

- [12] O. Fasunlade, S. Zhou and D. Sanders, "Comprehensive Review of Collaborative Network Attacks in MANET," 2020 IEEE 44th Annual Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC), 2020, pp. 1542-1545, doi: 10.1109/COMPSAC48688.2020.00-36.
- [13] F. Azam, S. K. Yadav, N. Priyadarshi, S. Padmanaban and R. C. Bansal, "A Comprehensive Review of Authentication Schemes in Vehicular Ad-Hoc Network," in IEEE Access, vol. 9, pp. 31309-31321, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3060046.
- [14] Z. Lu, G. Qu and Z. Liu, "A Survey on Recent Advances in Vehicular Network Security, Trust, and Privacy," in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 20, no. 2, pp. 760-776, Feb. 2019, doi: 10.1109/TITS.2018.2818888.
- [15] O. Alzamzami, I. Mahgoub, "Geographic routing enhancement for urban VANETs using link dynamic behavior: A cross layer approach", Vehicular Communications, Volume 31, 2021, doi:10.1016/j.vehcom.2021.100354.
- [16] A. Abdul Hanan, M. Y. Idris, O. Kaiwartya, M. Prasad, R. Ratn Shah, "Real traffic-data based evaluation of vehicular traffic environment and state-of-the-art with future issues in location-centric data dissemination for VANETs", Digital Communications and Networks, Volume 3, Issue 3, 2017, Pages 195-210, doi.org/10.1016/j.dcan.2017.04.002.
- [17] R. Srinivasan, A. Sharmili, S. Saravanan and D. Jayaprakash, "Smart vehicles with everything," 2016 2nd International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I), 2016, pp. 400-403, doi: 10.1109/IC3I.2016.7917997.
- [18] A. K. Ali, I. Phillips and H. Yang, "Evaluating VANET routing in urban environments," 2016 39th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), 2016, pp. 60-63, doi: 10.1109/TSP.2016.7760829.
- [19] O. T. Abdulhae, M. Ismail, M. A. Altahrawi and M. A. Saad, "Data Dissemination of Vehicular Ad-Hoc Network in Highway Scenario," 2019 IEEE 14th Malaysia International Conference on Communication (MICC), 2019, pp. 25-30, doi: 10.1109/MICC48337.2019.9037571.
- [20] M. Zhang and R. S. Wolff, "Routing protocols for vehicular Ad Hoc networks in rural areas," in IEEE Communications Magazine, vol. 46, no. 11, pp. 126-131, November 2008, doi: 10.1109/MCOM.2008.4689255.
- [21] J. Petit, "Surcoût de l'authentification et du consensus dans la sécurité des réseaux sans fil véhiculaires", Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 13 Juillet 2011
- [22] L. Zhang, A. Lakas, H. El-Sayed, E. Barka, "Mobility analysis in vehicular ad hoc network (VANET)", Journal of Network and Computer Applications, Volume 36, Issue 3, 2013, Pages 1050-1056
- [23] P. Shah, T. Kasbe, "A review on specification evaluation of broadcasting routing protocols in VANET", Computer Science Review, Volume 41, 2021, 100418.

- [24] Y. Park, K. H. Rhee, C. Sur, "A Secure and Location Assurance Protocol for Location-Aware Services in VANETs", 5th International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing, Seoul, 2011, pp. 456-461.
- [25] I. K. Virdaus, M. Kang, S. Shin and G. Kwon, "A simulation study: Is the broadcast storming really harmful for emergency delivery in VANETs?," 2015 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC), 2015, pp. 666-670, doi: 10.1109/ATC.2015.7388415.
- [26] Meraihi Yassine, "Routage dans les réseaux véhiculaires (VANET)", Thèse de doctorat, Université M'hamed Bougara de Boumerdès, 2011.
- [27] C. Burgod, "Contribution à la sécurisation du routage dans les réseaux ad hoc," Université de Limoges Thèse de doctorat, 2009.
- [28] P. B. Ulhe, A. Sinha, V. M. Dixit, V. Vijayrao Bhojar, G. V. Gawali and S. Ashok Nawkhare, "V2V Communication: A Study on Autonomous Driving using VANET and Telematics," 2020 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT), 2020, pp. 806-809, doi: 10.1109/ICICT48043.2020.9112390.
- [29] F. N. Alsaleem, J. S. Thompson and D. I. Laurenson, "Adaptive Sum of Markov Chains for Modelling 3D Blockage in mmWave V2I Communications," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 69, no. 9, pp. 9431-9444, Sept. 2020, doi: 10.1109/TVT.2020.3003245.
- [30] J. Zang and M. Shikh-Bahaei, "An Adaptive Full-Duplex Deep Reinforcement Learning-Based Design for 5G-V2X Mode 4 VANETs," 2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/WCNC49053.2021.9417550.
- [31] A. Martínez, E. Cañibano and J. Romo "Analysis of Low Cost Communication Technologies for V2I Applications", vol. 10, no. 4, pp. 1249, doi: 10.3390/app10041249.
- [32] S. Gyawali, S. Xu, Y. Qian and R. Q. Hu, "Challenges and Solutions for Cellular Based V2X Communications," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 23, no. 1, pp. 222-255, Firstquarter 2021, doi: 10.1109/COMST.2020.3029723.
- [33] Z. Ren, W. Li and Q. Yang, "Location Verification for VANETs Routing," 2009 IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, 2009, pp. 141-146, doi: 10.1109/WiMob.2009.33.
- [34] D. Wu, Y. Zhang, L. Bao and A. C. Regan, "Location-Based Crowdsourcing for Vehicular Communication in Hybrid Networks," in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 14, no. 2, pp. 837-846, June 2013, doi: 10.1109/TITS.2013.2243437.
- [35] M. Sayad Haghghi and Z. Aziminejad, "Highly Anonymous Mobility-Tolerant Location-Based Onion Routing for VANETs," in IEEE Internet of Things Journal, vol. 7, no. 4, pp. 2582-2590, April 2020, doi: 10.1109/JIOT.2019.2948315.
- [36] A. D. Devangavi and R. Gupta, "Routing protocols in VANET — A survey," 2017 International Conference On Smart Technologies For Smart Nation (SmartTechCon), 2017, pp. 163-167, doi: 10.1109/SmartTechCon.2017.8358362.

- [37] J. Shin, Y. Baek and S. H. Son, "Fundamental Topology-Based Routing Protocols for Autonomous Vehicles," 2016 IEEE 22nd International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications (RTCSA), 2016, pp. 265-265, doi: 10.1109/RTCSA.2016.56.
- [38] P.K.Shrivastava, L.K. Vishwamitra, "Comparative analysis of proactive and reactive routing protocols in VANET environment", Measurement: Sensors, Volume 16, 2021, 100051, ISSN 2665-9174, <https://doi.org/10.1016/j.measen.2021.100051> .
- [39] C. Sottile, A. F. Santamaria and S. Marano, "A reactive routing protocol for VANETs based on composite metric concept," International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems (SPECTS 2014), 2014, pp. 642-646, doi: 10.1109/SPECTS.2014.6880005.
- [40] M. J. Sataraddi, M. S. Kakkasageri, G. S. Kori and R. V. Patil, "Intelligent Routing for Hybrid Communication in VANETs," 2017 IEEE 7th International Advance Computing Conference (IACC), 2017, pp. 385-390, doi: 10.1109/IACC.2017.0087.
- [41] J. J. Ferronato and M. A. S. Trentin, "Analysis of Routing Protocols OLSR, AODV and ZRP in Real Urban Vehicular Scenario with Density Variation," in IEEE Latin America Transactions, vol. 15, no. 9, pp. 1727-1734, 2017, doi: 10.1109/TLA.2017.8015079.
- [42] L. Rivoirard, M. Wahl, P. Sondi, M. Berbineau and D. Gruyer, "Performance evaluation of AODV, DSR, GRP and OLSR for VANET with real-world trajectories," 2017 15th International Conference on ITS Telecommunications (ITST), 2017, pp. 1-7, doi: 10.1109/ITST.2017.7972224.
- [43] R. Z. Akbar, Istikmal and Sussi, "Performance Analysis FSR and DSR Routing Protocol in VANET with V2V and V2I Models," 2020 3rd International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI), 2020, pp. 158-163, doi: 10.1109/ISRITI51436.2020.9315367.
- [44] Ahmed Yasser, M. Zorkany & Neamat Abdel Kader, " VANET routing protocol for V2V implementation: A suitable solution for developing countries", Cogent Engineerin, 4:1, (2017) DOI: 10.1080/23311916.2017.1362802.
- [45] N. Schweitzer, A. Stulman, A. Shabtai and R. D. Margalit, "Mitigating Denial of Service Attacks in OLSR Protocol Using Fictitious Nodes," in IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 15, no. 1, pp. 163-172, 1 Jan. 2016, doi: 10.1109/TMC.2015.2409877.
- [46] A. Boushaba, A. Benabbou, R. Benabbou, A. Zahi and M. Oumsis, "An enhanced MP-OLSR protocol for MANETs," 2014 International Conference on Next Generation Networks and Services (NGNS), Casablanca, Morocco, 2014, pp. 73-79, doi: 10.1109/NGNS.2014.6990231.
- [47] A. Rachid, " SU-OLSR une nouvelle solution pour la sécurité du protocole OLSR " Mémoire de maîtrise électronique, Montréal, École de technologie supérieure ,2009.
- [48] Y. Fengjie, Y. Hui and Z. Ying, "Research on DSDV routing protocol based on wireless Mesh network," 2018 Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 2018, pp. 4292-4297, doi: 10.1109/CCDC.2018.8407870.

- [49] H.Touluni, B. Nsiri, "A Hybrid Routing Protocol for VANET Using Ontology", *Procedia Computer Science*, Volume 73, Pages 94-101, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.12.053>.
- [50] L. Barolli, Y. Honma, A. Koyama, A. Durrezi and J. Arai, "A selective border-casting zone routing protocol for ad-hoc networks," *Proceedings. 15th International Workshop on Database and Expert Systems Applications*, 2004., 2004, pp. 326-330, doi: 10.1109/DEXA.2004.1333494.
- [51] S. K. Pathak, R. Upadhyay and U. R. Bhatt, "An efficient query packets forward algorithm in ZRP protocol," *2014 International Conference on Issues and Challenges in Intelligent Computing Techniques (ICICT)*, 2014, pp. 592-595, doi: 10.1109/ICICT.2014.6781347.
- [52] N. S. Benni, S. S. Manvi and Anup T H, "Performance Analysis of Hybrid Routing Protocols in Wireless Mesh Networks using variation in maximum speed," *2015 International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSP)*, 2015, pp. 1370-1373, doi: 10.1109/ICCSP.2015.7322733.
- [53] A. K. Jaiswal and P. Singh, "Optimizing Velocity Based Adaptive Zone Routing Protocol," *2010 International Conference on Computer and Communication Technology (ICCCT)*, 2010, pp. 149-152, doi: 10.1109/ICCCT.2010.5640413.
- [54] T. Zhang and Z. Wang, "Research on IPv6 Neighbor Discovery Protocol (NDP) security," *2016 2nd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC)*, 2016, pp. 2032-2035, doi: 10.1109/CompComm.2016.7925057.
- [55] C. R. C. M. Da Silva, J. Kosloff, C. Chen, A. Lomayev and C. Cordeiro, "Beamforming Training for IEEE 802.11 ay Millimeter Wave Systems," *2018 Information Theory and Applications Workshop (ITA)*, 2018, pp. 1-9, doi: 10.1109/ITA.2018.8503112.
- [56] N. Goel, I. Dhyani and G. Sharma, "An Acute Position Based VANET Routing Protocol," *2016 International Conference on Micro-Electronics and Telecommunication Engineering (ICMETE)*, 2016, pp. 139-144, doi: 10.1109/ICMETE.2016.109.
- [57] Z. Du, C. Wu, T. Yoshinaga and Y. Ji, "A Prophet-Based DTN Protocol for VANETs," *2018 IEEE SmartWorld, Ubiquitous Intelligence & Computing, Advanced & Trusted Computing, Scalable Computing & Communications, Cloud & Big Data Computing, Internet of People and Smart City Innovation (SmartWorld/SCALCOM/UIC/ATC/CBDCOM/IOP/SCI)*, 2018, pp. 1876-1879, doi: 10.1109/SmartWorld.2018.00315.
- [58] J. Zhao and G. Cao, "VADD: Vehicle-Assisted Data Delivery in Vehicular Ad Hoc Networks," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 57, no. 3, pp. 1910-1922, May 2008, doi: 10.1109/TVT.2007.901869.
- [59] M. Belghachi, and N. Debab. "The adaptation of vehicle assisted data delivery protocol in IoV networks." *International Journal of Applied Mathematics, Computational Science and Systems Engineering* 2 (2020).
- [60] A. Al-Adilee, Ts. Dr. Maythem & Al-Jemeli, Marwan & Taharim, Nurwahida, "Vehicle's Direction Determination Protocol via VANET". *International Review of Automatic Control*. 9. pp.161-166 , 2016.

- [61] L. Alouache, N. Nguyen, M. Aliouat, R. Chelouah, "New robust protocol for IoV communications", 2017 ISTE OpenScience – Published by ISTE Ltd, London.
- [62] R. S. Mangrulkar and M. Atique, "Routing protocol for Delay Tolerant Network: A survey and comparison," 2010 International conference on communication control and computing technologies, 2010, pp. 210-215, doi: 10.1109/ICCCCT.2010.5670553..
- [63] A. A. Pirzada and C. McDonald, "Trusted Greedy Perimeter Stateless Routing," 2007 15th IEEE International Conference on Networks, 2007, pp. 206-211, doi: 10.1109/ICON.2007.4444087.
- [64] N. D. Nguyen, D. T. Nguyen, M. -A. L. Gall, N. Saxena and H. Choo, "Greedy Forwarding with Virtual Destination Strategy for Geographic Routing in Wireless Sensor Networks," 2010 International Conference on Computational Science and Its Applications, 2010, pp. 217-221, doi: 10.1109/ICCSA.2010.55.
- [65] X. Yang, M. Li, Z. Qian and T. Di, "Improvement of GPSR Protocol in Vehicular Ad Hoc Network," in IEEE Access, vol. 6, pp. 39515-39524, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2853112.
- [66] Q. Wu, Q. Liu, L. Zhang and Z. Zhang, "A trusted routing protocol based on GeoDTN+Nav in VANET," in China Communications, vol. 11, no. 14, pp. 166-174, 2014, doi: 10.1109/CC.2014.7085617.
- [67] B. Nithya, S. B. Abhinaya and V. Lavanya, "A Party-based Cluster Head Selection Algorithm for Wireless Sensor Networks," 2018 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON), 2018, pp. 327-332, doi: 10.1109/GUCON.2018.8675041.
- [68] R. A. Santos, R. M. Edwards and A. Edwards, "Cluster-based location routing algorithm for vehicle to vehicle communication," Proceedings. 2004 IEEE Radio and Wireless Conference (IEEE Cat. No.04TH8746), 2004, pp. 39-42, doi: 10.1109/RAWCON.2004.1389065.
- [69] T. Song, W. Xia, T. Song and L. Shen, "A cluster-based directional routing protocol in VANET," 2010 IEEE 12th International Conference on Communication Technology, 2010, pp. 1172-1175, doi: 10.1109/ICCT.2010.5689132.
- [70] H. Pan and L. Tseng, "Make Multi-hop Broadcast in VANET Fast by Selecting a Better Route for Source Vehicle," 2020 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops), 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/PerComWorkshops48775.2020.9156200.
- [71] M. Gandhi and M. A. Khan, "Performance analysis of metrics of broadcasting protocols in VANET," 2014 Innovative Applications of Computational Intelligence on Power, Energy and Controls with their impact on Humanity (CIPECH), 2014, pp. 315-321, doi: 10.1109/CIPECH.2014.7019048.
- [72] Venkatesh, Aindra, R Murali, "Routing Protocols for Vehicular Adhoc Networks (VANETs): A Review", Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences Vol. 5, No. 1 January 2014 ISSN 2079-8407, pp 25-43.

- [73] O. K. Tonguz, N. Wisitpongphan and F. Bai, "DV-CAST: A distributed vehicular broadcast protocol for vehicular ad hoc networks," in *IEEE Wireless Communications*, vol. 17, no. 2, pp. 47-57, April 2010, doi: 10.1109/MWC.2010.5450660.
- [74] S. Kumar, K.D. Narayan, Jogendra Kumar, " Qualitative Based Comparison of Routing Protocols for VANET ", *Journal of Information Engineering and Applications*, Vol 1, No.4, 2011.
- [75] Y. Bi, H. Shan, X. S. Shen, N. Wang and H. Zhao, "A Multi-Hop Broadcast Protocol for Emergency Message Dissemination in Urban Vehicular Ad Hoc Networks," in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 17, no. 3, pp. 736-750, March 2016, doi: 10.1109/TITS.2015.2481486.
- [76] S. Chang and S. Lee, "A Study on Distance-Based Multi-Hop Broadcast Scheme for Inter-Vehicle Communication," 2013 International Conference on IT Convergence and Security (ICITCS), 2013, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICITCS.2013.6717787.
- [77] H.Wu, R. Fujimoto, R.Guensler, and M. Hunter, "MDDV: a mobility-centric data dissemination algorithm for vehicular networks", In *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks*, Association for Computing Machinery, New York USA, 47–56, 2004, DOI:<https://doi.org/10.1145/1023875.1023884>
- [78] H. Jiang, H. Guo, and L. Chen, "Reliable and efficient alarm message routing in vanet," in *ICDCSW '08: Proceedings of the 2008 The 28th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops*. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2008, pp. 186--191.
- [79] S. Allal and S. Boudjit, "Geocast Routing Protocols for VANETs: Survey and Guidelines," 2012 Sixth International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing, 2012, pp. 323-328, doi: 10.1109/IMIS.2012.133.
- [80] S. Kamboj, S. Chawla, "Geocast Routing in Vehicular Ad Hoc Networks: A Survey", *International Journal of Computer Science and Information Technologies (IJCSIT)*, Vol. 5 (4), 2014, 5365-5370.
- [81] A. Bachir, A. Benslimane, A multicast protocol in ad hoc networks: inter-vehicle geocast, in: *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference, VTC-Spring*, 2003.
- [82] W. Farooq, MA. Khan, S. Rehman, NA. Saqib. "A Survey of Multicast Routing Protocols for Vehicular Ad Hoc Networks". *International Journal of Distributed Sensor Networks*. August 2015. doi:10.1155/2015/923086
- [83] T. K. Bhatia, R. Ketti Ramachandran, R. Doss and L. Pan, "A review of simulators used for VANETs: The case-study of vehicular mobility generators," 2020 7th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN), 2020, pp. 234-239, doi: 10.1109/SPIN48934.2020.9070933.
- [84] P. Sondi, M.Wahl, L. Rivoirard, O. Cohin. "Performance Evaluation of 802.11p-Based Ad Hoc Vehicle-to-Vehicle Communications for Usual Applications Under Realistic Urban Mobility". *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, IJACSA, 2016, 7 (5), p221-230.
- [85] J.Harri, , F.Filali, , & C.Bonnet, , "Mobility models for vehicular ad hoc networks: A survey and taxonomy". *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 11(4), 19, 2009.

- [86] H. Meyer et al., "VANET mobility modeling challenged by feedback loops," 2011 The 10th IFIP Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop, 2011, pp. 95-102, doi: 10.1109/Med-Hoc-Net.2011.5970499.
- [87] O. El Joubari. "Mobility and traffic models for VANETs". Networking and Internet Architecture [cs.NI]. Université Paris-Saclay, 2022. English.
- [88] E. Spaho, L.Barolli, , G.Mino, , F. Xhafa, , V.Kolici, "Vanet simulators: A survey on mobility and routing protocols". In: Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA), 2011 International Conference on. 2011, p. 1–10.
- [89] W. Navidi and T. Camp., "Stationary distributions for the random waypoint mobility model". Technical Report MCS-03-04, The Colorado School of Mines, April 2003.
- [90] J. Le Boudec, "On the Stationary Distribution of Speed and Location of Random Waypoint," IEEE Trans. Mobile Computing, vol. 4, July. /Aug. 2005.
- [91] J.-Y.L. Boudec and M. Vojnovic, "The Random Trip Model: Stability, Stationary Regime, and Perfect Simulation," IEEE/ACM Trans. Networking, vol. 14, no. 6, pp. 1153-1166, Dec. 2006.
- [92] B. Ramakrishnan,R. Bhagavath Nishanth M. Milton Joe , R. S. Shaji Comprehensive analysis of Highway, Manhattan and Freeway mobility models for vehicular ad hoc network, International Journal of Wireless and Mobile Computing Volume 9, Issue 1, September 2015 pp 78-89 <https://doi.org/10.1504/IJWMC.2015.071677>.
- [93] Krauß, S. (1998). "Microscopic modeling of traffic flow: Investigation of collision free vehicle dynamics"
- [94] D.Xia, , H.Li, , B.Wang, , Y.Li, , & Z.Zhang, (2016). "A map reduces based nearest neighbor approach for big-data-driven traffic flow prediction". IEEE access, 4, 2920-2934.
- [95] J.Weber, , M.Neves, & T.Ferreto, VANET simulators: an updated review. J Braz Comput Soc 27, 8 (2021). <https://doi.org/10.1186/s13173-021-00113-x>
- [96] KG. Lim, CH. Lee, Chin RKY, Yeo KB, Teo KTK (2017) "SUMO enhancement for vehicular ad hoc network (VANET) simulation". In: 2017 IEEE 2nd International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS). IEEE. pp 86–91
- [97] M. Fellendorf, P. Vortisch," Microscopic traffic flow simulator VISSIM". Fundamentals of Traffic Simulation. Springer. pp 63–93, 2010
- [98] CL Azevedo, NM Deshmukh, B Marimuthu, S Oh, K Marczuk, H Soh, K Basak, T Toledo, L-S Peh, Ben-Akiva ME (2017) Simmobility short-term: An integrated microscopic mobility simulator. Transp Res Rec 2622(1):13–23
- [99] GD Cameron, GI Duncan (1996) Paramics–parallel microscopic simulation of road traffic. J Supercomput 10(1):25–53
- [100] A Halati, H Lieu, S Walker (1997) CORSIM-corridor traffic simulation model. In: Traffic Congestion and Traffic Safety in the 21st Century: Challenges, Innovations, and Opportunities Urban Transportation Division, ASCE; Highway Division, ASCE; Federal

Highway Administration, USDOT; and National Highway Traffic Safety Administration, USDOT

[101] Y. Weng and T. Wu, "Car-following model of vehicular traffic," 2001 International Conferences on Info-Tech and Info-Net. Proceedings (Cat. No.01EX479), 2001, pp. 101-106 vol.4, doi: 10.1109/ICII.2001.983768.

[102] N. E. Yunus, S. F. A. Razak, S. Yogarayan and M. F. A. Abdullah, "Lane Changing Models: A Short Review," 2021 IEEE 12th Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC), 2021, pp. 110-115, doi: 10.1109/ICSGRC53186.2021.9515214.

[103] D. S. Gaikwad, & M.Zaveri, "A Novel Mobility Model for realistic behavior in Vehicular Ad Hoc Networks ", in Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Computer and Information Technology, Pafos, Cyprus, pp. 597-602, 2011.

[104] OpenStreetMap Foundation contributors, "Main Page," *OpenStreetMap Foundation*, , [https://wiki.osmfoundation.org/w/index.php?title=Main\\_Page&oldid=10070](https://wiki.osmfoundation.org/w/index.php?title=Main_Page&oldid=10070) (accessed february 2, 2023).

[105] A.Förster, , A.Bin Muslim, , & A.Udugama, (2018, October). "TRAILS-A Trace-Based Probabilistic Mobility Model." In Proceedings of the 21st ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (pp. 295-302).

[106] UDel Models For Simulation of Urban Mobile Wireless Networks, <https://udelmodels.eecis.udel.edu/>

[107] J.Kim, & S.Bohacek, (2005). A survey-based mobility model of people for simulation of urban mesh networks. Proc. MeshNets, 1-11.

[108] M.M. Alani, (2014). OSI Model. In: Guide to OSI and TCP/IP Models. SpringerBriefs in Computer Science. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-05152-9\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-05152-9_2)

[109] X.Miao, & Guo, Jianhua & Z.-D. Qian, (2012). Vehicular ad-hoc network: Review and future vision. 21. 121-125.

[110] Ali, Maaruf. (2014). "Standards of Communications in the Intelligent Transport Systems". 10.13140/2.1.2055.1040.

[111] Whyte, William. (2016). IEEE 1609.2 and Connected Vehicle Security: Standards Making in a Pocket Universe. 10.13140/RG.2.2.30133.88802.

[112] The Network Simulator ns-3. [Online]. Available: <https://www.nsnam.org/>. Accessed on: Oct. 26, 2022.

[113] "Manual-nsnam.org." [Online]. Available: <https://www.nsnam.org/docs/release/3.38/manual/singlehtml/index.html>. (Accessed: March 21, 2023).

[114] OMNeT++ Discrete Event Simulator. Available at: <https://omnetpp.org/> (Accessed: March 28, 2023).

- [115] NED the ned language. Available at: [https://www.ewh.ieee.org/soc/es/Nov1999/18/ned.htm#:~:text=NED%20\(Network%20Description\)%20is%20the,hierarchical%2C%20typed%20module%20structure](https://www.ewh.ieee.org/soc/es/Nov1999/18/ned.htm#:~:text=NED%20(Network%20Description)%20is%20the,hierarchical%2C%20typed%20module%20structure) (Accessed: March 28, 2023).
- [116] *Veins*. Available at : <https://veins.car2x.org/> (Accessed: March 28, 2023).
- [117] *Fonctionnement de Veins*. Available at: <https://veins.car2x.org/documentation/> (Accessed: March 29, 2023).
- [118] *Mininet*. Available at : <http://mininet.org/> (Accessed: March 29, 2023).
- [119] Wireless network emulation with Mininet-WIFI - Amazon.com. Available at : <https://www.amazon.com/Wireless-Network-Emulation-Mininet-WiFi-Fontes/dp/6590057141> (Accessed: April 7, 2023).
- [120] T. K. Saini, S. C. Sharma, "Recent advancements, review analysis, and extensions of the AODV with the illustration of the applied concept", *Ad Hoc Networks*, Volume 103, 2020,102148. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2020.102148>.
- [121] O. S. Al-Heety, Z. Zakaria, M. Ismail, M. M. Shakir, S. Alani, and H. Alsariera, "A comprehensive survey: Benefits, services, recent works, challenges, security, and use cases for SDN-VANET," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 91028–91047, May 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2992580>
- [122] H. D. Ali and A. H. Abdulqader, "Using software defined network (SDN) controllers to enhance communication between two vehicles in vehicular ad hoc network (VANET)," in *2021 7th International Conference on Contemporary Information Technology and Mathematics (ICCITM)*, Mosul, Iraq, Aug. 2021, pp. 106–111. <https://doi.org/10.1109/ICCITM53167.2021.9677720>
- [123] N. McKeown, T. Anderson, H. Balakrishnan, G. Parulkar, L. Peterson, J. Rexford, S. Shenker, and J. Turner, "OpenFlow," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 38, no. 2, pp. 69–74, Apr. 2008. <https://doi.org/10.1145/1355734.1355746>
- [124] Z. He, J. Cao, and X. Liu, "SDVN: Enabling rapid network innovation for heterogeneous vehicular communication," *IEEE Network*, vol. 30, no. 4, pp. 10–15, Jul. 2016. <https://doi.org/10.1109/MNET.2016.7513858>
- [125] W. Ben Jaballah, M. Conti, and C. Lal, "A survey on software-defined VANETs: benefits, challenges, and future directions," *arXiv preprint*, arXiv:1904.04577, 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1904.04577>
- [126] Md. Mahmudul Islam, M. T. R. Khan, M. M. Saad, and D. Kim, "Software-defined vehicular network (SDVN): A survey on architecture and routing," *Journal of Systems Architecture*, vol. 114, Mar. 2021, Art no. 101961. <https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2020.101961>
- [127] L. Xie, Y. Ding, H. Yang and X. Wang, "Blockchain-Based Secure and Trustworthy Internet of Things in SDN-Enabled 5G-VANETs," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 56656–56666, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2913682.

- [128] K. Gaur and J. Grover, "Exploring VANET Using Edge Computing and SDN," *2019 Second International Conference on Advanced Computational and Communication Paradigms (ICACCP)*, Gangtok, India, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICACCP.2019.8882917.
- [129] S. M.Hatim, , S. J.Elias, , N.Awang, , & M. Y. Darus, (2018). VANETs and Internet of Things (IoT): A Discussion. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 12(1), 218. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v12.i1.pp218-224>
- [130] O. S. Al-Heety, Z. Zakaria, M. Ismail, M. M. Shaker, S. Alani and H. Alsariera, "A Comprehensive Survey: Benefits, Services, Recent Works, Challenges, Security, and Use Cases for SDN-VANET," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 91028-91047, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2992580.
- [131] SourceForge, "Eclipse SUMO – simulation of Urban mobility". [Online]. Available: <http://sumo.sourceforge.net/>. Accessed on: Oct. 26, 2022.
- [132] Netedit, Available: <https://sumo.dlr.de/docs/Netedit/index.html> Accessed on: Nov. 19, 2023.
- [133] T. Adbeb, W.Di and M.Ibrar, "Software-Defined Networking (SDN) based VANET Architecture: Mitigation of Traffic Congestion" *International Journal of Advanced Computer Science and Applications(IJACSA)*, 11(3), 2020. <http://dx.doi.org/10.14569/IJACSA.2020.0110388>
- [134] M. Haklay and P. Weber, "OpenStreetMap: User-Generated Street Maps," in *IEEE Pervasive Computing*, vol. 7, no. 4, pp. 12-18, Oct.-Dec. 2008, doi: 10.1109/MPRV.2008.80.
- [135] M. R. Rifat, S. Moutushy, S. Ishtiaque Ahmed and H. Shahid Ferdous, "Location based Information System using OpenStreetMap," *2011 IEEE Student Conference on Research and Development*, Cyberjaya, Malaysia, 2011, pp. 397-402, doi: 10.1109/SCORED.2011.6148772.
- [136] Varun P. Sarvade, ShrirangAmbaji Kulkarni, "Real-World Multimedia Streaming for Software Defined Vehicular Ad Hoc Networks", *International Journal of Computer Networks & Communications (IJCNC)* Vol.15, No.4, July 2023
- [137] V. P. Sarvade and S. A. Kulkarni, "Modified POX Controller for Enhancing Quality of Experience of Multimedia Streaming in a Realistic Software Defined Vehicular Ad Hoc Networks," *2022 6th International Conference on Computation System and Information Technology for Sustainable Solutions (CSITSS)*, Bangalore, India, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/CSITSS57437.2022.10026385.
- [138] B., Shanu & Panda, Surya. (2022). Performance Evaluation Using RYU SDN Controller in Software-Defined Networking Environment. *Wireless Personal Communications*. 122. 10.1007/s11277-021-08920-3.
- [139] M. Rahouti, K. Xiong, Y. Xin, S. K. Jagatheesaperumal, M. Ayyash and M. Shaheed, "SDN Security Review: Threat Taxonomy, Implications, and Open Challenges," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 45820-45854, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3168972.

- [140] J. Medved, R. Varga, A. Tkacik, and K. Gray, "Opendaylight: Towards a model-driven SDN controller architecture," in Proceedings of the 15th IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), 2014, pp. 1–6.
- [141] M.Chahal, , S.Harit, , K.K.Mishra, , A.K.Sangaiah, , & Z.Zheng, (2017). A Survey on software-defined networking in vehicular ad hoc networks: Challenges, applications and use cases. *Sustainable Cities and Society*, 35, 830-840.
- [142] C., Manisha & H. Sandeep & M, Krishn & S. Arun & Zheng, Zhigao. (2017). A Survey on software-defined networking in vehicular ad hoc networks: Challenges, applications and use cases. *Sustainable Cities and Society*. 35. 10.1016/j.scs.2017.07.007.
- [143] Z. Wang, G. Xu, M. Zhang and Y. Guo, "Collision Avoidance Models and Algorithms in the Era of Internet of Vehicles," *2020 IEEE 3rd International Conference of Safe Production and Informatization (IICSPI)*, Chongqing City, China, 2020, pp. 123-126, doi: 10.1109/IICSPI51290.2020.9332358
- [144] D. Anadu, C. Mushagalusa, N. Alsbou and A. S. A. Abuabed, "Internet of Things: Vehicle collision detection and avoidance in a VANET environment," *2018 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, Houston, TX, USA, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/I2MTC.2018.8409861.
- [145] G. Rakesh and M. Belwal, "Vehicle Collision Avoidance in a VANET environment by data communication," *2019 3rd International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)*, Erode, India, 2019, pp. 238-242, doi: 10.1109/ICCMC.2019.8819797.
- [146] K. Raissi, M. Mejri and B. B. Gouisse, "Performance Evaluation of Data Scheduling in IEEE802.16e in VANET Traffic Context," *2018 11th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE)*, Cambridge, UK, 2018, pp. 58-63, doi:10.1109/DeSE.2018.00015.
- [147] H.Brahmia, C.Tolba and T.Hafs (2022) Improving AODV Performance by Software Defined Networking Using NS3. *Applied Computer Systems*, Vol.27 (Issue 2), pp. 159-165. <https://doi.org/10.2478/acss-2022-0017> .
- [148] J. F. Kurose, & Ross, K. W. (2013). *Computer Networking: A Top-Down Approach* (6th Edition). Pearson.
- [149] L. L. Peterson, & Davie, B. S. (2011). *Computer Networks: A Systems Approach*. Morgan Kaufmann.