

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A. Mira de Béjaïa

Faculté des Sciences Exactes

Département d'Informatique



جامعة بجاية  
Tasdawit n Bgayet  
Université de Béjaïa

## Mémoire de fin de cycle

En vue de l'obtention du diplôme Master professionnel en Informatique

**Option :** Administration et Sécurité des Réseaux (ASR)

### THÈME

Internet des véhicules scénarios : et protocoles de communication  
implémentation dans Netlogo

### Réalisé par :

M<sup>lle</sup> HASSANI Dihia

M<sup>lle</sup> KADRI Chaimaa

Soutenu le : 29/06/2025

Membres du jury :

<b>Président</b>	M <sup>r</sup> TOUAZI Djoudi	U.A/Mira Béjaia.
<b>Examinatrice</b>	M <sup>me</sup> HOCINI Kenza	U.A/Mira Béjaia.
<b>Examineur</b>	M <sup>r</sup> KHENNOUS Lachemi	U.A/Mira Béjaia.
<b>Examinatrice</b>	M <sup>me</sup> ZIDANI Ferroudja	U.A/Mira Béjaia.
<b>Encadrant</b>	M <sup>me</sup> HOUHA Amel	U.A/Mira Béjaia.

**Promotion : 2024/2025**

## **Remerciements**

*Avant tout, Nous tenons à remercier Dieu Tout-Puissant, qui nous a accordé la santé, la force, la patience et le courage nécessaires à l'accomplissement de ce travail.*

*Tout d'abord, nous exprimons notre profonde gratitude à notre promotrice, Madame **HOUHA Amel**, pour son soutien précieux, sa disponibilité, la justesse de ses recommandations et son engagement constant tout au long de la réalisation de ce mémoire.*

*Nous tenons également à exprimer notre profonde gratitude aux membres du jury pour le temps qu'ils ont consacré à l'évaluation de notre travail. Leurs remarques pertinentes et leur expertise ont été précieuses, enrichissant notre réflexion et contribuant de manière significative à l'amélioration de ce mémoire.*

*Nous remercions les plus sincères vont également à l'ensemble des enseignants du département d'informatique de l'Université Abderrahmane Mira de Béjaïa, pour la qualité de leur enseignement et leur accompagnement tout au long de notre parcours universitaire.*

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à **Mr. Arab Younes** pour son encadrement précieux, sa disponibilité et ses conseils avisés tout au long de notre stage, qui ont grandement contribué à notre apprentissage et à la réussite de cette expérience.*

*Nous tenons aussi à exprimer ma reconnaissance à ma famille pour son amour inconditionnel, sa patience et ses encouragements constants, ainsi qu'à mes amis(es) pour leur soutien moral et leur présence bienveillante durant toute cette période.*

*Enfin, nous remercions toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.*

*KADRI Chaimaa & HASSANI Dilia*

## *Dédicace*

*À mes chers parents,*

*Qui m'ont toujours soutenue et encouragée, Avec amour, patience et bienveillance. Pour leurs sacrifices silencieux, leur foi en moi, Et leur présence constante à chaque étape de ma vie, Ce travail leur est dédié avec tout mon amour et ma profonde reconnaissance.*

*À mon cher frère «Khouthir» et À mes chères sœurs «Amel»  
«Malak» ,*

*Merci pour votre présence, vos encouragements et votre amour constant.*

*Et tout particulièrement à Chaimaa et Ludmilia,*

*Mes meilleures amies.*

*Merci pour votre présence constante, votre complicité, et votre soutien, qui ont été pour moi une source de force, de réconfort et de motivation tout au long de ce parcours.*

*À Lilia et Hanane,*

*Des amies précieuses, toujours présentes pour m'encourager et m'aider. Merci pour vos mots réconfortants, Et votre soutien discret mais essentiel tout au long de cette aventure.*

*À tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin Particulièrement AOUCHICHE Lounes et SAIDOUNE Katia , Nous vous dédions ce travail avec toute notre gratitude.*

*Difia*

## *Dédicace*

*Avec tout mon amour et mes plus profonds sentiments de respect, je dédie ce mémoire*

*À mes chères parents, Abdelhamid et Houria, à ceux sans qui je ne serais pas là aujourd'hui, à ceux qui ont façonné mon chemin, m'ont portée dans leurs prières et n'ont jamais cessé de croire en moi, à ceux qui ont sacrifié leur confort, leurs rêves, et parfois leur propre bien-être pour que je puisse atteindre les miens. J'ai été votre première fille, votre première joie, et aujourd'hui, j'ai l'immense honneur d'être votre première diplômée..*

*À mes frère et sœur, Khaoula et Abderrahmane, ma source inépuisable de force et de courage. Merci d'avoir toujours été là, dans les hauts comme dans les bas, avec votre soutien inconditionnel, votre fierté discrète mais précieuse, et votre amour indéfectible.*

*À ma grande famille, pour l'amour authentique, les encouragements chaleureux et la fierté partagée qui m'ont toujours portée plus loin.*

*À mon amie et binôme Dihia, merci d'avoir été la lumière dans les jours sombres, le rire dans les moments de stress, et la meilleure partenaire de route que j'aurais pu rêver. Sans toi, cette aventure n'aurait pas été la même.*

*À tous mes amis, et en particulier à Ludmilla, merci pour votre présence sincère, votre soutien constant, votre bienveillance et votre confiance, qui m'ont portée dans les moments de doute. Vous avez été une véritable source de force et de réconfort.*

*À mon petit voisin Abd Djalil, mon petit chou, merci pour ton innocence, ton affection spontanée, et cette tendresse qui, souvent, valait plus que mille mots.*

*À toutes celles et ceux qui m'aiment, m'ont soutenue, encouragée, et ont cru en moi durant tout ce parcours. Et à toutes celles et ceux qui ont contribué de près ou de loin. Particulièrement AOUCHICHE Lounes et SAIDOUNE Katia à la réalisation de ce travail, je vous exprime ma profonde gratitude.*

*Chaimaa*

# Table des matières

Table des matières	I
Table des figures	V
Liste des tableaux	VII
Liste des acronymes	VIII
Introduction générale	1
<b>1 Généralités sur les réseaux véhiculaires</b>	<b>3</b>
1.1 Introduction . . . . .	4
1.2 Réseaux mobile Ad Hoc . . . . .	4
1.2.1 Réseaux MANET . . . . .	5
1.2.2 Réseaux véhiculaire VANET's . . . . .	5
1.2.2.1 Définition des VANETs . . . . .	5
1.2.2.2 Composants des VANETs . . . . .	6
1.2.2.3 Mode de communication dans VANET . . . . .	7
1.2.2.4 Environnements de déploiement . . . . .	10
1.2.2.5 Caractéristiques du réseau VANET . . . . .	10
1.3 Internet des objets(IoT) . . . . .	11
1.4 Internet des véhicules . . . . .	12
1.4.1 Définition . . . . .	12
1.4.2 Architecte de l'internet des véhicules . . . . .	13
1.4.3 Mode de communication de l'internet des vehicules . . . . .	15
1.4.3.1 Communications intra-véhiculaires . . . . .	15
1.4.3.2 Communications inter-véhiculaires . . . . .	16
1.4.4 Applications de l'internet des véhicules . . . . .	17
1.4.5 Défis de l'internet des vehicules . . . . .	18

1.5	Comparaison entre VANETs et l'IoV . . . . .	19
1.6	Conclusion . . . . .	21
<b>2</b>	<b>Protocoles et technologies de communication</b>	<b>22</b>
2.1	Introduction . . . . .	23
2.2	Protocoles et technologies de communication dans l'IoT . . . . .	23
2.2.1	Hypertext Transfer Protocol(HTTP) . . . . .	23
2.2.2	Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) . . . . .	24
2.2.3	Constrained Application Protocol (CoAP) . . . . .	24
2.2.4	LoRaWAN . . . . .	24
2.2.5	ZigBee . . . . .	25
2.3	Protocoles et technologies de communication dans les VANETs . . . . .	25
2.3.1	Dedicated Short-Range Communications(DSRC ) . . . . .	25
2.3.2	Wireless Access in Vehicular Environments(WAVE) . . . . .	26
2.3.3	Protocoles de diffusion et partage d'information dans les réseaux VANETs . . . . .	26
2.3.4	Protocoles de routage . . . . .	27
2.3.4.1	Protocoles de routage base sur la topologie . . . . .	28
2.3.4.2	Protocoles de routage basé sur le clustering . . . . .	30
2.3.4.3	Protocoles de routage basé sur la position dans les VANET . . . . .	31
2.4	Protocoles et technologies de communication dans IoV . . . . .	31
2.4.1	Adaptation des protocoles IoT dans l'IoV . . . . .	32
2.4.1.1	MQTT . . . . .	32
2.4.1.2	CoAP . . . . .	32
2.4.1.3	LoRaWAN . . . . .	32
2.4.1.4	ZigBee . . . . .	33
2.4.2	Adaptation des protocoles VANET dans l'IoV . . . . .	33
2.4.2.1	Dedicated Short-Range Communication . . . . .	33
2.4.2.2	C-V2X (Cellular Vehicle-to-Everything) . . . . .	33
2.4.2.3	Protocoles de routage . . . . .	34
2.5	Conclusion . . . . .	36
<b>3</b>	<b>Outils de modélisation et simulation</b>	<b>37</b>
3.1	Introduction . . . . .	38

3.2	Système de systèmes (SoS) . . . . .	38
3.2.1	Définition . . . . .	38
3.2.2	Caractéristiques d'un SoS . . . . .	38
3.3	Système multi-agents (SMA) . . . . .	39
3.3.1	Notion d'agent . . . . .	39
3.3.2	Définition d'un système multi-agents . . . . .	40
3.3.2.1	Communication . . . . .	40
3.3.2.2	Environnement d'un SMA . . . . .	40
3.3.2.3	Caractéristiques d'un SMA . . . . .	41
3.4	Agent-Based Modeling (ABM) . . . . .	41
3.5	Relation entre IoV, SMA et SoS . . . . .	42
3.6	Simulation . . . . .	42
3.6.1	Outils de simulation . . . . .	42
3.6.1.1	Network Simulator-2 (NS2) . . . . .	43
3.6.1.2	Network Simulator-3 (NS3) . . . . .	43
3.6.1.3	OMNeT++ . . . . .	43
3.6.1.4	Simulator of Urban Mobility (SUMO) . . . . .	44
3.6.1.5	NetLogo . . . . .	44
3.6.2	Choix Netlogo . . . . .	44
3.6.3	Présentation Netlogo . . . . .	45
3.6.4	Concept d'agent dans NetLogo . . . . .	45
3.6.5	Procédures et fonctions . . . . .	46
3.7	Conclusion . . . . .	46
<b>4</b>	<b>Scénarios et implémentation</b>	<b>47</b>
4.1	Introduction . . . . .	48
4.2	Scénarios de la simulation . . . . .	48
4.2.1	Description des scénarios . . . . .	48
4.2.2	Conditions générales des scénarios de simulation dans une ville intelligente . . . . .	53
4.2.3	Définition des agents . . . . .	54
4.2.4	Propriétés des agents . . . . .	63
4.3	Présentation de la simulation . . . . .	66
4.3.1	Description de l'interface de la ville intelligente . . . . .	66

4.3.2	Déroulement des procédures . . . . .	66
4.4	Conclusion . . . . .	74
	<b>Conclusion générale</b>	<b>75</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>77</b>

# Table des figures

1.1	<i>Figure I.1 Exemple d'un réseau MANET's [3].</i>	5
1.2	<i>Figure I.2 Exemple d'un réseau VANET's [6].</i>	6
1.3	<i>Figure I.3 Architecture basique d'un VANET [7].</i>	7
1.4	<i>Figure I.4 Les types de communication dans VANET [9].</i>	8
1.5	<i>Figure I.5 Communication V2V [10].</i>	8
1.6	<i>Figure I.6 Communication V2I [11].</i>	9
1.7	<i>Figure I.7 Communication hybride [12].</i>	9
1.8	<i>Figure I.8 Exemple d'un IOT [15].</i>	12
1.9	<i>Figure I.9 Exemple d'un IOV [18].</i>	12
1.10	<i>Figure I.10 schéma de l'architecture de l'IOV [21].</i>	14
1.11	<i>Figure I.11 Type Communication dans IoV [22].</i>	17
2.1	<i>Figure II.1 Schéma récapitulatif sur les protocoles et les technologies de communication.</i>	35
3.1	<i>Figure III.1 Logo de NetLogo.</i>	45
4.1	<i>Figure III.2 Interface de simulation de la ville intelligente.</i>	66
4.2	<i>Figure III. 3 Fonctionnement du bouton Setup.</i>	67
4.3	<i>Figure III.4 Fonctionnement du bouton Go.</i>	67
4.4	<i>Figure III.5 Fonctionnement du bouton move-pcars.</i>	68
4.5	<i>Figure III.6 Fonctionnement du bouton move-camion-pompier.</i>	68
4.6	<i>Figure III.7 Fonctionnement du bouton move-ambulance.</i>	69
4.7	<i>Figure III.8 Fonctionnement du bouton security.</i>	69
4.8	<i>Figure III.9 Interrupteur ON/OFF de la porte du RSU.</i>	69
4.9	<i>Figure III.10 Interrupteur ON/OFF de la porte du capteur.</i>	70
4.10	<i>Figure III.11 Représentation de l'accident.</i>	70
4.11	<i>Figure III.12 Fonctionnement du bouton accident.</i>	71
4.12	<i>Figure III.13 Représentation du feu.</i>	71

4.13	<i>Figure III.14 Fonctionnement du bouton start-garden-fire.</i>	72
4.14	<i>Figure III.15 Fonctionnement du bouton night.</i>	72
4.15	<i>Figure III.16 Fonctionnement du bouton morning.</i>	73
4.16	<i>Figure III.17 Fonctionnement du bouton détecter-conditions-météo.</i>	73

# Liste des tableaux

1.1	Table I.1 Comparaison entre les VANETs et les IoV [33] . . . . .	20
4.1	Table III.1 Propriétés des agents de la ville intelligente . . . . .	65

# LISTE DES ACRONYMES

<b>A</b>	AODV	Ad hoc On-demand Distance Vector
	ABM	Agent-Based Modeling
	AES	Advanced Encryption Standard
<b>B</b>	BLE	Bluetooth Low Energy
<b>C</b>	CALM	Continuous Air Interface for Long and Medium range
	CoAP	Constrained Application Protocol
	C-V2X	Cellular Vehicle-to-Everything
	COIN	Cognitive Internet of Things
<b>D</b>	DSRC	Dedicated Short Range Communications
	DSR	Dynamic Source Routing
	DSDV	Destination-Sequenced Distance Vector
<b>E</b>	EDR	Event Data Recorder
	EDCA	Enhanced Distributed Channel Access
	ECU	Electronic Control Unit
<b>G</b>	GPS	Global Positioning System
	GPSR	Greedy Perimeter Stateless Routing
<b>H</b>	HTTP	HyperText Transfer Protocol
<b>I</b>	IoV	Internet of Vehicles
	IoT	Internet of Things
	IETF	Internet Engineering Task Force
<b>L</b>	LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
<b>M</b>	MANET	Mobile Ad hoc Network
	MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
	M2M	Machine to Machine
<b>O</b>	OBU	On-Board Unit
	OLSR	Optimized Link State Routing
<b>P</b>	P2P	Peer-to-Peer
<b>Q</b>	QoS	Quality of Service
<b>R</b>	RCP	Reliable Control Protocol

	RFID	Radio-Frequency Identification
	RSU	Road-Side Unit
<b>S</b>	SoS	System of Systems
	SMA	Système Multi-Agent
<b>T</b>	TA	Trusted Authority
	TCP	Transmission Control Protocol
<b>U</b>	UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
	UAV	Unmanned Aerial Vehicle
<b>V</b>	VANET	Vehicular Ad hoc Network
	V2V	Vehicle-to-Vehicle
	V2I	Vehicle-to-Infrastructure
	V2X	Vehicle-to-Everything
	V2N	Vehicle-to-Network
	V2D	Vehicle-to-Device
<b>W</b>	WAVE	Wireless Access in Vehicular Environments
	WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
	WiFi	Wireless Fidelity
	WSM	WAVE Short Message
	WPAN	Wireless Personal Area Network
<b>Z</b>	ZRP	Zone Routing Protocol

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

Au cours des dernières décennies, l'avènement des technologies numériques a profondément transformé les modes de communication, de gestion et d'interaction entre les objets physiques. Parmi ces évolutions majeures, l'Internet des objets (IoT) s'impose comme une révolution technologique qui permet l'interconnexion d'un vaste ensemble de dispositifs intelligents capables de collecter, traiter et échanger des données en temps réel. Cette connectivité ubiquitaire ouvre la voie à de nombreuses applications dans des domaines variés tels que la santé, l'industrie, l'agriculture, et plus récemment, la mobilité urbaine.

Dans le domaine des transports intelligents, un sous-ensemble particulier de l'Internet des objets (IoT) a émergé : l'Internet des véhicules (IoV). Il a pour objectif d'interconnecter les véhicules entre eux, mais aussi avec les infrastructures routières, les piétons et les centres de contrôle. Cet écosystème intelligent et coopératif repose principalement sur les réseaux véhiculaires ad hoc (VANET), une architecture décentralisée qui permet une communication directe entre véhicules (V2V), avec les infrastructures (V2I), et plus largement avec tout élément connecté (V2X).

Face aux enjeux croissants liés à la sécurité routière, à la fluidité du trafic et à la réduction des émissions polluantes, les technologies issues de l'IoT, appliquées à travers l'IoV et les VANET, apparaissent comme des leviers stratégiques pour le développement des villes intelligentes et des systèmes de transport intelligents (ITS – Intelligent Transportation Systems). Ces technologies permettent non seulement d'optimiser la circulation en temps réel, mais aussi de prévenir les accidents et de renforcer la coordination entre les différents acteurs de la mobilité.

Ainsi, l'intégration de l'IoT dans les réseaux véhiculaires ouvre de nouvelles perspectives pour la conception de systèmes de transport plus sûrs, plus efficaces et plus durables. Cette évolution soulève néanmoins des défis techniques, organisationnels et sécuritaires

qu'il convient d'analyser de manière approfondie.

Malgré les avancées notables dans le domaine de l'IoV, plusieurs défis demeurent en matière de modélisation, d'interopérabilité des protocoles, et surtout de simulation réaliste des interactions entre les différentes entités impliquées (véhicules, infrastructures, piétons, etc.). Comment représenter efficacement ces interactions dans un environnement simulé ? Quels outils permettent de modéliser à la fois la complexité des réseaux véhiculaires et les dynamiques urbaines en temps réel ? Ce mémoire tente de répondre à ces interrogations en s'appuyant sur une modélisation multiagents intégrée dans le simulateur NetLogo, afin de proposer une approche pédagogique, flexible et visuelle pour la simulation des scénarios intelligents liés à l'IoV.

### **Organisation du mémoire :**

Ce mémoire est subdivisé principalement en trois chapitres :

Le premier chapitre, intitulé "**Généralités sur les réseaux véhiculaires**", présente les concepts fondamentaux, les architectures, les types de communications ainsi que les domaines d'application de ces technologies. Il met également en évidence les défis associés à leur conception et à leur intégration dans les environnements urbains intelligents.

Le deuxième chapitre intitulé "**Protocoles et technologies de communication**" explore les principales technologies de communication sans fil ainsi que les protocoles de communication utilisés dans les réseaux VANET et l'Internet des objets (IoT). Il examine ensuite comment ces technologies peuvent être adaptées et intégrées dans le cadre plus global de l'Internet des véhicules (IoV), en tenant compte des exigences spécifiques de cet environnement.

Le troisième chapitre, intitulé "**Outils de modélisation et simulation**", est dédié à la présentation approfondie des systèmes multi-agents (SMA) ainsi que des systèmes de systèmes (SoS).

Le dernier chapitre, intitulé "**Scénarios et implémentation**", offre une analyse approfondie des scénarios de ville intelligente, en utilisant le simulateur NetLogo comme outil central d'expérimentation.

Le mémoire se termine par une conclusion générale résumant les contributions principales du travail, ainsi que par quelques perspectives de recherche pour améliorer les simulations futures et répondre aux limites identifiées.

Chapitre **1**

Généralités sur les réseaux véhiculaires

## 1.1 Introduction

Au cours des dernières années, l'évolution phénoménale des services de communication sans fil a profondément transformé la manière dont la mobilité et la sécurité routière sont gérées. Dans ce cadre, les réseaux VANET et l'Internet des véhicules (IoV) ont une fonction importante en matière de communication instantanée sous forme d'échanges d'information en temps réel, qui sont situés au centre de la gestion du trafic et de la prévention des accidents de la circulation.

Les VANET exploitent la mobilité des véhicules pour former des réseaux dynamiques, flexibles et autogérés, capables de relayer efficacement des informations critiques entre les véhicules et les unités de bord de route. L'IoV, pour sa part, étend ces fonctionnalités en intégrant des technologies de communication sophistiquées qui permettent des interfaces intelligentes avec les utilisateurs de la route. Dans le contexte des routes intelligentes (smart roads) et des villes intelligentes (smart cities), les infrastructures de communication véhiculaires occupent une place centrale en favorisant le déploiement de services intelligents orientés vers la régulation du trafic, le renforcement de la sécurité routière, ainsi que l'optimisation de la consommation énergétique. En s'appuyant sur une connectivité ubiquitaire et en temps réel entre les véhicules, les dispositifs d'infrastructure et les systèmes de gouvernance urbaine, ces technologies participent activement à la construction d'un environnement urbain plus résilient, durable et adapté de manière dynamique aux besoins évolutifs des usagers.

Ce chapitre se propose d'explorer en profondeur ces deux paradigmes, en analysant leurs architectures, leurs composants ainsi que les applications concrètes qu'ils rencontrent dans un monde en constante évolution.

## 1.2 Réseaux mobile Ad Hoc

Les réseaux ad hoc sont des réseaux informatiques sans fil décentralisés et auto-organisés dans lesquels les nœuds (ordinateurs, appareils mobiles, etc.) communiquent directement entre eux sans nécessiter d'infrastructure centralisée. Ils s'auto-configurent et s'organisent dynamiquement, permettant ainsi l'acheminement efficace des données, même dans des environnements où la couverture sans fil est limitée ou absente. Nous distinguons plusieurs catégories de réseaux ad hoc, parmi lesquelles nous pouvons citer les réseaux mobiles,

véhiculaires [1].

### 1.2.1 Réseaux MANET

MANET est l'acronyme de Mobile Ad-hoc Network (réseau mobile ad hoc). Il s'agit d'un type de réseau sans fil dans lequel les mobiles, les ordinateurs portables et les tablettes peuvent se connecter les uns aux autres sans avoir besoin d'une infrastructure centralisée ou d'un réseau de communication préexistant. Dans un MANET, les appareils communiquent entre eux en formant un réseau temporaire. Chaque appareil joue à la fois le rôle d'émetteur et de récepteur de données.

La mobilité des nœuds engendre une topologie de réseau instable et évolutive, ce qui pose des défis en termes de routage, de stabilité et de gestion des ressources. La figure 1.1 illustre ce concept. Dans cette figure, chaque terminal mobile est représenté par un nœud du graphe, et la portée radio d'un terminal est représentée par un cercle [2].

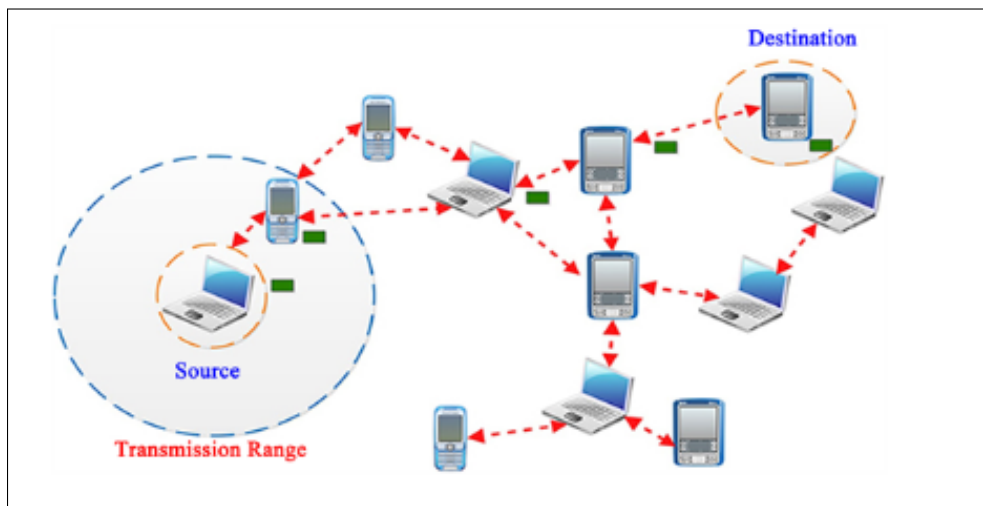


Figure I.1 Exemple d'un réseau MANET's [3].

### 1.2.2 Réseaux véhiculaire VANET's

#### 1.2.2.1 Définition des VANETs

Les réseaux sans fil véhiculaires, ou VANETs (Vehicular Ad-hoc Networks), constituent une solution innovante née de la confluence des technologies de communication sans fil, des systèmes de transport intelligents et des avancées en ingénierie automobile. Ils se définissent comme une sous-catégorie spécifique des réseaux mobiles ad hoc (MANET), caractérisés par des nœuds véhiculaires répondant à des exigences particulières [4].

Dans un VANET, la communication s'établit de manière auto-organisée entre des entités mobiles — c'est-à-dire les véhicules qui assurent simultanément les fonctions de nœuds et de routeurs — et des entités fixes, telles que les unités routières, facilitant ainsi l'échange rapide d'informations essentielles sur les conditions de circulation, la sécurité et d'autres paramètres dynamiques. La portée de communication varie typiquement de 100 à 300 mètres en zone urbaine, pour atteindre jusqu'à 1 000 mètres sur autoroute, afin d'améliorer la sécurité routière, de faciliter l'assistance sur la route et d'accroître le confort des usagers par la transmission en temps réel d'informations sur le trafic et les incidents [5]. Voir la figure 1.2.

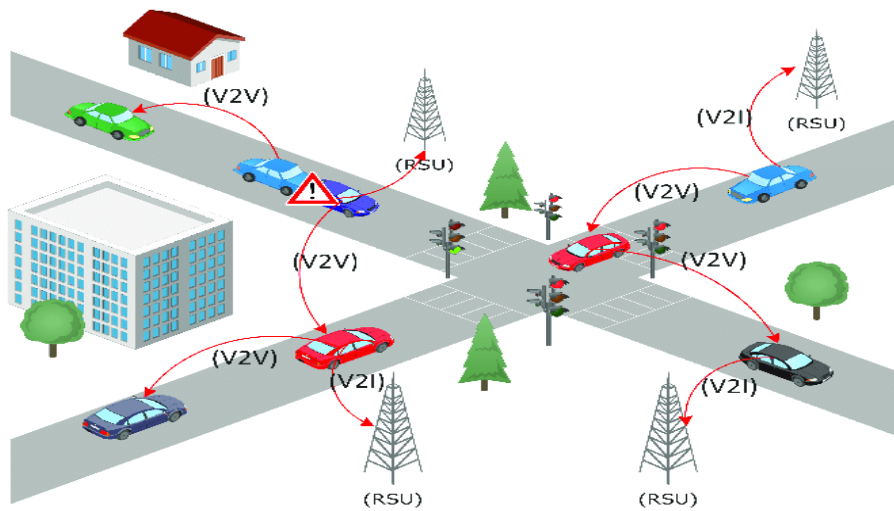


Figure 1.2 Exemple d'un réseau VANET's [6].

### 1.2.2.2 Composants des VANETs

#### 1. OBU (On-Board Unit)

Un dispositif de suivi des véhicules basé sur le GPS est généralement intégré dans chaque voiture afin de fournir des informations sur le véhicule à la RSU (Roadside Unit) ainsi qu'aux autres OBU. Il est composé de plusieurs éléments électroniques, tels que : le processeur de contrôle des ressources (RCP), les capteurs, l'interface utilisateur, le stockage en lecture/écriture permettant d'extraire les informations stockées. La fonction principale de l'OBU est d'être connectée à une RSU ou à d'autres OBU via une liaison sans fil utilisant la norme IEEE 802.11p. Elle est chargée de communiquer avec d'autres OBU ou RSU sous un format de message spécifique. De plus, l'OBU est alimentée par la batterie du véhicule. Chaque véhicule est équipé d'un capteur GPS, d'un enregistreur de données d'événements (EDR)

ainsi que de capteurs avant et arrière, qui fournissent des données en entrée à l'OBU [7].

## 2. RSU (Road-Side Unit)

Ce sont des équipements informatiques installés le long des routes ou à des emplacements spécifiques, tels que des zones de stationnement ou des intersections. Leur rôle principal est d'assurer une connectivité locale aux véhicules en mouvement. Les RSU intègrent des dispositifs de réseau dédiés à la communication à courte portée (DSRC), reposant sur la technologie radio IEEE 802.11p. En outre, ils peuvent également interagir avec d'autres dispositifs réseau au sein des infrastructures environnantes, ce qui permet d'établir une communication [7].

## 3. TA (Trusted Authority)

Il est chargé de la gestion globale du système VANET. Elle supervise l'enregistrement des unités de bord de route (RSU), des unités embarquées (OBU) et des utilisateurs des véhicules. En outre, elle assure la sécurité du réseau VANET en vérifiant l'authentification des véhicules, l'identifiant utilisateur et l'identifiant OBU, afin de prévenir tout dommage potentiel. Le TA nécessite une puissance de calcul importante ainsi qu'une grande capacité de mémoire. Il est également en mesure de révéler l'identifiant OBU et les informations associées en cas de détection de messages malveillants ou de comportements suspects. Par ailleurs, le TA dispose de mécanismes pour identifier et neutraliser les attaquants [7]. Voir la figure 1.3.

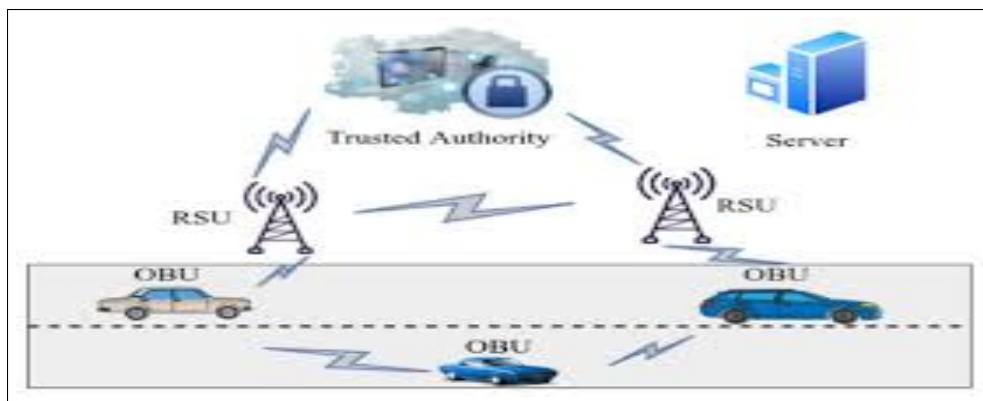


Figure 1.3 Architecture basique d'un VANET [7].

### 1.2.2.3 Mode de communication dans VANET

Les communications entre véhicules deviendront essentielles pour assurer la sécurité et le confort des usagers. Pour garantir l'efficacité des échanges, le réseau VANET doit

permettre une communication fluide entre ses entités. Nous distinguons ainsi plusieurs types de communications : V2V, V2I et hybrid [8], comme illustré dans la figure 1.4.

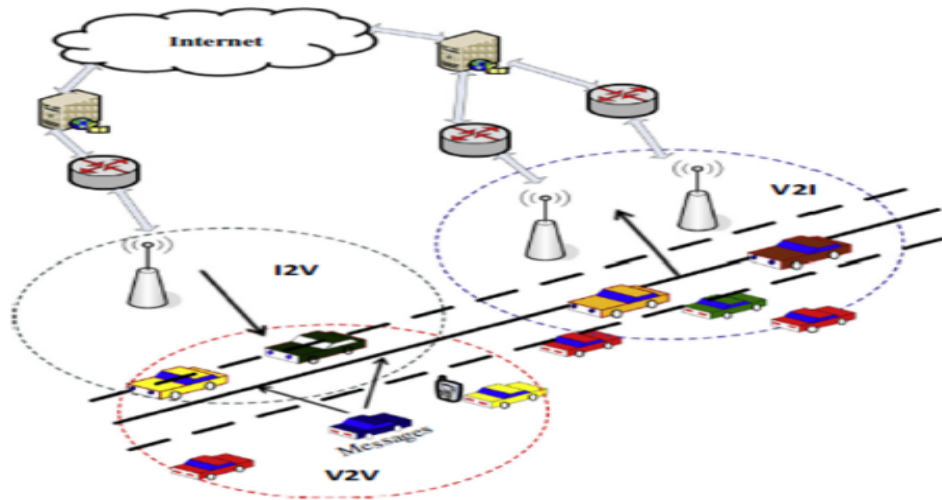


Figure I.4 Les types de communication dans VANET [9].

### 1. Vehicle-to-Vehicle (V2V) communication

La communication V2V est un système sans infrastructure qui permet aux véhicules d'échanger directement des informations avec ceux situés à proximité. Ces échanges s'effectuent soit en mode direct, soit via un protocole multi-sauts, utilisant des véhicules intermédiaires pour relayer les messages sur de plus longues distances. Les informations partagées, telles que la vitesse, la position et la direction, servent notamment à améliorer la sécurité routière grâce à des applications comme l'aide à la conduite coopérative et la surveillance du trafic. Comme l'illustre la figure 1.5.[8].



Figure I.5 Communication V2V [10].

## 2. Vehicle-to-Infrastructure (V2I) communication

Dans ce type de communication, les véhicules sont capables de communiquer avec une infrastructure fixe le long de la route RSU (Road Side Unit) afin de fournir aux utilisateurs des services de communication et d'information tels que l'accès Internet par point d'accès, la diffusion de contenus publicitaires contextuels, le chat inter-véhicules et les jeux distribués[8]. La figure 1.6 illustre une communication V2I.

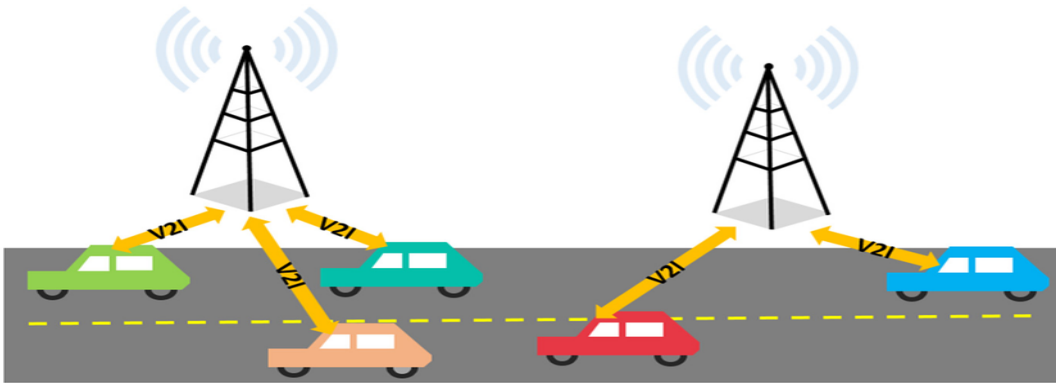


Figure I.6 Communication V2I [11].

## 3. Hybride communication

Le mode de communication hybride combine les communications de véhicule à véhicule (V2V) et de véhicule à infrastructure (V2I). Cette approche permet aux véhicules d'échanger des informations directement entre eux tout en interagissant avec des infrastructures fixes, telles que les unités en bord de route (RSU). L'objectif est d'étendre la portée de communication au-delà des limites des infrastructures fixes en utilisant les véhicules comme relais, ce qui améliore la diffusion des informations sur de plus longues distances sans nécessiter une multiplication coûteuse des infrastructures. La figure 1.7 illustre une communication hybride [12].



Figure I.7 Communication hybride [12].

### 1.2.2.4 Environnements de déploiement

Nous pouvons définir la circulation des voitures dans le réseau routier sur deux environnements [13] :

#### 1. Milieu urbain

Il se caractérise par la présence d'intersections et de points d'arrêt, tels que les panneaux Stop et les feux tricolores, imposant une vitesse limitée à 50 km/h. Cet environnement génère d'importantes perturbations des ondes radio en raison des nombreux bâtiments et infrastructures. Toutefois, la proximité entre les véhicules favorise une connectivité efficace et facilite la communication ad hoc. Cependant, le manque d'espace complique l'installation de nouvelles infrastructures routières, rendant leur aménagement particulièrement difficile.

#### 2. Le milieu autoroutier

Il se distingue par des routes longues et rapides, dotées de voies d'accélération et de sorties, où la vitesse des véhicules varie entre 60 et 100 km/h. En raison de cette vitesse élevée, l'écart entre les véhicules est important, ce qui peut entraîner des interruptions de connectivité et compliquer la communication en mode ad hoc. Pour surmonter ces limitations, l'intégration d'infrastructures fixes, telles que les unités de bord de route (RSU) et les Trusted Authority (TA), permet d'améliorer la connectivité et d'assurer un accès continu aux services du réseau pour tous les véhicules en circulation.

### 1.2.2.5 Caractéristiques du réseau VANET

#### 1. Mobilité

Tous les nœuds dans les VANET se déplacent généralement à grande vitesse. Par conséquent, la grande mobilité des nœuds réduit le temps de communication entre les nœuds du réseau. Cependant, contrairement aux MANET, la mobilité dans les VANET n'est pas spontanée, mais planifiée par le réseau routier, qui est soumis à des contraintes spatiales (routes, intersections) et temporelles (règles de circulation, feux de signalisation). Cette structure présente une certaine prévisibilité dans les parcours des véhicules, pouvant être utilisée pour optimiser l'efficacité des protocoles de communication et de routage [14].

## 2. Topologie de réseau dynamique

La topologie VANET évolue rapidement en raison de la grande mobilité des véhicules et est donc irrégulière par nature. Ce changement rapide de topologie du réseau facilite l'attaque de l'ensemble du réseau VANET et rend difficile la détection des véhicules malveillants [14].

## 3. Stockage d'énergie et calcul

Les VANET ne rencontrent pas de problèmes de panne d'énergie ou de stockage. Cependant, les environnements à grande échelle nécessitent le traitement d'une grande quantité d'informations et c'est un problème absolument difficile [14].

## 4. Puissance de transmission limitée :

Dans le WAVE, la puissance de transmission doit être suffisante pour atteindre les données. En cas de crise et de sécurité publique, comme un problème d'accident ou un problème de congestion du trafic, il est permis de transmettre avec une puissance élevée [14].

## 5. critique temporelle :

Les informations transmises dans le VANET doivent être transmises aux nœuds dans un délai déterminé, afin que les décisions puissent être prises par le nœud et que les actions correspondantes soient prises rapidement [14].

## 1.3 Internet des objets(IoT)

L'IoT désigne un réseau de dispositifs interconnectés capables de collecter, d'échanger et d'analyser des données en temps réel via Internet, souvent sans nécessiter d'interaction directe avec l'humain [15].

Cette technologie englobe une vaste gamme d'appareils « des voitures, des électroménagers et des thermostats, aux dispositifs domestiques intelligents, installations industrielles, dispositifs de surveillance médicale, trackers de fitness et systèmes de télématique pour véhicules » qui peuvent être contrôlés à distance et automatiser de nombreuses tâches. En facilitant la communication entre ces objets, l'IoT ouvre la voie à des innovations majeures telles que l'optimisation des ressources dans les villes intelligentes et l'amélioration de l'efficacité opérationnelle dans divers secteurs, tout en soulevant des enjeux importants en matière de réglementation, de protection de la vie privée numérique et de sécurité des données [16]. La figure 1.8 illustre un exemple d'IoT.



Figure 1.8 Exemple d'un IOT [15].

## 1.4 Internet des véhicules

### 1.4.1 Définition

L'IoV est une application avancée de l'IoT dans le système de transport intelligent. Elle est destinée à être réservée comme plate-forme de détection et de traitement d'informations importantes pour les systèmes de transport intelligents. L'IoV contient des véhicules connectés et des dispositifs de détection pris en charge par les piétons, les unités de bord de route et les réseaux sans restriction via l'interconnectivité V2V, V2R (véhicule-route), V2H (véhicule-humain) et V2S (véhicule-capteur). L'IoV est défini comme le sous-groupe du VANET établi à partir du MANET. Il a été démontré que l'architecture réseau de l'IoV est basée sur l'IoT, qui est similaire à l'IoV et contient diverses couches telles que la couche de détection, la couche réseau et la couche d'application. À l'inverse, l'IoV est un réseau complexe qui contient les caractéristiques d'un environnement de véhicule social, permettant une coordination intelligente et dynamique des interactions entre les véhicules, les infrastructures et les usagers [17]. La figure 1.9 illustre un exemple d'IoV.

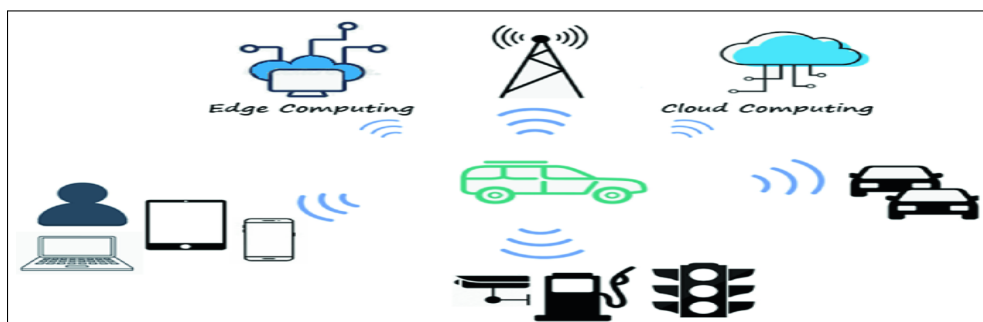


Figure 1.9 Exemple d'un IOV [18].

## 1.4.2 Architecte de l'internet des véhicules

Actuellement, il n'existe aucune architecture spécifique et universellement acceptée pour l'IoV à cause des différentes conceptions de ce concept. Certains chercheurs proposent des modèles en se basant sur l'IoT, en raison des similitudes entre les deux. L'une des architectures les plus proposées adopte un modèle à trois couches, inspiré de l'IoT, constitué d'une couche perception (ou détection), d'une couche réseau et d'une couche application [19].

Tandis que d'autres approches visant à avoir une coopération efficace entre véhicules, humains, environnements suggèrent une architecture à quatre couches pour mieux structurer les interactions et flux de données [20].

### 1. La couche de perception

La couche de perception de l'IoV assure la collecte et le traitement initial des données environnementales grâce à une multitude de capteurs internes et externes (caméras, radars, capteurs de température, GPS, RFID) Elle permet le suivi de l'environnement du véhicule, la détection des conditions de circulation et l'analyse des comportements de conduite. Cette couche repose sur des technologies de communications sans fil (WiFi, Bluetooth, ZigBee, etc.) et des liaisons filaires pour assurer une communication fluide entre les différents dispositifs. De plus, la couche de perception contribue aux services IoV avancés permettant la détection d'objets, l'exécution de commandes de contrôle et la coopération du véhicule avec ses infrastructures, comme dans les véhicules autonomes ou la gestion intelligente du trafic routier [21].

### 2. La couche réseau

La couche réseau joue un rôle essentiel dans l'IoV en permettant d'interconnecter les véhicules, les infrastructures et les autres entités, c'est-à-dire d'assurer la communication V2V, V2I, V2N, V2S et V2H en reposant sur diverses technologies sans fil WiFi, Bluetooth, WAVE, WiMAX, 4G/LTE, etc., ainsi que sur la mise en œuvre d'équipements (routeurs, commutateurs, passerelles...) afin d'acheminer et d'optimiser la transmission d'informations. Cette couche est indispensable à la gestion du trafic et de la mobilité, elle garantit une transition fluide entre les réseaux et assure une qualité de service optimale. En plus de transmettre les informations, elle permet d'analyser des données, de superviser à distance et de gérer des nœuds pour assurer une communication efficace et stable [21].

### 3. La couche de contrôle de calcul de coordination

Cette couche est essentielle pour optimiser l'ensemble des traitements de données et des ressources au sein de l'IOV. Elle permet la coordination des véhicules, des infrastructures et des utilisateurs grâce à une allocation efficace des ressources telles que la bande passante. Elle fait appel à des technologies telles que l'edge computing et l'intelligence artificielle pour une analyse en temps réel et une prise de décision rapide et mieux adaptée [19].

### 4. La couche application

Située au sommet de l'architecture IoV, elle est responsable du stockage, du traitement et de l'analyse des données qui viennent de la couche de perception pour élaborer des décisions intelligentes. Elle regroupe notamment des services de gestion du trafic et de la sécurité routière et contribue à l'interaction entre utilisateurs et véhicules. De plus, cette couche met en œuvre les protocoles de transmission et les interfaces nécessaires pour assurer l'interopérabilité des applications au sein de l'écosystème IoV [21].

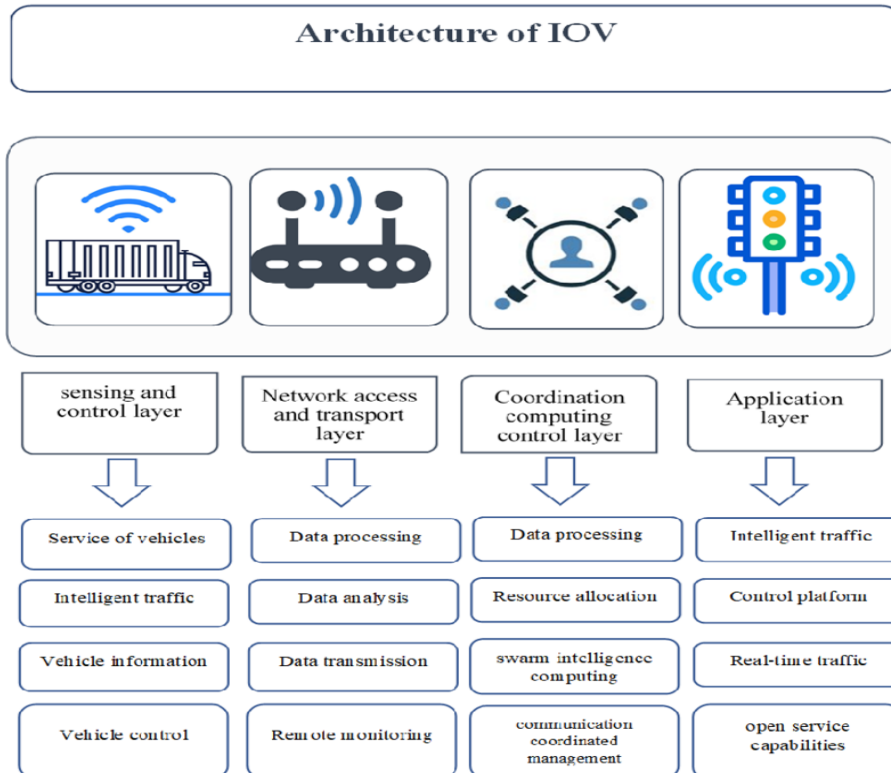


Figure I.10 schéma de l'architecture de l'IOV [21].

### 1.4.3 Mode de communication de l'internet des vehicules

L'Internet des véhicules (IoV – Internet of Vehicles) s'établit sur plusieurs techniques de communication qui consentent aux véhicules d'échanger des données en temps réel. Ces échanges sont importants pour assurer la sécurité sur les routes, optimiser la circulation et faciliter l'intégration des véhicules autonomes. Nous pouvons classer ces communications en deux grandes catégories : les communications intra-véhiculaires et les communications inter-véhiculaires [22].

#### 1.4.3.1 Communications intra-véhiculaires

- 1. Vehicle-to-Sensor (V2S) Communication :** le véhicule est équipé de capteurs intégrés. Grâce à leurs capteurs embarqués (caméras, radars, capteurs de pression, GPS, etc.), les capteurs sont destinés à détecter et collecter des informations sur l'état du véhicule et l'environnement qui l'entoure et le milieu environnant. Les données collectées seront envoyées à l'unité de commande électrique (ECU) chargée du traitement des données et du maintien de la communication entre le véhicule et d'autres entités [23].
- 2. Vehicle-to-Pedestrian (V2P) Communication :** l'intégration du V2P permet à un véhicule de communiquer ou de détecter des piétons ou des cyclistes à l'aide de leur smartphone ou autre appareil. Cette technologie est indispensable pour la protection des usagers fragiles de la route. Prenons l'exemple d'un piéton qui, hors des passages protégés, peut déclencher un smartphone pour alerter les véhicules en dérive. De la même manière, un cycliste équipé d'un capteur V2P peut être repéré par un véhicule bien avant que le conducteur ne puisse le voir [24].
- 3. Vehicle-to-Device (V2D) Communication :** la communication véhicule-à-appareil (V2D) se réfère au transfert d'informations enregistré entre un véhicule et d'autres appareils électroniques comme des téléphones portables, des tablettes, des ordinateurs ou encore des dispositifs portables. Ces formes de communication se font le plus souvent par le biais des réseaux sans fils comme le Bluetooth ou le Wi-Fi, permettant ainsi une interaction cohérente entre le véhicule et les appareils de la personne se mettant au volant ou des autres passagers [23].

### 1.4.3.2 Communications inter-véhiculaires

1. **Vehicle-to-Infrastructure (V2I) Communication** : les infrastructures routières intelligentes, telles que les feux de circulation liés ou les panneaux d'affichage numériques, ont la capacité de transmettre des informations aux véhicules afin d'améliorer la gestion du trafic. Par exemple, un feu de circulation rouge pourrait transmettre un message aux véhicules qui s'en rapprochent pour les renseigner sur son temps avant de changer en vert [25].
2. **vehicle-to-vehicle (V2V) Communication** : les véhicules communiquent entre eux afin de prendre en charge différentes applications et services, tels que l'assistance coopérative à la conduite et les données flottantes décentralisées des véhicules (par exemple, les informations de surveillance de l'état du trafic)[26].
3. **Vehicle-to-Road Side Unit (V2R) Communication** : cette communication suppose l'échange d'informations entre les véhicules et les capteurs ou antennes disposés le long des routes. Ces appareils ont la capacité de diffuser des renseignements concernant l'état de la route, les températures ou encore les opérations en cours, améliorant ainsi une meilleure communication en temps réel pour les conducteurs [26].
4. **Vehicle-to-Everything (V2X) Communication** : V2X est une excellente technologie qui recrute tous les systèmes de communication d'un véhicule et de son environnement. Avec V2X, un véhicule peut communiquer avec d'autres véhicules, la route, les piétons, et même le cloud. Cette technologie s'appuie sur des normes telles que le DSRC et le C-V2X qui utilisent la technologie 5G pour assurer une communication rapide et de qualité. V2X est très important pour les véhicules autonomes, car il leur permet de connaître en avance les conditions de circulation pour qu'ils puissent ajuster leur comportement en fonction. Ce paradigme englobe plusieurs types d'interactions [27] :
  - **Vehicle-to-Network(V2N)Communication** : V2N permet aux véhicules de rester en contact avec les services cloud ainsi que les réseaux cellulaires pour obtenir des informations en temps réel. Cela sert à recevoir et envoyer des notifications en temps réel, à mettre à jour le GPS, à informer sur le trafic et la météo. Les véhicules équipés de V2N peuvent par exemple recevoir des informations sur un accident et, par la suite, planifier pour éviter les congestions de la circulation [28].

- **Vehicle-to-Building (V2B) Communication** : connectivité avec des bâtiments intelligents, facilitant par exemple la réservation automatique d'une place de stationnement [28].
- **Vehicle-to-Home (V2H) Communication** : communication avec le réseau électrique dans le but de réguler la charge des véhicules électriques [29].

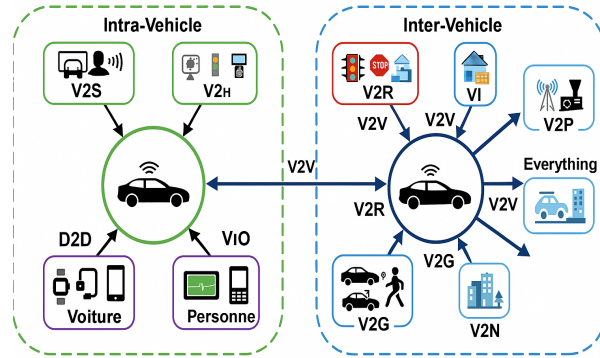


FIGURE 2 Interaction Models of IoV

Figure I.11 Type Communication dans IoV [22].

#### 1.4.4 Applications de l'internet des véhicules

Dans l'IoV, nous trouvons plusieurs types d'applications ou de services qu'on peut classer en 3 catégories [30] :

##### 1. La sécurité routière

Ce type d'applications a pour objectif de diminuer les risques d'accidents de la route et, par conséquent, de réduire le nombre de victimes, qu'il s'agisse de conducteurs ou de piétons. Elles informent les usagers de la route des dangers potentiels ou des événements à risque en partageant des données en temps réel.

Ces informations peuvent inclure des alertes sur les intersections dangereuses, les zones à haut risque, l'état de la chaussée (comme la présence de glace, de nids-de-poule ou de travaux), ainsi que la position des véhicules sur la route. Grâce à cette communication proactive, les usagers peuvent adapter leur conduite et éviter les situations périlleuses, contribuant ainsi à une meilleure sécurité routière. Ci-dessous, nous présentons donc des exemples de ce type d'applications afin d'en entrevoir les spécificités :

- Avertissement coopératif de collision.

- Avertissement de collision d'intersection.
- Avertissement de changement de ruelle.
- Automatisation collaborative des autoroutes.

## 2. La gestion du trafic routier

Ils visent à améliorer la sécurité des passagers sur les routes en évitant les véhicules dans toute situation dangereuse. Ces applications se basent en général sur une diffusion, périodique ou non, de messages informatifs permettant aux conducteurs d'avoir une connaissance de l'état de la route et des véhicules voisins.

Des exemples répandus dans cette catégorie d'applications sont :

- Avertissement des collisions.
- Avertissements sur les conditions de la route.
- Assistance au dépassement et changement de voie.

## 3. L'info-divertissement

Cette catégorie regroupe tous les services destinés à améliorer le confort du conducteur, à l'exclusion des applications relatives à la gestion du trafic et à la sécurité routière. Ces services comprennent l'accès à des jeux, le fait de s'échanger des musiques ou des vidéos. Elle permet en outre une interaction directe entre les conducteurs qui partagent leur trajet et permet le partage de contenus multimédia, en plus de fournir des solutions de contrôle à distance pour simplifier les tâches administratives des autorités concernées.

### 1.4.5 Défis de l'internet des vehicules

- **Zone de couverture réseau limitée** : généralement, les véhicules dans les VANET collaborent entre eux pour diffuser des signaux d'urgence, ils agissent à la fois comme fournisseurs de services et comme émetteurs d'informations. Par exemple, si un accident est détecté, le véhicule concerné informe les véhicules environnants, qui continueront à diffuser cette information aux autres véhicules. Les véhicules partagent leurs ressources via un cloud véhiculaire (VC) en s'appuyant sur une infrastructure fixe ou un réseau cellulaire. Cependant, un véhicule ne peut pas transmettre sa requête aux autres véhicules s'ils sont hors de portée du réseau. La couverture limitée des RSU n'est pas efficace pour les services de cloud véhiculaire en raison de la mobilité des véhicules dans différentes zones [31].

- **Stockage centralisé des données cloud dans l’IoV** : à l’heure actuelle, de nombreux véhicules intelligents communiquent entre eux et accèdent très fréquemment au cloud pour la gestion du trafic et du stockage des données. Mais face à la masse considérable de données échangées et au nombre croissant des nœuds connectés, l’emploi d’un cloud centralisé devient inadapté. De plus, une panne du serveur central peut entraîner une interruption totale du système, compromettant ainsi la communication et la gestion du réseau. Cette centralisation pose également des problèmes en termes de latence, de sécurité et de scalabilité, rendant nécessaire l’adoption de solutions décentralisées plus robustes [31].
- **Qualité de Service(QoS)** : est un défi majeur dans l’IoV en raison de l’énorme charge réseau introduite par le grand nombre de dispositifs connectés et des applications gourmandes en bande passante (voix, vidéo, multimédia). La mobilité des véhicules qui commute entre plusieurs réseaux avec différentes vitesses rend l’allocation des ressources réseau d’autant plus difficile et génère la latence et les problèmes de gigue, de débit et de pertes de paquets. De plus, le passage rapide d’un véhicule d’un réseau à un autre provoque des interruptions de service [32].

## 1.5 Comparaison entre VANETs et l’IoV

Le tableau ci-dessous présente une comparaison :

Paramètre	VANETs	IoV
Objective	L’objectif principal des VANET dès sa création est d’améliorer la sécurité routière. Pour prévenir les pertes désastreuses et optimiser la circulation dans le but de réduire le temps, les dépenses et les émissions polluantes.	Afin d’améliorer la sécurité routière, l’efficacité du trafic et l’info-divertissement commercial, l’IoV vise à offrir des services en ligne. Cette connectivité permet aux passagers d’accéder à une variété de contenus tels que la musique en streaming, la vidéo et même des services de surveillance à distance.
Mode Communication	Vehicle-to-Vehicle (V2V) Vehicle-to-Infrastructure (V2I)	Vehicle-to-Vehicle (V2V) Vehicle-to-Infrastructure (V2I) Vehicle-to-Everything (V2X)

Paramètre	VANETs	IoV
Technologie de communication	Deux types de technologies de communication : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wireless Access in Vehicular Environment (WAVE) : Dedicated Short Range Communication (DSRC)</li> <li>• Continuous Air Interface for Long and Medium range (CALM) : GSM-2G/GPRS-2.5G, UMTS-3G, Infrared communication.</li> </ul>	Cinq types de technologies de communication : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wireless Access in Vehicular Environment (WAVE) : Dedicated Short Range Communication (DSRC)</li> <li>• Continuous Air Interface for Long and Medium range (CALM) : GSM-2G/GPRS-2.5G, UMTS-3G, Infrared communication.</li> <li>• Bluetooth</li> <li>• ZigBee</li> <li>• 4G/LTE</li> </ul>
Compatibilité	En raison d'une architecture réseau sous-jacente incompatible, l'appareil personnel ne parvient pas à établir une connexion avec le véhicule, ce qui provoque des problèmes de compatibilité dans les réseaux VANET.	Grâce à l'intégration des fonctionnalités IoT, le transfert de données entre divers nœuds tels que les appareils personnels et intelligents s'effectue de manière fluide, assurant ainsi une compatibilité optimale dans l'IoV.
Utilisabilité	Conçu pour opérer de manière locale et discrète. Parfaitement adapté pour des utilisations à petite échelle, comme l'avertissement en temps réel des conducteurs en cas d'incident routier ou la prévention des collisions.	L'application offre une flexibilité et une durabilité remarquables, soutenues par des réseaux informatiques robustes et des capacités de communication avancées.

Table I.1 Comparaison entre les VANETs et les IoV [33]

## 1.6 Conclusion

L'objectif principal de ce chapitre était d'introduire les fondements des réseaux véhiculaires VANET en mettant en avant leur origine à travers les réseaux Ad Hoc et MANETs. Nous avons défini les VANETs, décrit leurs composants, leurs modes de communication existants, leurs environnements de déploiement et ainsi leurs caractéristiques. Les VANETs jouent un rôle clé dans l'amélioration de la sécurité routière et la gestion du trafic, mais ils restent limités par des défis tels que la couverture réseau et la fiabilité des communications. Ensuite, nous avons introduit le concept de l' IoT et de l' IoV, qui représentent une évolution des VANETs et peuvent être considérés comme une hybridation entre les VANETs et l'IoT. Nous avons en premier lieu défini l'IoV, détaillé son architecture et ses modes de communication V2X ainsi que ses applications ; enfin, nous avons comparé les VANETs et l'IoV. Cette transition vers l'IoV ouvre la voie à de nouveaux défis et opportunités, qui feront l'objet d'une analyse approfondie dans le chapitre suivant, notamment en ce qui concerne les protocoles de communication et les stratégies de routage adaptées aux environnements véhiculaires.

Chapitre **2**

Protocoles et technologies de communication

## 2.1 Introduction

L'évolution rapide des technologies de communication a facilité l'intégration des objets connectés (IoT) dans différents secteurs, en particulier celui du transport intelligent. Cette évolution a engendré l'émergence de nouveaux réseaux hybrides, tels que les IoV, qui fusionnent les caractéristiques des réseaux de véhicules ad hoc (VANETs) avec celles de l'Internet des objets. Dans ce contexte, les protocoles de communication sont essentiels pour garantir un transfert des données qui soit fiable, rapide et sécurisé.

Dans ce chapitre, nous présentons les principaux protocoles utilisés dans les contextes IoT, VANET ainsi que dans leur convergence.

## 2.2 Protocoles et technologies de communication dans l'IoT

Les protocoles de communication jouent un rôle vital dans le fonctionnement de l'Internet des objets. Ils régissent la manière dont les appareils partagent des informations, visant une connectivité ininterrompue dans ce vaste réseau d'objets intelligents. Ces protocoles sont classés en fonction de caractéristiques telles que l'architecture du réseau, la topologie, la consommation d'énergie, le débit de données et la portée. Chaque protocole est adapté à différentes applications IoT, des maisons intelligentes aux systèmes industriels. Dans cette section, nous explorerons certains des principaux protocoles de communication utilisés dans l'IoT, en évaluant leurs performances et leurs usages particuliers.

### 2.2.1 Hypertext Transfer Protocol(HTTP)

HTTP est un protocole de transfert de données conçu pour faciliter la communication entre clients et serveurs sur le World Wide Web. Fonctionnant selon une architecture client/serveur qui utilise des échanges de connexions fiables TCP, cela relève de la possibilité d'une communication entre plusieurs types d'appareils, même s'ils ont été créés de manière autonome. Dans le domaine de l'IoT, HTTP est utilisé pour envoyer et recevoir des données via des requêtes et des réponses standardisées, ce qui facilite l'interconnexion des appareils avec des applications web ou mobiles. Par conséquent, HTTP pose quelques problèmes de bande passante et de consommation des ressources, mais il est une solution pratique pour

les applications IoT nécessitant la possibilité de recevoir ou d'envoyer des données [34] [35].

### 2.2.2 Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)

MQTT est un protocole de niveau application de transport de messagerie conçu pour les appareils aux ressources limitées et les environnements à faible bande passante. Il est devenu un standard industriel pour la communication machine-à-machine (M2M) et les applications de l'Internet des objets (IoT) [36] [37].

MQTT repose sur un mécanisme de publication/abonnement qui organise les clients autour d'un serveur central, appelé broker, où les clients peuvent être publishers ou subscribers : les premiers envoient des messages sur des sujets, et les seconds s'y abonnent. Le broker central reçoit ces messages et les redirige vers les abonnés [38].

### 2.2.3 Constrained Application Protocol (CoAP)

CoAP est un protocole de couche d'application basé sur une architecture client/serveur. CoAP fournit son propre mécanisme de fiabilité en utilisant 4 types de messages : (GET, POST, PUT, DELETE) [39]. CoAP a été conçu par l'Internet Engineering Task Force (IETF) pour faciliter le transfert de messages entre les applications machine à machine (M2M) en offrant diverses fonctionnalités telles que la découverte intégrée, la prise en charge de la multidiffusion et les échanges de messages asynchrones [40].

### 2.2.4 LoRaWAN

LoRaWAN est un protocole de communication sans fil qui sert d'architecture système, qui offre une transmission de données à faible débit, mais surtout sur de longues distances, pour tous les dispositifs connectés (par exemple : capteurs IoT communicants) [41].

Le protocole LoRaWAN fait appel à la technologie de modulation LoRa pour assurer la communication et la gestion des appareils IoT (Internet of Things). Techniquement parlant, le réseau LoRaWAN comprend deux composants clés : les passerelles, qui assurent l'envoi et la réception des données vers/depuis les nodes (ou nœuds), qui sont des dispositifs finaux (tels que capteurs IoT, etc.) chargés de transmettre et de recevoir des informations à destination de la passerelle [42].

### 2.2.5 ZigBee

ZigBee est une technologie de communication réseaux sans fil basée sur la norme IEEE 802.15.4. C'est une norme adaptée aux protocoles de communication à faible coût de haut niveau conçue pour créer des réseaux personnels à faible consommation d'énergie et à faible débit de données. Elle peut prendre différents types de topologies, comme la topologie de réseau maillé, en étoile et en arbre. Utilisée principalement dans la domotique et les environnements industriels, elle permet la communication entre divers capteurs et dispositifs de surveillance [43].

## 2.3 Protocoles et technologies de communication dans les VANETs

Les VANET sont des réseaux ad hoc de véhicules dédiés à la communication entre eux et avec l'infrastructure environnante. Les protocoles de communication adoptés dans ces réseaux sont élaborés pour garantir une communication efficace. Les données utilisées dans ces réseaux sont conçues pour garantir un transfert de données efficace et sécurisé, en dépit des obstacles posés par la mobilité élevée, des connexions intermittentes et les contraintes de latence.

### 2.3.1 Dedicated Short-Range Communications(DSRC )

DSRC est une technologie de communication sans fil dédiée aux systèmes de transports intelligents dont le carrefour implique l'interaction entre véhicule et infrastructure urbaine (V2I) ainsi qu'intra-système automobile (V2V). Elle est de référence IEEE 802.11p et utilise la bande de fréquence 5,9 GHz. Elle a été développée dans le cadre de la gestion de ses applications routières comme les alertes de collision et le contrôle du flux du trafic.

Dans le cadre des réseaux de type "véhicule ad hoc" , la DSRC s'affiche pour sa plus grande utilité par l'absence de dépendance au réseau central pour l'échange direct de données entre infrastructure et véhicules. Ce système apporte un gain important pour la circulation en permettant au véhicule de partager des informations essentielles en minimisant le temps d'échange d'information. Il y a lieu de citer le contrôle coopératif de la vitesse de croisière, la détection coopérative de collision frontale, le contournement de collision d'intersections [44].

### 2.3.2 Wireless Access in Vehicular Environments(WAVE)

WAVE est une combinaison de communications sans fil intravéhiculaire (V2V) et intervéhiculaire routière (V2I) qui est d'une importance primordiale pour les VANETs. Le WAVE s'appuie principalement sur la norme IEEE 802.11p, qui spécifie les changements des couches physiques et MAC pour le 5,9 GHz, et qui s'assure que ces transmissions soient de bonne qualité en termes de délais et de fiabilité. Cette norme est importante pour maintenir l'ordre dans des zones où la circulation des véhicules est pour le moins dense. Le DSRC est aussi une technologie de pas très grande portée qui se base sur WAVE et IEEE 802.11p afin de réaliser des communications qui dépassent le domaine des services de sécurité routière et de contrôle et suivi de la circulation. Contrairement à l'IEEE 802.11p, qui ne couvre que les éléments radio [45].

WAVE englobe également les protocoles IEEE 1609, qui définissent la gestion des canaux, la sécurité et les services réseau, rendant le système plus robuste et adapté aux exigences des ITS (Intelligent Transportation Systems) [46].

1. **IEEE 1609.1** : gère les ressources et définit le format des messages pour les communications entre véhicules et infrastructures.
2. **IEEE 1609.2** : assure la sécurité des communications avec des services de chiffrement, d'authentification et de protection contre la falsification des données.
3. **IEEE 1609.3** : gère le routage, l'adressage et les protocoles de communication comme le WSM (Wave Short Message) pour les échanges courts.
4. **IEEE 1609.4** : optimise l'utilisation des canaux de communication grâce au mécanisme EDCA pour éviter les collisions et améliorer l'efficacité.
5. **IEEE 802.11p** : norme sans fil dédiée aux VANET, utilisant la bande 5,9 GHz pour des communications rapides et fiables entre véhicules (V2V) et entre véhicules et infrastructures (V2I).

### 2.3.3 Protocoles de diffusion et partage d'information dans les réseaux VANETs

Dans les VANET, la diffusion permet la transmission de données de manière omnidirectionnelle vers tous les véhicules à proximité. La méthode classique, appelée inondation (flooding), consiste à ce que chaque nœud recevant un message de diffusion le retransmette à ses voisins. Cela surcharge le réseau avec des transmissions redondantes et des collisions,

connue sous le nom de tempête de diffusion (broadcast storm). Afin d'éviter ces problèmes et d'améliorer l'efficacité du réseau, des algorithmes de diffusion optimisés ont été développés pour mieux gérer le trafic et éviter l'utilisation excessive des ressources. Ces protocoles sont dédiés principalement aux alertes de sécurité, aux mises à jour du trafic et à d'autres applications critiques dans les VANET.

Nous pouvons les classer selon leur méthode de diffusion [47].

1. **Algorithmes basés sur la probabilité** : technique de transmission qui vise à limiter le problème de la tempête de diffusion « en réduisant le nombre de retransmissions inutiles, chaque nœud le fait avec une probabilité  $P$ . »

Lorsque  $P = 1$ , l'algorithme équivaut à une inondation classique. Ces mécanismes réduisent la surcharge du réseau tout en assurant que le message atteigne un maximum de nœuds.

**Exemple** : Probabilistic Flooding [48].

2. **Algorithmes basés sur la localisation** : technique de transmission qui limite les retransmissions inutiles en dehors de la région de géocast, ce qui maximise la propagation à l'intérieur pour une communication efficace. Cette approche peut être réalisée par des appareils de positionnement comme les récepteurs GPS (Global Positioning System).

**Exemple** : LBP (Location-Based Broadcasting Protocol) [49] [50].

3. **Algorithmes basés sur l'urgence** : technique de transmission qui diffuse rapidement des messages critiques comme les alertes en cas d'accident ou les avertissements de danger sur la route. L'objectif principal est de garantir une transmission rapide et fiable tout en réduisant la surcharge du réseau.

**Exemple** : EMBP (Emergency Message Broadcast Protocol) [51].

### 2.3.4 Protocoles de routage

En VANET, les protocoles de routage sont classés en différentes catégories : les protocoles de routage basés sur la topologie, les protocoles de routage basés sur la position, les protocoles de routage de groupe et les protocoles de routage géographique.

### 2.3.4.1 Protocoles de routage base sur la topologie

Les protocoles de routage basé sur la topologie utilisent des liens qui existent dans le réseau pour réaliser le transfert de paquets. Ils sont divisés en protocoles réactifs, proactifs et hybrides. Les protocoles de routage basés sur la topologie consomment beaucoup la bande passante pour les mises à jour périodiques de la topologie [52].

1. **Protocoles réactifs** : construisent une table de routage lorsqu'un nœud effectue la demande. Il ne connaît pas la topologie du réseau.

Dans les réseaux VANET, les protocoles réactifs conviennent particulièrement aux communications V2V en environnements à forte mobilité et aux échanges V2P, caractérisés par leur caractère ponctuel et imprévisible. En revanche, leur utilisation est moins adaptée au mode V2I, en raison des exigences de latence faible et de stabilité, qui favorisent les protocoles proactifs ou hybrides [53].

Nous allons décrire dans ce qui suit les protocoles les plus importants de cette classe :

#### 1.1) Ad-hoc On-Demand Distance Vector (AODV)

AODV est un protocole réactif à vecteur de distance destiné aux réseaux mobiles ad hoc, dans lequel la route d'une source à une destination est créée uniquement lorsque cela est nécessaire et conserve ces routes aussi longtemps qu'elles sont souhaitées par les sources. AODV utilise des numéros de séquence pour garantir la fraîcheur des routes et utilise des messages Hello pour détecter et surveiller les liens vers les voisins. Chaque nœud actif diffuse périodiquement un message Hello à tous ses voisins. Étant donné que les messages Hello sont envoyés périodiquement, lorsqu'un nœud ne parvient pas à recevoir plusieurs messages Hello d'un voisin, il détecte une défaillance de liaison. Chaque nœud du réseau maintient une table de routage qui stocke les informations de routage [54] [55].

#### 1.2) Dynamic Source Routing (DSR)

DSR est un protocole de routage réactif à la demande. Dans DSR, un nœud conserve un cache de route qui contient les routes sources dont il a connaissance. Le nœud met à jour les enregistrements dans le cache de route lorsqu'un nouvel itinéraire est trouvé. La découverte et la maintenance de route sont les deux parties principales du DSR. Lorsqu'un nœud souhaite envoyer un paquet en tant que source vers une destination spécifique, il recherche dans son cache de route afin de déterminer s'il contient déjà une route vers la destination. S'il trouve

qu'une route vers la destination existe, il utilise cette route pour envoyer le paquet, mais si le nœud n'a pas de route vers la destination, il lance le processus de découverte de route en diffusant un paquet de demande de route [56].

**2. Protocoles proactifs :** chaque nœud maintient une ou plusieurs tables de routage de tous les destinataires qui se mettent à jour tout le temps. Cette catégorie de protocoles nécessite un échange périodique de paquets.

Dans les réseaux VANET, les protocoles proactifs sont bien adaptés aux communications V2I, grâce à la stabilité offerte par l'infrastructure, ainsi qu'au V2V en zones urbaines, où les mouvements sont modérés. Ils garantissent un temps de latence faible, mais sont moins efficaces en cas de forte mobilité, en raison du coût élevé des mises à jour de routage [57].

### **2.1) Destination-Sequenced Distance Vector (DSDV)**

DSDV est un protocole de routage proactif basé sur le vecteur à distance. DSDV est une version améliorée de l'algorithme distribué de Bellman-Ford reposant sur le principe du plus court chemin, caractérisée par sa capacité à résoudre les problèmes de bouclage de routage, à accélérer la convergence et à réduire le nombre de messages de contrôle. Dans ce protocole, chaque nœud conserve une table de routage recensant, pour chaque destination : la distance la plus courte, le premier nœud du chemin optimal, la métrique de coût, l'adresse du prochain saut et le numéro de séquence attribué par le nœud de destination. Les mises à jour peuvent être effectuées de manière périodique ou être déclenchées par des événements, avec la génération d'un nouveau numéro de séquence lors de tout changement de topologie. Ce mécanisme permet de stocker qu'une seule route optimale par destination. DSDV est surtout adapté aux petits réseaux ad hoc, et il est moins performant dans des environnements étendus et très dynamiques, tels que les réseaux VANET [58].

### **2.2) Optimized Link State Routing (OLSR)**

OLSR est un protocole de routage proactif, basé sur l'état des liens, conçu pour répondre aux exigences des MANET et des VANET, caractérisés par une faible bande passante et une mobilité élevée. Il se distingue par une diffusion périodique et efficace des informations de contrôle, réalisée via des nœuds spéciaux appelés relais multipoints (MPR), qui permettent de réduire significativement le nombre de transmissions nécessaires. Grâce à cette approche proactive, OLSR

est particulièrement adapté aux environnements où les nœuds effectuent des mouvements rapides et fréquents, entraînant des changements de topologie constants [59].

### 3. Protocole hybride

Les protocoles de routage hybrides combinent les avantages des deux protocoles de routage proactifs et réactifs. Le routage est établi initialement avec des itinéraires réalisés au préalable de manière proactive, puis répond à la demande et de manière réactive aux autres nœuds. Un des protocoles de routage hybrides est le ZRP (Zone Routing Protocol) [60].

#### 3.4) Zone Routing Protocol (ZRP)

ZRP est un protocole hybride pour les réseaux mobiles ad hoc. ZRP traite une zone de routage exprimée en fonction d'un rayon spécifique sous la forme d'un nombre de sauts. Les transmissions sont générées à l'aide d'un routage proactif dans la zone, tandis que les transmissions ciblées en direction des utilisateurs en dehors de la zone sont générées à l'aide d'un routage réactif. Ce dispositif permet de réduire la distance de contrôle tout en garantissant une identification rapide de l'itinéraire [61].

#### 2.3.4.2 Protocoles de routage basé sur le clustering

Les techniques de clustering ont été utilisées comme principale solution pour réduire les messages de surdébit de contrôle dans les VANET, dans lequel le réseau est divisé en plusieurs clusters et en sélectionnant l'un des membres du cluster (CM) comme tête de cluster (CH). Les CH sélectionnés sont responsables de la coordination des membres du cluster et de la communication entre les clusters. Les techniques de clustering réduiront considérablement les messages de surdébit de contrôle de routage, car les techniques de clustering restreignent la communication entre chaque CM et son CH au lieu de la communication entre tous les véhicules de la topologie VANET. Plusieurs protocoles de routage exploités sur le clustering ont été développés pour améliorer l'efficacité des réseaux, parmi lesquels nous retrouvons COIN (Location-Based Routing Algorithm), qui vise à réduire la surcharge de communication en organisant les nœuds en clusters et en désignant des chefs de cluster responsables du routage des données [62].

### 2.3.4.3 Protocoles de routage basé sur la position dans les VANET

Le routage géographique, adapté aux réseaux véhiculaires à grande échelle, repose sur deux éléments clés : le service de localisation et le processus de transfert géographique grâce à des dispositifs de géolocalisation comme le GPS et à l'utilisation de cartes numériques. Ce protocole détermine la position des nœuds ainsi que celle de la destination pour calculer le chemin optimal à travers les nœuds intermédiaires. Dans ce système, les nœuds ne conservent pas de tables de routage pour les nœuds distants et n'échangent avec leurs voisins que leurs positions, éliminant ainsi la nécessité de gérer une topologie réseau complète. Pour envoyer un message, l'expéditeur doit connaître la position de la destination et l'inscrire dans l'en-tête du paquet, ce qui permet aux nœuds intermédiaires d'ajuster le transfert en fonction de leur position actuelle, de leur vitesse et de leur direction. Cette approche garantit que les messages empruntent toujours le chemin le plus adéquat dans un environnement caractérisé par une mobilité élevée [63][64].

#### 1. Greedy Perimeter Stateless Routing (GPSR)

GPSR est un protocole de routage géographique unicast et réactif particulièrement adapté aux environnements à haute mobilité tels que les VANET où les nœuds sont uniformément répartis [65].

Le routage des paquets par GPSR se fait par deux approches [66] :

- « Greedy forwarding » où chaque nœud transmet le paquet au voisin le plus proche de la destination en se basant sur sa position géographique et son adresse.
- « perimeter forwarding » lorsque l'algorithme « greedy forwarding » échoue pour contourner les zones sans chemin direct, en utilisant un sous-graphe planaire jusqu'à ce qu'un itinéraire progressif soit retrouvé.

## 2.4 Protocoles et technologies de communication dans IoV

L'évolution de l'IoT a permis la transformation des VANET vers un écosystème plus avancé, connu sous le nom d'IoV. Contrairement aux VANET traditionnels, l'IoV est caractérisé par une connectivité hétérogène intégrant une multitude d'objets intelligents et de technologies de communication variées qui a été rendue possible grâce aux protocoles de communication V2X. Ces protocoles assurent une interaction fluide entre véhicules, infra-

structures et autres entités connectées et jouent aussi un rôle important dans l'optimisation du trafic, la recherche de services routiers ou encore l'amélioration de la sécurité et de l'expérience des usagers. Cette section explore comment les protocoles de communication de l'IOT et les réseaux VANET sont appliqués et adaptés à l'IoV.

## **2.4.1 Adaptation des protocoles IoT dans l'IoV**

### **2.4.1.1 MQTT**

Le protocole MQTT qui repose sur le modèle de publish-subscribe est une solution de messagerie légère et performante bien adaptée aux environnements à faible bande passante et à haute latence tels que l'IoV. Dans le contexte de l'IoV, des capteurs embarqués dans les véhicules publient leurs données vers un broker centralisé pendant que des applications abonnées à ce broker reçoivent les mises à jour en temps réel. Grâce à ses trois niveaux de QoS, il garantit une transmission fiable tout en assurant la sécurité et l'évolutivité. Cependant, ses performances en communication directe et en faible latence sont restreintes pour des applications critiques [37].

### **2.4.1.2 CoAP**

Le protocole CoAP, inspiré du HTTP, est un protocole léger destiné aux appareils contraints et aux réseaux instables. Dans l'IoV, il facilite la communication entre les véhicules, les capteurs routiers et les infrastructures intelligentes via un modèle client-serveur basé sur UDP. Ce protocole est optimisé pour les applications en temps réel, par exemple le streaming multimédia et la communication V2X, en particulier dans les architectures MEC où il améliore la gestion des ressources et l'interopérabilité. Cependant, sa dépendance à l'UDP peut générer une perte de fiabilité dans les environnements à très grande mobilité [67].

### **2.4.1.3 LoRaWAN**

LoRaWAN est un protocole de communication longue portée et basse consommation adapté à l'IoV, principalement pour les transmissions entre véhicules et infrastructures intelligentes distantes ou aux capteurs environnementaux. Il permet aux capteurs embarqués dans les véhicules d'envoyer des données aux passerelles LoRa, qui les transmettent ensuite aux serveurs cloud. Grâce à sa grande portée et faible consommation d'énergie, il est idéal

pour le suivi et la surveillance, mais il est moins adapté aux applications nécessitant des échanges rapides et continus en raison de son débit limité, de sa latence et des interruptions possibles lors des déplacements rapides des véhicules [68].

#### **2.4.1.4 ZigBee**

Zigbee est un standard de communication sans fil développé pour les réseaux WPAN, utilisant des radios numériques compactes, à faible consommation et à faible débit. Caractérisé par sa simplicité et son faible coût par rapport à Bluetooth [69].

Dans l’IoV, ZigBee est principalement utilisé pour connecter les capteurs embarqués des véhicules, les infrastructures intelligentes (feux de signalisation, parkings, bornes de recharge) et facilite la communication entre véhicules (V2V) et avec les piétons (V2P). Il convient parfaitement aux communications locales à faible consommation d’énergie, comme pour la gestion de capteurs de sécurité ou l’optimisation du trafic. Cependant, en raison de son faible débit et de sa courte portée, il devient inadapté aux échanges longue distance ou aux véhicules en mouvement rapide [70].

### **2.4.2 Adaptation des protocoles VANET dans l’IoV**

#### **2.4.2.1 Dedicated Short-Range Communication**

DSRC est une technologie basée sur l’IEEE 802.11p, dérivée du standard WiFi dédié aux applications automobiles et de transport. Le DSRC exploite la technologie WLAN pour établir des communications à très courte portée entre les véhicules et les infrastructures (V2V et V2I) dans le but d’échanger instantanément et directement des informations, essentielles pour la sécurité, la gestion efficace du trafic et le soutien aux véhicules autonomes et aux services connectés. Toutefois, ce standard DSRC est limité à un rayon d’action de communication de 1 km selon l’usage [71].

#### **2.4.2.2 C-V2X (Cellular Vehicle-to-Everything)**

Représentant une technologie essentielle dans le domaine de l’Internet des véhicules (IoV), elle exploite les réseaux cellulaires (4G LTE et 5G). Cette technologie repose sur deux modes de communication [72] :

- La communication directe (PC5) permet un échange sécurisé entre véhicules (V2V), entre infrastructure et véhicule (V2I), entre véhicules et piétons (V2P) sans dépendre de

l'infrastructure réseau cellulaire et donc permettant une communication à faible latence et longue portée.

– La communication réseau exploite les réseaux cellulaires pour le transport des données entre les véhicules et l'infrastructure, offrant ainsi une communication à plus grande portée, indispensable pour des services tels que les informations en temps réel sur la circulation ou sur l'état de la route. Cette combinaison de communication directe et indirecte permet à C-V2X d'offrir une connectivité flexible et fiable, s'adaptant aux besoins spécifiques de l'IoV, qu'il s'agisse de scénarios à courte ou à longue portée.

### 2.4.2.3 Protocoles de routage

Dans le cas des VANET classiques, le routage se concentre principalement sur la communication entre véhicules (V2V) et de véhicules vers infrastructures (V2I), alors que dans l'IoV, cette communication est développée pour englober les échanges entre véhicules et objets (V2X). Cette diversité de communications nécessite des protocoles adaptés aux spécificités de chaque environnement. Nous distinguons principalement deux grandes catégories de protocoles : les protocoles basés sur la topologie d'une part et ceux basés sur la position d'autre part. Les premiers reposent surtout sur la gestion de tables de routage. Les seconds exploitent en revanche les coordonnées géographiques des véhicules pour mettre en place un acheminement de paquets plus flexible, en utilisant des stratégies comme le greedy forwarding ou la stratégie carry-and-forward [73].

#### 1. Protocoles basés sur la topologie

Nous trouvons AODV, OLSR qu'on a détaillés déjà dans la partie des protocoles de routage dans les VANET et aussi SD-AOMDV (Ad hoc On-demand Multipath Distance Vector Routing) : extension d'AODV établissant plusieurs chemins pour améliorer la résilience.

Ces protocoles peuvent être efficaces pour les communications V2V, mais deviennent rapidement limités dans les scénarios V2X où la topologie du réseau évolue rapidement [5].

#### 2. Protocoles basés sur la position

Nous trouvons le GPSR, le RBVT-R (Road-Based Vehicular Traffic Reactive Protocol) qui génère les routes en fonction des données de trafic en temps réel pour mieux s'adapter aux conditions routières. Et enfin le GVGrid qui repose sur une approche de quadrillage géographique pour assurer la qualité de service (QoS) et maintenir

des routes robustes face à la mobilité des véhicules. Ces protocoles sont adaptés aux environnements dynamiques des réseaux de véhicules, et leur mode de communication dépend de la nécessité de transmettre les données entre les véhicules eux-mêmes (V2V), ou avec les infrastructures (V2I) et services externes (V2X) [74].

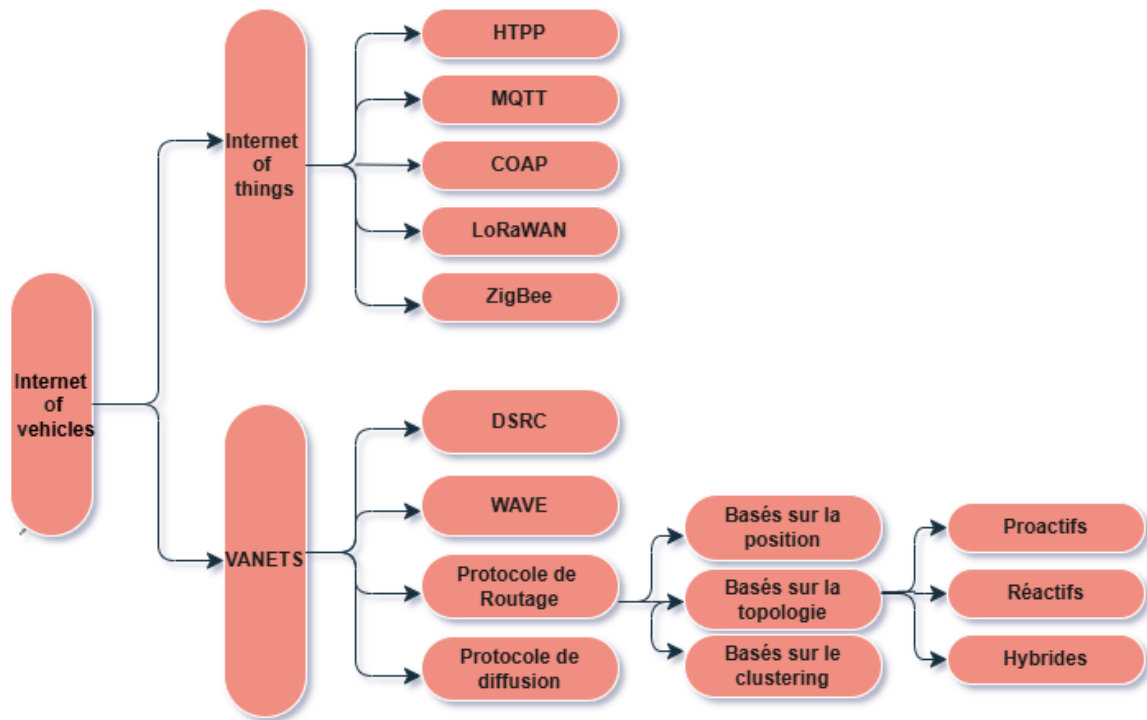


Figure II.1 Schéma récapitulatif sur les protocoles et les technologies de communication.

## 2.5 Conclusion

Ce chapitre a permis de passer en revue les protocoles de communication essentiels à la mise en œuvre et au fonctionnement optimal de l'IoT, des VANET et de leur intégration dans l'IoT-VANET. Il apparaît clairement que chaque environnement a ses propres contraintes spécifiques, telles que la mobilité, la consommation d'énergie ou encore la latence, qui affectent le choix des protocoles à mettre en œuvre. Alors que les protocoles du VANET privilégient la vitesse et la fiabilité au détriment de la mobilité, ceux de l'IoT mettent davantage l'accent sur l'économie d'énergie. L'analyse de ces protocoles permet de mettre en évidence les synergies possibles pour le développement d'architectures hybrides à haute performance, afin de répondre à la demande croissante de communication intelligente et sécurisée dans les systèmes de transport de nouvelle génération.

Le prochain chapitre sera consacré à la définition des notions clés liées aux systèmes multi-agents (SMA) et aux systèmes de systèmes (SoS), en mettant en lumière leurs liens avec l'internet des véhicules.

# Chapitre 3

## Outils de modélisation et simulation

## 3.1 Introduction

Les systèmes multi-agents (SMA) constituent un domaine de recherche passionnant, avec des applications dans de nombreux secteurs tels que les systèmes distribués, les interfaces homme-machine, le génie logiciel ou encore les réseaux. Ces systèmes sont conçus pour résoudre des problèmes complexes en répartissant les connaissances et les compétences entre plusieurs entités autonomes.

Dans ce chapitre, nous définirons les concepts d'agent, de système multi-agent ainsi que celui de système de systèmes (SoS). Nous explorerons leurs différents types et caractéristiques, puis nous analyserons les relations existantes entre les SMA, les SoS et l'IPv, en mettant en évidence leur interconnexion et leur complémentarité dans le cadre de la modélisation et de la simulation de systèmes complexes.

## 3.2 Système de systèmes (SoS)

### 3.2.1 Définition

SoS est un ensemble appartenant à différents systèmes indépendants et distincts, qui sont connectés ou unis pour créer un système plus large et plus complexe. Ces systèmes fonctionnent en collaboration pour parvenir à un plus commun, ce qui ne pourrait être réalisé par aucun d'entre eux séparément.

Ce type de système se caractérise par l'émergence de comportements collectifs, issus de l'interaction entre les composants des systèmes. Chaque système ne perd pas son autonomie et ses propres fonctions, mais saucé aussi aux transactions avec les autres systèmes afin d'être dans la mise en œuvre des objectifs globaux du système de systèmes [75].

### 3.2.2 Caractéristiques d'un SoS

- **Évolution** : Grâce à leur autonomie, les composants d'un SoS peuvent évoluer ou se modifier indépendamment du système global. Par ailleurs, les SoS fonctionnent dans des environnements complexes, dynamiques et souvent imprévisibles. Les changements dans ces environnements, ainsi que l'évolution des objectifs du SoS, entraînent une adaptation continue du système pour répondre aux variations internes et externes [76].

- **Emergence** : il s'agit d'une caractéristique essentielle d'un SoS. L'émergence désigne le comportement global du système résultant des interactions entre ses différents composants, un comportement qui ne peut être attribué à un composant pris isolément [76].
- **Diversité** : un SoS doit disposer d'une diversité fonctionnelle bien plus large qu'un système classique, dont les capacités sont généralement limitées par sa conception initiale. Cette diversité est essentielle pour répondre à l'incertitude, aux événements inattendus et aux innovations disruptives, en mobilisant des fonctions variées selon les besoins [76].

## 3.3 Système multi-agents (SMA)

### 3.3.1 Notion d'agent

Un agent est un système informatique autonome et indépendant, présent dans un environnement donné et capable d'agir avec souplesse pour atteindre un objectif. C'est une entité bien établie, dotée de limites et d'interfaces définies, qui détecte son environnement grâce à des capteurs et agit sur lui via des effecteurs [77].

L'agent contrôle ses propres actions, est capable de s'adapter aux changements de son environnement (réactivité) et d'initier de nouvelles actions ou de nouveaux objectifs (proactivité). Dans un environnement multi-agents, il peut également communiquer, coopérer, coordonner et négocier avec d'autres agents pour résoudre des problèmes complexes [78].

#### 1. Type Agent

- **Agent cognitif** : est un système qui a une base de données qui lui donne la capacité d'entendre son environnement, de raisonner, de planifier et d'échanger pour terminer ses tâches et d'interagir d'une manière appropriée avec d'autres agents [79].
- **Agent réactif** : est un système qui répond directement aux stimuli de son environnement sans utiliser de mémoire ni de raisonnement complexe. Il agit selon des règles simples basées sur la situation actuelle, ce qui le rend rapide, mais peu adapté aux situations complexes ou à la planification [79].
- **Agent hybride** : un agent est composé d'une architecture multiclass qui repose sur la hiérarchie des niveaux. Cela permet à l'agent hybride de combiner des compétences

réactives et la cognition, lui permettant d'adapter son comportement en temps réel aux évolutions de l'environnement qui l'entoure[79].

### 3.3.2 Définition d'un système multi-agents

Un système multi-agent est un système réparti constitué de plusieurs agents, qui peuvent être des logiciels, des robots ou des êtres humains, interagissant généralement à travers diverses modalités (coopération, concurrence, coexistence) [80].

Effectivement, chaque agent possède ses propres compétences à mettre en œuvre pour réaliser une tâche de base tout en collaborant avec les autres agents du SMA. Ces agents possèdent à la fois des caractéristiques communes et distinctes, partageant des objectifs identiques ou divergents [77].

#### 3.3.2.1 Communication

La communication est la base de tous les modes d'interaction, elle définit tout partage d'informations entre les agents. Dans un SMA, deux modes de communication entre agents sont rencontrés : la communication directe et la communication indirecte [80].

- **communication directe** : il s'agit de la transmission directe de messages entre agents. La transmission de l'information peut se faire de manière unidirectionnelle si celle-ci est dirigée vers un seul agent, ou en mode de diffusion si elle est partagée avec l'ensemble des autres agents.
- **communication indirecte** : elle peut se réaliser en changeant l'environnement ou en manipulant les connaissances partagées. Les agents ont la capacité de laisser des marques dans leur environnement qui reflètent leurs actions et leurs états. Dans ce type de communication, l'information peut ne pas être bien comprise, car il n'est pas garanti que tous les agents remarquent ces changements.

#### 3.3.2.2 Environnement d'un SMA

L'environnement peut être considéré comme l'espace commun aux agents du système. Il peut être modifié par les agents, soit de manière globale, soit en distinguant les objets passifs (qui subissent les actions des agents) des entités actives (représentées par les agents eux-mêmes) [75].

Un environnement peut être :

- **Accessible ou inaccessible** : un agent peut avoir ou non un accès complet à l'état de l'environnement [79].
- **Déterministe ou indéterministe** : l'évolution de l'état de l'environnement peut dépendre uniquement de son état courant et des actions effectuées par les agents, ou non [79].
- **statique ou dynamique** : l'environnement peut évoluer pendant que l'agent est en action (ou en phase de réflexion), ou rester inchangé [79].
- **Discret ou continu** : le nombre de perceptions et d'actions dont disposent les agents peut être restreint ou illimité. Dans ce qui suit, nous présentons quelques caractéristiques essentielles des systèmes multi-agents (SMA) [79].

### 3.3.2.3 Caractéristiques d'un SMA

Un système multi-agents (SMA) se caractérise généralement par les éléments suivants [79] :

- **Distribution** : le système est décomposable en entités autonomes, l'unité de base étant l'agent.
- **Décentralisation** : les agents fonctionnent de manière autonome, il n'existe pas de prise de décision centralisée applicable à l'ensemble du système.
- **Autonomie** : chaque agent fonctionne de manière continue et prend ses propres décisions en fonction de ses objectifs, de ses perceptions et de ses connaissances.
- **Organisation** : les interactions entre agents engendrent des relations, lesquelles forment une structure organisationnelle pouvant évoluer dynamiquement au fil du temps.

## 3.4 Agent-Based Modeling (ABM)

ABM est une méthode de modélisation computationnelle qui vise à visualiser un système complexe en tant que regroupement d'entités indépendantes définies comme capables de communiquer entre elles et avec leur environnement selon des règles établies. Chaque agent possède des caractéristiques propres, prend des décisions de manière indépendante et agit localement, mais les dynamiques du système dans son ensemble émergent de ces interactions individuelles. [81]

## 3.5 Relation entre IoV, SMA et SoS

Parmi les approches fondées sur les agents, la simulation des systèmes multi-agents (SMA) s'impose comme la méthode la plus appropriée et la plus largement utilisée pour modéliser les différents aspects des SoS. En effet, un agent est défini comme une entité autonome capable d'assumer certains rôles et d'interagir avec d'autres agents afin d'atteindre des objectifs individuels ou partagés.

Les SMA sont des systèmes intelligents distribués, composés d'agents coopérant et se coordonnant pour réaliser leurs objectifs locaux, tout en contribuant à l'atteinte d'objectifs globaux. Ils offrent ainsi une base pertinente pour représenter les architectures des SoS, à condition que les concepts des modèles soient correctement cartographiés aux concepts issus de l'approche multi-agents.

L'IoV, les SoS et les SMA sont complémentaires dans la conception des systèmes de transport intelligents. L'IoV assure la connectivité entre les entités, le SoS structure ces entités comme des sous-systèmes autonomes mais coopérants, et les SMA permettent de modéliser leur comportement en tant qu'agents autonomes. Cette intégration facilite la coordination, l'adaptabilité et la simulation de systèmes complexes.

## 3.6 Simulation

La simulation est une méthode par laquelle on reproduit le comportement d'un système réel par le biais d'un modèle, afin de découvrir ce qui arrive au système dans une situation ou une autre.

On peut évaluer des hypothèses en utilisant la simulation, observer des changements au système au fil du temps et tester des résolutions sans agression du système réel en aucune manière similaire [82].

### 3.6.1 Outils de simulation

L'IoV représente une évolution des réseaux véhiculaires traditionnels en intégrant des technologies de communication avancées, des capteurs intelligents ainsi qu'une connectivité avec les infrastructures urbaines et les dispositifs de l'IoT. Compte tenu de la complexité de cet écosystème, qui implique une forte mobilité, des interactions temps réel, la simula-

tion s'avère essentielle pour analyser, valider et optimiser les différentes architectures et protocoles proposés. Plusieurs plateformes de simulation permettent d'étudier les scénarios IoV sous différents angles et permettent de reproduire fidèlement les dynamiques d'un système IoV.

### 3.6.1.1 Network Simulator-2 (NS2)

NS2 (Network Simulator 2) est un simulateur basé sur des événements discrets, couramment utilisé dans le domaine de la recherche pour l'analyse des réseaux de communication. Il permet la modélisation et la simulation de réseaux filaires et sans fil, en intégrant divers protocoles tels que TCP, UDP ou les algorithmes de routage. NS2 offre un cadre flexible permettant de définir les protocoles réseau et d'évaluer leur comportement sous différentes conditions expérimentales [83].

### 3.6.1.2 Network Simulator-3 (NS3)

NS-3 est un logiciel open source de simulation de réseaux informatiques, reposant sur le principe de la simulation par événements discrets. Dans ce type de simulateur, chaque événement est associé à un instant d'exécution, et la simulation évolue en suivant un ordre temporel prédéfini. Lorsqu'un événement est traité, il peut entraîner la génération de nouveaux événements ou ne produire aucun effet. La simulation se poursuit jusqu'à l'épuisement de la file des événements planifiés, ou jusqu'à la survenue d'un événement particulier marquant la fin du processus simulé [84].

### 3.6.1.3 OMNeT++

OMNeT++ est un environnement de simulation modulaire, extensible et basé sur les événements discrets, conçu principalement pour la modélisation et l'analyse de réseaux de communication, de systèmes distribués et de systèmes embarqués. Il repose sur un noyau en C++ et utilise un langage de description spécifique (NED) pour définir les structures des réseaux simulés. Grâce à son architecture ouverte, OMNeT++ peut être étendu par divers frameworks, tels que INET pour les réseaux IP ou Veins pour les réseaux véhiculaires. Il offre également une interface graphique avancée, ainsi que des capacités d'exécution distribuée et parallèle, permettant la simulation de scénarios complexes à grande échelle [84].

#### 3.6.1.4 Simulator of Urban Mobility (SUMO)

est un logiciel open source de simulation du trafic routier. Il peut gérer tous les aspects liés au déplacement des véhicules sur un réseau routier donné. Il fournit l'ensemble des outils nécessaires à la création d'un réseau (tracé des voies, définition de leurs directions, ajout de ronds-points, etc.). Il permet également la gestion de la mobilité des véhicules (définition des caractéristiques des véhicules, simulation d'accidents) [85].

#### 3.6.1.5 NetLogo

NetLogo est un langage de programmation multi-agent basé sur le langage Logo. Il est distribué en tant que logiciel open source. Conçu et développé dès le départ pour la modélisation et la simulation de systèmes complexes évoluant dans le temps, NetLogo permet de modéliser et de simuler une grande variété de systèmes complexes dans de nombreux domaines, dont les réseaux informatiques [86].

### 3.6.2 Choix Netlogo

Pour notre cas, nous avons choisi de faire notre simulation avec le simulateur NetLogo pour les raisons suivantes :

- NetLogo est un programme open source qui bénéficie d'une communauté d'utilisateurs et de développeurs très dynamique.
- Il est spécifiquement élaboré pour les simulations basées sur des agents, afin de faciliter la modélisation des phénomènes complexes issus des interactions entre entités simples.
- NetLogo dispose d'une bibliothèque d'agents préprogrammés, notamment des « tortues » représentant des individus ou des « entités » et des « patches » représentant des emplacements spatiaux. Il offre une plus grande souplesse en matière de programmation, de modélisation et de simulation et permet de créer des modèles personnalisés en fonction de besoins particuliers.
- Le logiciel prend en charge une variété de méthodes de modélisation, telles que les graphes, les réseaux et les systèmes multi-agents.

### 3.6.3 Présentation Netlogo

NetLogo est un langage de programmation multi-agents open source, basé sur Logo. Il a été créé et élaboré de la programmation pour modéliser/simuler des phénomènes collectifs naturels. Il est particulièrement approprié pour modéliser des systèmes complexes constitués de centaines, voire de milliers d'agents opérant simultanément. Il a la capacité de manipuler plusieurs simulations dans divers domaines tels que la sociologie, la biologie, la médecine, la physique, la chimie, les mathématiques, l'informatique, l'économie et la psychologie sociale, tout en étant capable de concevoir ses propres modèles.



*Figure III.1 Logo de NetLogo.*

### 3.6.4 Concept d'agent dans NetLogo

Il existe 4 types d'agents dans Netlogo :

- **Tortue (Turtle)** : sont des agents qui sont situés et mobiles dans l'environnement.
- **Cellule (Patch)** : Cellules fixes qui définissent la grille sur laquelle des agents mobiles (turtles) peuvent se déplacer.
- **Lien (Link)** : c'est l'agent qui autorise la connexion entre deux tortues. Les liens ne possèdent pas de coordonnées. Toute liaison comporte deux extrémités, et chaque extrémité est une tortue. Si une tortue vient à mourir, le lien est également rompu.
- **Observateur (Observer)** : On peut se servir de l'observateur pour conférer des instructions précises à des patches ou à des tortues. Il réunit aussi des données pour l'élaboration de graphiques.

### 3.6.5 Procédures et fonctions

- **Les procédures** : Les procédures sont des fonctions spécifiques qui regroupent certaines instructions que nous devons exécuter à plusieurs reprises, et qui servent à modifier les variables globales et/ou les variables passées en argument. Déclaration :

```
to <nom-procédure> [<parametre1> <parametre2> . . .]
```

```
<Instructions>
```

```
End
```

```
Appel : <nom-procédure> <argument1> <argument2>
```

- **Les fonctions** : sont des techniques qui retournent une valeur spécifique à l'issue de leurs processus. Valeur à stocker dans une variable ou à exploiter dans un calcul.

Déclaration :

```
To-report <nom-fonction> [<parametre1> <parametre2> . . .]
```

```
<Instructions>
```

```
Report <valeur>
```

```
End
```

```
Appel : <nom-fonction> <argument1> <argument2>
```

## 3.7 Conclusion

La modélisation des systèmes complexes, tels que les SMA et les SoS , constitue un domaine essentiel pour la compréhension et la conception d'environnements dynamiques et interconnectés. Ce chapitre a posé les bases théoriques nécessaires à la compréhension et à l'application des concepts liés aux SMA et aux SoS.

Nous avons vu qu'un système multi-agents est un ensemble d'entités autonomes, appelées « agents », évoluant dans un environnement commun. Ces agents interagissent en s'appuyant sur des propriétés fondamentales telles que la coopération, l'autonomie et l'intelligence. L'ensemble de ces interactions, entre agents et autres entités du système global, s'inscrit pleinement dans la logique des systèmes de systèmes (SoS).

Dans le chapitre suivant, nous mettrons en application les notions présentées ici, en détaillant notre scénario ainsi que la simulation correspondante.

Chapitre **4**

Scénarios et implémentation

## 4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous examinerons le scénario de la ville intelligente, qui simule des situations urbaines réalistes afin d'évaluer les performances, l'organisation et les interactions des différents composants du système urbain. Ce scénario mettra en évidence la communication entre les entités (véhicules, capteurs, infrastructures) à travers des protocoles dédiés, en particulier dans des contextes de circulation, de sécurité et de détection d'événements critiques.

La simulation sera réalisée à l'aide de NetLogo, un environnement de modélisation et de simulation multi-agents permettant de représenter des systèmes complexes et d'analyser leur comportement via des interactions dynamiques.

Grâce à NetLogo, nous serons en mesure de construire un modèle de ville intelligente virtuelle, d'explorer différentes configurations de communication et d'analyser les échanges entre les agents (véhicules, piétons, capteurs, RSU, etc.) selon les protocoles de communication mis en œuvre (V2V, V2I, etc.). Nous pourrions également simuler différents événements (accident, incendie, urgence médicale) et observer la réaction du système face à ces perturbations.

Ce chapitre offre ainsi une vue d'ensemble approfondie du fonctionnement d'une ville intelligente, en mettant l'accent sur l'importance des communications protocolaires pour la coordination et la résilience urbaine. Pour conclure, nous proposerons des pistes d'amélioration pour renforcer la fiabilité du système et prévenir les dysfonctionnements.

## 4.2 Scénarios de la simulation

### 4.2.1 Description des scénarios

#### 1. Scénarios 1 : Fonctionnement normal d'une ville intelligente interconnectée

Ce scénario décrit le fonctionnement standard d'une ville intelligente en l'absence de tout événement critique (accident, incendie ou alerte urgente). Dans ce contexte, l'ensemble des entités présentes dans l'environnement urbain (véhicules, piétons, feux, capteurs, portails, RSU, caméras) interagissent automatiquement à travers un réseau de communication distribué, basé sur des technologies telles que DSRC et LTE/5G, selon les cas d'usage et la portée requise.

- **Circulation des véhicules dans un environnement connecté** Les véhicules circulent sur un réseau routier organisé, chacun suivant un parcours défini entre sa position de départ et sa destination. Lorsqu'un véhicule atteint une intersection, il décide de tourner ou de continuer en fonction de sa route, tout en respectant les feux véhicules. Pendant leurs déplacements, les véhicules communiquent en arrière-plan avec les RSU à proximité via une communication V2I (Vehicle-to-Infrastructure), notamment pour rester localisables ou recevoir d'éventuelles instructions. Ces échanges sont principalement réalisés à l'aide des protocoles DSRC pour la communication de proximité à faible latence, et LTE-V2X pour des mises à jour périodiques ou les zones de plus grande couverture.
- **Comportement des véhicules stationnés** Dans les zones de stationnement de la ville intelligente (parking), on retrouve des véhicules stationnés, représentant des voitures garées en attente de mise en circulation. En situation normale, ils peuvent quitter leur place de stationnement de manière autonome, selon une logique définie dans le cycle de simulation. Ils rejoignent alors le trafic routier classique, en s'insérant dans les voies comme n'importe quel autre véhicule actif. Une fois sur la route, ils adoptent le comportement standard des véhicules, et commencent à interagir avec l'infrastructure via V2I, en utilisant DSRC ou LTE-V2X, selon la technologie disponible dans la zone.
- **Ambulances et camions de pompiers dans le trafic régulier** En dehors des situations d'urgence, les ambulances et les camions de pompiers peuvent quitter l'hôpital ou la caserne pour circuler dans la ville. Lorsqu'un de ces véhicules se prépare à sortir, le portail intelligent s'ouvre automatiquement, activé par une communication I2V (Infrastructure-to-Vehicle) utilisant DSRC. Une fois le véhicule engagé sur la voie publique, le portail se referme automatiquement, assurant ainsi la sécurité et le contrôle d'accès aux zones sensibles. Ces véhicules circulent ensuite normalement et échangent des données avec les RSU via V2I, en utilisant LTE-V2X ou DSRC pour assurer leur suivi et leur intégration dans le trafic.
- **Comportement des piétons** Dans la ville intelligente, les piétons se déplacent librement sur les trottoirs, en suivant des trajectoires variées selon leurs intentions. Ils ne traversent jamais en dehors des passages piétons, ce qui reflète

un respect strict des règles de circulation. Lorsqu'un piéton souhaite traverser la route, il doit se trouver au niveau d'un passage piéton et vérifier l'état du feu piéton. Si le feu est vert, il traverse ; si le feu est rouge, il attend à l'entrée du passage, sans s'engager sur la chaussée. Les piétons sont détectés périodiquement par les RSU via une communication I2P (Infrastructure-to-Pedestrian), généralement établie via LTE/5G.

- **Gestion intelligente des feux de signalisation** Les feux véhicules et feux piétons de la ville fonctionnent de manière automatisée selon un principe d'alternance des priorités. À tout moment, seule la direction de circulation concernée est autorisée à avancer (état feu = vert), tandis que les autres restent au rouge. Cette alternance se fait de manière cyclique et fluide. Les feux piétons sont synchronisés avec les feux véhicules : lorsqu'un feu véhicule est au rouge, le feu piéton correspondant passe au vert, permettant la traversée en toute sécurité. Inversement, dès que le feu véhicule repasse au vert, le feu piéton associé retourne automatiquement au rouge pour empêcher toute traversée. La coordination entre ces feux est gérée par les RSU via des communications I2I, s'appuyant sur des protocoles DSRC.
- **Composants urbains en ville intelligente** Les infrastructures intelligentes telles que les RSU, les caméras de surveillance et les capteurs environnementaux restent actives en mode de veille continue. Les caméras surveillent les zones sensibles comme les intersections, tandis que les capteurs collectent en temps réel des données environnementales (température, humidité, etc.). De leur côté, les RSU n'attendent pas passivement une alerte : ils détectent périodiquement toutes les entités connectées présentes dans leur zone de couverture, qu'il s'agisse de véhicules, de piétons ou d'autres objets intelligents. Cette détection régulière s'effectue via des communications V2I, I2P ou I2I, selon le type d'entité ciblée, et repose sur des protocoles DSRC ou LTE-V2Xi. Elle permet au RSU de maintenir une connaissance à jour de son environnement local, afin d'être capable de réagir immédiatement en cas d'événement anormal.

## 2. Scénarios 2 : Gestion d'un accident avec ambulance (collision piéton–véhicule)

Nous supposons que l'événement commence lorsqu'un piéton sort d'un supermarché pour se diriger vers une zone résidentielle. En traversant la chaussée de manière imprudente, sans respecter les règles de circulation (passage piéton et état des feux

piéton), il s'engage sur la route. Simultanément, un véhicule quitte un parking situé à proximité, ignorant un feu rouge actif. Ce double manquement aux règles de circulation entraîne une collision entre le piéton et le véhicule. Une caméra de surveillance intelligente, installée à l'intersection, détecte immédiatement l'accident à l'aide de sa couverture visuelle et de ses capacités d'analyse locale. Cette détection, transmise automatiquement au RSU via un réseau de communication entre infrastructures (I2I) via une connexion de type DSRC ou, selon la configuration, via un réseau cellulaire (LTE/5G).

Dès réception de l'alerte, le RSU déclenche une série d'actions coordonnées. La première action consiste à informer le centre hospitalier à travers une communication inter-infrastructurelle sécurisée (I2I) via LTE/5G. Ce dernier déploie immédiatement une ambulance vers le lieu de l'accident, tandis que le portail de l'hôpital s'ouvre automatiquement à l'approche du véhicule, grâce à une communication directe entre l'infrastructure et le véhicule concerné (I2V) utilisant DSRC.

Simultanément, le RSU active une détection périodique par géolocalisation des entités connectées dans sa zone de couverture. Il identifie les piétons situés à proximité de la scène de l'accident via une connexion I2P utilisant LTE/5G, et leur envoie une alerte de sécurité à travers leur application mobile pour leur recommander d'éviter la zone.

En ce qui concerne la gestion du trafic, la RSU prend le contrôle des feux de circulation dans la zone : les feux piétons passent automatiquement au rouge pour interdire toute traversée, et seuls les feux véhicules situés sur l'itinéraire prévu de l'ambulance sont ajustés pour assurer un passage fluide. Cette coordination repose sur des échanges directs entre la RSU et les feux, suivant un schéma de communication infrastructure-à-infrastructure (I2I).

Grâce à la géolocalisation, la RSU identifie également les véhicules présents sur la route que l'ambulance doit emprunter, et leur envoie une instruction embarquée pour adapter leur comportement (ralentir, se décaler ou s'arrêter). Cette étape mobilise une communication infrastructure-vers-véhicule (I2V) qui s'appuie sur LTE- V2X.

Enfin, si un véhicule détecte lui-même l'accident, il peut relayer l'alerte aux autres véhicules situés dans sa portée via la communication inter-véhicules (V2V) en utilisant le protocole de diffusion basée sur l'urgence, renforçant ainsi la diffusion

rapide de l'information sans dépendre exclusivement de l'infrastructure.

Une fois l'ambulance arrivée à l'hôpital avec la victime, le système remet automatiquement les feux de signalisation dans leur état normal, et la circulation reprend son cours habituel, marquant le retour à un fonctionnement standard de la ville intelligente.

### 3. Scénarios 3 : Intervention des pompiers suite à un incendie dans un jardin

Ce scénario reprend la logique du précédent, en l'adaptant à un incendie détecté dans un jardin urbain, plutôt qu'à un accident de la route. Le processus repose toujours sur une détection initiale par un capteur environnemental intelligent, déclenchant une réaction rapide des infrastructures connectées.

Un feu se déclenche dans un jardin public, et il est immédiatement détecté par un capteur chargé de surveiller en temps réel des paramètres tels que la température, la fumée ou l'humidité. Cette alerte est transmise au RSU via une communication de type infrastructure-à-infrastructure (I2I), utilisant soit une liaison courte portée comme DSRC, soit un réseau cellulaire LTE/5G, selon la disponibilité.

Le RSU informe instantanément la caserne de pompiers, via une liaison I2I s'appuyant sur un réseau haut débit sécurisé, généralement basé sur LTE/5G dans les environnements urbains denses. Cette alerte déclenche le départ d'un camion de pompiers, pour lequel le portail de la caserne s'ouvre automatiquement, grâce à une communication I2V (infrastructure-vers-véhicule) utilisant DSRC.

En parallèle, le RSU détecte les piétons présents autour de la zone de danger grâce à un système de géolocalisation périodique. Une alerte de sécurité leur est envoyée directement sur leurs appareils mobiles via communication I2P (infrastructure-à-piéton) en utilisant LTE/5G, leur demandant de s'éloigner ou d'éviter la zone incendiée.

Le système adapte aussi les feux de circulation pour garantir le passage prioritaire des secours : les feux véhicules et piétons sont régulés dynamiquement par le RSU via des communications I2I (RSU → feux), en exploitant soit DSRC, soit LTE/5G. Seuls les feux sur le trajet du véhicule de secours sont modifiés pour optimiser la fluidité sans perturber les autres axes.

De plus, la position des véhicules présents sur l'itinéraire du camion est analysée par le RSU, qui leur envoie des instructions comportementales via V2I (Vehicle-to-

Infrastructure) sur DSRC ou LTE-V2X : se décaler, ralentir, ou s'arrêter temporairement pour libérer la voie. En complément, une diffusion entre véhicules est assurée : les voitures qui ont reçu l'instruction peuvent relayer l'alerte aux autres véhicules à proximité via V2V, facilitant une propagation rapide sans surcharger l'infrastructure. Ce relais est typiquement opéré via DSRC, pour sa faible latence et sa portée locale.

Ce scénario est étendu à un contexte évolutif, où plusieurs foyers d'incendie peuvent être déclenchés successivement. Chaque RSU réagit localement de manière autonome et décentralisée, tout en coordonnant ses actions avec les autres RSU si nécessaire — pour partager les ressources, rediriger les flux de véhicules ou mettre à jour les itinéraires. Cette communication inter-RSU (I2I) se fait sur des réseaux LTE/5G, permettant une synchronisation rapide à l'échelle de la ville.

#### **4.2.2 Conditions générales des scénarios de simulation dans une ville intelligente**

- Toutes les entités de la ville (véhicules, piétons, infrastructures, capteurs. . .) sont intelligentes et interconnectées, capables de réagir automatiquement aux conditions de circulation et aux événements détectés.
- Le RSU (Road Side Unit) agit comme un point d'accès intelligent au système d'information, en interaction avec une application de localisation embarquée dans les entités mobiles.
- Dans ce contexte, le RSU joue également un rôle partiel de cloud local, en assurant le traitement, la coordination et la diffusion rapide des informations dans sa zone de couverture, sans passer par un serveur centralisé.
- L'éclairage public est entièrement automatisé : il s'allume à la tombée de la nuit et s'éteint au lever du jour, grâce à des capteurs lumineux connectés. - Les véhicules intelligents s'arrêtent automatiquement lorsqu'ils détectent un feu rouge et redémarrent au passage au vert, sans intervention humaine. - Les piétons se déplacent librement sur les trottoirs, et ne peuvent traverser qu'au niveau des passages piétons (crosswalk), à condition que le feu piéton soit vert. - Le portail de la caserne ou de l'hôpital s'ouvre automatiquement dès qu'un véhicule d'urgence est détecté dans sa zone de proximité, ou lorsqu'une situation d'urgence est déclenchée. Il se referme dès que le véhicule a quitté la zone ou que l'état d'urgence est considéré comme terminé. - Un état d'urgence est considéré comme terminé lorsque le véhicule de secours est

revenu à son stationnement (caserne ou hôpital), et que tous les éléments du système reprennent leur fonctionnement normal.

- Les communications V2V et V2I (entre véhicules, ou entre véhicules et RSU) utilisent principalement le protocole DSRC, pour sa faible latence sur de courtes distances.
- Les communications de type I2I, I2V, I2P ou I2N (infrastructure à infrastructure, à véhicule, à piéton ou à capteur environnemental) exploitent le réseau LTE/5G si la portée est large, et DSRC lorsque la communication s'effectue sur de courtes distances locales.
- Toutes les entités d'infrastructure (caméras, capteurs, RSU, etc.) participent activement à la détection d'événements. Les caméras effectuent une surveillance en temps réel, les capteurs déclenchent des alertes en fonction de paramètres environnementaux (température, fumée...), et les RSU réalisent une détection périodique des entités connectées dans leur zone de couverture.
- Si une situation d'urgence est détectée par l'un de ces composants, l'ensemble du système intelligent adapte immédiatement son comportement pour gérer efficacement l'événement.
- Les caméras intelligentes détectent les incidents à l'aide d'algorithmes de reconnaissance d'image ou d'intelligence artificielle embarquée, leur permettant d'analyser le contexte visuel en temps réel.
- Chaque véhicule est capable de détecter la présence des autres véhicules dans sa zone de portée.
- Lorsqu'un véhicule d'urgence ou un véhicule initialement stationné rejoint le trafic, il adapte automatiquement son comportement pour respecter les règles de circulation en vigueur, tout en intégrant les priorités liées à son statut.

### 4.2.3 Définition des agents

- **Agent éclairage** : il détecte s'il y a un changement de temps selon lequel il s'allume ou s'éteint.

**Procédure\_éclairage\_intelligente****Début**

```

if temps = nuit then
  | L'éclairage s'allume automatiquement.
else
  | L'éclairage s'éteint automatiquement.
end
Fin.

```

- **Agent voiture** :Se déplace dans la ville, tout en respectant les feux intelligents. Lorsqu'il détecte un accident ou un incendie, il diffuse l'information aux autres véhicules situés dans sa zone de portée afin de prévenir le danger et d'adapter leur comportement.

**Procédure \_Diffusion\_V2V****Début**

```

if la voiture détecte un événement = "accident" ou événement = "feu" then
  | Elle diffuse l'alerte aux autres voitures qui sont dans sa portée
  for chaque voiture dans sa portée do
    | if la voiture a déjà reçu la même alerte then
      | Ignorer la nouvelle alerte
    end
  end
end
Fin

```

- **Agent personne** :Représente les habitants ; se déplace à pied selon les besoins, en suivant les signaux piétons.
- **Agent feux-signalisation** :Régule le passage des voitures et des piétons selon la couleur.

**Procédure\_go****Début**

**if** *feux-signalisation-voiture = rouge et feux-signalisation-péiton=vert* **then**

    | Les voitures s'arrêtent

    | Les piétons avancent

**end**

**else**

    | Les voitures avancent

    | Les piétons s'arrêtent

**end**

Chaque capteur surveille les conditions physiques et environnementales

(température, humidité, feu, piéton).

**if** *un événement est détecté (ex : température élevée, présence anormale)* **then**

    | Envoyer une alerte au RSU

**end**

Chaque caméra analyse la zone visuelle (routes, carrefours, zones piétonnes,

véhicule).

**if** *événement = accident* **then**

    | Afficher : Cette caméra a détecté : accident

    | Envoyer une alerte au RSU

**end**

**Fin.**

- **Agent station de base** :elle commence par détecter périodiquement les entités connectées (véhicules, capteurs, caméras, feux de signalisation, piétons , etc.) situées dans sa zone de couverture. Lorsqu'elle reçoit une alerte, transmise soit par une caméra en cas d'accident, soit par un capteur en cas d'incendie, elle traite l'information et la diffuse immédiatement aux entités concernées. Cette diffusion vise à permettre une réaction rapide, telle que l'arrêt des piétons, le changement d'état du feu de signalisation, ou la priorisation du passage des véhicules de secours.

**Procédure\_Détection\_RSU****Début**

**if** *RSU reçoit un message d'alerte* **then**

**if** *type d'événement = "accident"* **then**

        Transmettre l'alerte au **centre hospitalier**

        Informer les véhicules situés sur la route empruntée par l'ambulance pour libérer le passage

        Informer uniquement les **feux de signalisation intelligents** concernés de changer d'état pour **donner la priorité à l'ambulance**

        Avertit les piétons présents dans sa portée pour leur indiquer de ne pas traverser la route à proximité de la zone concernée.

**else if** *type d'événement = "incendie"* **then**

        Transmettre l'alerte au **centre de secours des pompiers**

        Informer les véhicules sur le trajet d'intervention de se décaler ou s'arrêter

        Demander aux **feux intelligents** sur le parcours des pompiers de passer au vert pour faciliter leur passage rapide

        Avertit les piétons présents dans sa portée pour leur indiquer de ne pas traverser la route à proximité de la zone concernée.

**else**

        il effectue une détection périodique des entités connectées à sa portée et préalablement enregistrées dans son système.

**end**

**end**

**Fin**

- **Agent caméra** : la caméra détecte la présence de toutes les entités dans son champ de vision, notamment les piétons, les véhicules ainsi que les événements se produisant sur la route, tels que les accidents ou tout comportement anormal.

**Procédure\_Détection\_caméra****Début****while** *le système est actif* **do**

| La caméra surveille en temps réel l'ensemble des éléments se déplaçant dans son champ de vision.

| **if** *un accident est détecté* **then**

| | Envoyer une alerte à la RSU la plus proche

| **else**

| | Continuer la surveillance

**Fin.**

- **Agent capteur** : des capteurs intelligents, installés dans des lieux stratégiques comme les jardins publics, les hôpitaux et les casernes de pompiers, détectent les piétons, la météo et les incidents. En cas de départ de feu dans un jardin, l'alerte est transmise au RSU, qui la relaie ensuite à la caserne des pompiers pour une intervention rapide.

**Procédure\_capteur****Début****while** *le système est actif* **do**

| La capture en temps réel l'ensemble des éléments se déplaçant dans son champ de vision.

| **if** *le capteur du jardin détecte un feu* **then**

| | Envoyer une alerte à la RSU la plus proche

| **else**

| | Continuer la détection

| **end****end****Fin.**

**Procédure\_Détection\_Météo()****Début****for** *chaque capteur detecte la météo* **do**

| Collecter la température et l'humidité actuelles

| Analyser les conditions (ex : chaleur excessive, humidité basse)

| Transmettre les données météo au RSU

**end****foreach** *RSU* **do**| **if** *réception de données météo* **then**

| | envoie périodiquement ces informations à tous les agents à sa portée

| **end****end****Fin****Procédure\_Activate\_emergency\_case****Début****if** *feux-signalisation reçu une alert d'urgence "accident" ou "feu"* **then**

| -le signal piéton passera à l'état rouge.

| - Le feu de circulation se synchronise pour laisser passer les véhicules de secours.

**else**| -le feu reste en fonctionnement standard, alternant successivement entre  
| véhicule et piéton.**end****Fin**

**Procédure\_manage\_gates****Début**

**if** *portail* recoit un message d'alert from "aumbulance ou pompier" "accident" ou "  
*incident* " **then**

| ouvre le portails automatiquement.

**end**

**else if** *le portail detect un vehicule secours qu'il souhaitent sortie dans sa zone*  
*porte* **then**

| ouvert portail automatiquement.

**end**

**else**

| ferme portail

**end**

**Fin**

**Procédure\_move\_vehicule\_secours****Début**

**if** *vehicule secours* recoit un message d'alert (from "pompier" ou "aumbulance"  
**then**

| -extrait le type d'incend , sa position. -dépêche les vehicules de secours  
| concerné au lieu d'incendie.

**else**

| le vehicules secours quitte et rejoint le trafic routière

**end**

**Fin**

**Procédure\_move\_véhicule****Début**




```
if le véhicule reçoit une alerte d'urgence et une requête de changement de  
comportement de la RSU then  
  | if type_requête = "stop" then  
  | | Les véhicules concernés s'arrêtent  
  | end  
  | if type_requête = "move" then  
  | | Les véhicules concernés libèrent la route pour laisser passer le véhicule de  
  | | secours  
  | end  
else  
  | if le feu est vert then  
  | | Les véhicules avancent sur la route et, lorsqu'ils atteignent un feu de  
  | | signalisation, ils poursuivent leur trajet (tout droit ou vers la gauche)  
  | else  
  | | Les véhicules s'arrêtent et attendent que le feu passe au vert pour continuer  
  | end  
end  
Fin
```

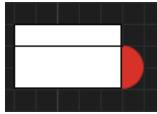
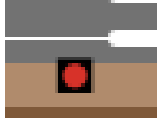
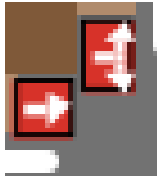
**Procédure\_move\_piéton****Début**

```
if les piétons reçoit une alerte d'urgence et une requête de changement de  
comportement de la RSU then  
  | if type_requête = "stop" then  
  | | Les piétonss concernés s'arrêtent  
  | end  
  | if type_requête = "move" then  
  | | Les vpiétons concernés libèrent la route pour laisser passer le véhicule de  
  | | secours  
  | end  
else  
  | if le piéton marche sur le trottoir then  
  | | if le piéton souhaite traverser la route then  
  | | | if le feu piéton est vert then  
  | | | | Le piéton traverse la route sur le passage piéton  
  | | | | else  
  | | | | | Le piéton attend que le feu piéton passe au vert  
  | | | | end  
  | | | end  
  | | end  
  | end  
end  
Fin
```

#### 4.2.4 Propriétés des agents

Le tableau ci-dessous décrit les agents principaux utilisés dans notre scénario :

Logo de l'agent	Nom de l'agent	Personnalisation de l'agent dans NetLogo	Rôle
	Personne	<pre>breed [personnes personne] set shape "person" set size 2 set speed 0.3 set label "Jaywalker"</pre>	La victime impliquée dans l'accident.
	Pcars	<pre>breed [Pcars Pcar] set shape "shape-namep" set size 2</pre>	Véhicule impliqué dans l'accident
	Éclairage	<pre>breed [eclairages eclairage] set shape "light" set size 6</pre>	s'allume ou s'éteint
	Station de bas	<pre>breed [rsus rsu] set shape "radio-tower" set size 8</pre>	Le RSU coordonne les informations en temps réel pour optimiser la gestion des incidents urbains.

Logo de l'agent	Nom de l'agent	Personnalisation de l'agent dans NetLogo	Rôle
	Caméra de surveillance	<pre>breed [cameras camera] set shape "camera" set size 3</pre>	reconnaissance faciale et de détecter la présence de véhicules dans la zone surveillée.
	Feux-signalisation-Pieton	<pre>breed [feux-P feu-P] set shape "pieton-light" set size 4 set heading angle-p set color red</pre>	indique aux piétons quand traverser en sécurité, en coordination avec les feux de circulation.
	Feux-signalisation-Pieton	<pre>breed [feux feu] set feu-name name set shape shape-name set heading angle set size 4 set size 3.5</pre>	régule la circulation en imposant un arrêt aux véhicules pour éviter les collisions et permettre un passage alterné.


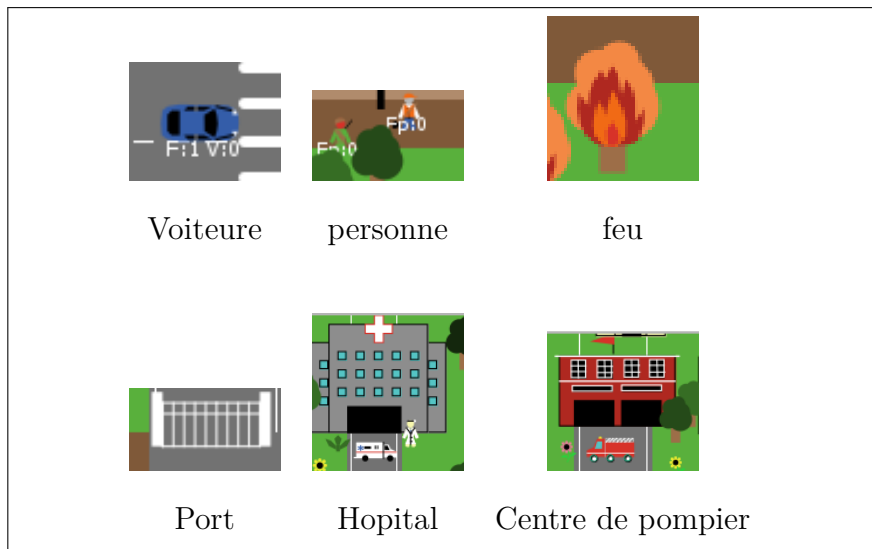
Logo de l'agent	Nom de l'agent	Personnalisation de l'agent dans NetLogo	Rôle
	Capteur	<pre>breed[captures capture] set shape "capteur" set size 4</pre>	Surveille les caractéristiques physiques et environnementales.

Table III.1 Propriétés des agents de la ville intelligente

Les agents secondaires sont listés ci-dessous :



## 4.3 Présentation de la simulation

### 4.3.1 Description de l'interface de la ville intelligente

L'interface de simulation dans NetLogo (figure 2) se compose de plusieurs éléments interactifs, tels que des boutons, des curseurs, des moniteurs et un panneau qui affiche le déroulement de la simulation, illustrant les actions et les déplacements des agents au sein de leur environnement.



Figure III.2 Interface de simulation de la ville intelligente.

### 4.3.2 Déroulement des procédures

Dans NetLogo, un bouton est un composant d'interface graphique permettant à l'utilisateur de lancer une procédure spécifique. Lorsqu'il est activé, il exécute une procédure ou une série d'instructions prédéfinies.

La première étape consiste à cliquer sur le bouton Setup, qui initialise l'environnement et les agents. Ensuite, les autres procédures sont exécutées dans un ordre logique via des boutons spécifiques, permettant ainsi le déroulement progressif et contrôlé de la simulation.

- **setup** : ce bouton permet de lancer la procédure setup, en créant les agents de la ville intelligente.

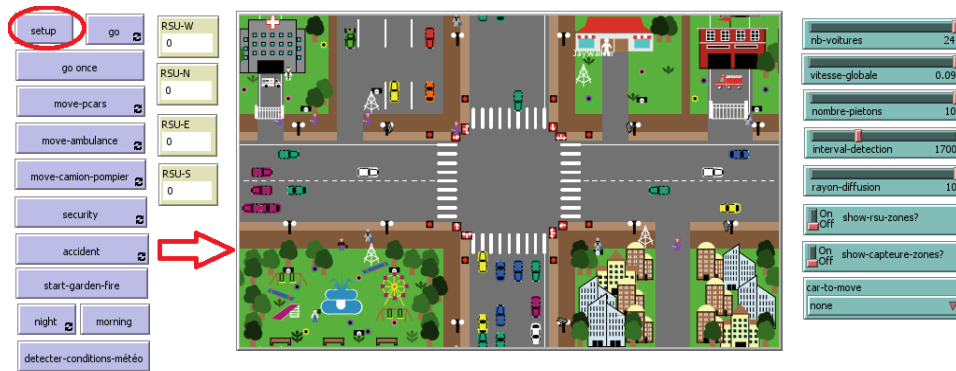


Figure III. 3 Fonctionnement du bouton Setup.

- **Go** : Ce bouton lance la simulation en temps réel. Il permet le déplacement des piétons et des véhicules, tout en assurant la gestion dynamique des feux de signalisation. et qui déclenche une autre procédure qui contrôle les feux de signalisation routiers. Le bouton go permet également la détection en temps réel par les caméras intelligentes et les capteurs, qui transmettent les informations au RSU pour un suivi et une coordination en temps réel des événements dans l'environnement simulé.
- **La glissière (slider) nb-voitures** : permet de contrôler le nombre d'agent vehicles.
- **La glissière (slider) nombre-pietons** : permet de contrôler le nombre d'agents piétons.
- **La glissière (slider) vitesse-globale** : ce curseur permet de contrôler la vitesse globale de déplacement des véhicules.



Figure III.4 Fonctionnement du bouton Go.

- **Moniteur** : afficher les entités connectées à la RUS par rapport à sa portée.
- **Move-Pcars** : c'est un bouton qui exécute la procédure to move-pcars, permettant de déclencher la sortie des véhicules choisis depuis le parking, leur permettant ainsi de rejoindre le réseau routier simulé.



Figure III.5 Fonctionnement du bouton move-pcars.

- **Le bouton move-camion-pompier** : permet de faire sortir le camion de pompiers de sa caserne sans intervention urgente. Comme tout autre véhicule, il respecte les feux et la signalisation lors de ses déplacements.

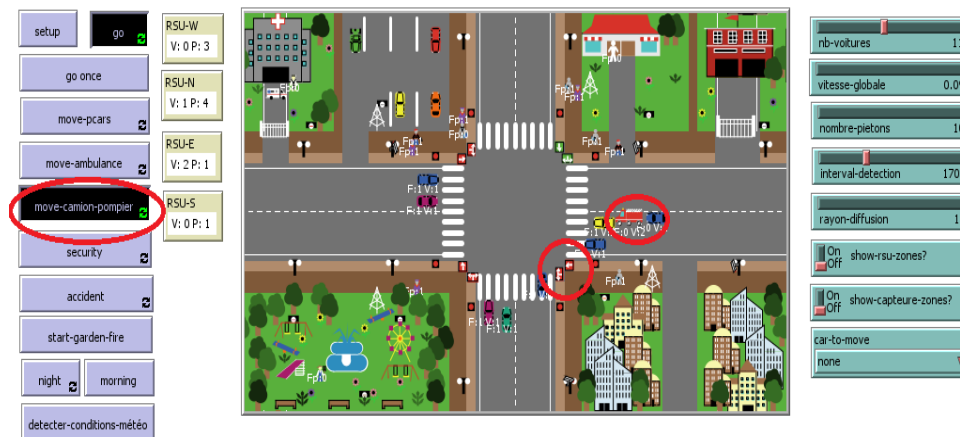


Figure III.6 Fonctionnement du bouton move-camion-pompier.

- **Le bouton move-ambulance** : permet de faire sortir l'ambulance de l'hôpital en situation normale, sans raison d'urgence. Dans ce cas, l'ambulance circule comme un véhicule ordinaire, en respectant les feux de signalisation et les règles de circulation.



Figure III.7 Fonctionnement du bouton move-ambulance.

- **Security** : ce bouton lance la procédure to security, qui permet d'activer les caméras de surveillance.

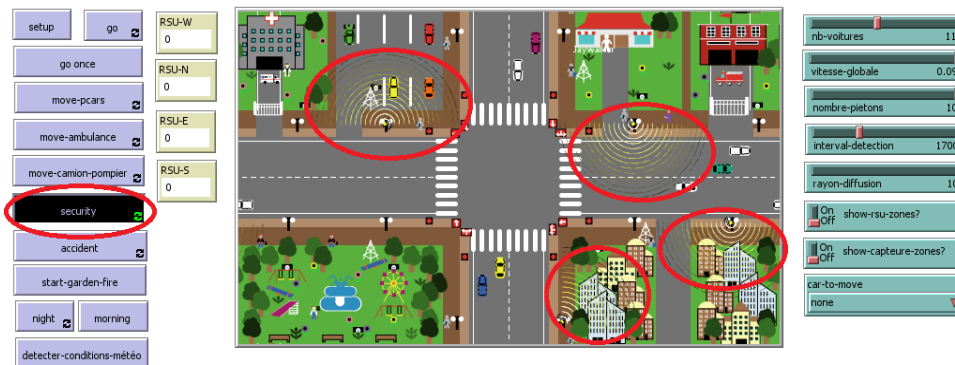


Figure III.8 Fonctionnement du bouton security.

- **Show-rsu-zones ?** : il s'agit d'un interrupteur de type ON/OFF qui permet d'afficher ou de masquer la porte du rsu , selon son état.

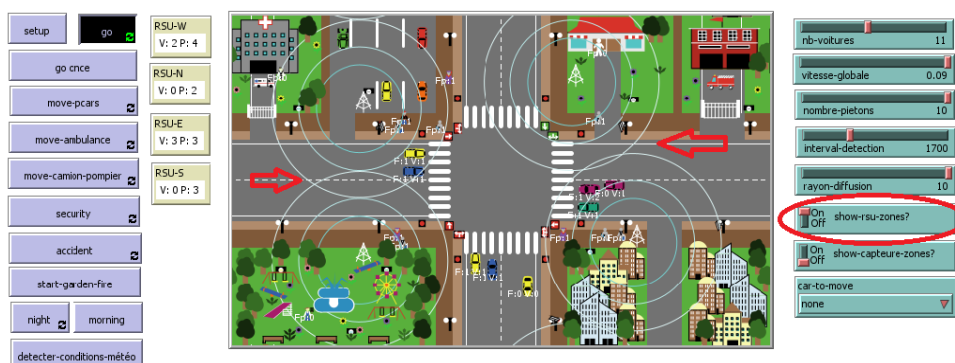


Figure III.9 Interrupteur ON/OFF de la porte du RSU.

- **Show-capteur-zones ?** : Il s'agit d'un interrupteur de type ON/OFF qui permet d'afficher ou de masquer la porte du capteur, selon son état.



Figure III.10 Interrupteur ON/OFF de la porte du capteur.

- **La glissière (slider) interval-detection** : ce curseur permet de définir l'intervalle de temps pour la détection périodique entre les RSU et les capteurs, en contrôlant ainsi la durée entre deux détections successives.
- **Accident** : Ce bouton exécute la procédure to accident, qui simule un scénario de collision entre une voiture et un piéton imprudent (jaywalker). (Suite à l'accident, une séquence de communication est déclenchée : l'incident est détecté, une alerte est transmise, puis une ambulance est envoyée sur les lieux pour prendre en charge la victime et la transporter vers l'hôpital.) Dès l'arrivée de l'ambulance à destination, le système intelligent rétablit son état initial : les feux de signalisation reprennent leur cycle normal, et la circulation routière reprend son cours habituel.



Figure III.11 Représentation de l'accident.



Figure III.12 Fonctionnement du bouton accident.

- Le bouton start-garden-fire** : ce bouton exécute une procédure qui simule la détection d'un incendie dans un jardin . Un capteur intelligent détecte le départ de feu et transmet l'information au RSU . Celui-ci envoie immédiatement une alerte au centre des pompiers, déclenchant l'intervention d'un camion de pompiers sur les lieux. Parallèlement, une alerte est diffusée aux véhicules à proximité afin qu'ils prennent des précautions ou contournent la zone. Le feu de signalisation peut également être ajusté pour faciliter l'accès des secours.



Figure III.13 Représentation du feu.



Figure III.14 Fonctionnement du bouton start-garden-fire.

- **Le bouton night** : lance la procédure to night, qui allume automatiquement l'éclairage si c'est le soir.

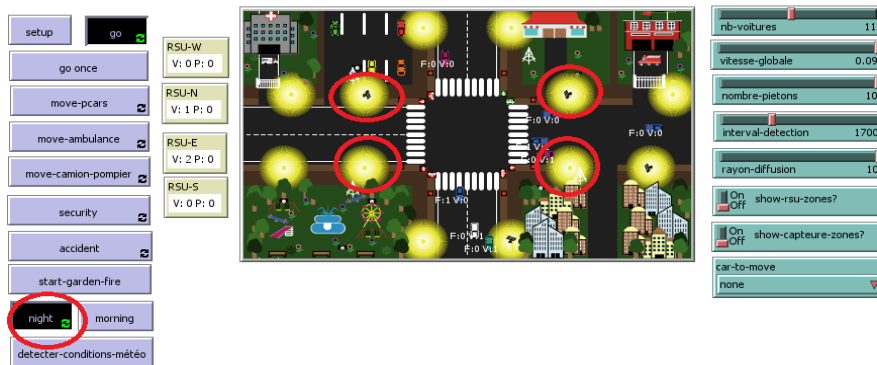


Figure III.15 Fonctionnement du bouton night.

- **Le bouton morning** : lance la procédure to morning et permet d'éteindre l'éclairage public pendant la journée.

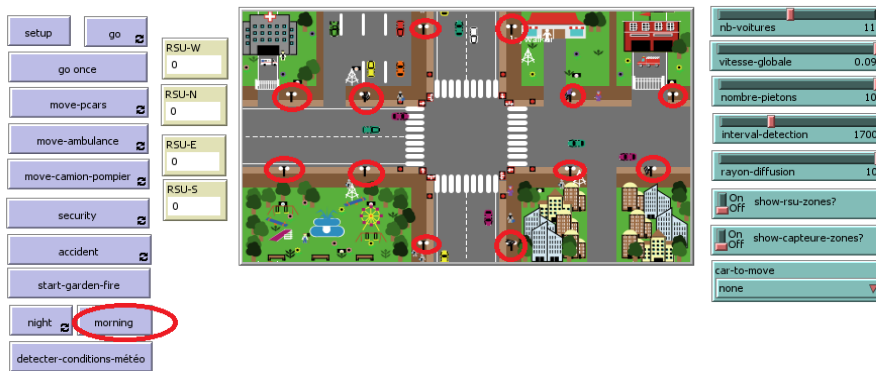


Figure III.16 Fonctionnement du bouton morning.

- **Le bouton détecter-conditions-météo** : ce bouton permet au capteur de détecter la température et l'humidité dans sa zone de portée. Puis transmises au RSU (unité de route).



Figure III.17 Fonctionnement du bouton détecter-conditions-météo.

## 4.4 Conclusion

Ce chapitre a présenté des scénarios liés à la ville intelligente ainsi que la simulation de différents cas d'usage urbains à l'aide de NetLogo. Ces simulations ont permis de mettre en évidence les apports potentiels des technologies de l'Internet des véhicules (IoV) et des systèmes multi-agents (SMA) dans la gestion et l'optimisation des environnements urbains intelligents.

La simulation de la ville intelligente a montré comment les différentes entités – véhicules, piétons, capteurs, feux de signalisation et unités RSU – peuvent interagir efficacement grâce à des protocoles de communication comme le V2V (vehicle-to-vehicle) et le V2I (vehicle-to-infrastructure). Les différents scénarios ont illustré la coordination dynamique des entités, la gestion du trafic en temps réel, ainsi que la réponse intelligente à des situations critiques telles que les accidents ou les urgences.

Par ailleurs, l'intégration de ces protocoles de communication dans un environnement multi-agents a permis de simuler des comportements adaptatifs, tout en visualisant les effets de la communication sur la fluidité, la sécurité et la résilience du système urbain.

En conclusion, ces simulations ont permis de visualiser et d'explorer les fonctionnalités, les avantages et les défis liés à la ville intelligente, tout en soulignant l'importance des technologies de communication et de coordination dans les environnements urbains connectés. Elles mettent en avant le rôle crucial de l'innovation numérique dans la construction de villes plus sûres, plus efficaces et plus intelligentes. Grâce à son modèle basé sur le comportement multi-agents, NetLogo nous a permis de produire des simulations dont les résultats se rapprochent davantage des phénomènes réels, grâce à son interface graphique comparativement aux outils traditionnellement utilisés. Son environnement intuitif et son langage accessible rendent NetLogo particulièrement adapté à la simulation de divers types de réseaux sans fil et de scénarios, ce qui en fait un outil polyvalent dans le domaine de la modélisation et de la simulation.

# CONCLUSION GÉNÉRALE

Les réseaux véhiculaires suscitent un vif intérêt dans le domaine de la recherche, s'imposant comme un pilier fondamental des systèmes de transport intelligents (STI). Cependant, en raison de la forte mobilité des véhicules et des changements fréquents de topologie, les VANET (Vehicular Ad hoc Network) peinent à assurer une connectivité stable et continue entre les entités mobiles. De plus, leur couverture limitée ne permet pas toujours une détection rapide et efficace des situations critiques sur la route. Pour pallier ces limites, les technologies issues de l'Internet des objets (IoT) ont été intégrées aux VANET, afin de tirer parti de la capacité des objets connectés à collecter, analyser et transmettre des données en temps réel. Cette fusion a donné naissance à un nouveau paradigme, l'Internet des véhicules (IoV), qui étend la portée des communications au-delà des simples échanges entre véhicules. Grâce à l'IoV, les véhicules peuvent interagir avec des capteurs, des infrastructures routières intelligentes et d'autres objets connectés, formant un écosystème collaboratif. Ainsi, cette synergie entre VANET, IoT et IoV permet d'améliorer significativement la sécurité routière, la gestion du trafic et la réactivité face aux incidents en environnement urbain.

Afin de mieux appréhender les fondements de l'Internet des véhicules (IoV), nous avons d'abord présenté les fondements du VANET et de l'IoV, leurs architectures, caractéristiques, défis et apports potentiels pour les systèmes de transport intelligents.

Nous avons ensuite exploré les technologies de communication et les protocoles de routage issus de l'IoT, du VANET et de l'IoV, en mettant en évidence leurs complémentarités et leur rôle dans le fonctionnement d'un environnement urbain connecté.

Enfin, dans la dernière partie de notre mémoire, nous avons eu recours à une modélisation multi-agents implémentée sous NetLogo afin de simuler un scénario représentatif d'une ville intelligente. Ce scénario a permis de mettre en œuvre et d'illustrer les interactions V2V, V2I et V2X dans le cadre d'une gestion intelligente des incidents. En particulier, nous

avons simulé une situation d'accident détectée automatiquement par des caméras ou des capteurs, avec une communication en temps réel vers le RSU, qui coordonne l'intervention des secours et ajuste dynamiquement les feux de circulation, avant un retour à l'état normal une fois l'événement traité.

NetLogo s'est révélé être un outil puissant et flexible pour représenter ces interactions complexes entre agents intelligents. Grâce à sa facilité de prise en main et à ses capacités de visualisation, il nous a permis de modéliser de manière concrète les bénéfices de l'IoV dans un contexte urbain.

En conclusion, l'IoV représente un domaine en plein essor, promettant de transformer nos villes en environnements plus sûrs, plus efficaces et plus durables. Notre travail s'inscrit dans cette dynamique en proposant une approche de simulation capable d'évaluer des solutions innovantes pour la gestion du trafic, la prévention des accidents et la réactivité face aux événements critiques.

En perspective, il serait intéressant d'enrichir davantage le modèle en incorporant, par exemple, des stratégies d'optimisation énergétique, la simulation de véhicules électriques avec des stations de recharge intelligentes, ou encore des mécanismes de cybersécurité pour tester la robustesse du système face à d'éventuelles attaques.

# Bibliographie

- [1] EDWINA, *Introduction aux réseaux ad hoc*, Publié le 27 mai 2022. Disponible sur :<https://commentouvrir.com/definitions/introduction-aux-reseaux-ad-hoc>, Consulté le 12-02-2025.
- [2] *Expliqué : Réseau mobile ad hoc (MANET) [3 Ressources didactiques]*, Publié le January 16, 2025. Disponible sur :<https://geekflare.com/fr/mobile-ad-hoc-network/>, Consulté le 13-02-2025.
- [3] M. F. BEDASA, B. ROBE, B. ROBE, B. ROBE et al., « Adaptation of Smart Antenna with AODV Routing Protocol for Ad Hoc Wireless Networks, » *Open Access Library Journal*, t. 7, n° 07, p. 1, 2020.
- [4] N. GUPTA, A. PRAKASH et R. TRIPATHI, « Medium access control protocols for safety applications in Vehicular Ad-Hoc Network : A classification and comprehensive survey, » *Vehicular Communications*, t. 2, n° 4, p. 223-237, 2015.
- [5] A. MCHERGUI, T. MOULAHY et S. ZEADALLY, « Survey on artificial intelligence (AI) techniques for vehicular ad-hoc networks (VANETs), » *Vehicular Communications*, t. 34, p. 100 403, 2022.
- [6] S. S. SHAH, A. W. MALIK, A. U. RAHMAN, S. IQBAL et S. U. KHAN, « Time barrier-based emergency message dissemination in vehicular ad-hoc networks, » *IEEE Access*, t. 7, p. 16 494-16 503, 2019.
- [7] M. S. SHEIKH, J. LIANG et W. WANG, « A survey of security services, attacks, and applications for vehicular ad hoc networks (vanets), » *Sensors*, t. 19, n° 16, p. 3589, 2019.

- [8] I. JAWHAR, N. MOHAMED et H. USMANI, « An overview of inter-vehicular communication systems, protocols and middleware, » *Journal of Networks*, t. 8, n° 12, p. 2749, 2013.
- [9] F. OLIVA, E. LANDOLFI, G. SALZILLO, A. MASSA, S. M. D'ONGHIA et A. TROIANO, « Implementation and Testing of V2I Communication Strategies for Emergency Vehicle Priority and Pedestrian Safety in Urban Environments, » *Sensors*, t. 25, n° 2, p. 485, 2025. DOI : 10.3390/s25020485.
- [10] J. FRAZER, *Transforming Road Safety and Efficiency : The Role of V2V Communication in Freight and Trucking*, Publié le aout 14,2024 .Disponible sur :<https://logisticsviewpoints.transforming-road-safety-and-efficiency-the-role-of-v2v-communication-in-freight-and-trucking/>, Consulté le 9-03-2025.
- [11] N. PARRADO et Y. DONOSO, « Congestion based mechanism for route discovery in a V2I-V2V system applying smart devices and IoT, » *Sensors*, t. 15, n° 4, p. 7768-7806, 2015.
- [12] K. NACEUR et M. OUKIDI, « Gestion du trafic routier urbain de la ville de Tiaret à l'aide de la technologie VANET, » thèse de doct., Université Ibn Khaldoun-Tiaret-, 2022.
- [13] P. J, « Surcoût de l'authentification et du consensus dans la sécurité des réseaux sans fil véhiculaires, » thèse de doct., – université de Toulouse, 2011.
- [14] M. N. RAJKUMAR, M. NITHYA et P. HEMALATHA, « Overview of VANETs with its features and security attacks, » *International Research Journal of Engineering and Technology*, t. 3, n° 1, 2016.
- [15] P. FIGLIOLA, « The Internet of Things (IoT) : An Overview, » *International Research Journal of Engineering and Technology*, t. 3, n° 1, 2020.
- [16] A. A. LAGHARI, K. WU, R. A. LAGHARI, M. ALI et A. A. KHAN, « A review and state of art of Internet of Things (IoT), » *Archives of Computational Methods in Engineering*, p. 1-19, 2021.
- [17] H. TASLIMASA, S. DADKHAH, E. C. P. NETO, P. XIONG, S. RAY et A. A. GHORBANI, « Security issues in Internet of Vehicles (IoV) : A comprehensive survey, » *Internet of Things*, t. 22, p. 100 809, 2023.

- [18] R. P. FRANÇA, A. C. B. MONTEIRO, R. ARTHUR et Y. IANO, « The fundamentals and potential of the internet of vehicles (IoV) in today's society, » in *Intelligent Technologies for Internet of Vehicles*, Springer, 2021, p. 3-29.
- [19] F. YANG, J. LI, T. LEI et S. WANG, « Architecture and key technologies for Internet of Vehicles : a survey, » *Journal of communications and information networks*, t. 2, n° 2, p. 1-17, 2017.
- [20] M. KHALID, L. A. HAMZA, Z. KAREEM, R. MALIK, R. M. MUNEER et S. A. HAMZA, « A review on IoV : Architecture, issues, challenges, and its applications, » in *AIP Conference Proceedings*, AIP Publishing, t. 2591, 2023.
- [21] P. AGBAJE, A. ANJUM, A. MITRA, E. OSEGHAE, G. BLOOM et H. OLUFOWOBI, « Survey of interoperability challenges in the internet of vehicles, » *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, t. 23, n° 12, p. 22 838-22 861, 2022.
- [22] M. AYADA, *Communications Intra-Véhiculaires et Inter-Véhiculaires : De l'Interopérabilité des Communications au sein des Véhicules à la Communication sans Fil entre les Véhicules*, Illustrated. Lieu de Publication : presses Académiques Francophones, 2013, ISBN : 3838179676.
- [23] S. A. RAHMAN, A. MOURAD, M. EL BARACHI et W. AL ORABI, « A novel on-demand vehicular sensing framework for traffic condition monitoring, » *Vehicular Communications*, t. 12, p. 165-178, 2018.
- [24] S. HE, J. LI et T. Z. QIU, « Vehicle-to-pedestrian communication modeling and collision avoiding method in connected vehicle environment, » *Transportation Research Record*, t. 2621, n° 1, p. 21-30, 2017.
- [25] K. C. DEY, A. RAYAMAJHI, M. CHOWDHURY, P. BHAVSAR et J. MARTIN, « Vehicle-to-vehicle (V2V) and vehicle-to-infrastructure (V2I) communication in a heterogeneous wireless network—Performance evaluation, » *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, t. 68, p. 168-184, 2016.
- [26] H. KATHIRIYA, N. KATHIRIYA et A. BAVARVA, « Review on V2R Communication in VANET, » in *Proceedings of the International Conference on Innovations in Automation and Mechatronics Engineering, Vallabh Vidyanagar, India*, 2013, p. 21-23.

- [27] M. T. KAWSER, M. S. FAHAD, S. AHMED, S. S. SAJJAD et H. A. RAFI, « The perspective of vehicle-to-everything (v2x) communication towards 5g, » *IJCSNS*, t. 19, n° 4, p. 146, 2019.
- [28] A. FLAH et C. MAHMOUDI, « Design and analysis of a novel power management approach, applied on a connected vehicle as V2V, V2B/I, and V2N, » *International Journal of Energy Research*, t. 43, n° 13, p. 6869-6889, 2019.
- [29] D. BORGE-DIEZ, D. ICAZA, E. AÇIKKALP et H. AMARIS, « Combined vehicle to building (V2B) and vehicle to home (V2H) strategy to increase electric vehicle market share, » *Energy*, t. 237, p. 121 608, 2021.
- [30] Y.BENNAI, « Contrôle d'accès et routage avec qualité de service dans les réseaux VANET, » thèse de doct., Université A.MIRA-BEJAIA Faculté, 2022.
- [31] J. A. FADHIL et Q. I. SARHAN, « Internet of Vehicles (IoV) : A survey of challenges and solutions, » in *2020 21st International Arab Conference on Information Technology (ACIT)*, IEEE, 2020, p. 1-10.
- [32] S. A. HUSSAIN, K. M. YUSOF, S. M. HUSSAIN et A. V. SINGH, « A review of quality of service issues in Internet of Vehicles (IoV), » in *2019 Amity international conference on artificial intelligence (AICAI)*, IEEE, 2019, p. 380-383.
- [33] A. HAKIMI, K. M. YUSOF, M. A. AZIZAN, M. A. A. AZMAN et S. M. HUSSAIN, « A survey on internet of vehicle (ioV) : A pplications & comparison of vanets, iov and sdn-ioV, » *ELEKTRIKA-Journal of Electrical Engineering*, t. 20, n° 3, p. 26-31, 2021.
- [34] E. AL-MASRI, K. R. KALYANAM, J. BATTS et al., « Investigating messaging protocols for the Internet of Things (IoT), » *IEEE Access*, t. 8, p. 94 880-94 911, 2020.
- [35] M. MILOŠEVIĆ, V. MLADENOVIC et U. PEŠOVIĆ, « Evaluation of HTTP/3 protocol for internet of things and fog computing scenarios, » 2021.
- [36] F. AZZEDIN et T. ALHAZMI, « Secure data distribution architecture in IoT using MQTT, » *Applied Sciences*, t. 13, n° 4, p. 2515, 2023.
- [37] G. D. MAAYAN, *Applying MQTT for the Internet of Vehicles*, Publié le Sep 05, 2023 .Disponible sur :<https://www.embedded.com/applying-mqtt-for-the-internet-of-vehicles/>, Consulté le 9-03-2025.

- [38] M. B. YASSEIN, M. Q. SHATNAWI, S. ALJWARNEH et R. AL-HATMI, « Internet of Things : Survey and open issues of MQTT protocol, » in *2017 international conference on engineering & MIS (ICEMIS)*, Ieee, 2017, p. 1-6.
- [39] I. MALLOUG et H. B. RABEH, « Gateway IoT de pilotage et de surveillance des capteurs domestiques via le protocole MQTT, » in *Colloque sur les Objets et systèmes Connectés 2022*, 2022.
- [40] D.-H. MUN, M. LE DINH et Y.-W. KWON, « An assessment of internet of things protocols for resource-constrained applications, » in *2016 IEEE 40th Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC)*, IEEE, t. 1, 2016, p. 555-560.
- [41] R. SINGH et S. JAIN, « LoRaWAN Protocols in IoT : Challenges, Innovations, and Future Directions, » 2024.
- [42] *Qu'est-ce que LoRa LoRaWAN?* Publié le september 10,2022 .Disponible sur :[https://www.ip-systemes.com/quest-ce-que-lora-lorawan.](https://www.ip-systemes.com/quest-ce-que-lora-lorawan) , Consulté le 9-03-2025.
- [43] S. AL-SARAWI, M. ANBAR, K. ALIEYAN et M. ALZUBAIDI, « Internet of Things (IoT) communication protocols, » in *2017 8th International conference on information technology (ICIT)*, IEEE, 2017, p. 685-690.
- [44] M. ZONGO, J. M. NLONG II, R. NDOUNDAM et A. FÖRSTER, « DSRC Applicability in Cameroon Road Traffic : A Simulation Study., » *EAI Endorsed Trans. Mob. Commun. Appl.*, t. 6, n° 19, e1, 2021.
- [45] B. F. IBRAHIM, M. TOYCAN et H. A. MAWLOOD, « A comprehensive survey on VANET broadcast protocols, » in *2020 International conference on computation, automation and knowledge management (ICCAKM)*, IEEE, 2020, p. 298-302.
- [46] S. BENMOUMENE et F. BOUKHALOUA, « Simulation et analyse de protocoles de routage dans les réseaux VANET, » thèse de doct., Université Ibn Khaldoun-Tiaret-, 2019.
- [47] S. PAREEK et R. SHANMUGHASUNDARAM, « Implementation of broadcasting protocol for emergency notification in vehicular ad hoc network (vanet), » in *2018 Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)*, IEEE, 2018, p. 1032-1037.
- [48] S.-Y. NI, Y.-C. TSENG, Y.-S. CHEN et J.-P. SHEU, « The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network, » in *Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, 1999, p. 151-162.

- [49] A. RYOSUKE et al., « Adaptive delay-based geocast protocol for data dissemination in urban VANET, » in *Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU), 2014 Seventh International Conference on. IEEE*, 2014.
- [50] V. K. YADAV, S. VERMA et S. VENKATESAN, « Efficient and secure location-based services scheme in VANET, » *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, t. 69, n° 11, p. 13 567-13 578, 2020.
- [51] Z. XIANG, Y. ZHANG, Y. CHEN, Y. MA, H. CAO et L. TIAN, « Emergency message broadcasting scheme based on v2v and v2i, » 2023.
- [52] A. A. TALEB, « VANET Routing Protocols and Architectures : An Overview., » *J. Comput. Sci.*, t. 14, n° 3, p. 423-434, 2018.
- [53] D. ESPÈS, « Protocoles de routage réactifs pour l'optimisation de bande passante et la garantie de délai dans les réseaux ad hoc mobiles, » thèse de doct., Toulouse 3, 2008.
- [54] S. AJMAL, A. RASHEED, A. QAYYUM et A. HASAN, « Classification of VANET MAC, Routing and Approaches A Detailed Survey., » *J. Univers. Comput. Sci.*, t. 20, n° 4, p. 462-487, 2014.
- [55] M. ASWATHY et C. TRIPTI, « A cluster based enhancement to AODV for inter-vehicular communication in VANET, » *International Journal of Grid Computing & Applications*, t. 3, n° 3, p. 41, 2012.
- [56] D. J. RAO, K. SREENU et P. KALPANA, « A study on dynamic source routing protocol for wireless ad hoc networks, » *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, t. 1, n° 8, p. 522-529, 2012.
- [57] J. HAILLOT, « Définition et validation d'un modèle de communication supportant la communication basée contenus dans les réseaux mobiles ad hoc discontinus, » thèse de doct., Université de Bretagne Sud, 2010.
- [58] Z. NAIM et M. I. HOSSAIN, « Performance analysis of aodv, dsdv and dsr in vehicular adhoc network (vanet), » in *2019 International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques (ICREST)*, IEEE, 2019, p. 17-22.
- [59] J. TOUTOUH, J. GARCÍA-NIETO et E. ALBA, « Intelligent OLSR routing protocol optimization for VANETs, » *IEEE transactions on vehicular technology*, t. 61, n° 4, p. 1884-1894, 2012.

- [60] Z. J. HAAS, « A new routing protocol for the reconfigurable wireless networks, » in *Proceedings of ICUPC 97-6th International Conference on Universal Personal Communications*, IEEE, t. 2, 1997, p. 562-566.
- [61] E. KURODE, N. VORA, S. PATIL et V. ATTAR, « MANET routing protocols with emphasis on zone routing protocol—an overview, » in *2021 IEEE Region 10 Symposium (TENSYP)*, IEEE, 2021, p. 1-6.
- [62] H. AODIA, Y. TOUATI, A. ALI-CHERIF et P. GREUSSAY, « Approche de routage hiérarchique basée sur un mécanisme de clustering dans les réseaux de capteurs sans fil, » in *9ème édition de la conférence MANifestation des JEunes Chercheurs en Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication-MajecSTIC 2012 (2012)*, 2012.
- [63] A. A. TALEB, « VANET Routing Protocols and Architectures : An Overview., » *J. Comput. Sci.*, t. 14, n° 3, p. 423-434, 2018.
- [64] S. ALLAL, « Optimisation des échanges dans le routage géocast pour les réseaux de Véhicules Ad Hoc VANETs., » thèse de doct., Université Paris-Nord-Paris XIII, 2014.
- [65] M. HOUMER, M. OUAISSA, M. OUAISSA et M. HASNAOUI, « SE-GPSR : Secured and enhanced greedy perimeter stateless routing protocol for vehicular ad hoc networks, » 2020.
- [66] M. HOUMER et M. L. HASNAOUI, « An enhancement of greedy perimeter stateless routing protocol in VANET, » *Procedia Computer Science*, t. 160, p. 101-108, 2019.
- [67] V. E. F. BORGES, D. C. VALADARES et D. F. SANTOS, « Internet of Vehicles Interoperability using CoAP Protocol for Streaming Applications, » *Volume*, 2023.
- [68] G. DI RENZONE, S. PARRINO, G. PERUZZI, A. POZZEBON et L. VANGELISTA, « Lo-rawan for vehicular networking : field tests for vehicle-to-roadside communication, » *Sensors*, t. 24, n° 6, p. 1801, 2024.
- [69] N. ANAS, K. FARSHEENA, P. LAYYINA, K. MIRSHAD, K. MOFEEDA et T. SINDHU, « IOV—Internet Of Vehicles, » *Volume*, t. 4, p. 65-72, 2017.
- [70] *Zigbee Wireless Standard*, Disponible sur :<https://www.digi.com/solutions/by-technology/zigbee-wireless-standard>, Consulté le 27-2025-03.

- [71] *DSRC vs. C-V2X : Understanding the Two Technologies*, Publié le May 18, 2023. Disponible sur :<https://www.ettifos.com/post/dsrc-vs-cv2x>, Consulté le 2-04-2025.
- [72] *C-V2X Explained : What Is It and How Does It Work ?* Publié le Aug 17, 2023. Disponible sur :<https://www.ettifos.com/post/dsrc-vs-cv2x>, Consulté le 2-04-2025.
- [73] I. SETH, K. GULERIA, S. N. PANDA et al., « [Retracted] A Taxonomy and Analysis on Internet of Vehicles : Architectures, Protocols, and Challenges, » *Wireless Communications and Mobile Computing*, t. 2022, n° 1, p. 9 232 784, 2022.
- [74] L. ALOUACHE, N. NGUYEN, M. ALIOUAT et R. CHELOUAH, *Nouveau protocole robuste pour les communications dans l'IoV. Internet des objets 17 (1)*, 2017.
- [75] M. W. MAIER, « Architecting principles for systems-of-systems, » *Systems Engineering : The Journal of the International Council on Systems Engineering*, t. 1, n° 4, p. 267-284, 1998.
- [76] M. A. ASSAAD, R. TALJ et A. CHARARA, « A view on systems of systems (sos), » in *20th World Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC WC 2017)-special session*, 2016.
- [77] A. SABAS, « Systèmes multi-agents : une analyse comparative des méthodologies de développement : vers la convergence des méthodologies de développement et la standardisation des plateformes SMA, » thèse de doct., Université du Québec à Trois-Rivières, 2001.
- [78] A. RAHMANI, M. KOHILI et al., « Modélisation et simulation système multi-agent de la Propagation d'une épidémie covid-19, » thèse de doct., UNIVERSITE AHMED DRAIA-ADRAR, 2022.
- [79] A. BENAOUA, « Contribution à la conception et à l'implémentation d'un langage de spécification formelle dédié à la e-maintenance des systèmes de production par l'approche des Systèmes Multi-Agents, » thèse de doct., 2018.
- [80] B.KARIMA., « Conception d'un système multi-agents adaptatif pour la résolution de problème., » thèse de doct., Université BADJI MOKHTAR, ANNABA, 2016.
- [81] *What is agent based modeling ?* Publié le Nov 17, 2021 .Disponible sur :<https://medium.com/@mindandculture/what-is-agent-based-modeling-b4a64c020769>, Consulté le 26-05-25.

- [82] B. CALVEZ, « Le calibrage de modèles à base d'agents pour la simulation de systèmes complexes, » *These de doctorat, Université d'Evry Val d'Essonne*, 2007.
- [83] T. ISSARIYAKUL, E. HOSSAIN, T. ISSARIYAKUL et E. HOSSAIN, *Introduction to network simulator 2 (NS2)*. Springer, 2009.
- [84] L. CAMPANILE, M. GRIBAUDO, M. IACONO, F. MARULLI et M. MASTROIANNI, « Computer network simulation with ns-3 : A systematic literature review, » *Electronics*, t. 9, n° 2, p. 272, 2020.
- [85] M. A. D. KHUMARA, L. FAUZIYYAH et P. KRISTALINA, « Estimation of urban traffic state using simulation of urban mobility (SUMO) to optimize intelligent transport system in smart city, » in *2018 International electronics symposium on engineering technology and applications (IES-ETA)*, Ieee, 2018, p. 163-169.
- [86] M. BABIŠ et P. MAGULA, « NetLogo—An alternative way of simulating mobile ad hoc networks, » in *2012 5th Joint IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC)*, IEEE, 2012, p. 122-125.

---

## Résumé

L'Internet des Véhicules (IoV) constitue une évolution majeure dans le domaine des transports intelligents, en permettant aux véhicules de communiquer entre eux et avec leur environnement. Cette technologie joue un rôle central dans le développement des villes intelligentes. Dans notre projet, nous avons simulé une ville intelligente où les entités connectées interagissent via le mode de communication V2X pour assurer une coordination rapide en cas d'incidents tels qu'un accident ou un incendie. Les messages d'alerte sont transmis automatiquement aux entités concernées, ce qui permet une réaction rapide et coordonnée. Nous avons utilisé le simulateur NetLogo pour modéliser et évaluer les performances des systèmes intelligents dans un environnement urbain connecté. Bien qu'il ne soit pas initialement conçu pour la simulation de réseaux de communication, nous avons réussi à l'adapter afin de représenter les échanges entre véhicules, capteurs et infrastructures, et à simuler efficacement le fonctionnement global d'une ville intelligente.

**Mots-clés :** réseaux ad hoc véhiculaires, Internet des véhicules, Internet des objets, ville intelligente, communication, Système des systèmes.

## Abstract

The Internet of Vehicles (IoV) represents a major advancement in the field of intelligent transportation by enabling vehicles to communicate with each other and with their environment. This technology plays a central role in the development of smart cities. In our project, we simulated a smart city where connected entities interact through V2X communication to ensure rapid coordination in the event of incidents such as accidents or fires. Alert messages are automatically transmitted to the relevant entities, enabling a quick and coordinated response. We used the NetLogo simulator to model and evaluate the performance of intelligent systems in a connected urban environment. Although NetLogo was not originally designed for network communication simulations, we successfully adapted it to represent exchanges between vehicles, sensors, and infrastructure, and to effectively simulate the overall functioning of a smart city.

**Keywords:** Vehicular ad hoc Networks, vehicles of things, Internet of things, smart city, communication, system of systems.