



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

**UNIVERSITE IBN KHALDOUN - TIARET**

# MEMOIRE

Présenté à:

FACULTÉ MATHÉMATIQUES ET INFORMATIQUE  
DÉPARTEMENT D'INFORMATIQUE

Pour l'obtention du diplôme de:

**MASTER**

Spécialité : Réseaux et Télécommunications

Par :

**CHAIMAA KHALFI & KAMILIA BRAHIMI**

Sur le thème

---

## Simulation d'une Stratégie de Routage Réactif dans un Réseau Ad-Hoc Véhiculaire (VANET)

---

Soutenu publiquement le 11/ 06 / 2024 à Tiaret devant le jury composé de :

|             |            |           |                         |           |
|-------------|------------|-----------|-------------------------|-----------|
| Mr BENGHENI | Abdelmalek | Grade MCA | Université Ibn Khaldoun | Président |
| Mr BOUALEM  | Adda       | Grade MCA | Université Ibn Khaldoun | Encadreur |
| Mr BENAOUA  | Habib      | Grade MAA | Université Ibn Khaldoun | Examineur |

2023 -2024

## **REMERCIEMENTS**

*Nous adressons en premier lieu notre reconnaissance à notre DIEU (Allah) tout puissant, car sans lui rien n'est possible.*

*Nous tenons tout d'abord à remercier notre encadrant de mémoire Dr. ADDA. BOUALLEM, pour tout le soutien, l'aide, l'orientation, la guidance qu'il nous a apporté pendant la réalisation de ce mémoire, ainsi que pour ses précieux conseils et ses encouragements.*

*Nous n'oublions pas non plus le mérite du professeur MOKHTARI AbdELKADER pour son aide et son accompagnement à nos côtés. Il a de nombreux remerciements et appréciations.*

*Nos remerciements sont destinés aussi tous les membres de jury d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.*

*Nous remercions aussi tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*

## *Dédicace*

*Je dédie ce mémoire à mes chers parents qui ont été toujours à mes côtés et m'ont toujours soutenu tout au long de ces longues années d'études. En signe de reconnaissance, qu'ils trouvent ici, L'expression de ma profonde gratitude pour tout ce qu'ils ont consenti d'efforts et de moyens pour me voir réussir dans mes études.*

*A toutes mes sœurs Sarah et Ikram*

*A toute ma famille*

*Et toute mes amies,*

*Surtout Mounira et Soundess*

*Je tiens à remercier chaleureusement mon binôme Kamilia qui a été une précieuse collaboratrice tout au long de l'année pour mener à bien ce projet.*

*Chaïmaa*



## *Dédicace*

*Ce travail est dédié à mon cher père, décédé trop tôt qui m'a toujours poussée et motivée dans mes études*

*A celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite... ma chère mère.*

*A mon frère et ma sœur Yasmine*

*Et toute mes amies,*

*A toute ma famille qui a toujours été là pour me soutenir et m'aider à surmonter les difficultés.*

*A mon binôme Khalfi chaïmaa qui a contribué à la réalisation de ce modeste travail.*

*A tous ceux et celles qui m'ont aidé de près ou de loï.*

*Kamília*



## Résumé

Dans ce PFE, nous avons focalisé notre attention sur la problématique du routage dans les réseaux Ad-hoc sans fil (VANET) et avons présenté un examen approfondi des solutions existantes dans la littérature pour améliorer et optimiser le routage. Notre projet s'est spécifiquement concentré sur la proposition d'une nouvelle classification des problèmes rencontrés dans les réseaux Ad-hoc sans fil, en mettant l'accent sur l'utilisation de techniques de clustering pour résoudre ces problèmes. Nous avons traité le problème du routage en comparant différentes approches, notamment celles basées sur le clustering et d'autres techniques. Par simulations, nous avons démontré que l'approche par clustering apporte une valeur ajoutée par rapport aux autres stratégies de routage. En conclusion, nous résumons les points essentiels abordés dans ce mémoire et proposons des perspectives pour de futures recherches dans ce domaine.

**Mots-clés :** Réseaux Ad-hoc sans fil (VANETs), Routage, Classification, Clusters.

## Abstract

In this work, we focused on the routing issues in wireless Ad-hoc networks (VANETs) and conducted a comprehensive review of existing solutions in the literature to enhance and optimize routing. Our project specifically centered on proposing a new classification of problems encountered in wireless Ad-hoc networks, with an emphasis on using clustering techniques to address these issues. We tackled the routing problem by comparing different approaches, including those based on clustering and other techniques. Our simulations, conducted using MATLAB and based on various scenarios, demonstrated that the clustering approach adds value compared to other routing strategies. In conclusion, we summarize the key points addressed in this thesis and offer perspectives for future research in this field.

**Keywords:** Wireless Ad-hoc Networks (VANETs), Routing, Classification, Clusters.

## المخلص

في مشروع مذكرة التخرج هذه ، ركزنا انتباهنا على مشكلة التوجيه في شبكات المخصصة للمركبات اللاسلكية طاية وقدمنا استعراضاً مفصلاً للحلول المتاحة في الأدوات لتحسين التوجيه .كما ركزنا بشكل خاص على اقتراح تصنيف جديد للمشاكل التي تواجهها شبكات طاية مع التركيز على استخدام تقنيات التجميع لحل هذه المشاكل. لذلك قمنا بمعالجة مسألة التوجيه من خلال اقتراح نمط أو نهج التجميع ، الذي يعتبر الأحسن من بين الاستراتيجيات المستخدمة في ذلك. أظهرت المحاكاة التي تم إجراؤها باستخدام باءا وبناء على سيناريوهات متنوعة، أن النهج بواسطة التجميع يضيف قيمة إضافية مقارنة بالاستراتيجيات الأخرى للتوجيه. في ختام هذه المذكرة لحصنا النقاط الرئيسية المطروحة في هذا العمل وإقترحنا آفاقاً للأبحاث المستقبلية في هذا المجال.

**الكلمات المفتاحية :** شبكات الاستشعار اللاسلكية، تغطية الهدف، التجميع،

التصنيف

# Liste de Figures

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1.1 | Exemple du Réseaux ad-hoc [1]   | 6  |
| 1.2 | Exemple de reseaux VANET [2]  | 7  |
| 1.3 | Les éléments constituant le véhicule intelligent [3]                      | 9  |
| 1.4 | La communication inter-véhicule[4]  | 10 |
| 1.5 | La communication V2I[4]   | 11 |
| 1.6 | La communication hybride[4]   | 11 |
| 1.7 | Notre Classification sur les réseaux Ad-hoc sans fil à base de Clustering | 15 |
| 2.1 | Plan de l'état de l'art   | 21 |
| 2.2 | Procédure de découverte de route dans AODV                                | 23 |
| 3.1 | Présentation du Simulateur MATLAB.  | 37 |
| 3.2 | Menu Principal (GUI) du MATLAB.   | 37 |
| 3.3 | Étapes du protocole VANET à base clustering .                             | 39 |
| 3.4 | La Conception Générale de notre stratégie de routage proposée             | 40 |
| 4.1 | Fenêtre "A propos" de Notre Application de Simulation                     | 44 |
| 4.2 | Interface MATLAB  | 45 |
| 4.3 | Menu Principale de la Simulation  | 45 |
| 4.4 | Fenêtre représentant les divers scénarios de la simulation                | 46 |
| 4.5 | Taux de Livraison des paquets en fonction de rayon de capteur             | 46 |

# Liste de Tables

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 1.1 | Caractéristiques des réseaux sans fil ad-hoc: Partie 1 . . . . .   | 16 |
| 1.2 | Caractéristiques des réseaux sans fil ad-hoc: Partie 2 . . . . .   | 17 |
| 2.1 | Comparaison de protocoles de routage dans les réseaux VANET<br>en termes de points forts/faibles . . . . . | 27 |
| 2.2 | Avantages et Inconvénients des routages proactif et réactif . . .  | 28 |
| 3.1 | Description des Fonctions utilisées dans la Simulation . . . . .   | 41 |
| 4.1 | Défis et Considérations de la simulation . . . . .   | 48 |

# Sommaire

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Introduction générale</b>  | <b>2</b>  |
| <b>1 Généralités sur Réseaux Ad-Hoc Véhiculaires</b>                            | <b>5</b>  |
| 1.1 Introduction  | 5         |
| 1.2 Les réseaux Ad-hoc sans fil   | 5         |
| 1.2.1 Définition  | 5         |
| 1.2.2 Catégories des réseaux ad-hoc sans fil                                    | 6         |
| 1.3 Réseau Véhiculaire Ad-hoc (VANET)   | 7         |
| 1.3.1 Définition  | 7         |
| 1.3.2 Architecture VANET  | 8         |
| 1.3.3 Composants d'un réseau VANET  | 8         |
| 1.3.4 Caractéristiques du réseau VANET  | 9         |
| 1.3.5 Modes de communication  | 10        |
| 1.3.6 Les applications de réseau ad-hoc véhiculaire (Types d'application VANET) | 12        |
| 1.3.7 Les problèmes du réseau véhiculaire ad-hoc (VANET)                        | 12        |
| 1.3.8 Les avantages et les inconvénients des VANETs                             | 14        |
| <b>2 Problème du Routage dans les Réseaux Véhiculaires Ad-Hoc (VANETs)</b>      | <b>20</b> |
| 2.1 Classification des protocoles de routage dans les réseaux VANET             | 20        |
| 2.1.1 Introduction  | 20        |
| 2.1.2 Protocoles basés sur la topologie   | 22        |
| 2.1.2.1 Les Protocoles réactifs   | 22        |
| 2.1.2.2 Les Les Protocoles proactifs  | 24        |
| 2.1.2.3 Les Les Protocoles hybrides   | 28        |
| 2.1.3 Protocoles de routage à base heuristiques                                 | 28        |
| 2.1.4 Protocoles de routage basés sur la géographie                             | 30        |
| 2.1.5 Protocoles de routage à base de clustering                                | 31        |
| <b>3 Conception et Réalisation</b>  | <b>35</b> |
| 3.1 Choix de MATLAB   | 36        |
| 3.2 Les principales phases d'un protocole VANET à base clustering:              | 38        |
| 3.3 Description :   | 40        |
| <b>4 Simulation et Analyse de Résultats</b>                                     | <b>44</b> |
| 4.1 Simulation et analyse de résultats:   | 44        |
| 4.1.1 Méthodologie de Simulation  | 44        |
| 4.1.2 Les étapes de la Simulation   | 45        |
| 4.1.3 Analyse des résultats de la simulation                                    | 47        |
| 4.1.4 Défis et Considérations   | 47        |
| <b>Conclusions et Perspectives</b>  | <b>50</b> |

# Liste des Abréviations

|               |  |
|---------------|--|
| <b>Ad-Hoc</b> | <b>Advanced Developers Hands-On Conference</b>         |
| <b>AGP</b>    | <b>Art Gallery Problem</b>                             |
| <b>A-STAR</b> | <b>Anchor-based Street and Traffic Aware Routing</b>   |
| <b>AODV</b>   | <b>Ad-hoc On-Demand Distance Vector</b>                |
| <b>ARP</b>    | <b>Address Resolution Protocol</b>                     |
| <b>CBLR</b>   | <b>Cross-Boundary Load Rebalancing</b>                 |
| <b>CBDRA</b>  | <b>Cluster Based Data Routing Algorithm</b>            |
| <b>DSR</b>    | <b>Dynamic Source Routing</b>                          |
| <b>DSDV</b>   | <b>Destination Sequenced Distance Vector</b>           |
| <b>DTN</b>    | <b>Delay-Tolerant Networking</b>                       |
| <b>GLS</b>    | <b>Guided Local Search</b>                             |
| <b>GPSR</b>   | <b>Greedy Perimeter Stateless Routing</b>              |
| <b>GSR</b>    | <b>Global State Routing</b>                            |
| <b>GyTAR</b>  | <b>Greedy Traffic Aware Routing</b>                    |
| <b>IERP</b>   | <b>Interzone Routing Protocol</b>                      |
| <b>MANET</b>  | <b>Mobile Ad-Hoc Network</b>                           |
| <b>MORA</b>   | <b>Multi-Objective Oamera Reinforcement Algorithm</b>  |
| <b>OBU</b>    | <b>On Board Unit</b>                                   |
| <b>OLSR</b>   | <b>Optimized Link State Routing</b>                    |
| <b>RSU</b>    | <b>Road Side Unit</b>                                  |
| <b>SN</b>     | <b>Sensor Network</b>                                  |
| <b>TN</b>     | <b>Telecommunication Network</b>                       |
| <b>UAV</b>    | <b>Unmanned Aerial Vehicle</b>                         |
| <b>UMB</b>    | <b>Unidirectional Multicast Broadcast</b>              |
| <b>UWSN</b>   | <b>Underwater Sensor Networks</b>                      |
| <b>V2I</b>    | <b>Vehicle To Infrastructure</b>                       |
| <b>V2V</b>    | <b>Vehicle To Vehicle</b>                              |
| <b>VANET</b>  | <b>Vehicular Ad-Hoc Network</b>                        |
| <b>WANET</b>  | <b>Wireless Ad-Hoc Network</b>                         |
| <b>WLAN</b>   | <b>Wireless Local Area Network</b>                     |
| <b>WMAN</b>   | <b>Wireless Metropolitan Area Network</b>              |
| <b>WMN</b>    | <b>Wireless Mesh Network</b>                           |
| <b>WPAN</b>   | <b>Wireless Personal Area Network</b>                  |
| <b>WSN</b>    | <b>Wireless Sensor Network</b>                         |
| <b>WWAN</b>   | <b>Wireless Wide Area Network</b>                      |
| <b>WIMAX</b>  | <b>Worldwide Interoperability for Microwave Access</b> |

# Introduction générale

# Introduction générale

## Introduction

Les réseaux Ad-Hoc sans fil sont spécifiquement conçus pour faciliter la communication en utilisant une configuration de nœuds sans fil capables d'interagir entre eux. La recherche sur les applications de ces réseaux couvre plusieurs disciplines, incluant l'analyse de données, l'économie, les mathématiques, la médecine légale, l'informatique et les sciences informatiques. Ce projet de fin d'études (PFE) explore les avantages de l'utilisation de la stratégie de regroupement dans les réseaux Ad-Hoc véhiculaires sans fil. Actuellement, les avancées technologiques dans les réseaux de capteurs sans fil (WSNs) et les appareils mobiles révolutionnent la fiabilité de la capture et de la communication des informations environnementales.

Les réseaux Ad-Hoc sans fil se forment spontanément sans besoin d'une infrastructure préexistante ni d'une gestion centralisée. Cependant, ils doivent faire face à plusieurs défis :

- **Problèmes de connectivité** : Les obstacles ou interférences peuvent affecter la connectivité.
- **Topologie dynamique** : Les dispositifs rejoignent et quittent fréquemment le réseau.
- **Préoccupations de sécurité** : Ces réseaux sont plus vulnérables aux menaces de sécurité en raison de leur nature décentralisée.
- **Bande passante limitée** : En particulier dans des scénarios avec de nombreux dispositifs connectés.
- **Consommation d'énergie, Scalabilité, Interférences et Qualité de service (QoS),...**

Les réseaux Ad-hoc véhiculaires (VANETs) sont devenus une composante essentielle des technologies de communication sans fil, offrant des avantages significatifs dans divers domaines tels que la sécurité routière, la gestion du trafic et les applications de divertissement. Ces réseaux se caractérisent par une mobilité élevée, des changements rapides de topologie et des exigences strictes en matière de latence. Pour exploiter pleinement le potentiel des VANETs, un routage efficace et réactif est indispensable.

Les réseaux Ad-Hoc, et en particulier les VANETs, sont des réseaux sans infrastructure préétablie où les nœuds communiquent directement les uns avec les autres pour former un réseau temporaire et dynamique. Ils offrent des solutions robustes pour surmonter les défis posés par la mobilité des véhicules, la perte de connectivité et les variations fréquentes de la topologie du réseau.

Dans le cadre de ce PFE, notre objectif est de concevoir, simuler et évaluer

un protocole de gestion de routage réactif adapté aux spécificités des VANETs. Plus précisément, nous nous concentrons sur le développement d'un protocole de routage réactif capable de répondre efficacement aux changements dynamiques de la topologie du réseau, garantissant une communication fiable et rapide entre les véhicules.

Nous avons utilisé l'outil de simulation MATLAB, pour simuler, analyser les performances du stratégie proposé à base de clustering dans divers scénarios de routage, en tenant compte de paramètres tels que la densité du trafic (paramétrer le nombre de véhicules par cluster), la vitesse des véhicules (nous avons fixé la vitesse dans cette étude). Ce mémoire est organisé en 4 chapitres :

- **Chapitre 1** : Présente des généralités sur les Réseaux Ad-Hoc Véhiculaires (VANET).
- **Chapitre 2** : Dédie à la Description détaillée des problèmes des réseaux véhiculaires ad-hoc, et concentration sur le problème du routage suivie d'un état de l'art mettant en évidence les travaux antérieurs dans le domaine réseaux ad-hoc véhiculaires.
- **Chapitre 3** : Dédie à la méthodologie de conception et de simulation d'une stratégie réactif de gestion de routage.
- **Chapitre 4** : Mise en œuvre notre proposition en utilisant le langage de simulation MATLAB. Présentation des résultats de simulation. Ce Chapitre se termine par un résumé des apports de cette étude simulative pour les travaux à venir (Synthèse des contributions de ce travail et perspectives pour l'avenir).

# **Chapitre 1**

## **Généralités sur Les Réseaux Ad-Hoc Véhiculaires**

# Chapitre 1

## Généralités sur Réseaux Ad-Hoc Véhiculaires

### 1.1 Introduction

Les réseaux VANET, dérivés des réseaux ad hoc mobiles (MANET), occupent une place centrale dans les Systèmes de Transport Intelligents (STI). Leur objectif premier réside dans l'amélioration de la sécurité routière, tirant profit des avancées technologiques en matière de communication et de la réduction des coûts des dispositifs sans fil. Ces réseaux permettent d'alerter les conducteurs de manière précoce sur les dangers potentiels grâce à des capteurs intégrés aux véhicules, aux abords des routes et dans les centres de contrôle.

Par ailleurs, les réseaux VANET ne se bornent pas à renforcer la sécurité routière ; ils proposent également de nouveaux services aux usagers des routes, améliorant ainsi l'expérience de conduite. Dans cette section, nous aborderons les spécificités des réseaux VANET, leurs applications, ainsi que les divers modes de communication utilisés, les normes et la standardisation qui leur sont associées.

### 1.2 Les réseaux Ad-hoc sans fil

#### 1.2.1 Définition

Le réseau mobile ad hoc, connu sous le nom de MANET (Mobile Ad hoc Network), est un réseau qui ne repose sur aucune infrastructure préétablie ni sur une administration centralisée. Ainsi, il autorise la communication directe entre deux nœuds voisins se trouvant à portée les uns des autres, sous réserve de conditions de propagation d'ondes radio appropriées.

Dans un réseau ad hoc, deux nœuds échangent des données sous forme de paquets en utilisant des nœuds intermédiaires. Dans ce processus, le nœud initiateur de l'échange, appelé nœud source, envoie les paquets à ses nœuds voisins. Si le nœud n'est pas la destination finale du paquet, un nœud intermédiaire le transmet à ses propres voisins, qui à leur tour le transfèrent aux leurs, et ainsi de suite, jusqu'à ce que le paquet atteigne sa destination[5].

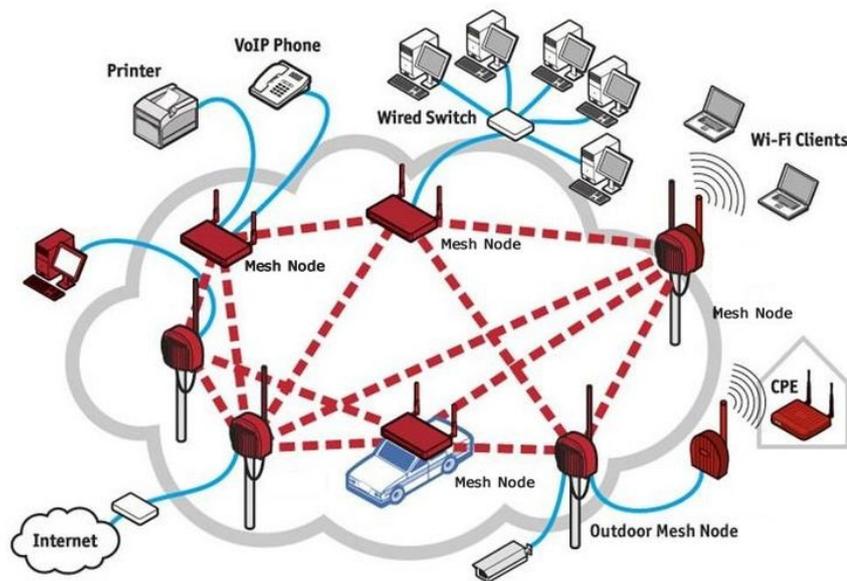


FIGURE 1.1: Exemple du Réseaux ad-hoc [1]

### 1.2.2 Catégories des réseaux ad-hoc sans fil

- **Les réseaux mobiles ad-hoc (MANETs):**

Un MANET (Mobile Ad-hoc NETWORK) (voir FIGURE 1.1) est un réseau ad-hoc, où les nœuds sont constitués d'ordinateurs portables, de téléphones mobiles, de PDA, etc., se caractérise souvent par une mobilité constante. Les réseaux MANET peuvent être déployés pour garantir la communication dans des environnements hostiles. Par exemple, dans un contexte de guerre, un MANET permet aux groupes de soldats de communiquer entre eux ainsi qu'avec des tanks, des hélicoptères ou des avions pour échanger leurs positions ou transmettre et recevoir des ordres militaires[1].

- **Les réseaux de capteurs (WSNs) :**

Les WSN (Wireless Sensor Networks) sont des réseaux ad-hoc composés de nœuds capteurs intelligents alimentés par des batteries et disposant de capacités limitées en traitement et en stockage. Ces nœuds capteurs sont capables de réaliser trois tâches complémentaires :

- La mesure d'une grandeur physique ou environnementale, telle que la température, la pression, la pollution, etc.
- Le traitement potentiel de cette information.
- Le routage: Le réseau peut comporter un grand nombre de nœuds (jusqu'à plusieurs milliers), généralement statiques et déployés de manière aléatoire, par exemple par largage depuis un hélicoptère, dans des environnements potentiellement dangereux. En plus des nœuds capteurs, un WSN comprend des stations de base riches en énergie (nœuds puits) dotées de capacités de traitement et de stockage supérieures. Ces stations servent de passerelles entre les nœuds capteurs et l'utilisateur final[6].

- **Les réseaux maillés sans fil les WMNs(Wireless Mesh Networks) :**

Un WMN (Wireless Mesh Network) est composé d'un ensemble de routeurs mesh statiques, généralement équipés de plusieurs interfaces de communication sans fil et placés sur les toits des bâtiments. Les routeurs mesh connectés à Internet sont appelés "passerelles Internet". Un nœud client se connecte au routeur mesh le plus proche et utilise l'infrastructure ad-hoc sans fil pour accéder à Internet. Les clients conventionnels équipés de cartes Ethernet peuvent communiquer directement avec les routeurs mesh via des liens Ethernet. Les clients utilisant la même technologie sans fil que les routeurs mesh peuvent également communiquer directement avec eux. En cas d'utilisation de différentes technologies sans fil, les clients doivent d'abord se connecter à des stations de base, lesquelles sont reliées aux routeurs mesh par des liens Ethernet[6].

## 1.3 Réseau Véhiculaire Ad-hoc (VANET)

### 1.3.1 Définition

Les réseaux sans fil véhiculaires, souvent désignés sous le nom de VANET (Vehicular Ad-hoc Network), constituent une sous-catégorie particulière des réseaux mobiles Ad-Hoc (MANET), dans lesquels les nœuds mobiles sont des véhicules. Leur fonctionnement permet d'établir des communications soit entre les véhicules eux-mêmes, soit entre les véhicules et l'infrastructure routière environnante, dans le but d'améliorer la sécurité routière ou de fournir aux conducteurs un accès à Internet (FIGURE 1.2).

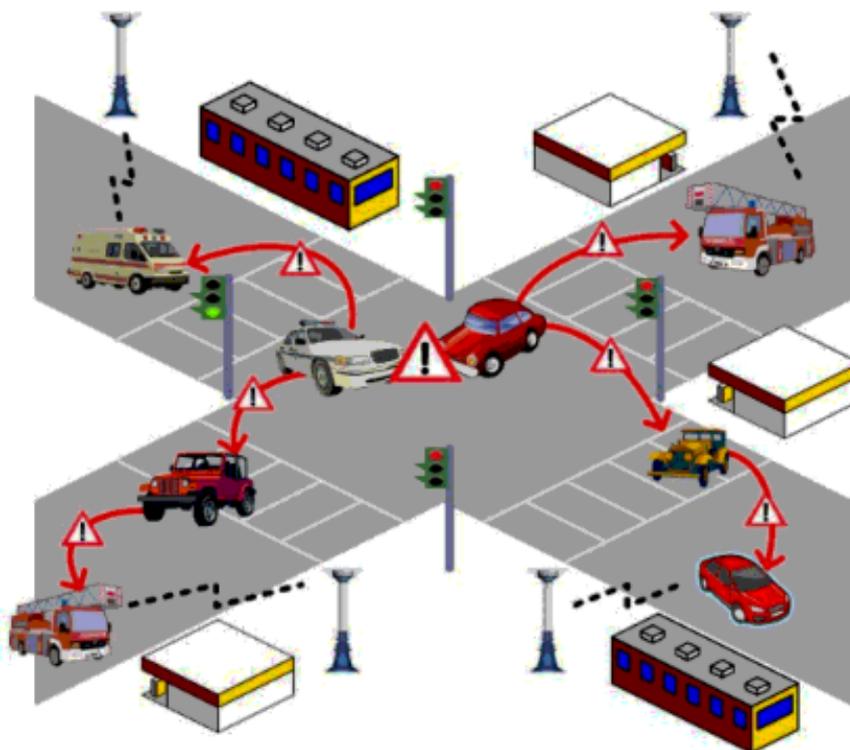


FIGURE 1.2: Exemple de reseaux VANET [2]

Pour établir ces réseaux, il est nécessaire d'équiper les véhicules de divers dispositifs électroniques, tels que des calculateurs, des cartes réseau, des capteurs, un système de localisation GPS, et éventuellement une plateforme de traitement. Plusieurs technologies peuvent être utilisées pour faciliter les communications entre les véhicules, notamment les réseaux sans fil comme le 802.11, WIMAX, Bluetooth, etc [7].

### 1.3.2 Architecture VANET

- **Architecture avec infrastructure**

Cette configuration repose sur l'équipement des infrastructures routières avec des dispositifs de communication tels que des balises ou des points d'accès, permettant ainsi aux véhicules de s'y connecter. Les infrastructures occupent un rôle central dans la coordination et la gestion du réseau. Les véhicules échangent des données avec ces infrastructures afin d'obtenir des informations concernant les conditions de la route, les feux de signalisation, les panneaux indicateurs, et autres[8].

- **Architecture sans infrastructure**

Cette architecture repose essentiellement sur la communication entre les véhicules eux-mêmes, indépendamment des infrastructures routières. Les véhicules constituent un réseau ad hoc dans lequel chacun peut agir comme un nœud de communication. Les informations sont transmises de manière multi-sauts, signifiant que les véhicules se transmettent mutuellement les données jusqu'à ce qu'elles parviennent à leur destination[8].

### 1.3.3 Composants d'un réseau VANET

- **Nœud:**

Un nœud dans un réseau VANET désigne un véhicule équipé de divers composants tels que des calculateurs, des interfaces réseau et des capteurs permettant la collecte et le traitement des informations. (FIGURE 1.3) il s'agit du « véhicule intelligent » ou smart véhicule[9].

- **Unités de bord de route (RSUs)(Road Side Units):**

sont des entités implantées le long des routes. Elles sont en mesure de collecter des données en temps réel auprès des véhicules, puis de les transmettre aux centres de contrôle du trafic pour une analyse approfondie. De plus, les RSU diffusent aux véhicules des informations importantes reçues des centres de gestion du trafic. Ces messages comprennent des données sur les conditions météorologiques ainsi que sur l'état de la route, telles que la vitesse maximale autorisée, les règles de dépassement, les feux de circulation, les intersections, etc.[10].

- **Unités embarquées (On-Board Units (OBUs)):**

Ces dispositifs sont intégrés dans les véhicules intelligents. Ils regroupent une gamme de composants matériels et logiciels de pointe tels que le GPS, le radar, les caméras et divers capteurs. Leur fonction

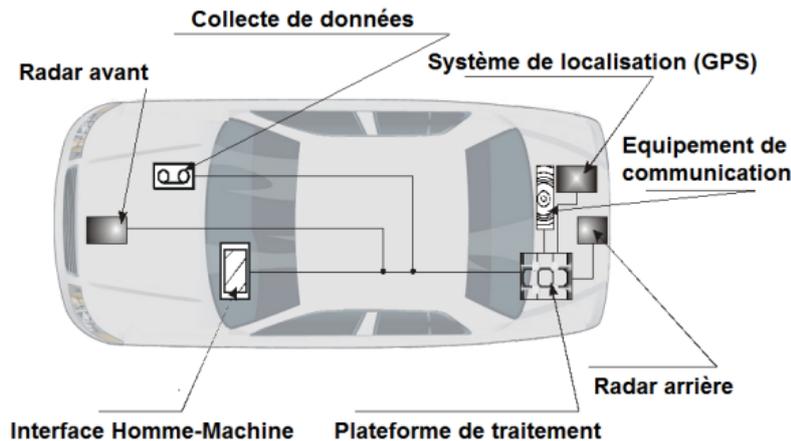


FIGURE 1.3: Les éléments constituant le véhicule intelligent [3]

principale est d'assurer la localisation, la réception, le traitement, le stockage et la transmission des données sur le réseau. Ils agissent en tant qu'émetteurs-récepteurs, assurant la connectivité du véhicule au réseau[9].

- **Autorité de Confiance (Trusted Authority(TA)):**

Elle représente une source d'authentification des données, assurant la gestion et l'enregistrement de toutes les entités du réseau : les RSU (Road Side Unit) et les OBU (On Board Unit). L'autorité de confiance est censée posséder les véritables identités de tous les véhicules et être en mesure, si nécessaire, de les divulguer aux forces de l'ordre[9].

### 1.3.4 Caractéristiques du réseau VANET

Les réseaux véhiculaires se distinguent des réseaux ad hoc mobiles par leurs caractéristiques uniques, requérant une approche spécifique dans la conception des protocoles pour les VANETs. Cette section met en avant plusieurs propriétés et contraintes propres à ce type de réseau, qui doivent être prises en compte lors du développement des protocoles correspondants.

- **La capacité d'énergie et stockage**

Contrairement au contexte des réseaux MANET où la contrainte énergétique représente un défi pour les chercheurs, les composants des réseaux VANET disposent d'une quantité d'énergie suffisante pour alimenter les divers équipements électroniques d'une voiture intelligente. Ainsi, les nœuds sont supposés posséder une grande capacité de traitement et de stockage de données[11].

- **La topologie et la connectivité**

Comme les réseaux ad hoc mobiles, les réseaux VANET se distinguent par leur connectivité sporadique. En effet, un véhicule (nœud) peut rejoindre ou quitter un groupe de véhicules en un laps de temps très court, ce qui engendre une topologie très dynamique, composée de plusieurs îlots distincts[11].

- **Le modèle de mobilité**

La mobilité dans ces réseaux peut être influencée par divers facteurs, tels que les caractéristiques des infrastructures routières telles que les routes et les autoroutes, ainsi que par des éléments de signalisation tels que les panneaux. De plus, la mobilité dans les VANETs est directement liée au comportement des conducteurs et à leurs réactions face à des obstacles ou à des situations complexes rencontrées, comme les heures de pointe, les accidents, etc..[12].

- **La sécurité et l'anonymat**

La valeur des informations transmises par les communications entre véhicules rend impérative la sécurisation de ces réseaux, une étape cruciale préalable au déploiement des VANETs[13].

### 1.3.5 Modes de communication

Concernant les méthodes de communication, les VANETs font généralement appel aux modes suivants : [14]:

- **La communication inter-véhicule (V2V):**

La communication véhicule à véhicule (V2V, Vehicle to Vehicle) se produit lorsque au moins deux véhicules interagissent via leur OBU (On Board Unit). Ce type de communication est considéré comme une instance spécifique des réseaux mobiles ad hoc, où les contraintes énergétiques, de mémoire et de capacité sont moins rigoureuses et où le modèle de mobilité est prévisible plutôt qu'aléatoire, avec une très grande mobilité. Les (FIGURES 1.4, 1.5, 1.6) un aperçu des divers modes de communication utilisés dans les réseaux VANETs.

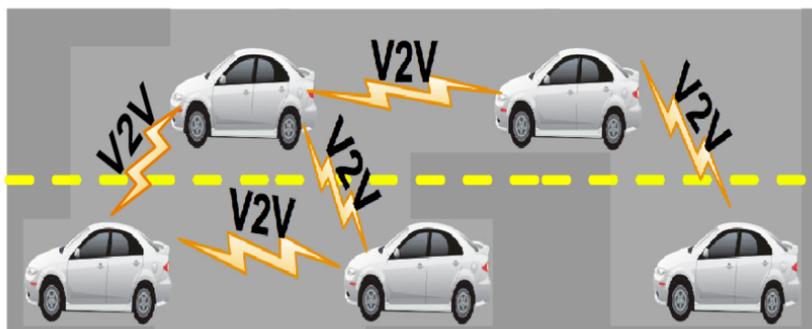


FIGURE 1.4: La communication inter-véhicule[4]

Ce mode de communication utilise le multicast ou le broadcast à multi-sauts pour transmettre les informations relatives au trafic à un groupe de récepteurs. Cette architecture est particulièrement utile dans des scénarios de diffusion d'alertes, tels que le freinage d'urgence, les collisions, les ralentissements, ou encore pour la conduite coopérative.

Il s'agit d'une communication moins coûteuse et plus flexible, car elle ne nécessite aucune infrastructure ni installation sur les routes. Tous les véhicules sont équipés pour communiquer directement entre eux, quel que soit leur emplacement.

- **La communication entre véhicule et les stations de bord de la route (V2I):**

Dans ce mode de communication V2I (Vehicle to Infrastructure), des unités RSU (Road Side Units) sont déployées le long des routes et toute communication doit passer par elles. L'architecture V2I est conçue pour transmettre des informations des véhicules vers les RSU, en utilisant soit des points d'accès Wi-Fi, soit des connexions 3G. Ces unités peuvent également offrir aux utilisateurs divers services relatifs au trafic, l'accès à Internet, l'échange de données entre le véhicule et le domicile, et même la communication entre le véhicule et le garage pour un diagnostic à distance.

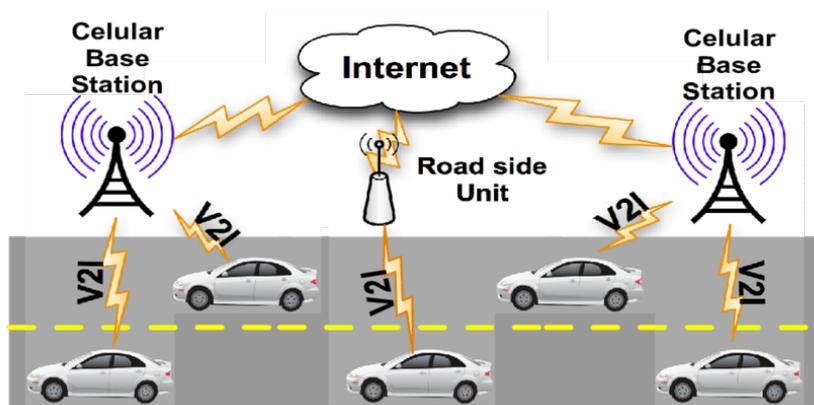


FIGURE 1.5: La communication V2I[4]

- **La communication hybride:**

La combinaison des deux types de communication, V2V et V2I, permet de créer une communication hybride particulièrement avantageuse. En effet, étant donné que la portée des infrastructures est limitée, l'utilisation des véhicules comme relais permet d'étendre cette distance. Cette approche est économiquement bénéfique, car elle évite la multiplication des bornes (RSU, Road Side Units) à chaque coin de rue. L'utilisation de véhicules intermédiaires pour des sauts de communication devient alors essentielle.

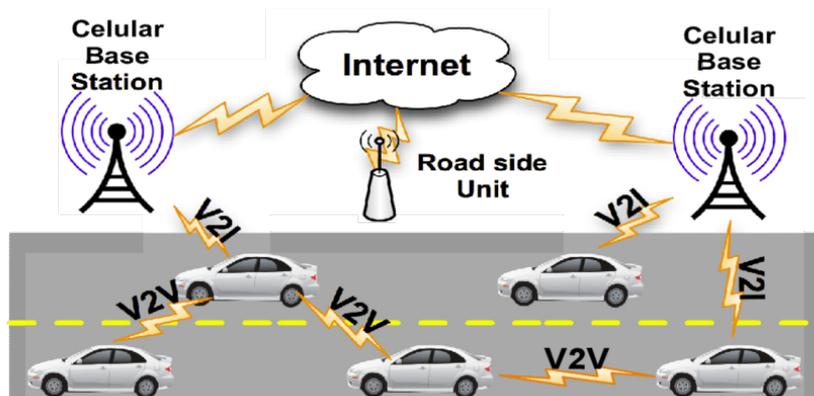


FIGURE 1.6: La communication hybride[4]

### 1.3.6 Les applications de réseau ad-hoc véhiculaire (Types d'application VANET)

- **Applications de gestion du trafic routier**

Les applications de gestion du trafic sont conçues pour améliorer les conditions de circulation en réduisant les embouteillages et les risques d'accidents. Elles fournissent aux conducteurs un soutien technique pour adapter leurs itinéraires en fonction de la situation du trafic. L'objectif de ces applications est d'équilibrer la circulation des véhicules sur les routes afin d'utiliser efficacement la capacité des infrastructures routières et des carrefours, ce qui permet de diminuer les pertes humaines, la durée des trajets et la consommation d'énergie, entre autres[15].

- **Applications de confort**

Cette catégorie regroupe toutes les applications qui contribuent au confort du conducteur sans relever de la gestion du trafic ni de la sécurité routière. Ces applications se présentent comme des services offerts au conducteur. Parmi celles-ci, on trouve des panneaux d'annonces locales de nature commerciale, tels que les offres de restaurants ou la présence de stations-service à proximité, ainsi que des informations culturelles comme la localisation des sites touristiques.

Il existe également des services télématiques, tels que le péage à distance sur autoroute ou le paiement automatique dans les stations-service, ce qui peut grandement faciliter la vie des personnes handicapées. Un autre type d'application de confort est la communication à vocation de divertissement, par exemple, une connexion Internet à bord avec vidéo à la demande.

De plus, ces applications incluent les communications point à point entre deux conducteurs voyageant ensemble, leur permettant d'échanger des messages ou de partager des données (vidéo, musique, itinéraires, jeux en réseau). La vie des usagers peut également être simplifiée par le contrôle électronique à distance du véhicule (vérification du permis de conduire, contrôle technique, plaque d'immatriculation) par les services compétents tels que la police, la douane ou la gendarmerie[15].

- **Applications de sécurité du trafic routier**

Ces applications visent à améliorer la sécurité des passagers sur les routes en avertissant les conducteurs de toute situation dangereuse. Elles reposent généralement sur la diffusion, périodique ou non, de messages informatifs permettant aux conducteurs de connaître l'état de la route et la position des véhicules environnants. Parmi les exemples courants de ces applications, on trouve les avertissements de collision, les alertes sur les conditions de la route, l'assistance au dépassement et au changement de voie, etc[15].

### 1.3.7 Les problèmes du réseau véhiculaire ad-hoc (VANET)

Les principaux défis des réseaux de capteurs véhiculaires (VANETs) comprennent[16]:

- **Routage**

Les réseaux véhiculaires (VANET) doivent relever de nombreux défis en matière de routage en raison de leur nature dynamique et de leurs caractéristiques spécifiques. Les principaux problèmes de routage dans les VANET sont les suivants :

- **Mobilité**

Les véhicules dans les VANET sont en mouvement constant, ce qui complique la découverte et le maintien des routes de manière fiable.

- **Hétérogénéité**

Les divers types de véhicules dans les VANET possèdent des capacités de communication et de traitement variables, ce qui peut entraîner des déséquilibres dans le trafic de données.

- **Densité**

La densité de véhicules dans les VANET peut fluctuer considérablement en fonction des zones géographiques et des moments de la journée, ce qui peut influencer la qualité de service (QoS). Résoudre ces problèmes de routage dans les VANET représente un défi majeur de recherche, exigeant des approches innovantes pour concevoir et mettre en œuvre des protocoles de routage adaptés aux particularités des VANET.

- **La sécurité des données**

Les VANETs doivent assurer la sécurité des données sensibles transmises, telles que les informations de position et de conduite. Des attaques telles que la falsification de messages peuvent compromettre la sécurité des réseaux.

- **La fiabilité de la communication**

Les réseaux sans fil peuvent être perturbés par diverses interférences telles que le bruit et les collisions de paquets. Les VANETs doivent assurer une communication fiable pour transmettre en temps réel des informations critiques.

- **La gestion de la bande passante**

Les VANETs produisent d'importantes quantités de données en temps réel, ce qui peut entraîner une surcharge de la bande passante. Il est donc essentiel de gérer la bande passante de manière efficace pour assurer une communication efficace.

- **L'intégration avec d'autres technologies**

Les VANETs doivent s'interconnecter avec d'autres technologies telles que les réseaux cellulaires et les systèmes de navigation GPS afin de fournir une couverture étendue et des fonctionnalités améliorées.

### 1.3.8 Les avantages et les inconvénients des VANETs

- **Les avantages**[17]
  - **Topologie dynamique**

Les nœuds des réseaux VANET (véhicules), se déplaçant à grande vitesse, modifient constamment la topologie du réseau. Cependant, les caractéristiques des VANET permettent de maintenir les communications et d'échanger des flux d'informations malgré les changements fréquents de positions des nœuds.
  - **Echange entre nœuds hétérogènes**

Les véhicules des réseaux VANET proviennent de diverses marques, et leurs composants réseau utilisent différentes techniques. Malgré cela, un échange d'informations efficace peut être réalisé grâce aux protocoles mis en place par les concepteurs du réseau.
  - **Propagation par trajet multiple**

Les informations partagées par un véhicule peuvent être reçues par tous les autres véhicules se trouvant à proximité.
  - **Relais d'informations**

Deux véhicules distants de plusieurs kilomètres peuvent échanger des informations. Ces informations envoyées depuis un nœud A sont relayées par plusieurs nœuds intermédiaires avant d'atteindre le destinataire B.
- **Les inconvénients** [17]
  - **Canal radio partagé et limité :**

Tous les nœuds utilisent un canal radio avec des fréquences spécifiques, ce qui limite le flux d'informations et réduit le débit de transmission, en particulier dans les zones urbaines denses.
  - **Faible bande passante :**

Le partage du canal restreint la bande passante disponible pour chaque nœud afin de partager les informations.
  - **Les interférences :**

Les réseaux VANET utilisent des transmissions radio pour échanger des informations, exposant ainsi les communications à diverses interférences radio. Ces interférences peuvent être de différentes natures, telles que le chevauchement des fréquences d'émission (interférences entre deux nœuds), les bruits environnementaux (provenant d'équipements électriques ou de moteurs), ainsi que les phénomènes de réflexion, d'atténuation et de dispersion qui altèrent le signal. Ces interférences augmentent le taux d'erreurs de transmission, rendant le signal incompréhensible pour le récepteur.

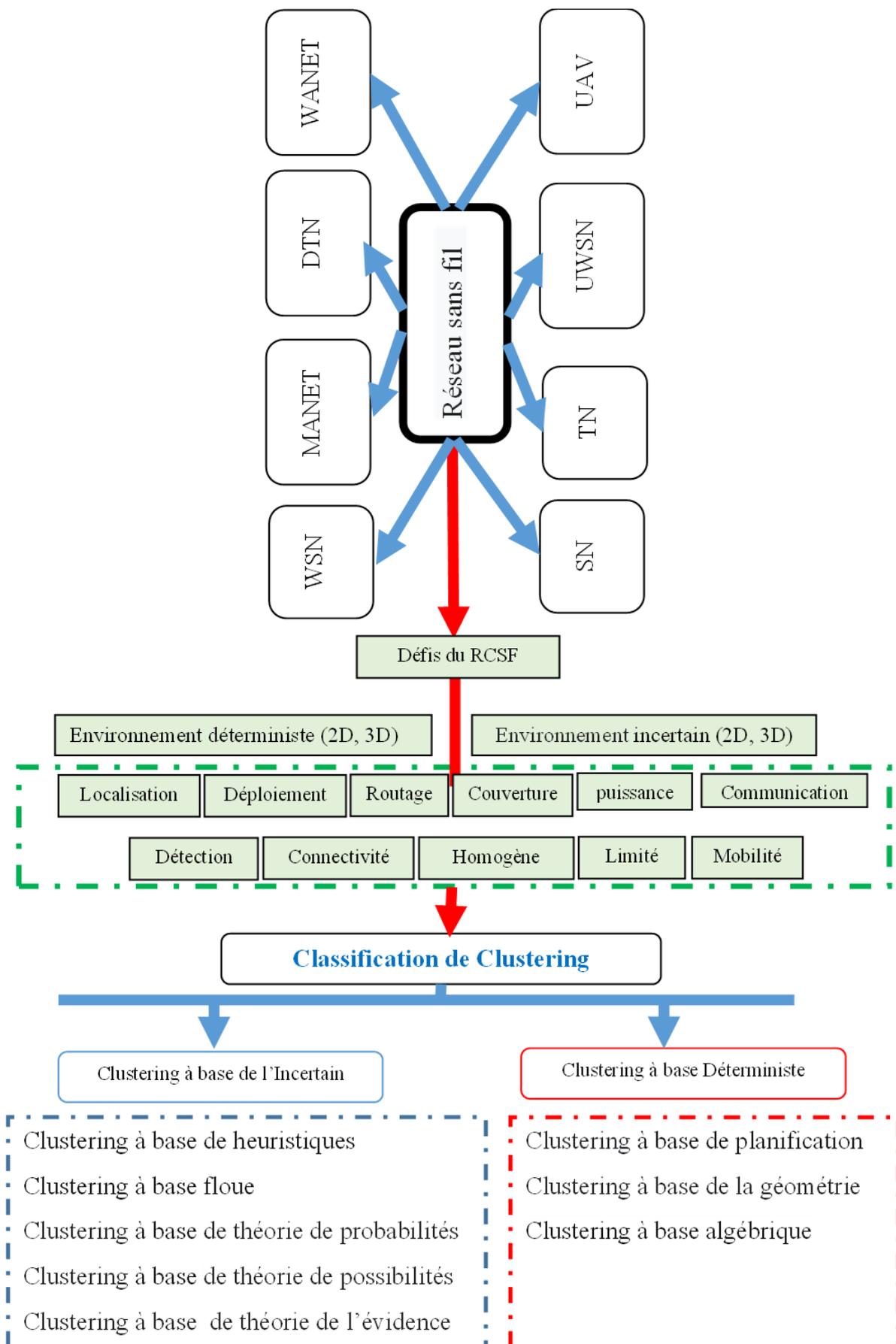


FIGURE 1.7: Notre Classification sur les réseaux Ad-hoc sans fil à base de Clustering [18], [19]

| Type du Réseau Sans fil | Type de Noeud                 | Caractéristiques   | Depl. Envir | Objectifs  |
|-------------------------|-------------------------------|--|-------------|--|
| RCSF                    | Nœuds statiques ou/et mobiles | Sert à relayer les données des capteurs de l'environnement physique vers un site central   | 2D, 3D      | Recueillir des informations sur les conditions physiques, environnementales ou pertinentes, en répartissant les données dans l'espace. Les données collectées sont ensuite transmises à un système central, ce qui permet de mesurer des facteurs environnementaux essentiels tels que la température, le son, la pollution, etc.  |
| WANET ou MANET          | Nœuds mobiles                 | Un type de réseau sans fil décentralisé. Le réseau est ad hoc car il ne dépend pas d'une infrastructure préexistante telle que des routeurs ou des points d'accès sans fil.  | 2D, 3D      | La détermination des nœuds qui vont transférer les données se fait de manière dynamique en fonction de la connectivité du réseau et de l'algorithme de routage. Chaque nœud participe au routage en transférant les données vers d'autres nœuds.   |
| VANET                   | Véhicules                     | Utilisant les ondes radio, les véhicules établissent des réseaux de communication instantanés en vol alors qu'ils se déplacent le long des routes.   | 2D          | Servir de moyen de communication entre les véhicules et l'équipement en bordure de route. Les réseaux ad hoc intelligents pour les véhicules (InVANETs) représentent une forme d'intelligence artificielle qui améliore la capacité des véhicules à manifester un comportement intelligent dans des situations telles que les collisions entre véhicules et les accidents, et il est impératif de garantir la sécurité des VANETs grâce à la mise en œuvre de protocoles légers. |
| DTN                     | Statique et Mobile noeuds     | Contrairement aux réseaux traditionnels qui supposent une connectivité continue de bout en bout, les réseaux tolérants aux retards (DTN) sont un type de réseau conçu pour fonctionner efficacement dans des situations où la connectivité réseau est intermittente ou peu fiable. Les caractéristiques clés et les fonctionnalités des réseaux tolérants aux retards comprennent la connectivité intermittente. | 2D ou 3D    | Conçus pour s'adapter aux situations où la connectivité continue entre les nœuds n'est pas garantie, permettant des retards dans la livraison des messages), les protocoles de routage (les DTN utilisent souvent des protocoles de routage spécialisés qui tiennent compte de la nature dynamique et intermittente du réseau, optimisant la livraison des messages dans des conditions difficiles).   |

TABLE 1.1: Caractéristiques des réseaux sans fil ad-hoc: Partie 1

|      |                                     |  |          |  |
|------|-------------------------------------|--|----------|--|
| UWSN | Nœuds dynamiques et nœuds statiques | Les réseaux spécialisés conçus pour la communication et l'échange de données dans les environnements sous-marins sont appelés "réseaux sous-marins".                         | 3D       | Ces réseaux se composent généralement d'une collection de capteurs sous-marins qui travaillent de manière collaborative pour collecter et transmettre des données provenant de l'environnement aquatique.              |
| UASN | Nœuds dynamiques et nœuds statiques | UASNs sont des réseaux spécialisés conçus pour la communication et l'échange de données dans des environnements sous-marins en utilisant des signaux acoustiques.            | 3D       | Ces réseaux exploitent les ondes acoustiques pour transmettre des informations entre les nœuds capteurs sous-marins, permettant ainsi une variété d'applications en océanographie et en surveillance environnementale. |
| UAV  | Mobile et statique                  | Il s'agit de systèmes de véhicules aériens sans pilote (UAV), interconnectés pour permettre la communication, la coordination et les opérations collaboratives.              | 2D       | Ces réseaux jouent un rôle crucial dans diverses applications, notamment la surveillance, la reconnaissance, l'agriculture, la réponse aux catastrophes et la recherche scientifique.                                  |
| TN   | Dynamique et Statique noeuds        | Il s'agit de systèmes de communication conçus pour les opérations militaires, offrant une connectivité fiable et sécurisée dans des environnements dynamiques et difficiles. | 2D et 3D | Ces réseaux jouent un rôle crucial dans la facilitation de la communication entre les unités militaires, en améliorant la connaissance de la situation et en soutenant la coordination des activités tactiques.        |

TABLE 1.2: Caractéristiques des réseaux sans fil ad-hoc: Partie 2

## Conclusion

Les réseaux ad hoc véhiculaires sont responsables de la communication entre les véhicules en mouvement dans un environnement donné. Un véhicule peut communiquer directement avec un autre véhicule, ce qui est appelé la communication de véhicule à véhicule (V2V), ou un véhicule peut communiquer avec une infrastructure telle qu'une unité côté route (RSU), connue sous le nom de communication de véhicule à infrastructure (V2I).

Au cours de ce Chapitre, nous avons abordé divers concepts fondamentaux des réseaux ad-hoc véhiculaires, présenté certaines applications, examiné les avantages et les inconvénients de l'utilisation des VANETs, et conclu en énumérant les problèmes associés au réseau véhiculaire ad-hoc. Après une recherche bibliographique intensive, nous avons synthétisé les travaux de la littérature dans TABLE 1.1 et TABLE 1.2 et proposer une nouvelle classification représenté par FIGURE 1.7.

TABLE 1.1 et TABLE 1.2 montrent les caractéristiques et les objectifs de chaque type de réseaux Ad-hoc sans fil. La FIGURE 1.7 illustre notre classification des réseaux Ad-hoc sans fil basés sur le clustering dans des environnements à la fois déterministes et incertains.

Dans le prochain Chapitre, nous nous intéresserons au problème du routage dans les réseaux véhiculaires ad-hoc. Nous examinerons les défis

spécifiques liés au routage dans ce type de réseau mobile et les différentes approches proposées dans la littérature pour les relever.

## **Chapitre 2**

# **Le Problème du Routage dans les Réseaux Ad-Hoc Véhiculaires**

## Chapitre 2

# Problème du Routage dans les Réseaux Véhiculaires Ad-Hoc (VANETs)

### Introduction

Les Réseaux Ad-Hoc Véhiculaires (VANETs) représentent une composante cruciale de l'évolution des systèmes de transport intelligents. Ces réseaux permettent la communication sans fil entre les véhicules et avec l'infrastructure routière, ouvrant ainsi la voie à une amélioration significative de la sécurité routière, de l'efficacité du trafic et de la gestion des véhicules. Le principal objectif des VANET est d'aider un groupe de véhicules à établir et maintenir un réseau de communication entre eux sans utiliser de station de base centralisée ni de contrôleur. Cependant, avec ces applications utiles des VANET, émergent de nouveaux défis et problèmes. Le manque d'infrastructure dans les VANET impose des responsabilités supplémentaires aux véhicules. Chaque véhicule devient une partie du réseau et gère également et contrôle la communication sur ce réseau en plus de ses propres besoins en communication. Ce chapitre débute par une introduction, laquelle sera ensuite suivie d'une description détaillée du problème de routage dans les VANETs, mettant en évidence les défis, les opportunités et les récents développements dans ce domaine en constante évolution.

## 2.1 Classification des protocoles de routage dans les réseaux VANET

### 2.1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons les réseaux Ad-Hoc véhiculaires (VANET). Nous exposerons le contexte général ainsi que les connaissances nécessaires pour comprendre le cadre de ce mémoire. Les caractéristiques, les applications pratiques des réseaux VANET, et leurs architectures de communication seront décrites. Nous aborderons ensuite les défis et les problèmes existants dans les réseaux VANET.

Cette mémoire de fin d'études se concentre sur le problème du routage dans les réseaux véhiculaires, en mettant en avant l'utilisation de la stratégie de regroupement (clustering). Le prochain chapitre sera dédié à une introduction détaillée de la problématique du routage dans les réseaux

véhiculaires ad hoc (VANET), ainsi qu'à une présentation des différentes approches employées pour développer des protocoles de routage efficaces.

Dans ce chapitre, nous présenterons un état de l'art sur le routage, en particulier le routage réactif dans les VANETs, selon le plan illustré dans la FIGURE 2.1.

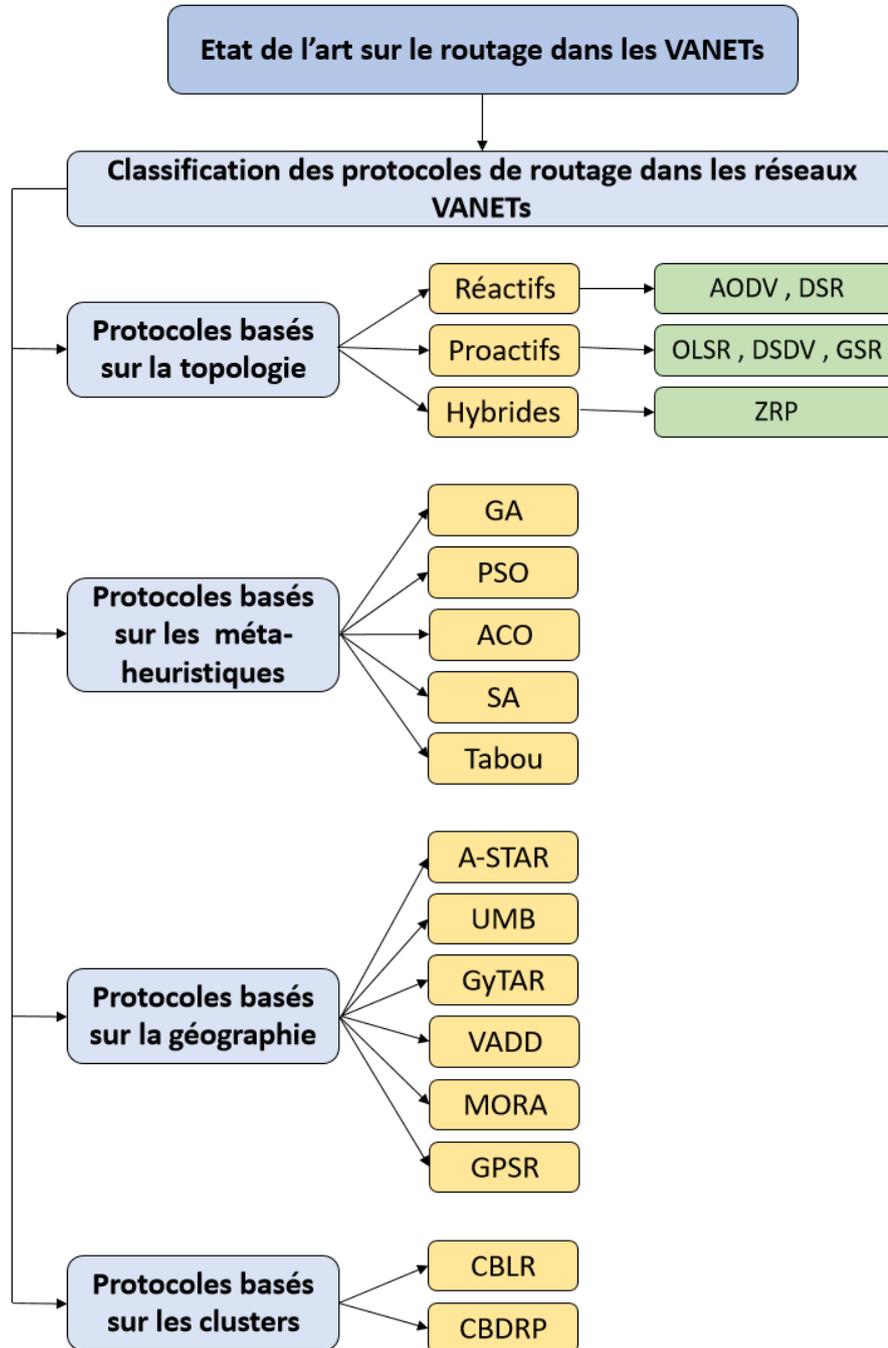


FIGURE 2.1: Plan de l'état de l'art

## 2.1.2 Protocoles basés sur la topologie

Les protocoles de routage basés sur la topologie sont des protocoles qui utilisent des informations sur la structure du réseau afin d'établir des routes. Ils maintiennent une vue d'ensemble de la topologie du réseau en échangeant régulièrement des messages de contrôle entre les nœuds. Ces informations de topologie peuvent inclure des données sur les nœuds voisins, les liens entre les nœuds et les chemins vers les destinations, entre autres. Les protocoles de routage basés sur la topologie sont souvent utilisés dans les réseaux VANET car ils sont capables de s'adapter rapidement aux changements de topologie[20]. Ces protocoles peuvent être classés en trois principales catégories :

### 2.1.2.1 Les Protocoles réactifs

Les protocoles réactifs dans les réseaux VANET sont des mécanismes de routage qui ne conservent pas d'informations de routage pour toutes les destinations potentielles. Au lieu de cela, ces protocoles établissent des routes uniquement lorsque cela est nécessaire, c'est-à-dire lorsqu'il faut transmettre des données à une destination spécifique.

Les protocoles réactifs dans les réseaux VANET (Vehicular Ad Hoc Networks) se caractérisent par le fait qu'ils ne conservent pas d'informations de routage pour toutes les destinations potentielles. Au lieu de cela, ces protocoles découvrent des routes à la demande, lorsque cela est nécessaire pour transmettre des données. Ce type de protocoles est caractérisé par:

- **Temps de Découverte de Route** Le temps de découverte de route, noté  $T_{RD}$ , est le temps nécessaire pour découvrir une nouvelle route entre un nœud source  $S$  et un nœud destination  $D$ . Ce temps peut être exprimé en fonction du délai de propagation des messages de découverte de route (RREQ) et des réponses de route (RREP) dans le réseau est définie par l'équation 2.1).

$$T_{RD} = T_{RREQ} + T_{RREP} \quad (2.1)$$

- **Nombre de Messages de Contrôle** Le nombre de messages de contrôle nécessaires pour établir une route entre le nœud source  $S$  et le nœud destination  $D$  est une mesure importante de l'efficacité d'un protocole réactif. Supposons que  $N$  soit le nombre total de nœuds dans le réseau. Le nombre de messages de contrôle échangés  $M$  est défini par équation 2.2 :

$$M_{control} = M_{RREQ} + M_{RREP} + M_{RERR} \quad (2.2)$$

où :  $M_{RREQ}$  est le nombre de messages de requête de route,  $M_{RREP}$  est le nombre de messages de réponse de route et  $M_{RERR}$  est le nombre de messages d'erreur de route.

- **Taux de Réussite de la Route** Le taux de réussite de la route, noté  $RSR$  est la proportion des requêtes de route qui aboutissent à l'établissement d'une route valide. Il peut être exprimé comme le rapport entre le nombre de routes établies avec succès  $R_{seccess}$  et le nombre total de tentatives de découverte de route  $R_{total}$ , comme il est illustré par l'équation 2.3 :

$$RSR = \frac{R_{seccess}}{R_{total}} \quad (2.3)$$

- Latence de Routage** La latence de routage, notée  $L$ , est le délai total entre l'envoi d'un message de découverte de route et la réception de la réponse de route. Cela inclut les délais de traitement à chaque nœud intermédiaire, notés  $t_{proc}$ , et les délais de transmission, notés  $t_{trans}$ .  $L$  est définie par équation 2.4:

$$L = \sum_{i=1}^n (t_{proc,i} + t_{trans,i}) \quad (2.4)$$

où  $n$  est le nombre de nœuds intermédiaires entre la source et la destination.

Parmi les protocoles de routage réactifs les plus couramment utilisés dans les réseaux véhiculaires ad hoc (VANETs), on peut citer les suivants :

- AODV (Ad-hoc On-Demand Distance Vector):**

est un protocole réactif où les nœuds acheminent les paquets en se basant sur leurs tables de routage respectives. Chaque nœud maintient sa propre table de routage, qui indique pour chaque destination le nœud suivant à utiliser comme relais.

Lorsque le nœud source souhaite établir une route, il déclenche une opération de découverte en diffusant un paquet RREQ (Route Request) indiquant sa requête. Lorsqu'un autre nœud reçoit ce paquet, il vérifie sa table de routage pour voir s'il possède une entrée vers la destination (ou s'il est lui-même la destination). Si c'est le cas, il envoie un paquet RREP (Route Reply) au nœud source, arrêtant ainsi la diffusion du RREQ. Sinon, il retransmet la requête à ses voisins et enregistre dans sa table de routage le nœud d'où provient la requête comme relais pour atteindre le nœud source.

En cas de rupture de lien, un message RERR (Route Error) est envoyé au nœud source, qui décide alors de retenter ou non l'envoi du paquet. [21]. FIGURE 2.2 montrent la procédure de découverte d'une route entre un nœud source et destination. Les deux paquets RREQ et RREP sont utilisés dans cette procédure.

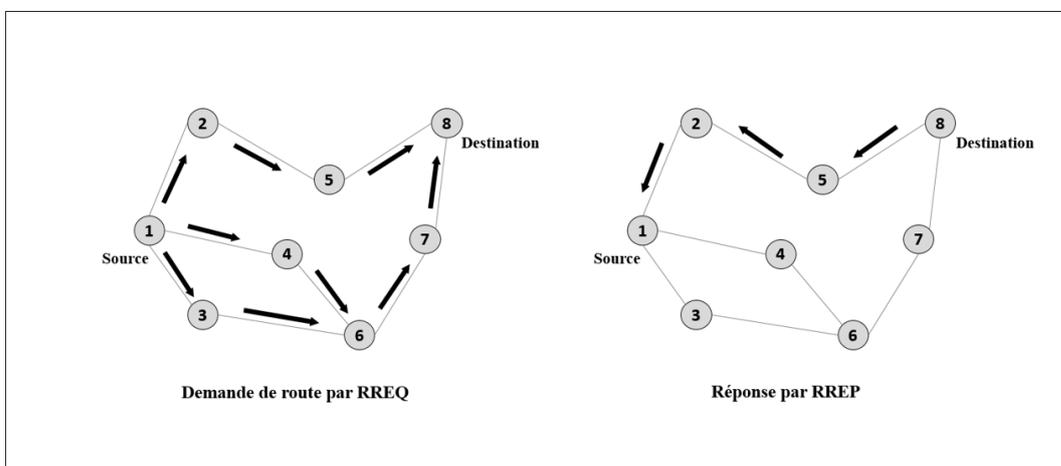


FIGURE 2.2: Procédure de découverte de route dans AODV

- **DSR (Dynamic Source Routing)**

Le DSR (Dynamic Source Routing) est un protocole de routage à la demande conçu pour les réseaux ad hoc sans fil. Il permet à un nœud de découvrir dynamiquement le chemin optimal vers une destination en utilisant une approche de requête-réponse. Lorsqu'un nœud souhaite envoyer un paquet à une destination, il diffuse une requête RREQ (Route Request) à ses voisins pour trouver un chemin. Les nœuds recevant cette requête peuvent soit répondre directement s'ils connaissent une route vers la destination, soit transmettre la requête à leurs propres voisins pour étendre la recherche.

Une fois que le nœud source reçoit une réponse RREP (Route Reply) de la part de la destination ou d'un nœud intermédiaire ayant une route valide, il peut commencer à envoyer les paquets de données en suivant le chemin découvert. Le DSR utilise également des mécanismes de mise en cache pour éviter de répéter la découverte de route pour les destinations déjà connues. Ainsi, lorsqu'un nœud découvre une route vers une destination, il peut stocker cette information dans sa mémoire cache, améliorant ainsi l'efficacité des communications futures.[22].

### 2.1.2.2 Les Les Protocoles proactifs

Les protocoles proactifs, également connus sous le nom de protocoles basés sur des tables, sont des protocoles de routage qui maintiennent une table de routage à jour pour chaque nœud du réseau. Ces tables contiennent des informations sur les voisins immédiats ainsi que sur les nœuds distants accessibles via ces voisins. Ainsi, chaque nœud est capable de calculer des chemins vers toutes les destinations possibles du réseau sans avoir besoin d'attendre une requête de routage spécifique.

Les protocoles de routage proactifs dans les réseaux véhiculaires ad hoc (VANETs) maintiennent en permanence des informations de routage pour chaque nœud du réseau, même si certaines routes ne sont pas utilisées. Ce type de protocoles est caractérisé par [23] :

- **Table de Routage** Une table de routage  $T_i$  pour un nœud  $i$  dans un VANET peut être représentée par l'équation 2.5 :

$$T_i = \{(d_j, n_j, c_{ij}) \mid j \in N, n_j \in N, c_{ij} \in R^+\} \quad (2.5)$$

où  $d_j$  est le nœud de destination,  $n_j$  est le prochain saut vers la destination  $d_j$ , et  $c_{ij}$  est le coût (comme la distance ou le temps) de  $i$  à  $d_j$  via  $n_j$ .

- **Mise à jour Périodique** Les protocoles proactifs envoient périodiquement des messages de mise à jour pour maintenir les tables de routage. La fréquence de mise à jour peut être définie par une période  $\Delta t$ . Si  $(R_t)$  représente la table de routage à l'instant  $t$ , alors après une mise à jour, la table devient (équation 2.6) :

$$R(t + \Delta t) = Update(R(t)) \quad (2.6)$$

où  $Update(R(t))$  est la fonction de mise à jour appliquée à  $R(t)$ .

- **Algorithme de Dijkstra** L'algorithme de **Dijkstra** peut être utilisé pour calculer le chemin le plus court entre les nœuds. Si  $G = (V, E)$  est le graphe représentant le réseau avec  $V$  l'ensemble des nœuds et  $E$  l'ensemble des liens, le coût  $c_{ij}$  pour aller du nœud  $i$  au nœud  $j$  peut être exprimé comme l'équation 2.7 :

$$\text{minimize}(i, j) \sum_{(i,j) \in E} c_{ij} \quad (2.7)$$

- **Convergence et Stabilité** La convergence d'un protocole proactif est le temps  $T_c$  nécessaire pour que toutes les tables de routage soient synchronisées après un changement. Si  $t_i$  est le temps où le nœud  $i$  reçoit la dernière mise à jour nécessaire pour la convergence, alors (équation 2.8):

$$T_c = \max_{i \in V} (t_i) \quad (2.8)$$

où,  $V$  l'ensemble des nœuds dans  $E$ .

- **Fonction de Coût** La fonction de coût  $c_j$  peut intégrer plusieurs facteurs tels que la distance, le temps de transmission, ou le nombre de sauts (équation 2.8):

$$c_{ij} = w_1 \times \text{distance}(i, j) + w_2 \times \text{temps}(i, j) + w_3 \times \text{saut}(i, j) \quad (2.9)$$

où  $w_1, w_2, w_3$  sont des poids ajustables en fonction des priorités du réseau.

Parmi les protocoles de ce type, on cite :

- **Le protocole OLSR**

Ce protocole introduit des nœuds désignés sous le nom de « multi-relais », qui sont les seuls à posséder des tables de routage complètes. Cette approche permet de réduire la diffusion excessive et le gaspillage de bande passante, comparativement au protocole DSDV[24].

- **Le protocole DSDV**

Il utilise l'algorithme de vecteur de distance pour déterminer le chemin optimal entre le nœud source et le nœud destinataire. La mise à jour des tables de routage s'effectue soit périodiquement, grâce à des minuteries, soit en réaction à des événements tels qu'une dégradation de la qualité de connexion, des délais excessifs ou la perte de liens.[25].

- **Le protocole GSR**

Le protocole GSR (Global State Routing) est un protocole proactif basé sur l'état des liens, où chaque nœud connaît la topologie globale du réseau, ce qui lui permet de calculer les routes vers chaque destination.

Contrairement aux autres protocoles à état de liens, dans GSR, les nœuds ne diffusent pas leurs états de liens à l'ensemble du réseau, mais se limitent à les envoyer uniquement à leurs voisins immédiats. Cela permet de réduire le trafic des paquets de contrôle. Cependant, GSR présente des inconvénients, notamment la taille des paquets de mise à jour (table de topologie), qui peut devenir importante si le réseau contient un grand nombre de nœuds. De plus, il souffre d'une certaine lenteur dans la détection des changements de topologie.[25].

**Comparaison entre Les protocoles Proactifs et Réactifs :**

Dans cette section, Nous vous cité une comparaison des protocoles de routage réactifs et proactifs dans les réseaux VANET. TABLE 2.1 illustre les différences et les points forts/faibles de chaque type de protocole de routage dans les réseaux VANET.

| Critère                           | Protocoles Réactifs   | Protocoles Proactifs   |
|-----------------------------------|---|--|
| <b>Principe de Fonctionnement</b> | Découverte de routes à la demande, routes établies quand nécessaire   | Maintenance de tables de routage actualisées périodiquement  |
| <b>Fiabilité de Routage</b>       | Plus fiables dans des environnements dynamiques avec changements fréquents  | Routes immédiatement disponibles, mais risque d'utiliser des routes obsolètes                              |
| <b>Connectivité</b>               | Potentiellement affectée par les délais initiaux de découverte de route, mais stable une fois les routes établies | Maintient une connectivité constante avec une surcharge de contrôle importante                             |
| <b>Sécurité</b>                   | Sécurité par obscurité, routes découvertes uniquement au moment du besoin   | Plus vulnérables aux attaques comme le "man-in-the-middle" et la falsification des tables de routage       |
| <b>Surcharge de Routage</b>       | Faible surcharge car les routes ne sont maintenues que lorsqu'elles sont nécessaires                              | Surcharge élevée due aux mises à jour périodiques des tables de routage                                    |
| <b>Adaptabilité à la Mobilité</b> | Bien adapté aux environnements avec haute mobilité  | Moins efficace dans les environnements hautement mobiles en raison des fréquentes mises à jour nécessaires |
| <b>Délais de Transmission</b>     | Délais initiaux élevés dus à la découverte de route   | Routes immédiatement disponibles, minimisant les délais de transmission                                    |
| <b>Complexité de Gestion</b>      | Moins complexe à gérer en termes de contrôle de routage   | Complexité élevée en raison des mises à jour constantes des tables de routage                              |

TABLE 2.1: Comparaison de protocoles de routage dans les réseaux VANET en termes de points forts/faibles

### 2.1.2.3 Les Les Protocoles hybrides

Les protocoles hybrides sont des protocoles de routage qui combinent les caractéristiques des protocoles proactifs et réactifs. Leur objectif est de trouver un équilibre optimal pour améliorer les performances du réseau. Ces protocoles utilisent une approche proactive pour maintenir une topologie partielle du réseau et une approche réactive pour établir des routes en fonction des demandes de routage. Cette stratégie permet de mettre à jour rapidement les changements de topologie du réseau, tout en évitant la surcharge liée à une mise à jour constante de la topologie. Les protocoles hybrides sont largement utilisés dans les réseaux VANETs pour offrir un routage fiable et efficace dans des applications en temps réel.[20], telles que la sécurité routière et la gestion de la circulation (FIGURE 2.2).

- **Le protocole ZRP** ZRP ( Protocole de zone de routage ). est un modèle hybride entre un schéma proactif et un Schéma réactif. Il est basé sur deux procédures : le protocole de routage intra zone, nommé ARP et le protocole de routage interzone, nommé IERP [26].

Le ZRP a été conçu pour accélérer la livraison et réduire la surcharge de traitement en sélectionnant le type de protocole le plus efficace à utiliser tout au long de l’itinéraire. [27]

|                                 | Avantages  | Inconvénients  |
|---------------------------------|--|--|
| <b>Les Protocoles proactifs</b> | * Pas de retard de découverte d’une nouvelle route                               | * Haute consommation de bande passante.<br>Stockage inutile de certaines informations.         |
| <b>Les Protocoles réactifs</b>  | * Réduit le surcout du message de contrôle.<br>* Consomme peu de bande passante. | * Retard lors de la création d’une route.  |
| <b>Hybride</b>                  | * Plus rapide que le réactif.<br>* Moins coûteux que le proactif.                | * Création et maintenance des zones et une tâche complexe et coûteuse dans les réseaux mobiles |

TABLE 2.2: Avantages et Inconvénients des routages proactif et réactif

### 2.1.3 Protocoles de routage à base heuristiques

Cette section discute quelques protocoles utilisés dans le routage dans les VANETs [28].

- **GA (Algorithme génétique) :**
  - Adaptabilité : Capacité à s’ajuster dynamiquement aux variations de la topologie du réseau.
  - Exploration de l’espace de solutions : Permet une exploration efficace et approfondie d’un vaste ensemble de solutions potentielles.

- Optimisation globale : Capable de converger vers des solutions optimisant les performances globales du réseau.
- **PSO (Optimisation par essaim de particules):** approche algorithmique s’inspirant du comportement coopératif observé chez les membres d’un essaim :
  - Adaptabilité dynamique :Le PSO s’adapte de manière dynamique aux changements de topologie et aux conditions du réseau ad-hoc, offrant ainsi une réactivité efficace face aux variations de l’environnement.
  - Facilité d’implémentation : L’algorithme PSO est relativement simple à implémenter, ce qui en fait une option attrayante pour les applications de routage dans les réseaux ad-hoc, où la complexité algorithmique peut être un facteur déterminant.
  - Réduction du risque de blocage : Le PSO, en analysant dynamiquement plusieurs solutions de routage potentielles, aide à s’adapter plus efficacement aux variations du réseau. Ainsi, cette méthode contribue à améliorer la fiabilité et la réactivité des communications dans ce type d’environnements réseau instables et changeants.
- **ACO (Colonie de fourmis):** Inspirée par le comportement des fourmis dans la nature, cette méthode d’optimisation est utilisée pour identifier des chemins efficaces et adaptatifs entre les nœuds (véhicules) d’un réseau dépourvu d’infrastructure préétablie.
  - Adaptabilité dynamique :L’ACO offre aux nœuds du réseau une capacité d’adaptation aux changements dynamiques, tels que les défaillances de nœuds ou les variations de la topologie du réseau.
  - Optimisation locale et globale :Grâce à l’utilisation d’informations locales (phéromones), l’ACO favorise la prise de décision décentralisée au niveau des nœuds individuels.
  - Robustesse : Du fait de sa nature décentralisée, l’ACO possède une robustesse intrinsèque face aux défaillances locales.
- **SA (Recuit simulé):**Inspiré du processus de recuit utilisé en métallurgie, cet algorithme d’optimisation stochastique est employé pour résoudre les problèmes de routage dans les réseaux ad hoc.
  - Adaptabilité aux Changements Dynamiques: permet d’ajuster les solutions de routage en fonction de ces changements, offrant ainsi une adaptabilité nécessaire.
  - Optimisation Globale : le Recuit Simulé favorise la recherche de solutions globales plutôt que de s’en tenir à des solutions locales optimales.
  - Réduction du Risque de Blocage : La probabilité d’acceptation de solutions sub-optimales contribue à éviter les blocages dans la recherche, permettant ainsi à l’algorithme de sortir d’une solution locale sous-optimale pour rechercher des alternatives potentiellement meilleures.

- **Algorithme de recherche tabou:** (Tabu Search) est une technique d'optimisation heuristique utilisée pour résoudre des problèmes complexes d'optimisation.
  - Adaptabilité aux changements dynamiques : Les VANET sont définis par des conditions de réseau en constante évolution en temps réel. L'algorithme de recherche tabou peut rapidement s'ajuster à ces changements, proposant ainsi des solutions efficaces même dans des environnements dynamiques.
  - Efficacité en temps réel : La rapidité et l'itérativité de l'algorithme dans la fourniture de solutions de routage sont essentielles dans les environnements où l'établissement de la communication entre les véhicules doit être réalisé de manière efficace.
  - Robustesse : ans les VANET, où les conditions de réseau peuvent être imprévisibles, la robustesse de l'algorithme de recherche tabou face aux perturbations ou aux imprécisions des informations revêt une importance cruciale.

#### 2.1.4 Protocoles de routage basés sur la géographie

es protocoles de routage géographique sont spécifiquement conçus pour s'adapter aux réseaux ad hoc de véhicules. Ils exploitent les données géographiques des nœuds pour calculer les chemins les plus efficaces, optimisant ainsi la communication dans un environnement dynamique tel que celui des véhicules. [29]. Les protocoles basés sur ce principe sont :

- **Le protocole A-STAR:** A-STAR (Anchor-based Street and Traffic Aware Routing) est un protocole de routage basé sur la position, spécifiquement adapté aux environnements de veille des systèmes de communication entre véhicules. Il garantit une connectivité optimale pour la transmission des paquets en exploitant la circulation des véhicules et en tirant parti des informations fournies par les bus urbains pour assurer une connexion de bout en bout. [30].
- **Le protocole UMB:** Le protocole de routage UMB (Urban Multi hop Broadcast Protocol) est une solution efficace, basée sur la norme 802.11, qui repose sur un algorithme de diffusion multi-saut. Conçu spécifiquement pour les réseaux inter-véhiculaires disposant d'une infrastructure de support, son objectif est de minimiser les collisions et d'optimiser l'utilisation de la bande passante. Contrairement aux approches de diffusion par inondation, UMB délègue les opérations d'envoi et de reconnaissance des paquets aux nœuds les plus éloignés, sans nécessiter une connaissance préalable de la topologie du réseau.[31].

**UMB est décomposé en deux phases :**

La première phase, nommée diffusion directionnelle, consiste en ce que le véhicule source sélectionne un nœud dans la direction de diffusion pour relayer les données, sans avoir besoin d'informations préalables sur la topologie.

La deuxième phase, appelée diffusion aux intersections, vise à disséminer les paquets dans toutes les directions. Pour ce faire,

UMB utilise des répéteurs installés aux intersections afin d'envoyer les paquets vers tous les segments. Il est supposé que chaque véhicule est équipé d'un récepteur GPS (Global Positioning System) et d'une carte routière électronique. Le principal avantage du protocole UMB réside dans sa fiabilité de diffusion multi-saut dans les environnements urbains.[32][33].

- **Le protocole GyTAR**

Le protocole de routage GyTAR (improved Greedy Traffic-Aware Routing protocol) est un protocole géographique basé sur la localisation et spécialement conçu pour les réseaux véhiculaires. Il vise à découvrir des chemins robustes dans des environnements urbains. L'objectif principal de ce protocole est de router les données de manière itérative en tenant compte des divers facteurs propres à ce type d'environnements ou de réseaux , [34].

Ce protocole repose sur l'hypothèse selon laquelle chaque véhicule dispose de sa position actuelle grâce à un système GPS. De plus, un nœud source est censé connaître la position du destinataire afin de pouvoir prendre des décisions de routage. Cette information est fournie par un service de localisation tel que GLS (Grid Location Service), qui peut également déterminer la position des intersections voisines grâce à des cartes numériques.[35].

- **Le protocole VADD**

VADD (Vehicule-Assisted Data Delivery) est un protocole de routage qui tient compte du contexte des réseaux de véhicules et exploite les mouvements prévisibles des véhicules pour décider de relayer ou non les messages. Il se base notamment sur les informations relatives au trafic routier au niveau d'une route pour estimer le délai nécessaire à un paquet pour parcourir un tel segment. Ainsi, les paquets sont acheminés le long d'un chemin offrant le délai de bout en bout le plus court[36].

- **Le protocole MORA**

MORA (MOvement-based Routing Algorithm) exploite la position et la direction de mouvement des véhicules pour ajuster les décisions de retransmission en fonction du contexte des véhicules. Cela permet de répondre efficacement à la forte mobilité des nœuds et aux changements fréquents de la topologie[37].

- **Le protocole GPSR**

GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing) opte pour un nœud se trouvant le plus proche de la destination finale en se basant sur une balise. En cas d'échec, il utilise un algorithme de transfert glouton et fait également appel à un renvoi périmétrique pour choisir un nœud par lequel le paquet peut passer[38].

### 2.1.5 Protocoles de routage à base de clustering

Dans ce type de protocoles, les véhicules proches les uns des autres forment des clusters. Chaque cluster est doté d'un Chef de Cluster (CH), chargé de

gérer les communications intra et inter-cluster. Les nœuds au sein d'un même cluster communiquent directement entre eux, tandis que la communication entre différents clusters s'effectue via les CHs de chaque cluster [39].

- **Avantages :**

- En raison de la grande dynamique de mobilité des réseaux VANET, la formation de groupes apparaît comme une solution efficace pour maintenir les connexions entre les véhicules.
- La stratégie de clustering réduit les coûts de livraison des paquets de données pendant leur transport.

- **Inconvénients :**

- Des retards de livraison des paquets de données pendant le transport, principalement dus à des problèmes de gestion.
- Le choix du Cluster Head (CH) est une problématique majeure.

- **Exemple :**

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

Le protocole de routage réactif repose sur une organisation en groupes. Chaque chef de groupe conserve une table de routage comprenant les adresses et les localisations géographiques des nœuds de son propre groupe ainsi que des nœuds passerelles, en plus de maintenir une table de routage des groupes voisins. Lorsqu'une source souhaite envoyer des données à une destination, le chef de groupe vérifie d'abord si la destination se trouve dans le même groupe ou non. Si tel est le cas, il transmet le paquet au nœud voisin le plus proche de la destination. Dans le cas contraire, la source stocke le paquet de données dans son tampon.

Le CBLR est spécifiquement conçu pour les réseaux à haute mobilité, car il actualise la localisation de la source et de la destination à chaque nouvelle transmission de données[40].

- **Le protocole CBDRP (Cluster-Based Directional Routing Protocol) :** Cluster-Based Directional Routing Protocol est un Le protocole de routage directionnel basé sur les groupes fonctionne en divisant les véhicules en groupes, où ceux qui se déplacent dans la même direction forment un cluster. L'émetteur envoie le paquet au chef de son groupe, qui le transmet ensuite au chef du groupe de destination, lequel le transmet à la destination. Le CBDRP prend en compte la vitesse et la direction du véhicule[40][41].

## Conclusion

Le routage constitue l'un des problèmes les plus importants pour améliorer la qualité de service, renforcer la sécurité et favoriser la conduite automatique sans accidents dans les réseaux de VANET. Cela implique de surmonter les problèmes de congestion et de trouver les chemins libres et sécurisés appropriés.

Ce Chapitre offre une description détaillée du problème de routage dans les VANETs, mettant en évidence les défis, les opportunités et les récents développements dans ce domaine en constante évolution.

Le prochain chapitre abordera l'exécution de notre stratégie proposée, mettant en lumière la conception, les méthodes et fonctions employées.

# **Chapitre 3**

## **Conception & Réalisation**

## Chapitre 3

# Conception et Réalisation

### Introduction

Nous avons identifié plusieurs types de modèles de simulation, les distinguant tous les types de réseaux Ad-hoc sans fil. Pour mettre en œuvre notre solution, nous avons opté pour l'utilisation d'un outil de simulation spécifique, à savoir MATLAB. Cette décision découle de notre analyse des simulateurs existants pour les VANETs tels que NS-2, TOSSIM, et OPNET. Ces derniers se sont révélés souvent trop complexes, difficiles à maîtriser dans les délais impartis (étant donné la date de début du projet), et peu adaptés à nos besoins spécifiques.

Par ailleurs, il existe plusieurs simulateurs dédiés aux réseaux VANET [42], mais notre choix s'est orienté vers MATLAB pour ses capacités de modélisation flexibles et sa relative facilité de prise en main pour nos besoins de simulation.

Quelques simulateurs couramment utilisés pour la simulation du routage dans les réseaux véhiculaires Ad-hoc sans fil :

- **NS-3 (Network Simulator-3)** : NS-3 est un simulateur de réseau open source largement utilisé pour la simulation de réseaux sans fil, y compris les réseaux véhiculaires Ad-hoc. Il offre une grande flexibilité pour la modélisation des protocoles de routage et des scénarios de mobilité.
- **OMNeT++** : OMNeT++ est un autre simulateur de réseau open source qui prend en charge la simulation de réseaux véhiculaires Ad-hoc. Il offre un cadre de simulation modulaire et extensible pour la modélisation précise des protocoles de routage et des comportements des véhicules.
- **SUMO (Simulation of Urban MObility)** : SUMO est un simulateur de mobilité spécifiquement conçu pour la simulation des réseaux véhiculaires et de la circulation routière. Bien qu'il soit principalement utilisé pour la modélisation de la mobilité, il peut être intégré à d'autres simulateurs pour étudier le routage dans les VANET.
- **VEINS (Vehicles in Network Simulation)** : Veins est une extension pour OMNeT++ qui se concentre spécifiquement sur la simulation des réseaux véhiculaires. Il offre des fonctionnalités avancées pour la modélisation du mouvement des véhicules, des interactions entre les véhicules et les infrastructures, et des protocoles de routage.
- **MATLAB/Simulink** : Bien que principalement utilisé pour des applications de modélisation et de simulation dans divers domaines,

MATLAB peut également être utilisé pour simuler le routage dans les réseaux véhiculaires Ad-hoc. Il offre une grande flexibilité pour la modélisation des algorithmes de routage et des comportements des véhicules.

Ces simulateurs offrent différents niveaux de fonctionnalités et de flexibilité, et le choix dépend souvent des besoins spécifiques de la simulation et de la préférence de l'utilisateur en termes d'interface et de langage de programmation.

### 3.1 Choix de MATLAB

MATLAB, développé par MathWorks, est un logiciel de calcul numérique largement plébiscité. Il est disponible sur différentes plateformes et est reconnu pour sa simplicité d'utilisation et son efficacité. Son nom est un acronyme de "MATrix LABoratory", soulignant son optimisation pour le traitement des matrices.

Par rapport aux anciens langages de programmation comme le C, le Pascal, le Fortran ou le Basic, MATLAB offre une syntaxe beaucoup plus concise pour les calculs numériques. Il simplifie également la programmation en optimisant le code grâce à ses fonctions prédéfinies. Une des caractéristiques majeures de MATLAB est la capacité à traiter les matrices comme des variables simples.

MATLAB offre une gamme complète d'outils pour la modélisation, la simulation et l'analyse des réseaux VANET (Vehicular Ad hoc NETWORK). Grâce à ses fonctionnalités avancées, les chercheurs peuvent modéliser avec précision la mobilité des véhicules, concevoir et évaluer des protocoles de communication spécifiques aux VANETs, analyser les performances du réseau en termes de taux de livraison des messages, de délai de bout en bout et d'autres métriques critiques, et même implémenter des techniques de traitement du signal pour améliorer la fiabilité de la communication. MATLAB est donc un outil essentiel pour les ingénieurs et les chercheurs travaillant sur le développement et l'optimisation des réseaux VANETs, offrant à la fois puissance et flexibilité pour répondre aux besoins divers de ce domaine en évolution rapide (FIGURE 3.2)[43].

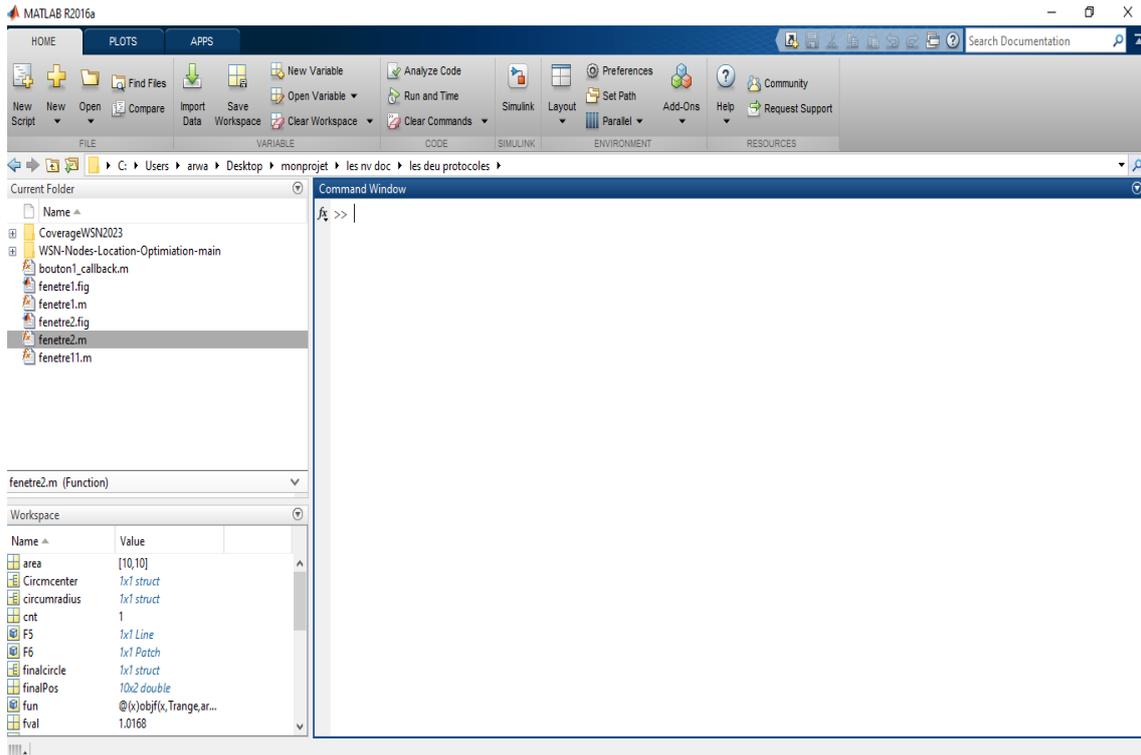


FIGURE 3.1: Présentation du Simulateur MATLAB.

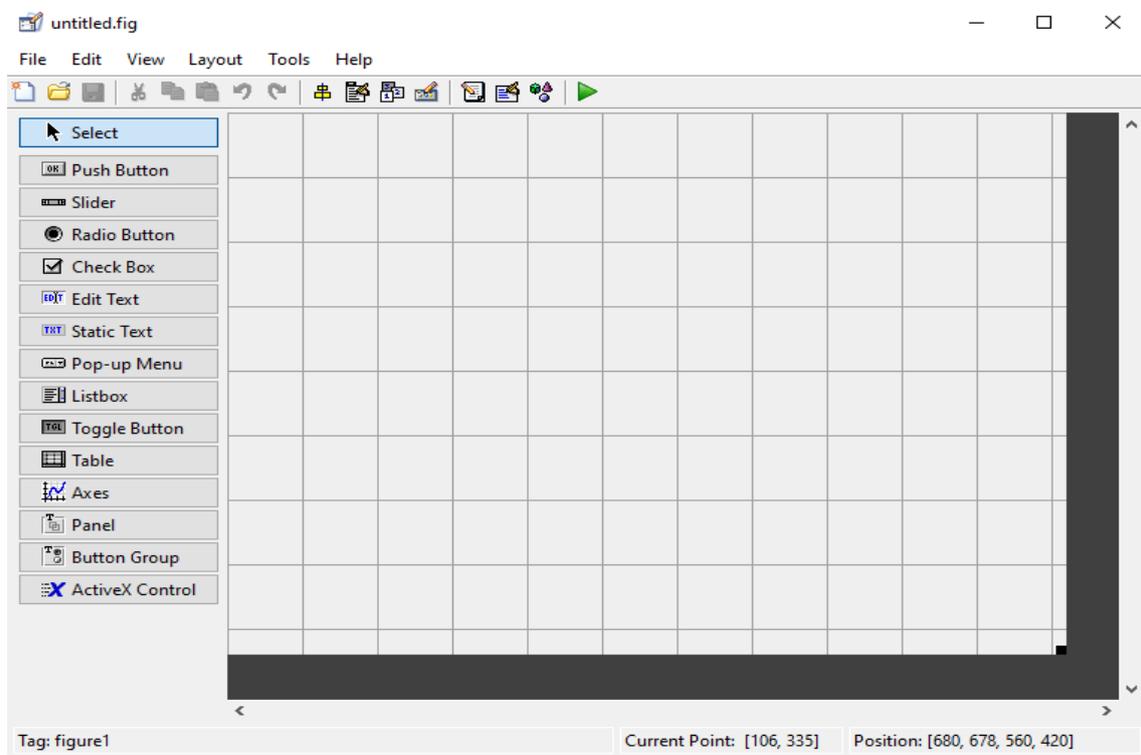


FIGURE 3.2: Menu Principal (GUI) du MATLAB.

## 3.2 Les principales phases d'un protocole VANET à base clustering:

Les protocoles de réseau véhiculaire ad hoc (VANET) peuvent varier en fonction de leur conception spécifique. Dans ce contexte, les étapes générales impliquées dans un protocole typique de VANET sont les suivantes[44]:

- **Étape 1: Initialisation:**

Les véhicules participants initialisent leurs paramètres et établissent des communications avec d'autres véhicules à portée. Cela peut inclure l'échange de données de localisation, d'identifiants et d'autres informations nécessaires à la formation de clusters.

- **Étape 2: Formation des clusters statiques:**

Un clustering statique est utilisé pour former des clusters de véhicules en fonction de leur proximité géographique.

- **Étape 3: Sélection des Chefs de Clusters (Chs):** Dans le processus d'estimation de chefs de clusters. Chaque zone, les véhicules sont initialement divisés pour estimer le nœud avec la taille de tampon maximale, puis la distance entre le nœud source et le nœud destination dans chaque zone est calculée.

- **Étape 4: Clustering à base de poids:**

Les nœuds véhiculaires sont regroupés en clusters en fonction de leurs poids (paramètres) estimés, basés sur des critères tels que la vitesse et la taille du tampon de chaque nœud, la stabilité du nœud, etc. Nous regroupons les nœuds dans chaque zone séparément. Ainsi, chaque zone a des membres de cluster et un chef de cluster. Le nombre de chefs de cluster attribué est basé sur la valeur nombre de chefs de clusters (nCH). Chaque nœud a une position  $(x_1, y_1), (x_2, y_2) \dots (x_N, y_N)$ .

Chaque nœud de zone indique  $[x_i, y_i]$  tel que La position centrale de la zone est indiquée par  $[z_x + 50, z_y + 50]$

La Distance de position (D) euclidienne entre  $[x_1, y_1]$  et  $[x_2, y_2]$  est définie par l'équation 3.1

$$D = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (3.1)$$

- **Étape 5: Formation des clusters dynamiques:**

Les clusters sont constitués dynamiquement en désignant un Chef de Cluster (CH) pour chaque groupe chaque période de temps. Le CH est responsable de la coordination des communications et de la prise de décisions au sein de son cluster.

- **Étape 6: Mise à jour de Sélection du CH:**

La sélection dynamique et la mise à jour des têtes de cluster (Cluster Head) se basent sur des critères tels que la disponibilité des ressources, la stabilité de la connexion et la mobilité du véhicule (dans notre cas d'étude, nous avons utilisé la distance). Maintenir des têtes de cluster efficaces revêt une importance capitale afin de garantir une communication fluide et une gestion optimale du cluster;

- **Étape 7: Routage:**

Une fois que les chefs de cluster sont formés et validés, les données sont transmises de la source à la destination. Dans un premier temps, la distance entre chaque chef de cluster est calculée, et si cette distance dépasse la portée du capteur, la fiabilité de la liaison est considérée comme infinie. Nous avons utilisé l'algorithme de Dijkstra pour calculer le plus court chemin pour le routage. Le chemin de routage est estimé en minimisant le coût total.

Ces étapes d'un protocole de routage réactif dans VANET à base de clustering permettent d'organiser le réseau VANET de manière efficace pour un routage efficace, en améliorant la communication et la gestion des véhicules connectés (FIGURE 3.3).

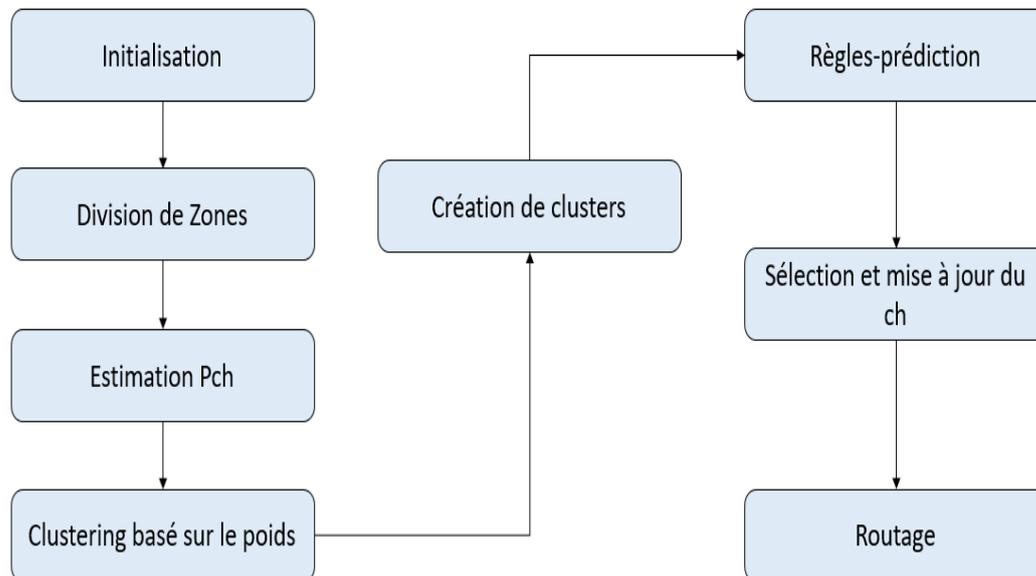


FIGURE 3.3: Étapes du protocole VANET à base clustering .

### 3.3 Description :

FIGURE 3.4 représente les principales fonctions utilisées dans la partie source.

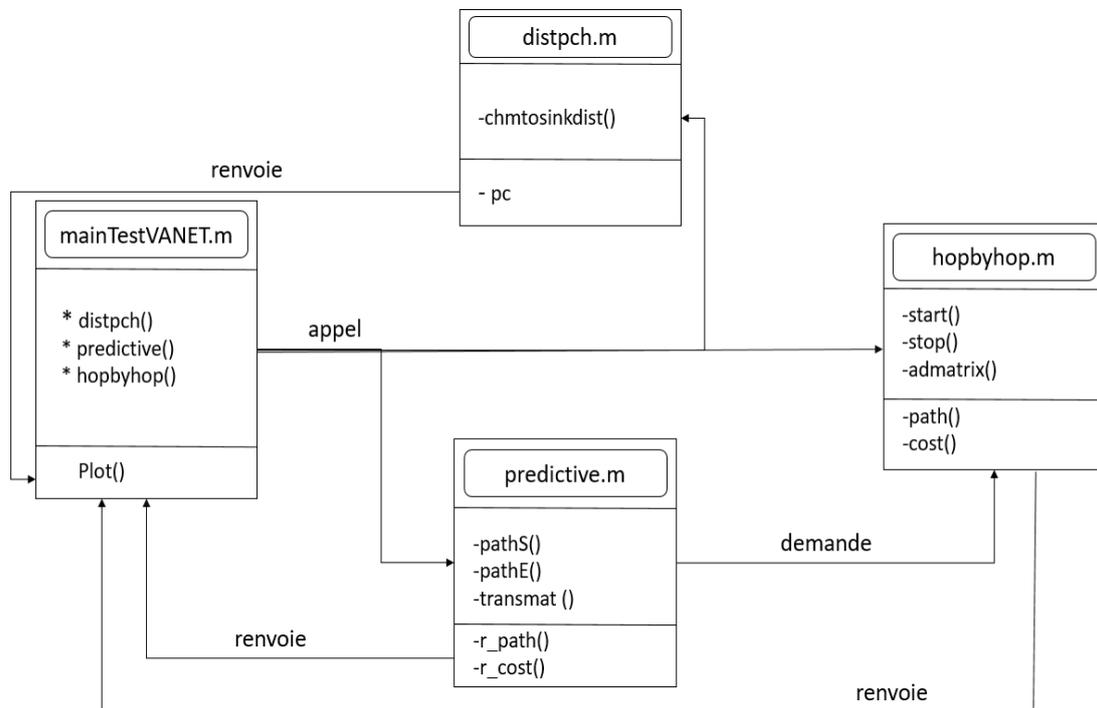


FIGURE 3.4: La Conception Générale de notre stratégie de routage proposée

| Nom de la fonction     | Description du rôle dans le code  |
|------------------------|---|
| <b>mainTestVANET.m</b> | La fonction <b>mainTestVANET</b> dans notre application est la fonction principale qui organise la simulation et l'analyse des performances du réseau VANET et qui fait les appels aux autres fonctions.  |
| <b>distpch.m</b>       | Le Calcul de la distance entre un moniteur <b>i</b> et un récepteur <b>j</b> , se fait par la valeur absolue de la différence de leurs coordonnées $x_i, x_j$ . Cette distance est ensuite utilisée pour calculer un pourcentage de <b>pch</b> (qui signifie probablement <b>consommation d'énergie</b> ) basé sur une fonction appelée "distpch". Le pourcentage obtenu est ensuite multiplié par le nombre d'éléments dans un tableau appelé <b>ind</b> , et arrondi à l'entier supérieur pour obtenir une valeur entière. Cette valeur est assignée à une variable appelée <b>s1</b> , et également stockée comme partie d'un tableau de structures nommé <b>SN</b> .  |
| <b>prédictive.m</b>    | Le code initialise deux variables, <b>rpath</b> et <b>rcost</b> qui seront utilisées pour stocker les résultats de l'algorithme prédictif. Ensuite, une appelle à la fonction <b>Predictive</b> , en passant trois paramètres : <b>path1</b> qui est un tableau représentant la topologie du réseau, $size(trust,1)$ qui détermine combien de nœuds sont présents dans ce réseau et <b>w1</b> représente une valeur de poids qui sera utilisée pour calculer le coût de chaque chemin.<br>A l'intérieur de la fonction <b>Predictive</b> , il y a une boucle qui itère à travers tous les chemins possibles entre deux nœuds donnés. Pour chaque chemin, il calcule son coût en multipliant la valeur de confiance de chaque nœud par <b>w1</b> (le poids) et en les additionnant. Ce coût est ensuite comparé aux coûts précédemment calculés pour d'autres chemins, et s'il est inférieur à ces coûts précédents, il devient le nouveau chemin au coût le plus bas. Une fois que tous les chemins possibles ont été évalués, le résultat final (le chemin au coût le plus bas) est stocké dans la variable <b>rpath</b> , tandis que sa valeur de coût correspondante est stockée dans la variable <b>rcost</b> . Ces variables sont ensuite renvoyées de cette fonction à l'endroit où elles ont été appelées. |
| <b>hopbyhop.m</b>      | Un appelle à une autre fonction appelée <b>hopbyhop</b> , en passant des paramètres similaires à ceux d'avant, mais avec des poids différents ( <b>w2</b> ). Cette fonction utilise une approche étape par étape au lieu de prédire tous les chemins en une seule fois comme <b>Predictive()</b> .  |

TABLE 3.1: Description des Fonctions utilisées dans la Simulation

## **Conclusion**

Dans cette section, nous avons présenté l'outil utilisé pour la simulation, à savoir MATLAB, et nous avons mis en avant la conception générale d'un protocole de routage. Nous avons détaillé les étapes principales de ce protocole, ainsi les fonctions utilisées afin de fournir une vue d'ensemble de la stratégie adoptée dans la simulation.

Enfin, le dernier chapitre présentera les résultats de simulation de notre solution de routage. Nous analyserons ses performances.

# **Chapitre 4**

## **Simulation et Analyse de Résultats**

## Chapitre 4

# Simulation et Analyse de Résultats

### Introduction

Les réseaux ad hoc de véhicules (VANET) sont des sous-ensembles des réseaux ad hoc mobiles (MANET), conçus spécifiquement pour les communications entre véhicules (V2V) et entre véhicules et infrastructures (V2I). Dans ces réseaux dynamiques, les protocoles de routage réactifs jouent un rôle crucial en établissant des chemins de communication uniquement lorsqu'ils sont nécessaires, ce qui minimise la surcharge du réseau.

### 4.1 Simulation et analyse de résultats:

Nous avons développé une application de simulation d'un protocole de routage, illustrée en FIGURE 4.1, qui permet de modéliser et d'évaluer les performances du protocole dans divers scénarios de réseau (FIGURE 4.4). Cette application inclut des fonctionnalités avancées pour analyser l'efficacité, la fiabilité et la latence du routage, offrant ainsi une plateforme complète pour l'expérimentation et l'optimisation des stratégies de routage (FIGURE 4.5).

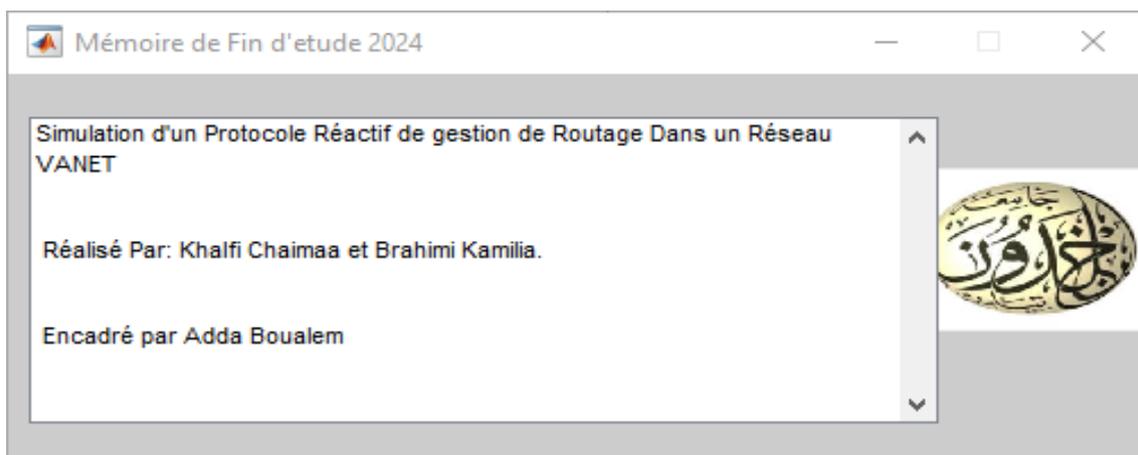


FIGURE 4.1: Fenêtre "A propos" de Notre Application de Simulation

#### 4.1.1 Méthodologie de Simulation

La simulation d'un protocole de routage réactif dans un VANET implique les étapes méthodologiques suivantes:

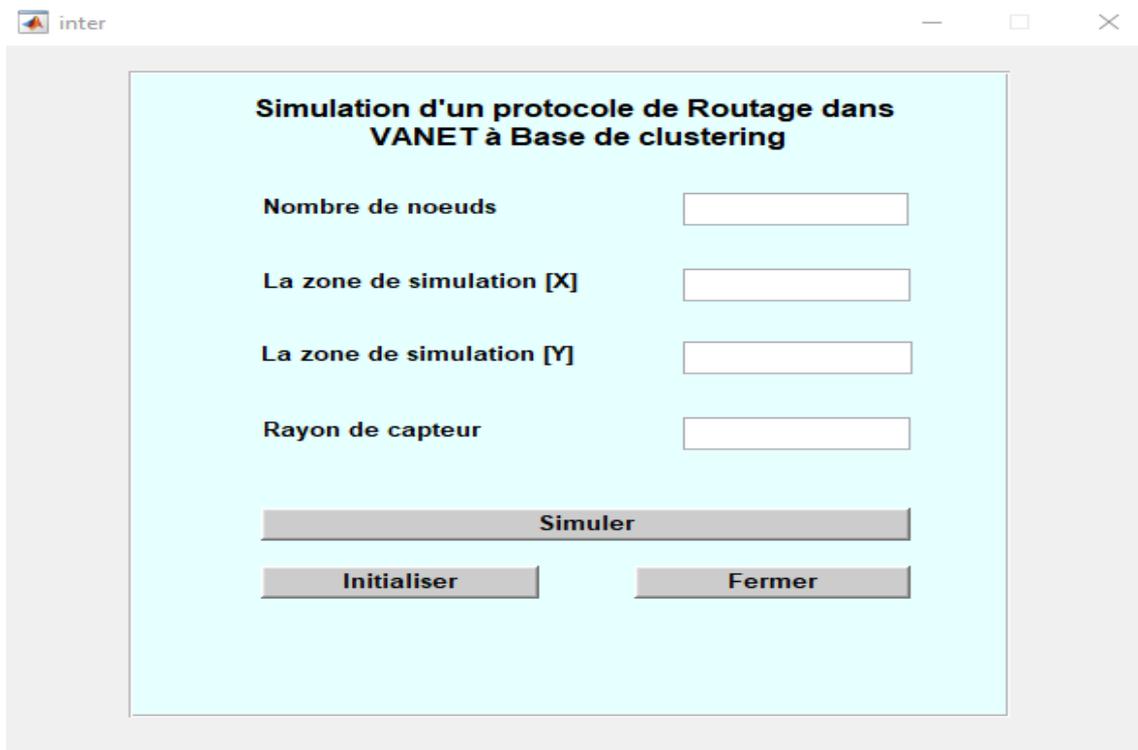


FIGURE 4.2: Interface MATLAB

#### 4.1.2 Les étapes de la Simulation

- **Déroulement de la simulation:** Dans cette étape, nous avons renseigné les paramètres de simulation (FIGURE 4.3), puis cliqué sur le bouton "Simuler".

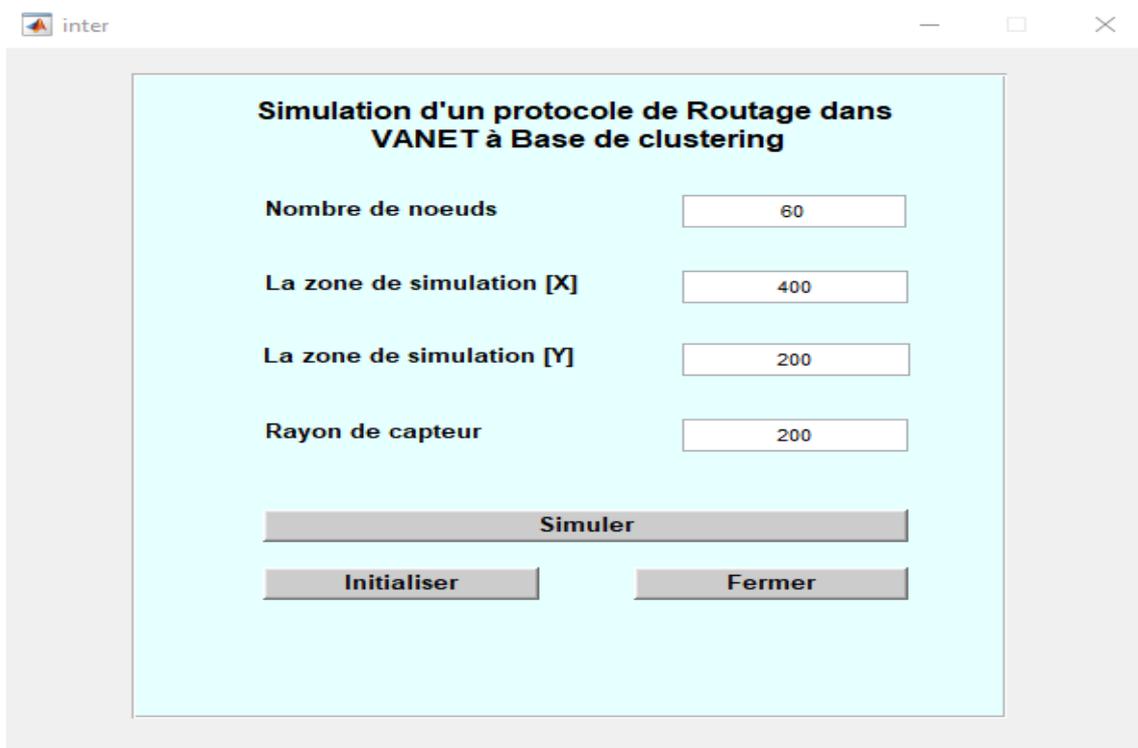


FIGURE 4.3: Menu Principale de la Simulation

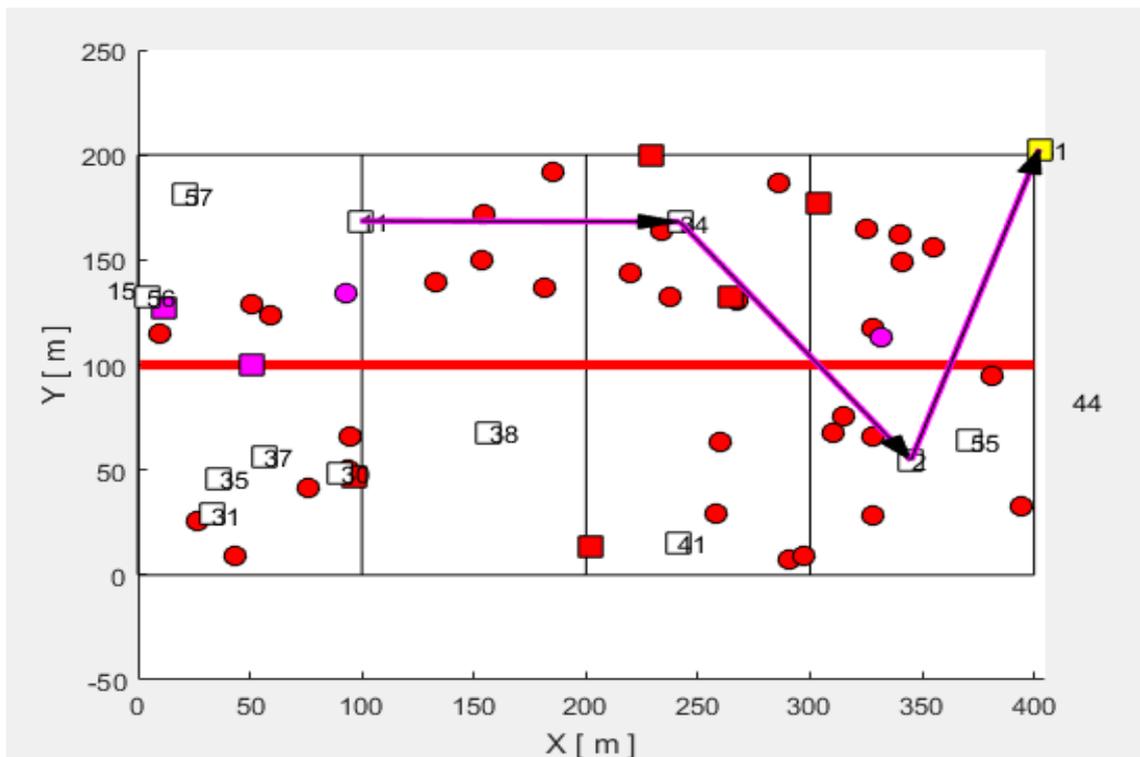


FIGURE 4.4: Fenêtre représentant les divers scénarios de la simulation

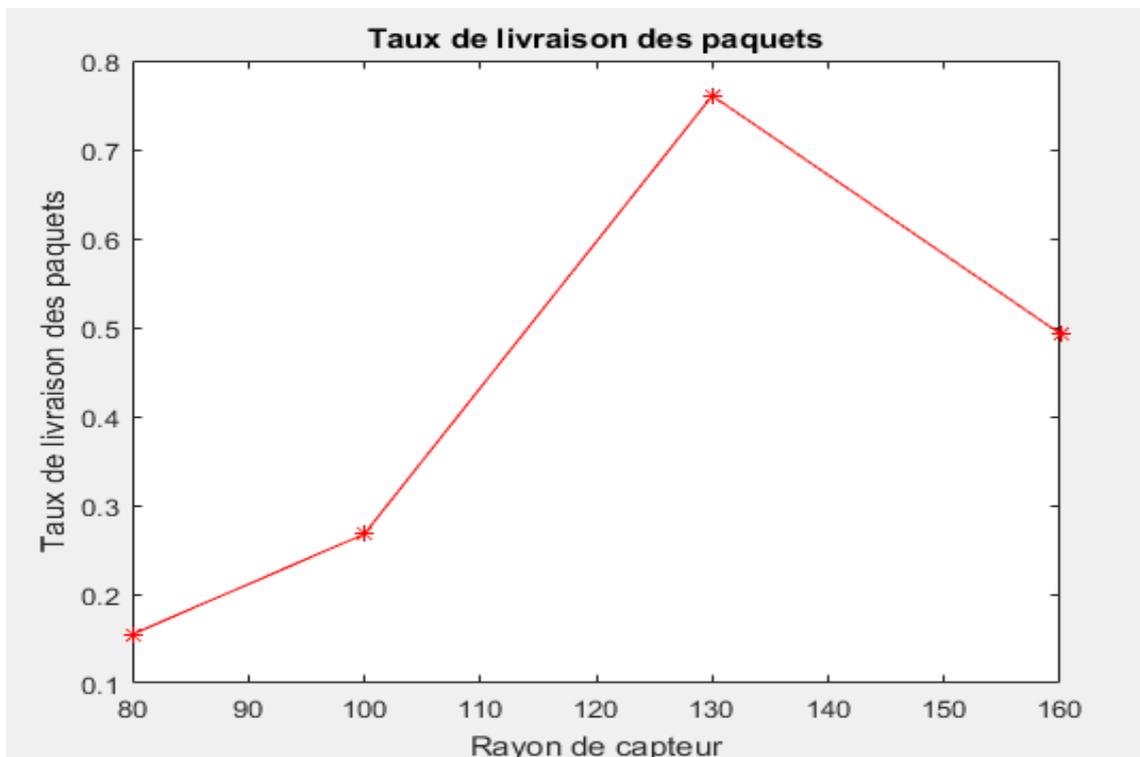


FIGURE 4.5: Taux de Livraison des paquets en fonction de rayon de capteur

### 4.1.3 Analyse des résultats de la simulation

La FIGURE 4.5 montre le taux de livraison des paquets en fonction du rayon de couverture. Le nombre de paquets pour un routage optimal est minimal entre 80 m et 100 m, grâce à une connectivité accrue et à l'efficacité du contrôle par les RSU. Cependant, à mesure que le rayon de couverture augmente, le nombre de paquets nécessaires pour assurer le routage augmente également. De plus, la dynamique des véhicules entraîne une augmentation de la distance entre eux, ce qui provoque une perte de connectivité et une augmentation de la demande de livraison des paquets de routage. Cependant, en raison de la congestion des paquets, le nombre de paquets peut diminuer.

### 4.1.4 Défis et Considérations

Nous avons simulé une stratégie de routage réactif simple basée sur le clustering et analysé le taux de livraison en fonction du nombre de paquets livrés, en prenant en compte les défis et les aspects à aborder dans nos futurs travaux. Dans la prolongation de cette étude, nous envisageons de comparer les stratégies de routage basées sur le clustering avec celles utilisant d'autres techniques telles que les méthodes probabilistes ou heuristiques, en vue de la rédaction d'articles de recherche.

TABLE 4.1 résume certains des défis de simulation à prendre en considération.

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons simulé et analysé les résultats d'une stratégie de routage réactif et montré que bien que le routage réactif basé sur le clustering puisse efficacement gérer la communication dans les environnements de VANET, plusieurs défis persistent. Les travaux futurs devraient se concentrer sur l'amélioration de la modélisation de la mobilité, la gestion de la surcharge du réseau, et l'intégration de mécanismes de sécurité robustes. Comprendre et atténuer ces défis permettra de développer des protocoles de routage plus robustes et performants pour les réseaux de véhicules ad-hoc.

| <b>Défis et Considérations</b>              | <b>Description</b>  |
|---|---|
| <b>Modélisation Réaliste de la Mobilité</b> | Assurer que les modèles de mobilité reflètent les comportements réels des véhicules pour obtenir des résultats significatifs                              |
| <b>Paramètres de Simulation</b>             | Choisir les paramètres de simulation appropriés (nombre de véhicules, vitesse, rayon de couverture) pour refléter des situations réelles                  |
| <b>Coordination entre Véhicules</b>         | Simuler efficacement les mécanismes de coordination entre les véhicules pour garantir la précision des résultats de routage                               |
| <b>Latence et Temps de Réponse</b>          | Mesurer et analyser la latence et le temps de réponse pour évaluer l'efficacité du protocole dans des situations de forte mobilité                        |
| <b>Surcharge Réseau</b>                     | Minimiser la surcharge réseau générée par le protocole tout en maintenant une performance de routage efficace   |
| <b>Robustesse et Fiabilité</b>              | Tester la robustesse du protocole face aux pannes de communication et aux changements rapides de topologie  |
| <b>Scalabilité</b>                          | Gérer un grand nombre de véhicules pour tester la robustesse du protocole dans des scénarios de haute densité   |
| <b>Variabilité des Scénarios</b>            | Créer et tester des scénarios variés (urbains, autoroutes, zones rurales) pour évaluer la performance du protocole dans différents contextes de mobilité. |

TABLE 4.1: Défis et Considérations de la simulation

## **Conclusion Générale**

# Conclusions et Perspectives

Dans ce rapport de Projet de Fin d'Études (PFE), nous avons effectué une revue de la littérature sur le problème du routage dans les réseaux véhiculaires Ad-hoc, en présentant les classifications classiques des Réseaux Ad-hoc sans fil (WANET) proposées dans les travaux antérieurs. L'étude approfondie de ce problème et la proposition de stratégies pertinentes contribuent de manière efficace à résoudre les problèmes de routage. De plus, nous avons proposé une nouvelle classification des Réseaux Ad-hoc sans fil. L'objectif de ce projet de fin d'études est d'examiner en détail la conception et la réalisation d'un protocole réactif de routage, afin de proposer des améliorations basées sur des théories de l'incertain, telles que la logique floue, la théorie des possibilités et la théorie de l'évidence. Ce travail a été valorisé par la proposition et l'acceptation de deux travaux de recherche, dont les certificats de présentation sont joints en annexe :

- La Première conférence nationale sur les Systèmes et Applications Informatiques (NCCSA'2024) à Khemis Meliana, Ain Defla, Algérie, le 14/05/2024 [18].
- La deuxième conférence à Vancouver, Canada, le 25-26/05/2024 [19].

Dans la continuité de ce travail, nous prévoyons d'étudier les aspects suivants pour améliorer les méthodes proposées :

- Réaliser une étude comparative entre les protocoles de couverture de cible à base de clustering et tous les protocoles de couverture proposés dans les RCSF.
- Effectuer une version étendue de l'étude comparative entre les protocoles à base de clustering et tous les protocoles de couverture proposés dans les réseaux Ad-hoc Sans Fil.
- Prendre en compte les variations temporelles de la topologie du réseau, du déploiement statique au déploiement dynamique, et des différents domaines impliqués.
- Proposer des stratégies hybrides combinant le clustering avec d'autres techniques pour évaluer leur efficacité dans la couverture des cibles.

En conclusion, notre étude a permis de dresser un panorama complet des différentes approches de classification des Réseaux Ad-hoc sans fil (WANET) en ce qui concerne le problème du routage dans les réseaux véhiculaires Ad-hoc. Cependant, il reste plusieurs perspectives et pistes de recherche à explorer pour approfondir notre compréhension et proposer des solutions innovantes :

- **Évaluation comparative** : Une analyse comparative approfondie des classifications existantes et de notre nouvelle classification pourrait être

réalisée pour identifier les avantages et les limites de chaque approche en termes de performance, de scalabilité et de robustesse.

- **Validation expérimentale** : Il serait pertinent de mener des expérimentations et des simulations pour valider empiriquement l'efficacité de notre nouvelle classification dans des scénarios réels de réseaux véhiculaires Ad-hoc. Cela permettrait de corroborer les résultats théoriques et de confirmer la pertinence de notre approche.
- **Optimisation des protocoles de routage** : Sur la base de notre classification, des travaux futurs pourraient se concentrer sur le développement et l'optimisation de nouveaux protocoles de routage spécifiquement adaptés aux caractéristiques des réseaux véhiculaires Ad-hoc, tels que la mobilité des nœuds, la variabilité des liens et la gestion de l'énergie.
- **Intégration de technologies émergentes** : Avec l'évolution rapide des technologies de communication, l'intégration de technologies émergentes telles que l'Internet des objets (IoT) et les réseaux 5G/6G dans les réseaux véhiculaires Ad-hoc pourrait ouvrir de nouvelles perspectives pour améliorer les performances et la fiabilité des communications.

Notre étude ouvre la voie à de nombreuses possibilités de recherche et de développement axées sur l'amélioration de la gestion et des performances des réseaux véhiculaires ad hoc. Nous mettons un accent particulier sur l'optimisation du routage et l'intégration de technologies avancées, en adoptant le clustering comme approche clé pour résoudre les problèmes rencontrés par les réseaux Véhiculaires Ad-hoc.

# **Annexes**



THIS CERTIFICATE  
IS PROUDLY PRESENTED  
FOR HONORABLE ARCHIEVEMENT TO

*Khalfi..... Chaimaa.....*

**AWARDED THIS DAY OF MAY 14TH, 2024**

After his participation as a **communicant** by the **oral présentation** entitled by:

**“A New based-Clustering Wireless Ad-hoc Networks Classification, Common Algorithm and Future Challenges”**

under the following authorship order : **boualem adda\***; **Khalfi Chaimaa**; **Brabimi Kamilia**; **Khelil Bochra**; **bouchama sanaa**; **ABDELMALEK BENGHENL**

**at The first National Conference on Computational Systems and Applications (NCCSA'2024) on May 14-15, 2024** which is organised by the **computer science department** and hosted by the **faculty of sciences and technology (F.S.T)** under the full-supervision of **Djilali Bounaâma Khemis Milliana University** as part of its 2023-2024 program .

*Our organisation is honoured by your presence as a good asset ofthis event.*

Chairman of NCCSA'2024 National Conference  
.....

*Abdelhamid Hariche*

Dean of faculty of sciences and technology (F.S.T)  
.....

*Djelloul Bergaid*



**10<sup>th</sup> International Conference on Networks and  
Communications (NCO 2024)**

**AC**

**PAPER PRESENTATION CERTIFICATE**

**MAY 25 ~ 26, 2024 VANCOUVER, CANADA**

**THIS IS TO CERTIFY THAI MR./MS./DR.** .....  
Adda Boualem, Marwane Ayaida, Hichem Sedjelmaci,  
Chaimaa Khalfi, Kamilia Brahimi, Bochra Khelil, Sanaa Bouchama **FROM** University of Tiaret, Algeria **HAS**  
**PRESENTED PAPER TITLED "** A New Classification of Clustering-Based for Different Problems in  
.....

Different Wireless AD-HOC Networks  
.....

**AT CONFERENCE ORGANIZED DURING MAY 25 ~ 26, 2024, VANCOUVER, CANADA**



COMPUTER SCIENCE & INFORMATION  
TECHNOLOGY (CS & IT)

GENERAL CHAIR / SESSION CHAIR, NCO 2024.

# Bibliographie

- [1] B. A. Seddik, "La couverture dans les réseaux de capteurs sans fil," Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira, Bejaia, 2016-2017.
- [2] D. Zekri, "Aggregation and extraction of knowledge in inter-vehicle networks," Ph.D. dissertation, Telecom Sud paris et l'université Evry Val d'essonne, Janvier 2013.
- [3] A. Soua, "Vehicular ad hoc networks : dissemination, data collection and routing : models and algorithms," Ph.D. dissertation, Ecole doctorale: Informatique, Télécommunications et Electronique de Paris, Paris, France, Novembre, 22 2013, thèse de doctorat.
- [4] K. Ullah, "On the use of opportunistic vehicular communication for roadside services advertisement and discovery," Ph.D. dissertation, Ciências Matemáticas e de Computação (ICMC/USP), São Carlos – SP, September 2016.
- [5] P. K. Sarkar, *Ad Hoc Networks: Technologies and Protocols*. Springer New York, 2013.
- [6] A. Kumar and S. Ghosh, Eds., *Handbook of Mobile Data Communications and Applications*. CRC Press, 2021.
- [7] R. K. Gupta, R. K. Jha, and S. Yadav, *Vehicular Ad Hoc Networks (VANETs): Principles, Designs and Applications*. Springer, 2021.
- [8] S. Olariu and M. C. Weigle, Eds., *Vehicular Networks: From Theory to Practice*. Chapman and Hall/CRC, November 2023.
- [9] V. Sharma, M. Sood, and S. Sharma, *Vehicular Ad-Hoc Networks (VANETs): Components, Protocols and Applications*. Springer, 2022.
- [10] M. Fogue, P. Garrido, and F. J. Martinez, *Vehicular Ad-Hoc Networks (VANETs): Architecture, Protocols and Applications*. Springer, 2021.
- [11] P. Basu, S. Maitra, and M. K. Naskar, *Vehicular Ad-Hoc Networks (VANETs): Characteristics, Challenges, and Applications*. Springer, 2021.
- [12] F. Bai and X. Bai, *Mobility Models for Vehicular Ad-Hoc Networks*. Springer, 2021.
- [13] V. Sharma, M. Sood, and S. Sharma, *Security and Privacy in Vehicular Ad-Hoc Networks*. Springer, 2022.
- [14] S. Pandi, V. Moorthy, and M. Manikandan, *Vehicular Ad-Hoc Networks (VANETs): Architecture, Protocols and Applications*. Springer, 2021.

- [15] D. Bektache, "Application et modélisation d'un protocole de communication pour la sécurité routière," Ph.D. dissertation, Nom de l'Université, 2024.
- [16] W. Liang, Z. Li, H. Zhang, S. Wang, and R. Bie, *Vehicular Ad-Hoc Networks: Principles, Protocols, and Applications*. CRC Press, 2021.
- [17] H. Q. Nguyen, X.-N. Tran, and M. Voznak, *Vehicular Ad-Hoc Networks: Emerging Trends and Future Prospects*. Springer, 2023.
- [18] A. Boualem, A. Bagheni, C. Khalfi, K. Brahimi, B. Khelil, and S. Bouchama, "A new based-clustering wireless ad-hoc networks classification, common algorithm and future challenges," in *First National Conference on Computational Systems and Applications (NCCSA'2024)*, Khemis Meliana, Ain Defla, Algeria, 14-15 May 2024, pp. 1–8.
- [19] A. Boualem, M. Ayaida, H. Sedjelmaci, C. Khalfi, K. Brahimi, B. Khelil, and S. Bouchama, "A new classification of clustering-based for different problems in different wireless ad-hoc networks," in *10<sup>th</sup> International Conference on Networks and Communications (NCO 2024)*, Vancouver, Canada, May 25-26 2024, pp. 107–117.
- [20] H. Rejab, "Résolution à base d'heuristiques du problème de routage dans les réseaux ad hoc de vehicules," Ph.D. dissertation, Université Bourgogne Franche Comté, 2018.
- [21] Z. U. Khan, A. Raza, and M. Z. Asghar, *AODV Routing in Vehicular Ad-Hoc Networks: Challenges, Enhancements, and Future Directions*. Springer, 2023.
- [22] T. Nurfitriana, J. G. Amri Ginting, and K. Nugroho, "Energy consumption analysis of dsr reactive routing protocol on mobile ad-hoc network," *JURNAL INFOTEL*, vol. 15, no. 1, pp. 89–96, feb 2023.
- [23] R. Hajlaoui, "Résolution à base d'heuristiques du problème de routage dans les réseaux ad hoc de véhicules," Ph.D. dissertation, Université Bourgogne Franche-Comté, 2018.
- [24] A. U. Rehman, Z. U. Khan, and A. Raza, *Routing Protocols for Vehicular Ad-Hoc Networks: Advances, Challenges, and Future Directions*. Springer, 2023.
- [25] M. Abolhasan, T. Wysocki, and E. Dutkiewicz, *DSDV Routing Protocol in Mobile Ad Hoc Networks*. Springer, 2018.
- [26] C. Cheng and J. Chen, *Zone Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks*. Springer, 2021.
- [27] A. Boukerche, Ed., *Algorithms and Protocols for Wireless and Mobile Ad Hoc Networks*. Wiley, 2018.
- [28] D. Karaboga and B. Gorkemli, Eds., *Metaheuristic-Based Routing Protocols for Mobile Ad-Hoc Networks*. Springer, 2019.

- [29] S. Vhatkar, Z. Aalam, and M. Atique, "Advancing wireless sensor networks through performance evaluation of m-pdch routing protocol for enhanced quality of service," *Indian Journal Of Science And Technology*, vol. 17, no. 9, pp. 794–803, feb 2024.
- [30] R. Begum and R. Venkateswarlu, *Adaptive Swarm-Based Routing for Mobile Ad Hoc Networks*. CRC Press, 2020.
- [31] H. Jiang, X. Tao, and Y. Zhang, *5G and Beyond for Intelligent and Connected Vehicles*. Springer, 2022.
- [32] R. Jain and S. S. Khan, *Ultra-Mobile Broadband: Cutting-Edge 5G and 6G Wireless Communication*. Wiley-IEEE Press, 2019.
- [33] J. G. Andrews, S. Buzzi, W. Choi, S. V. Hanly, A. Lozano, A. C. Soong, and J. C. Zhang, *5G and Beyond: Fundamentals and Standards*. Cambridge University Press, 2020.
- [34] S. Bassi, S. Giordano, and G. Pau, *Routing Protocols for Vehicular Ad-Hoc Networks*. Wiley, 2021.
- [35] K. Manindar and S. Misra, *Routing Protocols for Vehicular Ad Hoc Networks*. Springer, 2021.
- [36] Y. Zeng, J. Cao, and F. Hong, *Vehicular Ad-Hoc Networks for Smart Cities*. Springer, 2020.
- [37] R. Jain and S. Tokekar, *Routing Protocols for Mobile Ad-Hoc Networks: Principles, Analysis and Applications*. Springer, 2020.
- [38] C.-K. Toh, *Mobile Ad Hoc Networking: Protocols and Techniques for Efficient Information Delivery*. Wiley-IEEE Press, 2022.
- [39] S. Zeadally, R. Hunt, Y.-S. Chen, A. Irwin, and A. Hassan, *Emerging Technologies for Connected and Autonomous Vehicles*. Institution of Engineering and Technology, 2020.
- [40] M. Elhoseny and A. E. Hassanien, *Cluster-Based Location Routing Protocol in Mobile Ad-Hoc Networks*. Springer, 2019.
- [41] C.-X. Wang, Z. Zhang, X. Ge, and J. Thompson, *Coordinated Beamforming and Dynamic Link Adaptation for 5G and Beyond Wireless Networks*. Wiley, 2021.
- [42] K. S. Tsiolis and E. Ntoutsis, *Simulation of Vehicular Networks with NS-3*. Springer International Publishing, 2020.
- [43] T. Gungor and M. Guneş, *MATLAB Simulations for Vehicular Ad Hoc Networks*. Springer International Publishing, 2019.
- [44] I. Ali, S. u. Rehman, and Y. B. Zikria, *Clustering in Vehicular Ad-Hoc Networks: Principles and Applications*. Springer International Publishing, 2019.