

République Algérienne démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. Mira de Bejaia
Faculté des Sciences Exactes
Département d'Informatique



Mémoire de fin de cycle

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

Option : Administration et Sécurité des Réseaux (ASR)

THÈME

Scénario et Simulation d'un Réseau Hybride Capteurs-Véhicules (HSVN) dans NetLogo

Réalisé par :

Mlle. CHERGUI Lydia

Mlle. BOUZID Manal

Soutenu le : 04/07/2024

Devant le jury composé de :

Président	M ^r Mocketfi Mohand	M.C.B	U.A/Mira Béjaia.
Examineur	M ^{me} Bouadem Nassima	M.C.B	U.A/Mira Béjaia.
Encadrant	M ^{me} Houha Amel	M.A.A	U.A/Mira Béjaia

Promotion : 2023/2024

Remerciements

Nous aimerions exprimer notre profonde gratitude envers Dieu, le Tout-Puissant pour les innombrables bénédictions dont nous avons bénéficié tout au long de notre parcours de recherche, sans lesquelles ce projet n'aurait pas été possible.

Nous tenons à remercier chaleureusement notre promotrice, Madame HOUHA Amel, pour son soutien inébranlable, sa patience infinie, et son expertise précieuse. Sa disponibilité et ses conseils avisés ont grandement alimenté notre réflexion. Sa présence constante et son mentorat ont été une source inestimable d'inspiration et de motivation tout au long de notre recherche et de la rédaction de ce mémoire.

Nous exprimons également notre sincère reconnaissance envers les membres du jury qui ont consacré leur temps et leurs compétences à évaluer et juger notre travail. Leurs commentaires constructifs et leur expertise ont grandement enrichi notre réflexion et contribué à l'amélioration de ce mémoire.

Enfin, nous adressons nos remerciements à l'ensemble des professeurs et membres du département informatique de l'Université Abderrahmane Mira de Bejaia. Nous sommes particulièrement reconnaissants envers ceux qui nous ont soutenus et accompagnés tout au long de notre cursus universitaire.

Dédicaces

Avec une profonde joie, une fierté indéfectible et un respect sincère, je dédie ce travail :

*À la plus belle femme du monde, celle qui a été la lumière de mon chemin dans les moments sombres. Ton amour inconditionnel, ton affection et ton soutien ont été des piliers essentiels tout au long de mon parcours. En te sacrifiant constamment pour m'offrir un environnement de travail idéal, je te dois tous mes succès. **Ma chère maman**, ta présence à mes côtés aurait été l'aboutissement de cette réussite. Je t'aime infiniment, que Dieu te donne la santé et te protège de tout mal.*

*À l'homme qui a enduré des épreuves sans jamais me laisser souffrir, qui a toujours répondu à mes besoins sans hésitation et qui a consacré chaque effort à mon bonheur. Il m'a inculqué le sens de la responsabilité et m'a encouragé à croire en moi-même depuis mon enfance. Aujourd'hui, en honorant la promesse que je lui avais faite depuis longtemps, je dédie ce travail à **mon cher père**.*

*À mon cher frère « **Nabil** » que j'aime plus que tout, pour sa présence réconfortante à mes côtés à travers toutes les épreuves de la vie, ton soutien constant a été ma force.*

*À ma chère sœur « **Ilina** », tu es un véritable trésor. Ton soutien précieux est une bénédiction qui m'inspire.*

*Je tiens à exprimer toute ma gratitude envers notre estimée promotrice « **Madame Houha** » qui nous a constamment offert son précieux soutien et ses encouragements, en nous prodiguant ses conseils éclairés. Sa présence bienveillante et son appui indéfectible ont été d'une importance capitale tout au long de notre parcours.*

*A ma sœur de cœur et binôme « **Lydia** » avec qui j'ai partagé ce parcours exceptionnel. Sa passion, son dévouement et son esprit d'équipe ont largement contribué au succès de notre projet. Je lui adresse mes vœux de bonheur et de réussite éclatante dans sa carrière à venir.*

Que Dieu bénisse chacun de vous pour votre contribution inestimable à ma réussite.

Manal

Dédicaces

Avec l'expression de ma grande reconnaissance, je dédie ce travail :

À mes très chers parents, pour leurs sacrifices incommensurables, leur soutien indéfectible et les efforts inlassables déployés pour mon éducation et ma formation tout au long de mes années d'études, sans lesquels je n'aurais jamais pu réussir.

À mes chères sœurs, dont la présence joyeuse et le soutien constants ont été une source de réconfort et de motivation. Que dieu vous procure bonne santé et une longue vie

À mon cher frère, je suis infiniment reconnaissante pour son soutien inébranlable, sa bienveillance sans faille et sa présence constante à mes côtés.

*Je souhaite exprimer toute ma gratitude envers notre estimée promotrice « Madame **HOUHA** » pour son aide précieuse, ses encouragements constants et ses conseils avisés. Sa présence bienveillante et son soutien inconditionnel ont joué un rôle essentiel tout au long de notre parcours.*

À Manal, ma précieuse binôme, merci pour ton soutien indéfectible tout au long de ce projet. Tes idées brillantes, ton esprit critique et ton sens de l'humour ont rendu ce travail non seulement productif, mais aussi agréable. Je suis reconnaissante d'avoir pu partager cette expérience avec toi et je suis fière de ce que nous avons accompli ensemble.

À tous ceux que j'aime et qu'ils m'aiment, je vous remercie du fond du cœur.

Lydia

Table des matières

Table des matières.....	I
Liste des figures	IV
Liste des tableaux.....	V
Liste des acronymes.....	VI
Introduction générale	1
1. CHAPITRE 01 : Généralités sur les HSVN	3
1.1. Introduction	4
1.1.1. Définition d'un réseau cellulaire.....	4
1.1.2. Définition d'un réseau ad hoc	4
1.1.3. Définition des MANETs	5
1.2. Les réseaux véhiculaires VANET	5
1.2.1. Définition des VANETs.....	5
1.2.2. Comparaison entre les MANETs et les VANETs.....	6
1.2.3. Composants des VANETs	7
1.2.4. Modes de communication dans les VANET.....	7
1.2.5. Objectifs des VANETs	11
1.2.6. Applications des VANETs.....	11
1.2.7. Défis des VANETs	12
1.3. Réseaux de capteurs sans fil (WSN)	13
1.3.1. Définition d'un capteur sans fil.....	13
1.3.2. Architecture d'un capteur sans fil	13
1.3.3. Définition d'un réseau de capteurs sans fil	15
1.3.4. Architecture d'un réseau de capteurs sans fil	15
1.3.5. Caractéristiques d'un réseau de capteurs sans fil.....	16
1.3.6. Domaines d'application des réseaux de capteurs sans fil	17
1.3.7. Défis des réseaux de capteurs sans fil.....	18
1.4. HSVN (Hybrid Sensor-VANET Networks).....	20
1.4.1. Définition des HSVN	20
1.4.2. Architecture des HSVN	21
1.4.3. Motivation d'intégration des WSN dans les VANETs	22
1.4.4. Applications des HSVN.....	23
1.4.5. Défis des HSVN.....	25

Table des matières

1.4.6.	Conclusion	27
2.	Chapitre 02 : Communication et Routage dans les HSVN	28
2.1.	Introduction	29
2.2.	Technologies de communication dans les HSVN	29
2.2.1.	IEEE 802.15.4 (ZigBee)	29
2.2.2.	IEEE 802.11 (WiFi)	30
2.2.3.	Bluetooth et Bluetooth Low Energy (BLE)	30
2.2.4.	Sigfox	31
2.2.5.	IEEE 802.16e (WiMax)	31
2.2.6.	La 5G	31
2.3.	Routage dans les HSVN	31
2.3.1.	Protocoles de routage dans les WSN	32
2.3.2.	Protocoles de routage dans les VANET	34
2.4.	La communication dans les HSVN	36
2.4.1.	Les types de communications dans les HSVN	37
2.4.2.	Architectures de communication dans les HSVN	37
2.4.2.1.	Etude de prototype pour les HSVN	37
2.4.2.2.	Approches de communication dans les HSVN	38
2.4.3.	Communication et Consommation d'énergie dans les HSVN	38
2.5.	Conclusion	46
3.	Chapitre 03 : Outils de Modélisation	47
3.1.	Introduction	48
3.2.	Systèmes Multi-Agents (SMA)	48
3.2.1.	Notion d'agent	48
3.2.1.1.	Types d'agents	48
3.2.1.2.	Caractéristiques	49
3.2.2.	Définition d'un système multi-agents	50
3.2.3.	Environnement d'un SMA	50
3.2.4.	Caractéristiques d'un SMA	51
3.2.5.	L'interaction dans un Système Multi-Agents(SMA)	51
3.3.	Système de systèmes (SoS)	53
3.3.1.	Définition d'un SoS	53
3.3.2.	Types des SoS	53
3.3.3.	Caractéristiques des SoS	54

Table des matières

3.4.	Relation entre HSVN, SMA et SoS	54
3.5.	Conclusion.....	55
4.	CHAPITRE 04 : Scénario et Simulation	57
4.1.	Introduction	58
4.2.	Simulation	58
4.2.1.	Simulation base multi-agents	59
4.2.2.	Outils de simulation	59
4.2.3.	Choix NetLogo.....	61
4.2.4.	Présentation NetLogo.....	62
4.3.	Scénario de la simulation	64
4.3.1.	Description du scénario.....	64
4.3.2.	Conditions du scénario.....	65
4.3.3.	Scénario en cas d’incendie et solution	65
4.4.	Mise en œuvre de la forêt.....	66
4.4.1.	Définition des agents.....	66
4.4.2.	Propriétés des agents.....	69
4.4.3.	Présentation de la simulation	70
4.5.	Mise en œuvre de la ville intelligente	75
4.5.1.	Définition des agents.....	75
4.5.2.	Propriétés des agents.....	78
4.5.3.	Présentation de la simulation	79
4.6.	Conclusion.....	84
	Conclusion générale.....	85
	Bibliographie.....	87

Liste des figures

Figure 1.1 Exemple d'un MANET [5].....	5
Figure 1.2 Exemple d'un VANET [7]	6
Figure 1.3 Architecture basique d'un VANET [11]	7
Figure 1.4 Communication V2V [13].....	8
Figure 1.5 Communication V2I [13]	8
Figure 1.6 Communication hybride [13]	9
Figure 1.7 Communication V2N [17].....	9
Figure 1.8 Communication V2P [19].....	10
Figure 1.9 Communication V2C [21]	10
Figure 1.10 Exemple d'un capteur sans fil [27].....	13
Figure 1.11 Architecture d'un capteur sans fil.....	13
Figure 1.12 Architecture d'un réseau de capteurs sans fil [32]	16
Figure 1.13 Architecture d'un HSVN [45]	22
Figure 2.1 Logo de Zigbee [54]	29
Figure 2.2 Logo de Bluetooth [56]	30
Figure 2.3 Logo de Sigfox [58].....	31
Figure 2.4 Schéma récapitulatif sur les protocoles de routages	36
Figure 3.1 Système multi-agents [76].....	50
Figure 4.1 logo de NetLogo	62
Figure 4.2 Interface de simulation de la zone forestière	70
Figure 4.3 Fonctionnement du bouton setup.....	71
Figure 4.4 Fonctionnement du bouton découverte de voisins	72
Figure 4.5 Fonctionnement du bouton clustering	72
Figure 4.6 Fonctionnement du bouton déclencher feu.....	73
Figure 4.7 Fonctionnement du bouton périodique	73
Figure 4.8 Fonctionnement du bouton choose random cluster head	74
Figure 4.9 graphe de consommation de l'énergie	74
Figure 4.10 Fonctionnement du bouton go	74
Figure 4.11 Fonctionnement du bouton night.....	75
Figure 4.12 Fonctionnement du bouton morning	75
Figure 4.13 Interface de simulation de la ville intelligente	79
Figure 4.14 Fonctionnement du bouton Setup.....	79
Figure 4.15 Fonctionnement du bouton Go	80
Figure 4.16 Détection d'un piéton par un capteur	80
Figure 4.17 Le slider lights-interval.....	81
Figure 4.18 Fonctionnement du bouton Allumer.....	81
Figure 4.19 Fonctionnement du bouton Eteindre	82
Figure 4.20 Fonctionnement du bouton Security.....	82
Figure 4.21 Stationnement de la première voiture.....	83
Figure 4.22 Stationnement de la deuxième voiture	83
Figure 4.23 La troisième voiture ne peut pas stationner puisque le parking est complet.....	84

Liste des tableaux

Tableau 1.3-1 Comparaison entre les VANET et les WSN [42]	20
Tableau 2.3-1 Comparaison entre le routage multi-chemins et mono-chemin [42]	33
Tableau 2.4-1 Architecture de communication dans les HSVN [43]	37
Tableau 3.5-1 Tableau comparatif entre SoS et SMA	55
Tableau 4.2-1 Comparaison entre NS-2, NS-3 et OMNET++ [88].....	61
Tableau 4-4.4-1 Propriétés des agents de la forêt	70
Tableau 4-4.5-1 Propriétés des agents de la ville intelligente	78

Liste des acronymes

A	AODV	Ad hoc On-demand Distance Vector
	AOMDV	Ad hoc On-demand Multipath Distance Vector
B	BLE	Bluetooth Low Energy
D	DREAM	Distance Routing Effect Algorithm for Mobility
	DSDV	Destination-Sequenced Distance-Vector
	DSR	Dynamic Source Routing
G	GAF	Geographic Adaptive Fidelity
	GEAR	Geographic and Energy-Aware Routing
	GPSR	Greedy Perimeter Stateless Routing
H	HSVN	Hybrid Sensor-Vehicular Networks
I	IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
	ITS	Intelligent Transportation System
	IoT	Internet of Things
L	LEACH	Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy
	LP-WPAN	Low Power-Wireless Personal Area Network
	LPWA	Low Power Wide Area
M	MANET	Mobile Ad Hoc NETWORKS
	MECN	Minimum Energy Communication Network
O	OBU	On-Board Unit
	OLSR	Optimized Link State Routing
P	PEGASIS	Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems
Q	QoS	Quality of Service
R	RAM	Random Access Memory
	RCSF	Réseaux de Capteurs Sans Fil
	RFID	Radio Frequency Identification

Liste des acronymes

	RSU	Road-Side Unit
S	SIG	Special Interest Group
	SMA	Système Multi-Agents
	SoS	System of Systems
	SPIN	Sensor Protocols for Information Negotiation
	SRB	Selective Request Broadcast
	STI	Systèmes de Transportation Intelligents
T	TA	Trusted Authority
	TBF	Trajectory-Based Forwarding
U	UMB	Urban Multihop Broadcast
V	V2C	Vehicle-To-Cloud
	V2D	Vehicle-To-Device
	V2I	Vehicle-To-Infrastructure
	V2N	Vehicle-To-Network
	V2P	Vehicle-To-Pedestrian
	V2V	Vehicle-To-Vehicle
	VANET	Vehicular Ad Hoc NETWORKS
	VTRADE	Vehicular Traffic Data Exchange Protocol
W	WiFi	Wireless Fidelity
	WiMax	Worldwide Interoperability for Microwave Access
	WSN	Wireless Sensor Networks

Introduction générale

Le monde actuel connaît une urbanisation croissante et une augmentation constante du nombre de véhicules sur les routes. Cette situation entraîne une congestion routière accrue, des accidents de la route et une pollution de l'air, ce qui représente des défis majeurs pour la sécurité routière et la qualité de vie dans les villes. Face à ces défis, les technologies de communication sans fil émergent comme des solutions prometteuses pour améliorer la sécurité routière et la gestion du trafic.

Les réseaux de véhicules ad hoc (VANETs) et les réseaux de capteurs sans fil (WSN) représentent deux technologies clés dans ce domaine. Les VANETs permettent aux véhicules de communiquer directement entre eux, échangeant des informations sur leur position, leur vitesse et leur état, ce qui permet d'éviter les accidents et d'optimiser le flux du trafic. Les WSN, quant à eux, permettent de collecter des données en temps réel sur l'environnement routier, telles que l'état des routes, les conditions météorologiques et la présence de piétons, ce qui peut être utilisé pour améliorer la sécurité routière et la gestion du trafic.

Les réseaux hybrides capteurs-véhicules (HSVN) représentent une nouvelle génération de systèmes de transport intelligents (ITS) qui combinent les avantages des VANETs et des WSN, créant une infrastructure de communication sans fil plus complète et plus efficace pour la sécurité routière et la gestion du trafic. Les HSVN permettent aux véhicules et aux capteurs fixes de communiquer entre eux, partageant des informations en temps réel pour une meilleure connaissance de la situation routière et une prise de décision plus rapide.

Cependant, Malgré leur potentiel prometteur, les réseaux hybrides capteurs-véhicules (HSVN) font face à certains défis dont : les délais de livraison des données, la couverture et la connectivité, la sécurité et la congestion du trafic.

Face à ces défis, la simulation s'impose comme un outil indispensable pour explorer des solutions innovantes et optimiser les performances du réseau. La simulation peut s'effectuer à l'aide de simulateurs dédiés, conçus spécifiquement pour modéliser des types de réseaux particuliers, ou à l'aide d'outils plus génériques, offrant une plus grande flexibilité mais nécessitant une expertise plus poussée. Le choix du simulateur dépend des objectifs de la simulation, des caractéristiques du réseau étudié et des ressources disponibles.

L'objectif principal de ce travail est de démontrer que c'est possible de réaliser une simulation détaillée d'un scénario d'utilisation du réseau HSVN et de ses différentes applications, en se focalisant sur

Introduction générale

l'aspect communication, en exploitant l'outil de simulation multi agents NetLogo, réputé pour son aptitude à modéliser des systèmes complexes.

Organisation du mémoire :

Ce mémoire est subdivisé principalement en quatre chapitres :

Le premier chapitre intitulé « **Généralités sur les HSVN** » offre un panorama complet des concepts fondamentaux et des technologies qui sous-tendent les HSVN. Il s'agit d'une exploration approfondie des deux composants essentiels de ce dernier, à savoir : les réseaux véhiculaires (VANETs) et les réseaux de capteurs sans fil (WSN), l'accent est mis sur les caractéristiques uniques de chaque type de réseau, ainsi que sur leur architecture, leurs domaines d'application et les défis de conception auxquels ils sont confrontés. En analysant ainsi leur intégration au sein des HSVN.

Le deuxième chapitre intitulé « **Communication et Routage dans les HSVN** » couvre deux aspects : la communication et le routage, et la gestion d'énergie. Il présente les technologies de communication et les protocoles de routage, et il expose le problème de consommation d'énergie et offre quelques techniques matérielles et logiciels pour la conservation d'énergie dans les HSVN.

Le troisième chapitre intitulé « **Modélisation** » est consacré pour détailler les systèmes multi-agents (SMA) et les Systèmes de Systèmes (SoS).

Le quatrième chapitre intitulé « **Simulation** » offre une perspective approfondie sur le scénario de la ville intelligente et de la forêt en exploitant le simulateur NetLogo comme outil d'analyse.

Le mémoire s'achève par une conclusion générale et quelques perspectives de recherche.

1. CHAPITRE 01 : Généralités sur les HSVN

1.1. Introduction

Au cours de ces dernières années, des progrès continus en matière de communications sans fil ont ouvert de nouvelles perspectives de recherche dans le domaine des réseaux informatiques, permettant d'étendre la connectivité dans des environnements où les solutions filaires sont limitées.

Les réseaux véhiculaires (VANET) et les réseaux de capteurs sans fil (WSN) sont tous les deux des réseaux ad hoc qui fonctionnent sans infrastructure. Le Réseau Hybride Sensor-Véhiculaire (HSVN), combine ces deux types de réseaux visant à créer un cadre de communication permettant la détection en temps réel des dangers routiers tout en maintenant la connectivité dans le VANET lorsque la densité du réseau est faible.

Ce premier chapitre est subdivisé principalement en trois parties, où nous allons définir dans chaque partie les concepts de bases des réseaux VANET, WSN et HSVN. En décrivant leurs architectures, leurs composants, leurs caractéristiques, leurs applications ainsi que leurs défis associés à chaque type de réseau.

1.1.1. Définition d'un réseau cellulaire

Un réseau cellulaire est un réseau de communications conçu spécifiquement pour les appareils mobiles. Il permet la connectivité entre ces unités mobiles ainsi que l'ensemble des abonnés. L'onde radio dans le cas d'un réseau cellulaire est le lien entre le mobile et l'infrastructure des émetteurs. [1] Le principe fondamental d'un réseau cellulaire repose sur deux éléments clés : la division du territoire en zones appelées cellules et la répartition des fréquences radio entre ces cellules. Cette organisation permet d'optimiser l'utilisation des ressources radio et d'éviter les interférences entre les communications mobiles.[2]

1.1.2. Définition d'un réseau ad hoc

Un réseau ad hoc est un type de réseaux sans fil décentralisé et auto-organisé. Il se compose d'un ensemble de nœuds mobiles qui s'organisent dynamiquement pour former un réseau qui ne nécessite pas une infrastructure préexistante.

Les réseaux ad hoc exploitent la capacité de ces nœuds mobiles pour acheminer les données et faciliter la communication dans des environnements différents, y compris dans ceux où la couverture sans fil est absente ou limitée.

On distingue plusieurs classifications des réseaux ad hoc, incluant les réseaux mobiles ad hoc (Mobile Ad hoc Networks), les réseaux ad hoc véhiculaires (Vehicular Ad hoc Networks), les réseaux ad hoc sous-marins(Underwater Ad hoc Newtorks), les réseaux ad hoc à lumière visible (Visible-Light Ad hoc Networks), les réseaux ad hoc volants (Flying Ad hoc Networks).[3]

1.1.3. Définition des MANETs

Les réseaux mobiles Ad Hoc, ou MANETs, sont des réseaux de communication sans fil où les nœuds mobiles peuvent communiquer sans passer par un point d'accès ou une station de base, formant ainsi un réseau sans infrastructure.

Chaque nœud se charge de découvrir dynamiquement les nœuds qui sont dans sa portée de transmission afin de pouvoir communiquer directement. Par conséquent, si des nœuds veulent communiquer et qui ne sont pas à la portée les uns des autres, ils doivent passer par des nœuds intermédiaires qui jouent le rôle des routeurs pour acheminer les informations entre la source et la destination.

Le principal défi des réseaux MANETs consiste à équiper chaque nœud mobile des dispositifs nécessaires pour obtenir et maintenir les informations requises pour acheminer les messages.[4]

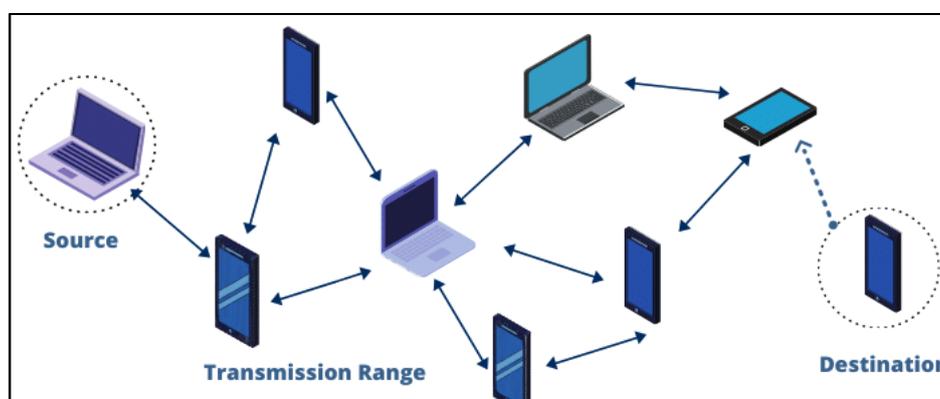


Figure 1.1 Exemple d'un MANET [5]

1.2. Les réseaux véhiculaires VANET

1.2.1. Définition des VANETs

De nos jours les technologies sans fil font partie de notre quotidien ce qui a donné naissance à de nouveaux systèmes de communication, l'idée initiale consistait à rendre les véhicules et les routes plus intelligents d'où la technique VANET s'est présentée.

Les réseaux sans fil véhiculaires, aussi appelés VANETs (Vehicular Ad-hoc Networks) constituent une classe particulière des réseaux mobiles Ad-Hoc(MANET) où les nœuds mobiles sont des véhicules

Chapitre 01 : Généralités sur les HSVN

qui sont soumis aux règles de la circulation. Leur déplacement s'effectue à des vitesses supérieures à celles des nœuds présents dans d'autres types de MANET.

La portée du réseau sans fil de chaque véhicule peut être restreinte à quelques centaines de mètres. Ainsi, afin de garantir une communication de bout en bout sur une longue distance, les messages doivent transiter par plusieurs nœuds. [6]

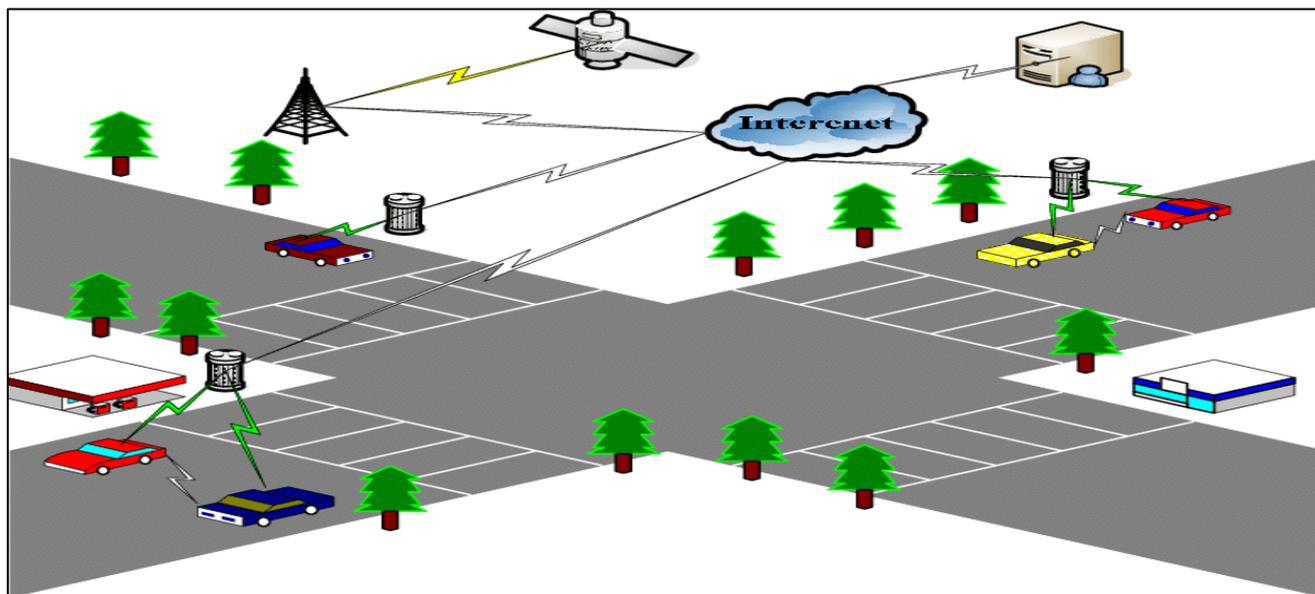


Figure 1.2 Exemple d'un VANET [7]

1.2.2. Comparaison entre les MANETs et les VANETs

Les réseaux MANET et VANET partagent une similarité fondamentale : leurs nœuds s'organisent et gèrent les informations de manière autonome, sans recourir à un serveur central. Cependant, les réseaux VANET se distinguent par des caractéristiques uniques, les plaçant dans la catégorie des réseaux mobiles ad hoc. [8]

Les réseaux véhiculaires se caractérisent par :

- **Topologie extrêmement dynamique** : le déplacement à haute vitesse des véhicules provoque le changement de la topologie. Par conséquent, les algorithmes développés pour les VANETs doivent être capables de s'adapter aux nœuds hautement mobiles. [4]
- **Connectivité** : La topologie hautement dynamique fragilise les liens entre véhicules. [4]
- **La capacité énergétique** : Les batteries embarquées dans les véhicules servent comme source d'énergie pour les entités des réseaux véhiculaires. [9]
- **Diversité environnementale** : l'environnement de communication diffère selon les caractéristiques qui définissent la route. En effet, les véhicules peuvent passer d'un

environnement ouvert, sans obstacles à un autre complètement différent, ce qui implique la prise en compte de ces changements.[9]

- **Techniques de transmission** : dans les applications liées à la sécurité routière, les messages d’alerte ou d’avertissement sont envoyés d’une source vers plusieurs destinations, il s’avère que les stratégies de communication qui dominent les VANETs sont : le Broadcast et le Multicast. [9]

1.2.3. Composants des VANETs

Comme le montre la figure 1.9, les réseaux véhiculaires se composent de trois éléments essentiels :

- **Road-Side Unit (RSU)** : Les unités de bord de route servent comme une passerelle pour les véhicules afin de se connecter à Internet. [10]
- **On-Board Unit (OBU)** : Ce sont des unités embarquées dans les véhicules, elles regroupent un ensemble de composants tels que : un processeur, une carte réseau, une antenne radio, une interface utilisateur, etc. Elles permettent d’assurer la communication directe entre véhicules (V2V) ou entre véhicules et infrastructures (V2I). [10]
- **Trusted Authority (TA)**: Autorité de confiance, elle permet de garantir la sécurité du VANET. Son rôle consiste à délivrer des certificats afin d’assurer la confidentialité des communications au sein du réseau véhiculaire. [10]

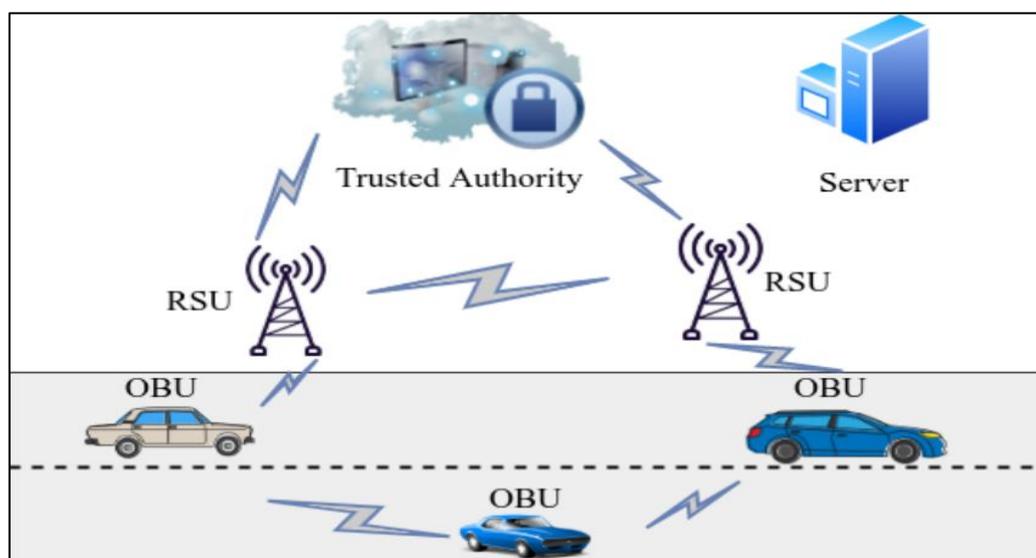


Figure 1.3 Architecture basique d'un VANET [11]

1.2.4. Modes de communication dans les VANET

La communication permet la diffusion d'informations utiles pour la sécurité et l'efficacité des déplacements, comme les conditions de circulation en temps réel, les alertes d'accidents, les

signalements de dangers et d'autres événements importants. ce qui conduit à aborder les modes de communication suivants :

1.2.4.1. Communication de type Véhicule-à-Véhicule (V2V)

L'échange d'informations dans ce mode de communication se fait de manière directe entre les véhicules sans passer par une infrastructure fixe. On utilise le V2V principalement pour les applications de sécurité et de diffusion. [12]

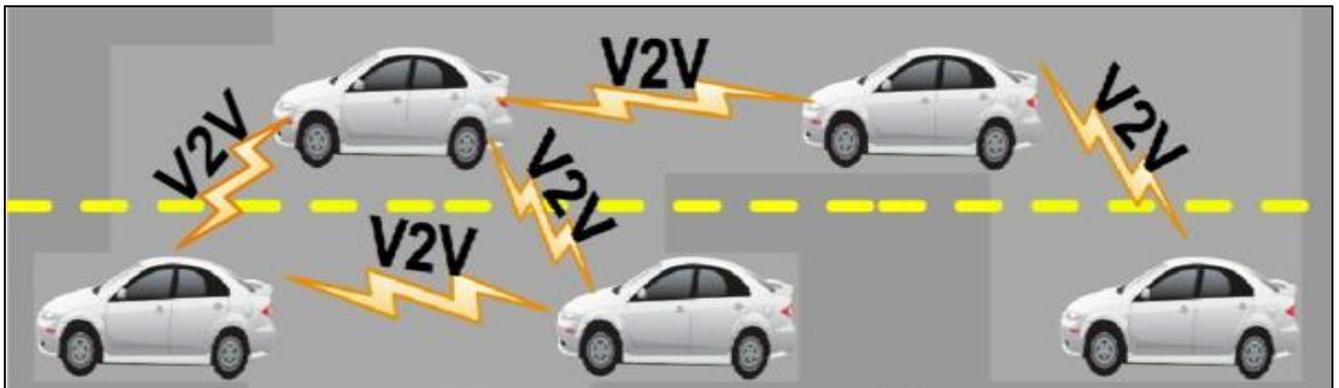


Figure 1.4 Communication V2V [13]

1.2.4.2. Communication de type Véhicule-à-Infrastructure (V2I)

La communication entre l'infrastructure routière et les véhicules se fait de manière sans fil et bidirectionnelle en utilisant des fréquences de communication dédiées à courte portée (en anglais : DSRC (Dedicated Short Range Frequencies)). [14]

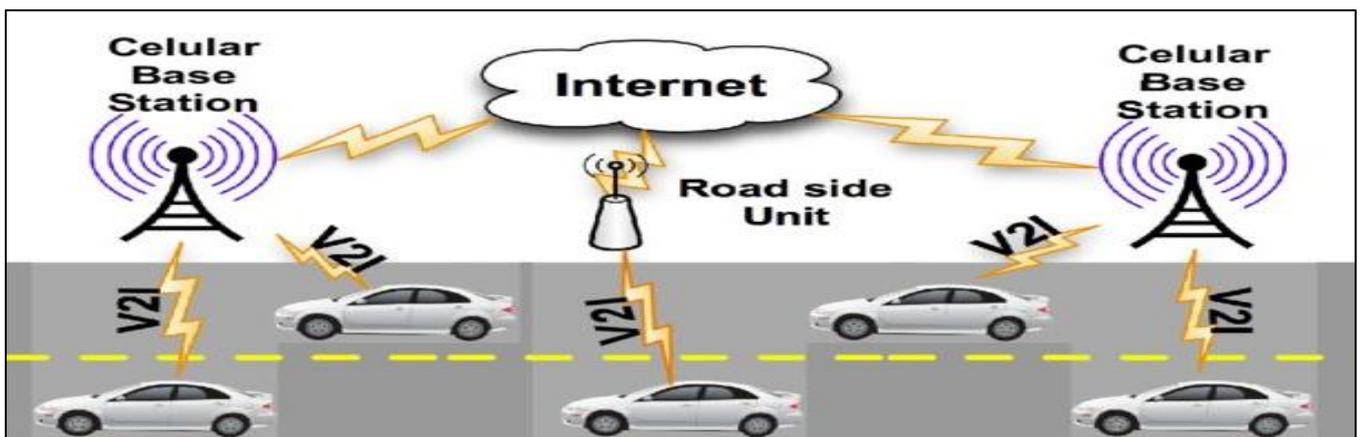


Figure 1.5 Communication V2I [13]

1.2.4.3. Communication hybride (V2V & V2I)

Appelée aussi V2X (Vehicule-to-Everything), c'est la combinaison des deux types de communication Véhicule-à-Véhicule et Véhicule-à-Infrastructure.

Ce mode de communication peut alerter les conducteurs sur les conditions météorologiques dangereuses, les accidents et les embouteillages à proximité.

La communication avec le système de circulation rend la tâche de conduite plus simple en fournissant les informations directement au véhicule au lieu d'attendre la réaction du conducteur. [15]

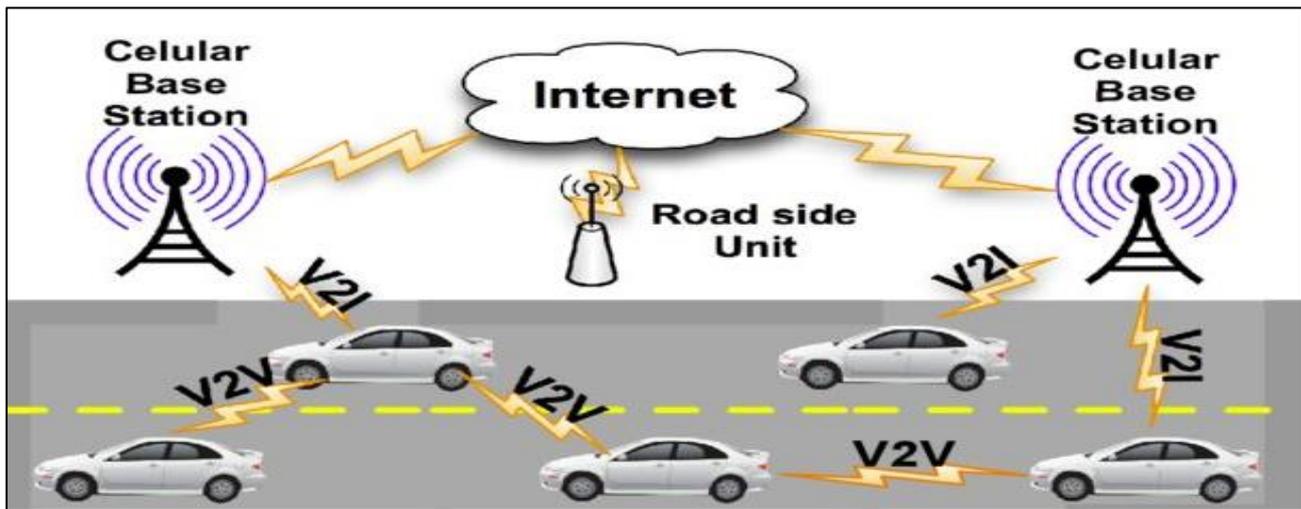


Figure 1.6 Communication hybride [13]

1.2.4.4. Communication de type Véhicule-à-Réseau (V2N)

Cette technologie permet aux véhicules d'échanger des informations et des données avec les infrastructures routières via des technologies de communication cellulaires, telles que : LTE, la 4G et la 5G.

De plus, ce mode de communication vise à renforcer la sécurité routière en offrant un flux d'informations cruciales et en temps réel sur les conditions de circulation, permettant ainsi une meilleure connectivité entre les véhicules. [16]

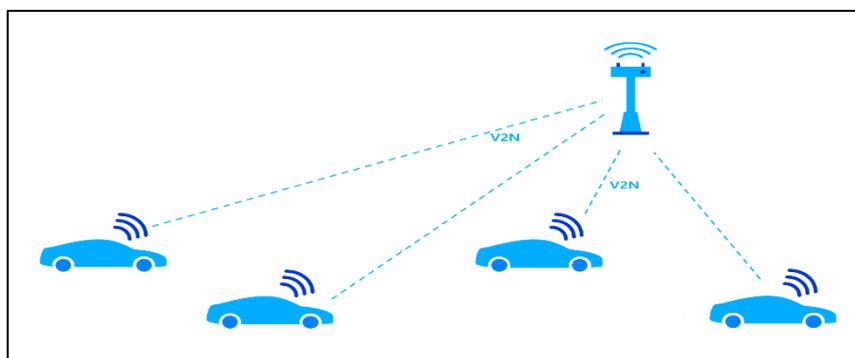


Figure 1.7 Communication V2N [17]

1.2.4.5. Communication de type Véhicule-à-Piéton (V2P)

Ce mode de communication se concentre sur l'interaction entre les piétons et les véhicules. Dans cette technologie, les données sont généralement transmises en utilisant des smartphones, des appareils portables ou bien d'autres dispositifs portés par les piétons.

Les véhicules équipés de V2P peuvent exploiter les données de positions et de déplacement qui ont été reçues pour identifier et éviter les collisions en améliorant ainsi la sécurité de tous les usagers de la route. [18]

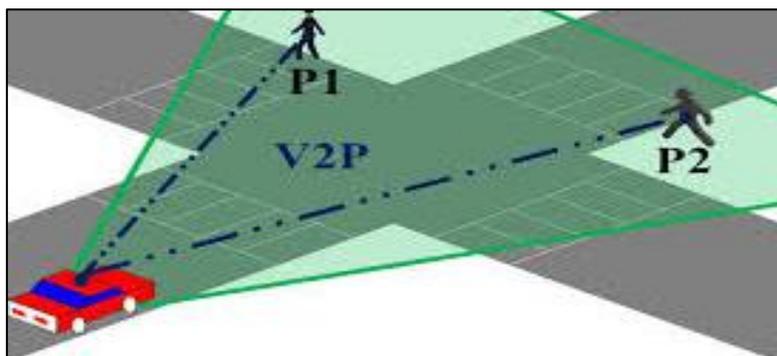


Figure 1.8 Communication V2P [19]

1.2.4.6. Communication de type Véhicule-à-Cloud (V2C)

La communication V2C est une forme d'interaction et d'échange de données en temps réel entre les véhicules et les plateformes basées sur le Cloud. Elle permet de développer une multitude d'applications qui améliorent la sécurité, l'efficacité et l'expérience de conduite. [20]



Figure 1.9 Communication V2C [21]

1.2.4.7. Communication de type Véhicule-à-Appareil (V2D)

La communication V2D (Vehicule-to-Device) permet l'échange des informations entre les véhicules et n'importe quel appareil intelligent, via Bluetooth généralement. [22]

1.2.5. Objectifs des VANETs

L'objectif principal des réseaux véhiculaires est de permettre aux véhicules de communiquer d'une manière directe, sans utiliser une infrastructure fixe comme une station de base. Cela permet de créer un réseau décentralisé et autonome, améliorant ainsi la sécurité routière et l'efficacité des systèmes de transport. [23]

1.2.6. Applications des VANETs

Les applications des réseaux véhiculaires sont nombreuses et variées. Elles peuvent être regroupées en trois grandes catégories :

1.2.6.1. La sécurité routière

Ce type d'applications vise à améliorer la prévention routière de façon significative, en alertant les véhicules de tous risques potentiels ou événements dangereux. Les conducteurs sont informés sur l'état de la route et les véhicules voisins grâce à la diffusion périodique des messages informatifs. La transmission de ces messages peut s'effectuer soit par la communication entre véhicules, soit par la communication de véhicule à infrastructure. Quelques exemples répandus de services dans cette catégorie d'applications : [10] [24]

- L'avertissement des collisions.
- L'assistance dépassement et changement de voie.
- Le signalement de véhicules d'urgence et prioritaires.

1.2.6.2. La gestion du trafic routier

Ces applications se concentrent sur l'amélioration des conditions de circulation. En effet, elles coordonnent les usagers de la route en se basant sur les informations de trafic routier en temps réel afin de leur fournir les itinéraires les plus efficaces. Elle prend en compte la position géographique des véhicules, l'état des routes et la densité de ces dernières en termes de véhicules. La gestion de la vitesse et la navigation coopérative sont deux groupes typiques de ce type d'applications : [10]

- **La gestion de la vitesse** : a pour objectif d'aider le conducteur à optimiser la vitesse à laquelle il circule, et trouver un équilibre entre un rythme qui lui permettra de gagner du temps et le maintien d'une sécurité adéquate. [10]

- **La navigation coopérative :** le but ici est d'augmenter l'efficacité du trafic par la gestion de la navigation des véhicules grâce à la coopération entre les véhicules eux-mêmes ainsi qu'entre les véhicules et les unités de bord de la route. [24]

1.2.6.3. L'info-divertissement

Cette catégorie d'applications vise avant tout à enrichir l'expérience utilisateur. Elles offrent des services axés sur le confort, l'information et le divertissement, tels que les jeux en ligne, les bulletins météo ainsi que le streaming audio et vidéo. Il existe deux types d'applications d'info-divertissement, les applications locales et celles qui sont connectées directement à Internet. [10]

1.2.7. Défis des VANETs

- **Affaiblissement du signal :** La présence d'obstacles entre deux véhicules en communication est l'un des défis pouvant affecter l'efficacité des réseaux VANET. Ces obstacles peuvent être d'autres véhicules ou des bâtiments, principalement présents le long des routes et en milieu urbain. Leur impact se traduit par une obstruction du signal vers son destinataire et une augmentation de l'affaiblissement du signal transmis. [25]
- **Limitation de bande passante :** En l'absence de régulation centralisée, le risque de congestion est élevé, particulièrement dans les zones denses et avec la multiplication des applications. Une utilisation équitable est cruciale pour réduire le délai de diffusion des messages. [25]
- **Connectivité :** La forte mobilité et les changements rapides de la topologie dans les réseaux VANET entraînent une fragmentation fréquente. Pour maintenir la communication, il est crucial de prolonger la durée de vie des liens. [25]
- **Diamètre du réseau réduit :** Dans les réseaux VANET, le petit diamètre effectif affaiblit la connectivité entre les nœuds. Maintenir une topologie globale complète est impossible pour un nœud individuel. Cette limitation complique l'application des algorithmes de routage traditionnels dans les VANET. [25]
- **Sécurité et confidentialité :** Les véhicules doivent pouvoir échanger des informations fiables pour garantir la sécurité routière. De l'autre, la transmission de données personnelles peut exposer les utilisateurs à des risques de surveillance et de piratage. Trouver un juste équilibre entre ces deux exigences est crucial pour le développement et l'adoption des réseaux VANET. [25]

1.3. Réseaux de capteurs sans fil (WSN)

1.3.1. Définition d'un capteur sans fil

Les capteurs sont de très petits appareils dotés de ressources très limitées, capables de traiter et de transmettre des informations à d'autres entités (capteurs, unité de traitement...) via des ondes radio sur des distances limitées à quelques mètres. [26]



Figure 1.10 Exemple d'un capteur sans fil [27]

1.3.2. Architecture d'un capteur sans fil

Un nœud capteur se compose principalement de quatre unités fondamentales : l'unité de captage, l'unité de traitement, l'unité de transmission et l'unité d'énergie, chacune ayant des rôles spécifiques, comme illustré dans la Figure 1.3.2

Il peut contenir également, suivant son domaine d'application, des modules supplémentaires tels qu'un système de localisation qui donne au capteur sa position (GPS), ou bien un système générateur d'énergie (cellule solaire), ou bien un système de mesure de distance ou d'angle avec un nœud capteur voisin.[26]

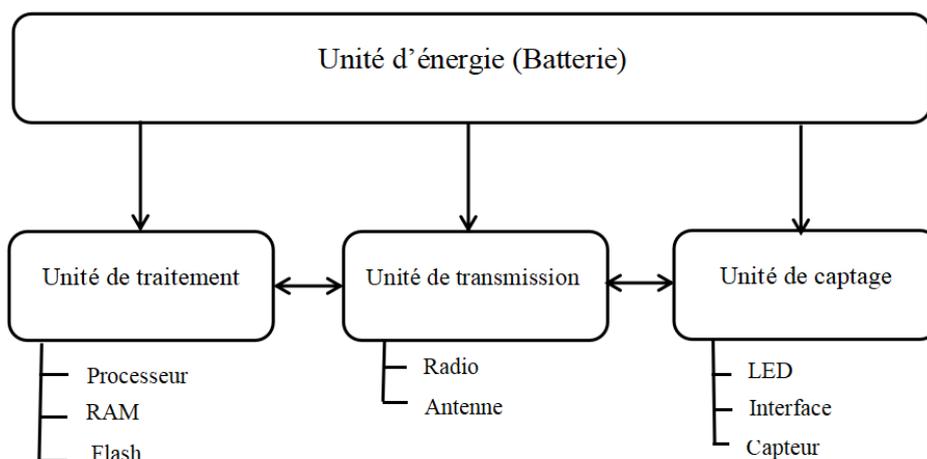


Figure 1.11 Architecture d'un capteur sans fil

1.3.2.1. Unité de traitement (Processing unit) :

Cette unité est chargée de l'exécution des protocoles de communication qui permettent aux nœuds d'interagir avec d'autres nœuds du réseau. Elle comprend deux sous-unités : le processeur et l'unité de stockage. Le processeur peut fonctionner en modes actif, repos (Idle) et veille pour économiser l'énergie sans compromettre son fonctionnement. Les processeurs utilisés vont des microcontrôleurs 8 bits à ultra-faible consommation, cadencés à des vitesses aussi basses que 31 kHz, aux processeurs ARM 32 bits plus puissants, cadencés à plus de 200 MHz. L'unité de stockage se compose généralement d'une mémoire flash pour le code du programme et d'une mémoire RAM pour sauvegarder les informations détectées et les données nécessaires aux calculs.[28]

1.3.2.2. Unité de transmission (Tranceiver Unit) :

Radio et antenne : Les dispositifs étudiés sont donc généralement dotés d'une radio ainsi que d'une antenne. Cette unité est chargée de gérer toutes les émissions et réceptions de données sur un médium sans fil. Elle peut être de type optique (comme dans les nœuds Smart Dust), ou de type radiofréquence. Les communications de type optique sont robustes vis-à-vis des interférences électriques. Néanmoins, elles présentent l'inconvénient d'exiger une ligne de vue permanente entre les entités communicantes. Par conséquent, elles ne peuvent pas établir de liaisons à travers des obstacles. [26]

1.3.2.3. Unité de captage (Sensing Unit) :

LED, interface, capteur : On retrouve donc des équipements de différents types de détecteurs et d'autres entrées. Le capteur est généralement constitué de deux sous-unités : le récepteur qui identifie l'analyste, et le transducteur qui est chargé de convertir le signal du récepteur en un signal électrique.

Le capteur est responsable de fournir un signal analogique au convertisseur analogique-numérique en fonction du phénomène observé. Ce dernier convertit ces signaux en un signal numérique compréhensible par l'unité de traitement. [26]

1.3.2.4. Unité d'énergie (Power Unit) :

Batterie : Un micro-capteur est équipé d'une ressource énergétique (généralement une batterie de type AAA) pour alimenter tous ses composants. Cependant, en raison de sa petite taille, la ressource énergétique disponible est limitée et généralement non substituable.

Cette unité peut également gérer des systèmes de rechargement d'énergie à partir de l'environnement observé telles que les cellules solaires, afin d'étendre la durée de vie totale du réseau. Cependant

quelques différences existent suivant les fabricants, chacun développant ses propres types de capteurs tels que mica, mica2, telos, ou telosb, par exemple. [26]

1.3.3. Définition d'un réseau de capteurs sans fil

Un réseau de capteurs sans fil – Wireless Sensor Networks (WSN) – représente une catégorie émergente au sein des réseaux ad hoc.

Il se compose d'un grand nombre de capteurs autonomes répartis dans l'espace, chargés de recueillir des données et de les transmettre à d'autres capteurs ou de les renvoyer à une station de base. Ces derniers sont largement utilisés dans des domaines tels que la préservation de l'environnement, les applications militaires et la surveillance de la santé des structures (SHM).

Ils sont placés plus ou moins aléatoirement dans des environnements potentiellement dangereux (comme une chute d'hélicoptère). Pour que les nœuds capteurs travaillent d'une façon coopérative, les informations collectées sont partagées entre eux par voie hertzienne. [29][30]

1.3.4. Architecture d'un réseau de capteurs sans fil

Un réseau de capteurs sans fil générique se compose d'un ensemble de nœuds capteurs répartis de manière dispersée dans une zone géographique, appelé zone d'intérêt.

Les nœuds capteurs acheminent les données captées en utilisant un mode de communication multi-sauts à un nœud responsable appelé puits (en anglais sinks). Ce dernier collecte les données, les stocke et les analyse pour les communiquer à d'autres réseaux via internet ou par satellite. [31]

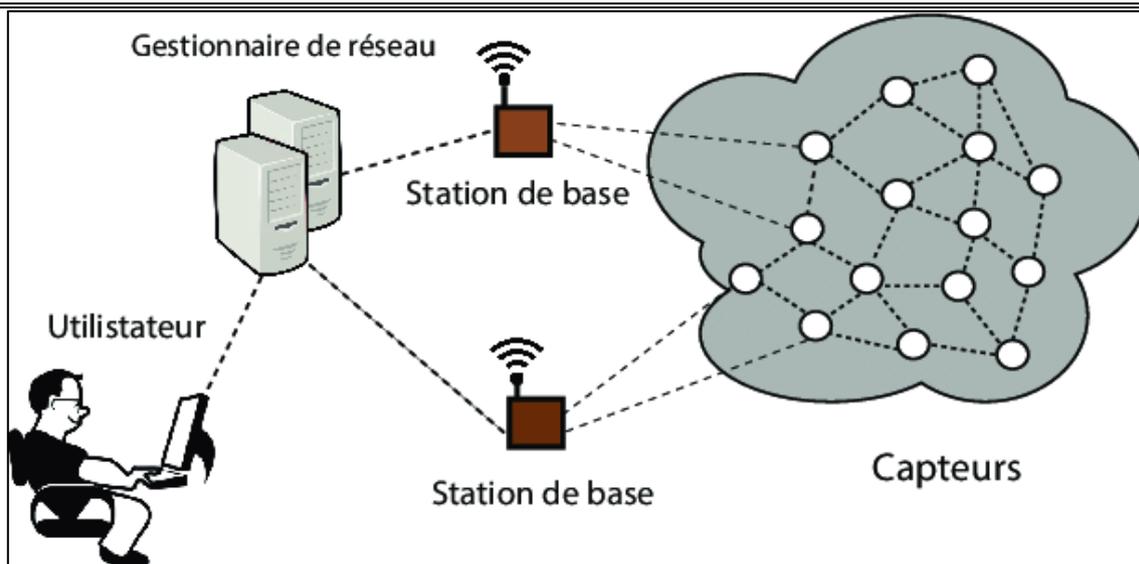


Figure 1.12 Architecture d'un réseau de capteurs sans fil [32]

1.3.5. Caractéristiques d'un réseau de capteurs sans fil

1.3.5.1. Auto-configuration des nœuds capteurs

Les nœuds capteurs sont densément déployés soit d'une manière aléatoire, ou bien être positionnés individuellement (de manière manuelle) par un être humain ou un robot. Ce déploiement peut s'effectuer à l'intérieur ou autour de la zone où le phénomène est observé. Alors un capteur doit avoir la capacité de s'auto-configurer dans un réseau de capteur mais également de pouvoir collaborer avec les autres nœuds du réseau.

Chaque capteur du réseau est équipé d'une unité émettrice/réceptrice, qui permet à chaque capteur d'établir des communications avec les nœuds à proximité. Grâce à l'échange d'informations avec les nœuds voisins chaque capteur du réseau a la capacité de découvrir les chemins qu'il adoptera en fonction des exigences de l'application. [31] [33]

1.3.5.2. Types de communication

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) utilisent différents types de communication :

- **Unicast** : c'est une communication point à point, c'est-à-dire qu'elle permet à deux nœuds capteurs de communiquer entre eux.
- **Broadcast** : c'est un type de communication dans lequel le nœud puits transmet des informations à tous les autres nœuds du réseau.

- **Local gossip** : Ce type de communication est utilisé par des nœuds déployés dans une zone géographiquement restreinte qui collaborent ensemble afin d'avoir une meilleure estimation de l'événement observé et d'éviter l'émission du même message vers le point de collecte ce qui contribue à consommer moins d'énergie.
- **Multicast** : est un type de communication dans lequel un nœud transmet une information à un groupe de nœuds. [33]

1.3.5.3. Topologie dynamique

La topologie des réseaux de capteurs change d'une manière fréquente et rapide. Ces changements sont dus à la défaillance des nœuds capteurs, à leur mobilité, et à la mobilité des nœuds finaux. [34]

1.3.5.4. Tolérance aux pannes

La capacité d'un réseau de capteurs sans fil à continuer à fonctionner sans interruption peut être due à une panne intervenue sur un ou plusieurs capteurs qui peuvent générer des erreurs ou ne plus fonctionner en raison de problèmes tels que le manque d'énergie, des défaillances physiques, ou des interférences. [35]

1.3.5.5. Collaboration entre les capteurs

La collaboration des nœuds est très importante dans les RCSF, notamment pour prévenir le traitement et la transmission redondants des données à l'échelle du réseau. Ce genre de traitement est nécessaire afin d'éviter une perte d'énergie et de temps importantes dans le cadre d'une optimisation de la consommation de l'énergie à travers tout le réseau. [36]

1.3.6. Domaines d'application des réseaux de capteurs sans fil

Le domaine des réseaux de capteurs sans fil (WSN) est un domaine de recherche multidisciplinaire offrant une grande variété d'applications : [37]

1.3.6.1. Applications militaires

Les Systèmes de Capteurs à Réseau (RCSF), tout comme de nombreuses autres technologies de l'information, ont émergé initialement de la recherche liée au domaine militaire. Ils sont considérés comme un élément clé dans le développement des systèmes de guerre. Ils peuvent être rapidement déployés pour la surveillance et utilisés pour fournir des renseignements sur le champ de bataille concernant l'emplacement, le nombre, le mouvement, et l'identité des troupes et des véhicules, et aussi pour la détection des armes nucléaires, chimiques et biologiques. [38]

1.3.6.2. Applications médicales

Les nœuds capteurs implantés sous la peau peuvent être utilisés pour surveiller en temps réel les fonctions vitales des organismes vivants (surveillance de la glycémie, détection de cancers, etc.). Ils peuvent ainsi surveiller la progression d'une maladie. [39]

1.3.6.3. Applications environnementales

Il existe de nombreuses applications dans la surveillance de paramètres environnementaux tel que la détection des incendies de forêt, la surveillance de la pollution de l'air, la prévention des risques industriels tels que la fuite de produits toxiques (gaz, produits chimiques radioactifs, etc.). [39]

1.3.6.4. Applications commerciales

Les réseaux de capteurs peuvent être exploités dans le secteur commercial pour optimiser le processus de stockage et de livraison des marchandises. Ils fournissent aux clients des informations en temps réel sur la position, l'état et la direction spécifiques de leurs commandes.

Pour les entreprises manufacturières, les RCSF permettront de suivre le procédé de production à partir des matières premières jusqu'au produit final livré donc aider les entreprises à offrir une meilleure qualité de service tout en réduisant leurs coûts. [39]

1.3.6.5. Applications domotiques

Les capteurs peuvent être embarqués dans des dispositifs domestiques tels que : les aspirateurs, les fours, les réfrigérateurs, les micro-ondes etc. Ces capteurs embarqués peuvent interagir entre eux et avec un réseau externe via Internet pour permettre à un utilisateur de contrôler les appareils et les systèmes des futures maisons (intelligentes) localement ou à distance. Cela permet d'améliorer le confort, la sécurité et l'efficacité. [39]

1.3.7. Défis des réseaux de capteurs sans fil

En raison de la capacité de stockage et de la puissance limitée des nœuds capteurs, de nombreux enjeux et défis de recherche sont confrontés lors de la conception de ces réseaux.

- **L'énergie** : Les capteurs nécessitent une alimentation pour effectuer diverses opérations telles que la collecte, le traitement et la communication des données. Ces derniers sont pourvus de batteries fournissant de l'énergie qui doivent être changées ou rechargées, ce qui est difficile et presque impossible en raison des conditions hostiles de l'environnement. Pour les chercheurs travaillant sur les Réseaux de Capteurs Sans Fil, le défi le plus critique consiste à concevoir,

développer et mettre en œuvre des protocoles, des matériels et des logiciels économes en énergie afin d'optimiser les performances de ces réseaux. [40]

- **Sécurité** : Certaines applications des réseaux de capteurs demandent une haute confidentialité et fiabilité des données telles les applications militaires et médicales. Pour garantir l'intégrité et la confidentialité de ces données, il est nécessaire de développer des méthodes de cryptographie qui soulève le problème de l'élaboration de protocoles de gestion de clés et qui doivent prendre en considération les limites des réseaux de capteurs. Il est recommandé de protéger un réseau de capteurs des attaques externes telles le déni de service (DoS) qui peut être fatale pour les nœuds capteurs vus leurs batteries limitées. [41]
- **Qualité de service (QoS)** : La qualité de service (QoS) dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs) est cruciale pour des applications en temps réel et critiques. Cependant, assurer une QoS optimale est complexe en raison des changements fréquents de la topologie du réseau et de l'imprécision des informations sur l'état du routage. Les RCSFs doivent disposer de bande passante suffisante malgré le déséquilibre du trafic causé par l'agrégation des données. Les protocoles de routage peuvent sacrifier l'efficacité énergétique pour répondre aux exigences de livraison. Les mécanismes de QoS doivent prendre en charge l'évolutivité du réseau, garantissant que l'ajout ou la suppression de nœuds n'affecte pas la qualité de service du RCSF. [40]
- **Tolérance aux pannes** : La tolérance aux pannes assure le fonctionnement d'un réseau sans interruption. En cas de défaillance d'un nœud le système de capteurs doit rester fonctionnel en s'adaptant à changer sa connectivité en cas de panne. Parmi les mécanismes utilisés c'est la retransmission et la réplication des messages qui consomment de l'énergie et engendrent des calculs computationnels. [40]
- **Communication Multimédia** : Les informations multimédias sont collectées et transmises par le RCSF. En plus des modes typiques de livraison de données dans les réseaux de capteurs sans fil scalaires, les données multimédia comprennent des instantanés et du contenu multimédia en streaming. Le traitement et la livraison de ce contenu ont un impact significatif sur la qualité de service, nécessitant une bande passante élevée pour la transmission. [40]
- **L'agrégation des données** : Lors de la capture ou de la transmission de données, certains capteurs peuvent générer des données redondantes. Ainsi, des paquets similaires de plusieurs nœuds peuvent être regroupés en un seul paquet de sorte que le nombre de transmissions soit réduit. L'agrégation des données consiste donc à combiner les données provenant de différents

Chapitre 01 : Généralités sur les HSVN

nœuds ce qui se révèle être une technique efficace pour optimiser la consommation d'énergie et le transfert de données. [36]

Les VANETs et les WSNs partagent certaines similitudes en tant que réseaux sans fil ad hoc permettant la communication multi-sauts entre les nœuds. Cependant, malgré leurs similitudes, ces deux réseaux présentent des différences importantes dont on peut mentionner :

VANET	WSN
Mouvement prévisible et haute vitesse.	Généralement statique
Unités de traitement puissantes et capacités de stockage importantes.	Faibles capacités de traitement et de stockage.
Portée de communication : environ quelques centaines de mètres, bande passante : de quelques dizaines à quelques centaines de Mbits/s	Portée de communication : environ quelques dizaines de mètres, bande passante de quelques centaines de Kbits/s.
La détection rapide des conditions routières dangereuses n'est pas garantie.	Haute efficacité de détection d'événements.
Les capteurs du véhicule ne permettent pas de repérer les dangers potentiels aux alentours de la route.	Faciles à déployer sur les routes et leurs environs
Déconnexions fréquentes entre les véhicules (zones rurales).	Peut maintenir la connectivité et la communication au sein du VANET en cas de faible densité du réseau.

Tableau 1.3-1 Comparaison entre les VANET et les WSN [42]

1.4. HSVN (Hybrid Sensor-VANET Networks)

1.4.1. Définition des HSVN

Les réseaux véhiculaires à base des réseaux de capteurs sans fil combinent le WSN avec le VANET afin que chaque type du réseau puisse bénéficier des avantages de l'autre tout en compensant ses faiblesses. En conséquence, cette coopération a donné naissance à un nouveau concept de réseaux, appelé : les réseaux véhiculaires à base des réseaux de capteurs sans fil ou Hybrid Sensor-Vehicular Network (HSVN), où les nœuds sont positionnés le long des routes pour surveiller les conditions

routières et transmettre en temps réel les données capturées aux véhicules d'améliorer la sécurité du transport en réduisant le nombre et la gravité des accidents. Les réseaux véhiculaires à base des réseaux de capteurs sans fil joueront un rôle fondamental dans le développement des applications au sein du système de transport intelligent, et seront une base essentielle d'une nouvelle série d'applications qui apparaissent comme une conséquence de ce concept.

Par exemple, on prévoit un scénario d'application militaire de réseau véhiculaire à base de réseau de capteurs sans fil qui fusionne un réseau véhiculaire se composant de chars de combat, et un réseau de capteurs qui se compose de mines intelligentes. Cette fusion permet à une mine intelligente de ne pas s'explorer face à un char de même armé et s'explorer seulement contre les chars ennemis. [43] [28]

1.4.2. Architecture des HSVN

Les nœuds des réseaux de capteurs sans fil sont hautement miniaturisés, majoritairement statiques, très limités en ressources et en énergie, et disposent généralement de bonnes capacités de détection. En revanche, les réseaux véhiculaires ad hoc (VANET) ont des topologies très dynamiques et les véhicules ne souffrent pas de contraintes énergétiques importantes. Les véhicules eux-mêmes pourraient être équipés de capteurs. Cependant, la couverture par les capteurs ne peut être garantie, car les véhicules ne sont pas présents partout et en permanence, et certains types d'événements ne peuvent pas être détectés de manière fiable par des entités mobiles.

Les réseaux HSVN ont été conçus afin que les deux types de réseaux puissent tirer parti des forces de l'autre tout en compensant leurs faiblesses. Nous utilisons un réseau de capteurs sans fil déployé sur ou à proximité des routes comme une grille de capteurs avec une disponibilité constante et une couverture dense, contrairement au réseau véhiculaire qui pourrait n'avoir qu'une couverture clairsemée. Le réseau de capteurs communique en permanence ses données aux véhicules circulant sur la route, leur fournissant des informations précises et à jour. Les véhicules communiquent entre eux pour diffuser ces informations sur des distances relativement longues. Ensuite, les véhicules renvoient ces données au réseau de capteurs où elles sont stockées pour être consultées ultérieurement par d'autres véhicules. Cela soulage le réseau de capteurs de la tâche énergivore consistant à transférer les données par saut à l'intérieur du WSN lui-même[44]

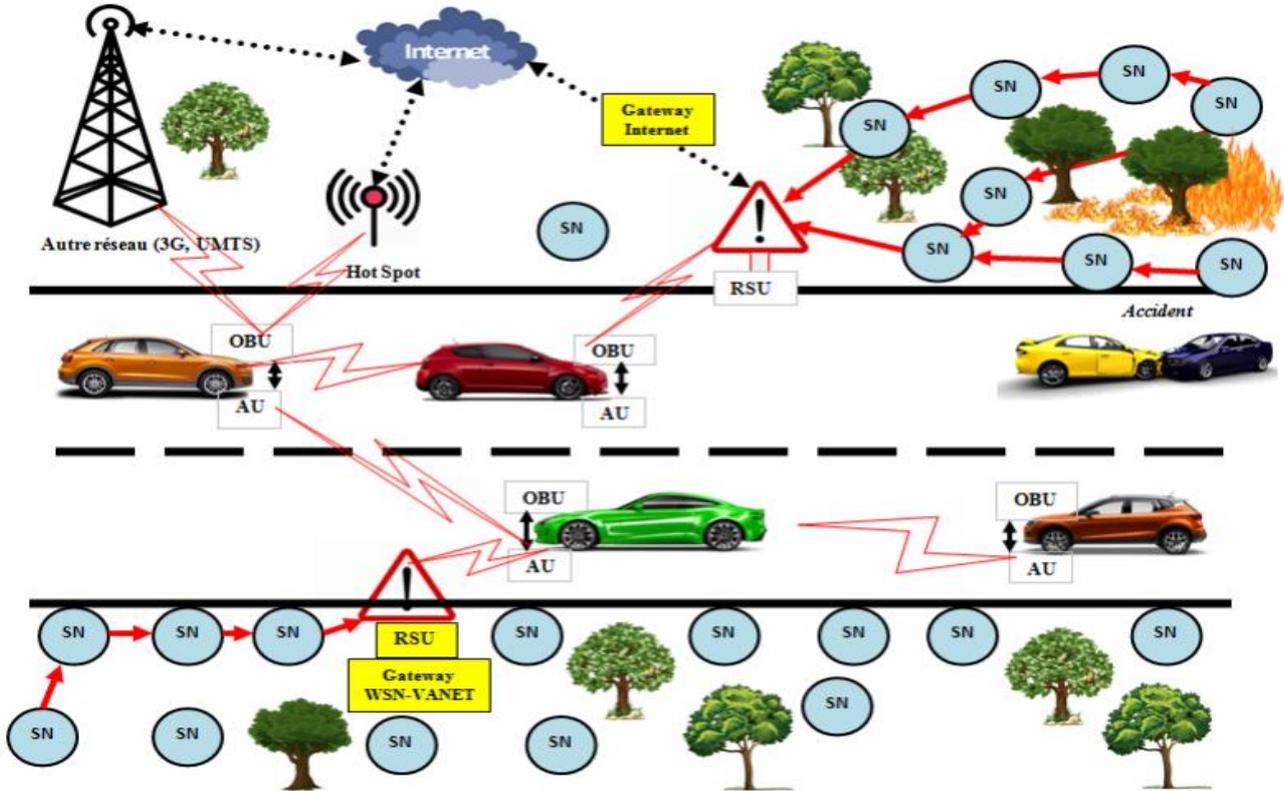


Figure 1.13 Architecture d'un HSVN [45]

1.4.3. Motivation d'intégration des WSN dans les VANETs

Les nœuds capteurs sont des petits dispositifs physiques qui consomment peu d'énergie, qui peuvent communiquer à courte ou à longue portée et qui possèdent une capacité de détection d'événements et de transfert de données. Le déploiement des capteurs aide à détecter les dangers (conditions météorologiques, obstacles cachés, feux de forêts, etc) et alerter les conducteurs de ces dangers potentiels, en améliorant ainsi la sécurité routière et diminuer le nombre d'accidents et de décès.

De même, le choix d'intégration des WSNs dans les VANETs est motivé par :

- **Fiabilité** : Dans les zones peu fréquentée (zones rurales par exemple), la déconnection des véhicules peut engendrer la perte de données importantes. En cas d'accident, l'arrivée des autres véhicules sur le lieu de l'accident est inévitable, c'est pour cela l'avantage de l'utilisation des WSNs est le fait que les capteurs peuvent détecter et récupérer les messages d'avertissement, même dans le cas où le véhicule accidenté est déconnecté. [46]
- **Faisabilité** : le déploiement massif des unités de bord de route (RSU) n'est pas économique car leur mise en place est très couteuse. Par conséquent, il y a un risque que deux RSUs

adjacentes peuvent ne pas être à portée l'une de l'autre. C'est pour cela, la mise en œuvre de nœuds capteurs entre elles est une solution efficace pour remédier à ce problème. [46]

- **Capacités de détection élevées :** les nœuds capteurs déployés le long de la route détectent et collectent les informations concernant l'état de la route et la densité de la circulation. [46]
- **Stabilité du réseau :** Les routes à haut risque d'accidents doivent être surveillées en permanence. Les VANETs se caractérisent par une topologie hautement dynamique ce qui rend la tâche de surveillance très difficile. En revanche, l'installation des capteurs statiques peut couvrir une zone géographique large et garantir la stabilité de la connexion réseau. [46]
- **Flexibilité :** Les WSNs peuvent être installés facilement dans les tunnels et les ponts grâce à leur flexibilité. [46]

1.4.4. Applications des HSVN

➤ Amélioration de la sécurité routière

La coordination entre les infrastructures routières et les véhicules connectés devient cruciale pour la sécurité routière. Des progrès significatifs ont été réalisés dans ce domaine :

En 2010, Barba et al ont développé un algorithme de communication entre WSN et VANET. Une fois la connexion établie, la passerelle WSN échange des paquets avec les véhicules approchants. Selon la direction des véhicules, deux types de communication sont distingués : dans un cas, les véhicules partageant la même direction échangent des informations sur l'état de la route, tandis que dans l'autre, seuls les chefs de groupe établissent la connexion pour diffuser les nouvelles informations routières aux véhicules de leur propre groupe.

En outre, Sam et al. (2013) ont suggéré l'intégration de capteurs sans fil le long des routes, dans le but d'améliorer la fiabilité du système en assurant une connexion réseau stable et une transmission efficace des messages. [46]

➤ Détection des dangers et des anomalies

La détection proactive et continue des dangers et des anomalies routières constitue un enjeu majeur dans les réseaux HSVN.

Chapitre 01 : Généralités sur les HSVN

Dans cette optique, Ericsson et al. (2008) ont proposé l'utilisation de WSN pour surveiller l'état des routes. À cette fin, ils ont développé un système de bout en bout capable de détecter et de diffuser des alertes en cas d'irrégularités.

Parallèlement, Djahel et Ghamri (2012) ont mis au point un cadre HSVN optimisant la détection des événements dangereux tout en minimisant la consommation d'énergie et le délai de transmission des avertissements aux véhicules. [46]

➤ Stationnement intelligent (Smart Parking)

Avec l'augmentation de la disponibilité et de l'utilisation des véhicules au cours des dernières années, il devient de plus en plus difficile de trouver une place de stationnement inoccupée, en particulier pendant les heures de pointe (Hassoune et al.2016). Par conséquent, une solution efficace à ce service peut être fournie par de nombreuses nouvelles technologies, parmi lesquelles les WSN.

Dans ce cadre, Zheng et Cao (2006) ont conçu un système de gestion de parking intelligent basé sur les WSN. Les nœuds de capteurs sont déployés dans un parking pour détecter et surveiller l'occupation du parking.

Tandis que Karbab et al. (2015) ont développé un cadre de stationnement intégrant les WSN et la technologie RFID (Radio Frequency Identification) pour moderniser la gestion des parkings avec des services avancés tels que le guidage des conducteurs et le paiement automatique, la récupération des places de parking et la sécurité.[46]

➤ Evitement de collisions

Les WSNs ont prouvé leur efficacité en s'imposant comme technologie prometteuse pour la sécurité routière. En 2007, Qingfeng et Ying ont proposé l'intégration des WSNs dans les réseaux véhiculaires afin de prévenir les accidents de route et éviter la collision.

Concrètement, les nœuds capteurs stockent les informations du trafic qui seront transférer ultérieurement aux véhicules.[46]

➤ Réduction de la congestion du trafic

La congestion du trafic est considérée comme un problème critique, car les retards deviennent de plus en plus fréquents. L'intégration des réseaux hybrides WSN-VANET s'est avérée efficace pour minimiser la congestion du trafic.

Chapitre 01 : Généralités sur les HSVN

En 2012, Pan et Al ont proposé un système de recalcul d'itinéraire et de guidage de trafic visant à réduire l'impact de la congestion.[46]

➤ Surveillance du trafic

La surveillance du trafic est l'un des services les plus importants dans les HSVNs. On peut citer plusieurs applications concernant ce suivi dont l'application menée par Bottero et Al, en 2012, qui consiste à installer des capteurs magnétiques dans le village de fret de Turin en Italy dans le but de compter et de classifier les véhicules entrants ou sortant d'une zone définie en fonction des perturbations du champ magnétique causée par leur passage.

Plusieurs recherches, dont celle de Tubaishat et al (en 2008), se sont penchées sur l'utilisation des WSNs pour collecter des données du trafic en temps réel. [46]

➤ Suivi des mouvements des véhicules

Le suivi des mouvements des véhicules est un autre service fourni par les WSNs qui est requis par les ITS (Intelligent Transportation Systems) pour échanger la position des véhicules.

Dans ce contexte, Lin (en 2013) a proposé une solution de suivi adaptif des véhicules pour les réseaux de capteurs de véhicules, où les nœuds de véhicules sont entourés de nœuds de capteurs de surveillance afin de suivre la position de chaque véhicule et enregistrer sa trace en temps réel. [46]

1.4.5. Défis des HSVN

1.4.5.1. Délai de livraison des messages

Dans un HSVN, on distingue trois classes de protocoles de communication : les protocoles de communication intra-WSN, les protocoles de communication intra-VANET et les protocoles de communication entre un VANET et un WSN.

La communication entre un VANET et un WSN est établie en utilisant deux types de messages : les messages utiles (échangés entre le véhicule et le capteur, contenant des données non critiques mais ayant un impact important pour améliorer la sécurité routière) et les messages d'alerte (détectés par les capteurs déployés sur la route, contenant des données critiques qui doivent être transmises en urgence au véhicule afin d'éviter des situations dangereuses).

Contrairement à l'échange des messages utiles, le temps disponible pour la délivrance des messages d'alerte dépend de la stratégie du protocole de communication et non pas de la durée de traitement des messages.

Ce défi trouve son origine dans diverses causes, dont la portée limitée de détection et de transmission des capteurs, leurs capacités réduites de stockage, de traitement et d'énergie ; la mobilité des véhicules ; les obstacles et l'interférence. [47]

1.4.5.2. La couverture et la connectivité

Le but principal de la fusion des réseaux véhiculaires et les réseaux de capteurs sans fil dans les HSVN est de créer un cadre de collaboration entre les deux réseaux afin d'améliorer la sécurité routière en offrant une détection en temps réel des conditions dangereuses de la route. Certes, la création d'un réseau HSVN fiable nécessite la résolution des problèmes des WSN liés à la couverture et à la connectivité.[48]

La couverture individuelle d'un capteur dépend de ses fonctions de détection propres à chaque type de capteur, tandis que la couverture de détection à l'échelle du réseau est une mesure collective de performance pour les nœuds de capteurs répartis géographiquement.[49]

1.4.5.3. La sécurité

La transmission des données est également vulnérable aux attaques malveillantes visant à créer un dysfonctionnement dans le réseau. La réception des informations digne de confiance de leurs sources est important pour les récepteurs. Toutefois, ces données de confiance peuvent enfreindre les exigences de confidentialité de l'expéditeur. Des solutions de sécurité robustes sont donc essentielles pour protéger des données accessibles ouvertement et garantir un environnement de communication fiable.[50]

1.4.5.4. La congestion du trafic

La congestion des données survient lorsqu'un lien de communication est saturé par un flux de données. Elle entraîne des embouteillages routiers car les messages d'urgence ne seront pas délivrés à temps et les communications entre les véhicules seront également affectées. La congestion est causée par plusieurs facteurs tels que les collisions de paquets, le dépassement de tampon de nœud. Une solution pour faire face à ce problème réside dans l'utilisation de la mémoire tampon en stockant temporairement les paquets surnuméraires. Toutefois, en cas de saturation prolongée, la perte

automatique des nouveaux paquets, incapable d'être transmis ou stockés, ceci peut constituer un défi, particulièrement pour le transport de données critiques.[51] [52]

1.4.6. Conclusion

Les nœuds dans les réseaux de capteurs sans fil sont très miniaturisés, principalement statiques, l'énergie et les ressources sont très limitées, et ont généralement de bonnes capacités de détection. En revanche, les VANETs ont des topologies très dynamiques et les véhicules n'étant pas restreints par des limitations énergétiques. Un nouveau concept nommé HSVN a été introduit, combine ces deux technologies, de sorte que chaque type de réseau peut bénéficier des avantages de l'autre tout en compensant ses faiblesses. Nous prévoyons que le HSVN jouera un rôle fondamental dans le développement d'applications des ITSs et sera la pierre angulaire d'une nouvelle série d'applications qui apparaissent comme une conséquence de ce concept.

Ce chapitre a été axé sur la présentation des concepts fondamentaux des réseaux WSN, VANET et HSVN. Le chapitre suivant se focalise sur la communication et le routage au sein des HSVNs, explorant en détail les technologies de communication, les protocoles de routage adaptés, les architectures de communication pour ces réseaux hybrides

2. Chapitre 02 : Communication et Routage dans les HSVN

2.1. Introduction

Dans le monde interconnecté d'aujourd'hui, les Réseaux Hybrides de Capteurs et de Véhicules (HSVN) émergent comme un nouveau paradigme, combinant les forces des réseaux de capteurs et des réseaux de véhicules. Ces réseaux créent une infrastructure complète de détection et de communication pour diverses applications, telles que les villes intelligentes, les systèmes de transport intelligents, la surveillance environnementale et la gestion des catastrophes. Une communication et un routage efficaces sont les pierres angulaires des HSVN, permettant un échange de données transparent et un fonctionnement efficace du réseau.

Dans ce chapitre, nous examinons les technologies de communication les plus couramment utilisées dans les HSVN, les protocoles de routage propres aux WSN et aux VANET, ainsi que les différents types et architectures de communication spécifiques aux HSVN. Nous mettons en évidence des études de prototypes et des cadres intégrés de communication pour améliorer la sécurité routière. Nous aborderons également le défi crucial de l'efficacité énergétique dans les HSVN, en examinant des techniques et des protocoles visant à minimiser la consommation d'énergie tout en maintenant des performances de communication optimales.

2.2. Technologies de communication dans les HSVN

Les réseaux de capteurs sans fil routiers (HSVN) reposent sur plusieurs normes de communication afin d'assurer la transmission des informations sur l'état des routes et des dangers potentiels :

2.2.1. IEEE 802.15.4 (ZigBee)

ZigBee est un LP-WPAN (Low Power – Wireless Personal Area Network) : c'est un réseau sans fil à bas débit et à courte portée qui utilise les ondes hertziennes pour transporter des messages entre deux ou plusieurs entités réseaux. Il est caractérisé par une portée comprise entre quelques mètres et quelques centaines de mètres et un débit faible (maximum 250 kbits/s). L'utilisation du médium hertzien est la principale distinction entre ZigBee et la plupart des autres réseaux locaux et personnels sans fil (WiFi, Bluetooth).[53]



Figure 2.1 Logo de Zigbee [54]

2.2.2. IEEE 802.11 (WiFi)

Le WiFi est une technologie sans fil populaire basée sur l'IEEE 802.11 g a/n/ac. Il est largement utilisé dans les téléphones mobiles, les maisons intelligentes, l'automatisation et la mise en réseau. Généralement, le WiFi opère dans la bande de fréquence 2,4 GHz ou 5 GHz, qui est disponible sans licence à travers le monde. Comparant à Zigbee, le WiFi présente ces avantages : une vitesse plus rapide et une grande flexibilité.

Le débit de données maximal peut atteindre 150Mb / s, ce qui signifie que le WiFi a le potentiel d'être appliqué dans un réseau à grande échelle pour le partage de ressources, l'agrégation de données et même la transmission de méga données. [55]

La norme IEEE 802.11p a été conçue pour prendre en charge l'accès sans fil dans les environnements véhiculaires. Cela comprend l'échange de données entre des véhicules à grande vitesse, ainsi qu'entre les véhicules et l'infrastructure routière dans la bande autorisée ITS de 5,9 GHz (5,85-5,925 GHz). [55]

2.2.3. Bluetooth et Bluetooth Low Energy (BLE)

Le Bluetooth est une technologie de liaison radio à courte portée permettant la transmission sans fil entre des utilisateurs mobiles.

Le Bluetooth Low Energy (BLE), également commercialisé sous le nom de Bluetooth Smart, est une technologie de réseau personnel sans fil à faible consommation d'énergie conçue et commercialisée par le Bluetooth Special Interest Group (SIG). Grâce à ses caractéristiques - faible consommation d'énergie, faible coût et mobilité élevée - le Bluetooth peut offrir de bonnes performances dans de nombreuses applications de ville intelligente, telles que la santé et la localisation. Par rapport au Bluetooth classique, le Bluetooth Smart vise à réduire considérablement la consommation d'énergie et le coût tout en conservant une portée de communication similaire.[55]

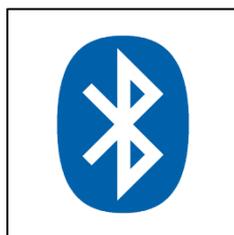


Figure 2.2 Logo de Bluetooth [56]

2.2.4. Sigfox

La technologie Sigfox 0G est un protocole réseau à basse consommation et longue portée (Low Power Wide Area LPWA) détenu par UnaBiz. Elle est conçue pour connecter des capteurs et des appareils de manière sécurisée et économique, en optimisant l'efficacité énergétique afin de permettre l'Internet des Objets (IoT) à grande échelle.[57]

Sigfox propose une solution de communication logicielle, où toute la complexité du réseau et de l'informatique est gérée dans le Cloud, plutôt que sur les appareils. Ce principe de fonctionnement réduit considérablement la consommation d'énergie et les coûts des appareils connectés. [58]



Figure 2.3 Logo de Sigfox [58]

2.2.5. IEEE 802.16e (WiMax)

Le WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) est une technologie de communication sans fil qui offre un accès haut débit à Internet sur de grandes distances. Contrairement au Wi-Fi, conçu pour des réseaux locaux à courte portée, le WiMAX est pensé pour couvrir des zones étendues, avec un rayon pouvant atteindre plusieurs kilomètres autour de l'antenne émettrice.[59]

2.2.6. La 5G

La 5G est la cinquième génération de réseaux mobiles, offrant des débits de transmission allant jusqu'à 10 Gbit/s, une latence réduite et une connectivité massive pour une multitude d'appareils

La 5G s'impose comme un catalyseur majeur pour la transformation de la gestion du trafic et l'essor des véhicules autonomes. Son déploiement permettra de repenser l'organisation urbaine et de façonner un futur de mobilité plus fluide, plus sûr et plus intelligent.[60]

2.3. Routage dans les HSVN

L'objectif fondamental des protocoles de routage est d'établir des chemins optimaux entre les nœuds distants du réseau, minimisant ainsi les surcoûts de communication. De nombreux protocoles dédiés

aux environnements HSVN ont été développés et peuvent être classés selon divers critères et spécificités.

2.3.1. Protocoles de routage dans les WSN

Plusieurs protocoles de routage ont été développés pour les RCSF (Réseaux de Capteurs Sans Fil) et peuvent être classés comme suit : [42]

2.3.1.1. Protocoles basés sur la localisation

Les protocoles basés sur la localisation s'appuient sur la connaissance précise de la position des capteurs, généralement obtenue grâce à un GPS intégré. Cette information est essentielle pour optimiser le routage des données en calculant la distance entre les nœuds et en estimant ainsi la consommation d'énergie.

Exemples de protocoles : Minimum Energy Communication Network (MECN), Geographic Adaptive Fidelity (GAF), Geographic and Energy-Aware Routing (GEAR), Trajectory-Based Forwarding (TBF). [42]

2.3.1.2. Protocoles centrés sur les données (Data-Centric)

L'objectif de ce groupe de protocoles est de minimiser la redondance des données générées par les capteurs déployés. Pour ce faire, les nœuds intermédiaires effectuent une agrégation des données collectées avant de les relayer vers le collecteur (sink) lorsque le capteur source envoie ses données. Cette stratégie permet d'économiser une quantité importante d'énergie en réduisant le volume de données à transmettre.

Exemples de protocoles : Sensor Protocols for Information Negotiation (SPIN), Directed Diffusion, COUGAR. [42]

2.3.1.3. Protocoles Hiérarchiques

Ce type de protocole organise le réseau en petits groupes de capteurs appelés clusters. Certains capteurs, dotés d'un niveau d'énergie plus élevé, sont choisis aléatoirement comme têtes de cluster (CH) et ont pour mission de traiter et de transmettre les données vers le nœud central (collecteur). L'objectif principal de ces protocoles est de minimiser la consommation d'énergie, contribuant ainsi à prolonger la durée de vie des capteurs.

Exemples de protocoles : Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH)[42], Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems (PEGASIS)[42].

2.3.1.4. Protocoles multi-chemins

Les protocoles multi-chemins permettent d'acheminer les données de la source vers le collecteur en empruntant un chemin unique (mono-chemin) ou plusieurs chemins simultanés (multi-chemins) qui peuvent être de type disjoint ou tressé.

Dans le routage mono-chemin, chaque capteur emprunte le chemin le plus court pour acheminer ses données vers le collecteur, privilégiant l'efficacité et la simplicité. En revanche, le routage multi-chemin adopte une stratégie plus complexe en répartissant les données sur plusieurs itinéraires simultanés, généralement les n premiers itinéraires les plus courts calculés par le capteur source.

➤ **Comparaison entre le routage multi-chemins et mono-chemin**

Le routage à chemin unique, bien que simple et évolutif, est inefficace dans les réseaux de capteurs sans fil pour les raisons suivantes : [42]

Routage multi-chemins	Routage mono-chemin
Le temps de configuration du chemin varie en fonction des techniques de découverte de chemin.	Le temps de configuration du chemin est une durée spécifique.
Mécanismes de tolérance aux pannes faciles à mettre en œuvre.	Mécanismes de tolérance aux pannes difficiles à mettre en œuvre.
Résistance aux cyberattaques internes et externes sophistiquées.	Des attaques simples peuvent compromettre le fonctionnement de l'ensemble du réseau.
Tolère la défaillance ou l'épuisement d'énergie de plusieurs nœuds, évitant ainsi le partitionnement du réseau.	La défaillance d'un nœud ou l'épuisement de son énergie peut facilement fragmenter le réseau.
Mécanismes d'équilibrage de charge faciles à mettre en œuvre.	Les mécanismes d'équilibrage de charge sont un processus complexe à mettre en œuvre.
Une grande quantité de données peut être transférée si les paquets sont envoyés sur plusieurs chemins.	Le mono-chemin offre des performances limitées en matière de QoS.

Tableau 2.3-1 Comparaison entre le routage multi-chemins et mono-chemin [42]

2.3.1.5. Protocoles basés sur la QoS (Qualité de Service)

Ces protocoles visent à offrir une bonne qualité de service en tenant compte de plusieurs paramètres : maximisation du débit, minimisation du délai de bout en bout, Prise en compte de la consommation d'énergie et la gestion optimale des ressources.

2.3.2. Protocoles de routage dans les VANET

Les caractéristiques uniques des réseaux VANET, telles que la forte mobilité des véhicules et la topologie dynamique du réseau, font du routage un défi de taille. En effet, il est difficile de trouver et de maintenir des routes garantissant la livraison d'un paquet dans un délai minimal.

Les protocoles de routage pour VANET peuvent être classés en plusieurs catégories : [42]

2.3.2.1. Protocoles basés sur la position

Les protocoles de routage basés sur la position tirent parti des informations de localisation des véhicules, généralement acquises par GPS, pour déterminer le chemin optimal pour la transmission des paquets de données.

Exemples de protocoles : DREAM (Distance Routing Effect Algorithm for Mobility), GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing) [42]

2.3.2.2. Protocoles basés sur le clustering

Les protocoles de routage basés sur le clustering organisent les véhicules en groupes appelés clusters. Chaque cluster est doté d'une tête de cluster qui gère la communication interne (intra-cluster) et externe (inter-clusters) du cluster. Cette approche offre une bonne évolutivité pour les réseaux de grande envergure, mais elle peut accroître la charge de communication du réseau.

2.3.2.3. Protocoles basés sur la diffusion

Dans les protocoles de routage par diffusion, la technique d'inondation est employée pour propager les messages à l'ensemble des nœuds du réseau.

Ce type de routage est principalement utilisé pour la diffusion rapide d'informations de sécurité routière critiques, telles que la météo, le trafic, les situations d'urgence et l'état des routes.

Exemples de protocoles : SRB (Selective Request Broadcast), VTRADE (Vehicular Traffic Data Exchange Protocol), UMB (Urban Multihop Broadcast).

2.3.2.4. Protocoles Geocast/Multicast

Au lieu d'inonder l'ensemble du réseau, les protocoles de routage Geocast / Multicast diffusent les messages d'une source unique vers un groupe spécifique de nœuds situés dans une zone géographique définie. Cette approche ciblée permet de limiter la surcharge de messages et la congestion du réseau.

2.3.2.5. Protocoles basés sur la topologie

Dans les protocoles de routage basés sur la topologie, chaque nœud du réseau maintient une table de routage qui stocke les informations sur les chemins possibles vers les autres nœuds. Cette table de routage est utilisée pour guider l'acheminement des paquets de données de la source vers la destination.

Les protocoles de routage basés sur la topologie sont classés en trois catégories principales :

- a. Protocoles proactifs :** Dans ce type de protocoles, chaque nœud garde une image globale sur la topologie du réseau. On met à jour cette image régulièrement ou à chaque modification de la topologie. [24]

Exemples de protocoles : OLSR (Optimized Link State Routing), DSDV (Destination-Sequenced Distance-Vector). [42]

- b. Protocoles réactifs :** Les protocoles de routage réactifs se basent sur le principe de trouver une route entre un émetteur et un récepteur à la demande, lorsqu'un nœud souhaite envoyer des données à une destination spécifique en utilisant les techniques de découverte et de maintenance de routes [4]

Exemples de protocoles : AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector), DSR (Dynamic Source Routing), AOMDV (Ad hoc On-Demand Multipath Distance Vector). [42]

- c. Protocoles hybrides :** Les protocoles de routage hybrides combinent les avantages des protocoles proactifs et réactifs. En tirant parti des points forts de chaque type, ils offrent une meilleure scalabilité et minimisent la surcharge du réseau.

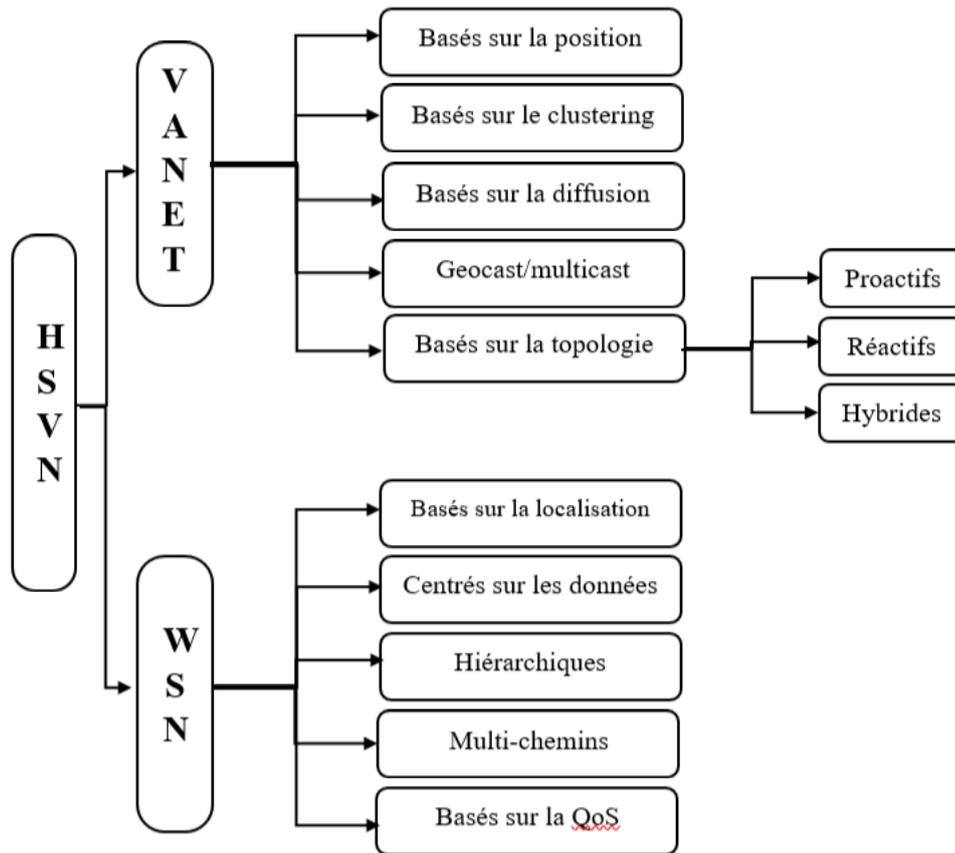


Figure 2.4 Schéma récapitulatif sur les protocoles de routages

2.4. La communication dans les HSVN

D’après [46], les HSVN utilisent des nœuds de capteurs sans fil installés le long des routes afin de maintenir une surveillance constante de l’état de la chaussée (pluie, neige, verglas, obstacles cachés, etc.) et d’évaluer la densité du trafic sur n’importe quel tronçon. Quand un danger sur la route survient, le module de communication du capteur envoie un message d’alerte (signal d’information) à un véhicule s’approchant ou à l’unité de bord de route la plus proche en utilisant la norme IEEE 802.15.4 (ZigBee). Par la suite, les véhicules échangent le message reçu grâce à la communication entre eux. Après avoir été informé du danger, le conducteur a la possibilité d’ajuster sa conduite et sa vitesse afin de prendre une décision adéquate et de diminuer les risques d’accident. Il existe deux interfaces pour les véhicules et les unités de bord de route :

- Une carte Wi-Fi intégrée (IEEE 802.11) qui offre la possibilité de communiquer entre les véhicules.

- Une interface IEEE 802.15.4 pour la communication avec les capteurs déployés entre deux unités de bord de route.

Réseau	Rôle	Principe
VANET	Propagation de données à longue portée.	Diffusion géographique : Dissémination des données entre les véhicules.
WSN	Détection des événements.	Utilisation des capteurs adéquats. Agrégation de données. Arbre couvrante pour la collecte de données.
HSVN	Recueillir l'information du WSN. Stocker l'information au sein du WSN.	Déploiement des passerelles entre le WSN et le VANET.

Tableau 2.4-1 Architecture de communication dans les HSVN [43]

2.4.1. Les types de communications dans les HSVN

Les réseaux HSVN se composent de trois types de communication distincts, chacun ayant ses propres règles et objectifs, comme présenté dans ce qui suit : [61]

- Communication inter-capteurs :** La communication entre capteurs vise à garantir une détection fiable des événements et un signalement rapide à la passerelle WSN.
- Communication entre la passerelle WSN et les véhicules :** La passerelle WSN informe les véhicules à proximité des événements détectés, et ces véhicules relaient les avertissements aux autres passerelles sur leur itinéraire, augmentant la prévention des accidents.
- Communication inter-véhicules :** La communication inter-véhicules assure la diffusion des messages d'avertissement collectés auprès des passerelles WSN à l'ensemble du réseau VANET.

2.4.2. Architectures de communication dans les HSVN

Plusieurs architectures de communication ont été proposées pour les HSVN. Dans ce qui suit, nous présentons quelques-unes.

2.4.2.1. Etude de prototype pour les HSVN

Selon E. Weingrtner et F. Kargl , un prototype pour les HSVN a été présenté, en explorant les diverses formes de communication qui peuvent se présenter dans ces systèmes.[43]

- **La transmission des informations au sein du WSN** : consiste à repérer et à signaler les incidents détectés aux passerelles.
- **Passage des informations du WSN au VANET** : informer les véhicules des incidents survenus sur la route.
- **La diffusion de l'information au sein du VANET** : garantit une transmission à grande échelle de l'information sur la route.
- **L'insertion des données du VANET dans le WSN** : permet de signaler les véhicules qui arrivent plus tard lorsque les véhicules à leur portée de communication ne sont pas disponibles.
- **Transport physique des données** : utiliser la mobilité des véhicules pour le déplacement des données.

2.4.2.2. Approches de communication dans les HSVN

Qin et al, proposent une approche de communication basée sur la **détection passive des véhicules** pour les réseaux hybrides de capteurs et de véhicules (HVSN). Afin d'économiser l'énergie, les capteurs sont maintenus inactifs jusqu'à l'approche d'un groupe de véhicules. La passerelle active alors les capteurs le long de la trajectoire du groupe et communique les informations routières uniquement au véhicule en tête. [43]

Djahel et al, proposent une structure basée sur la **détection active des véhicules** pour les HVSN. Pour réduire la consommation d'énergie, la passerelle active les capteurs en fonction du niveau de danger estimé dans la zone environnante. Les informations sont ensuite transmises à tous les véhicules à portée de la passerelle. [43]

2.4.3. Communication et Consommation d'énergie dans les HSVN

Dans les réseaux hybrides capteurs-véhicules HSVN, les capteurs disposés le long des routes sont utilisés pour détecter divers dangers tels que les conditions météorologiques défavorables, les embouteillages, les obstacles cachés ou les freinages d'urgence. Les données collectées par ces capteurs sont ensuite diffusées localement au sein du réseau de capteurs sans fil (WSN). Les nœuds capteurs transmettent ces informations aux véhicules à portée, qui relaient ensuite les données vers d'autres zones via un routage multi-sauts.[46]

Le fonctionnement des nœuds capteurs nécessite une alimentation énergétique continue, Cette source d'énergie consiste souvent en une batterie ayant une capacité limitée.[62]

Le changement ou le chargement de ces batteries une fois leur énergie épuisée peut s'avérer difficile, spécifiquement dans les zones hostiles inaccessibles par l'homme. Face à ces contraintes, l'un des défis majeurs auxquels sont confrontés les chercheurs est de concevoir, développer et mettre en œuvre des solutions matérielles et logicielles permettant d'optimiser l'efficacité énergétique de ces réseaux. [40]

2.4.3.1. Consommation d'énergie dans les RCSF

Dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSF), les nœuds capteurs sont généralement alimentés par des batteries de petite capacité, et leur durée de vie est donc limitée. De plus, les RCSF peuvent être déployés dans des environnements difficiles d'accès, ce qui rend le remplacement des batteries difficile, voire impossible.

La consommation d'énergie d'un nœud capteur est principalement liée aux opérations de capture, de traitement et de communication. [39]

a. Énergie de capture

L'énergie de capture désigne la quantité d'énergie requise par un nœud capteur afin d'accomplir les opérations essentielles à sa fonction :

- **Échantillonnage** : Collection des informations brutes provenant de l'environnement.
- **Conversion analogique/numérique** : Convertir les informations analogiques en format numérique pour le traitement.
- **Activation du module de capture** : Mise en œuvre des éléments indispensables pour la collecte des données.

Le coût de cette énergie dépend des opérations précédentes et du modèle précis du capteur. En général, cette énergie est extrêmement faible par rapport à la quantité totale d'énergie consommée par un nœud capteur spécifique.

b. Énergie de traitement

L'énergie de traitement représente la quantité d'énergie requise par un nœud capteur pour effectuer les opérations de lecture et d'écriture en mémoire. Elle est scindée en deux parties principales :

- **L'énergie de commutation** : Elle est calculée en fonction de la tension d'alimentation et de la capacité totale commutée au niveau logiciel.
- **L'énergie de fuite** : Elle désigne l'énergie perdue lorsque le processeur est inactif.

Dans la consommation totale d'un capteur, l'énergie de traitement est généralement inférieure à l'énergie de communication.

c. Énergie de communication

L'énergie de communication définit la quantité d'énergie requise par un nœud capteur pour échanger des données avec d'autres capteurs ou une station de base. Elle se divise en deux parties :

- **L'énergie de transmission (TX)** : correspond à l'énergie dépensée lors de la transmission de données vers d'autres nœuds.
- **L'énergie de réception (RX)** : correspond à l'énergie consommée lors de la réception de données provenant d'autres nœuds.

L'énergie de communication dépend de la quantité de données à transmettre, de la distance entre l'émetteur et le récepteur, ainsi que du type de module de communication utilisé. Par conséquent, elle représente généralement la plus grande partie de la consommation énergétique totale d'un nœud capteur.

Dans le cadre des HSVN (Réseaux Hybrides Capteurs-Véhicules), il est nécessaire que les capteurs garantissent une détection efficace des événements routiers et les transmettent aux véhicules avec un délai minimal tout en prolongeant autant que possible la durée de vie des RCSF (Réseaux de Capteurs Sans Fil).[63] Pour ce faire, nous allons présenter dans ce qui suit quelques techniques de conservation d'énergies dans les RCSF.

2.4.3.2. Techniques de conservation énergétique des capteurs

Dans les HSVN, l'optimisation de la consommation d'énergie est un défi crucial car les capteurs ont une alimentation limitée et doivent fonctionner de manière autonome pendant de longues périodes. Pour prolonger leur durée de vie et réduire les coûts d'exploitation, il est essentiel de mettre en œuvre des techniques d'optimisation énergétique matérielles ou logicielles.

- **Approches matérielles**

- a. La récolte d'énergie (Energy harvesting ou Energy scavenging)**

Cette technique consiste à exploiter l'énergie présente dans l'environnement, connue sous le nom d'**énergie ambiante**, en la convertissant en électricité utilisable. Cette énergie peut être cinétique, thermique, électromagnétique, ou solaire. Les récolteurs d'énergie ont besoin d'un système de stockage d'énergie, comme un super condensateur ou une batterie rechargeable, pour conserver l'énergie récoltée.[64]

- b. L'échantillonnage adaptatif**

L'échantillonnage adaptatif se distingue de l'approche classique uniforme en modulant la fréquence et la résolution d'échantillonnage en fonction des variations du signal mesuré.

Cette approche permet de concentrer les efforts d'échantillonnage sur les zones et les moments les plus pertinents, réduisant ainsi considérablement la consommation d'énergie sans compromettre la précision des mesures.[65]

- c. Déclenchement et détection multi-échelle**

La gestion de l'énergie dans les réseaux de capteurs peut être optimisée en combinant des capteurs hétérogènes et en utilisant des techniques de détection multi-échelle.

Combiner des capteurs hétérogènes permet de détecter les événements avec différents niveaux de précision et de consommation d'énergie. Les capteurs à faible puissance peuvent être utilisés pour une détection préliminaire, tandis que les capteurs plus puissants sont activés uniquement lorsqu'un événement d'intérêt est détecté.

La détection multi-échelle utilise des capteurs à différentes résolutions pour identifier les zones d'intérêt, puis concentre les efforts d'échantillonnage sur ces zones. Cela permet de réduire la consommation d'énergie globale en évitant de collecter des données inutiles dans des zones sans importance. [65]

- **Approches logicielles**

Pour réduire la consommation énergétique des réseaux, plusieurs stratégies peuvent être mises en œuvre, que ce soit au niveau de la capture, du traitement ou de la communication des données. De manière générale, on distingue trois grandes catégories de techniques de conservation d'énergie : le

"Duty-cycling", les approches orientées données, les techniques basées sur la mobilité, le clustering, le routage, les protocoles MAC et le contrôle de topologie.

a. Duty-cycling

Cette technique est principalement utilisée dans l'activité réseau. Le moyen le plus efficace pour conserver l'énergie est de mettre la radio de l'émetteur en mode veille (low-power) à chaque fois que la communication n'est pas requise. Idéalement, la radio doit être éteinte dès qu'il n'y a plus de données à envoyer et ou à recevoir, et devrait être réactivée dès qu'un nouveau paquet de données doit être envoyé ou reçu. Ainsi, les nœuds alternent entre périodes actives et sommeil en fonction de l'activité du réseau. Ce mécanisme est généralement dénommé Duty-cycling. Un Duty-cycle est dénommé Comme étant la fraction de temps où les nœuds sont actifs.

Comme les nœuds capteurs effectuent des tâches en coopération, ils doivent coordonner leurs dates de sommeil et de réveil. Un algorithme d'ordonnement Sommeil/Réveil est donc crucial dans toute technique de duty cycling. Il s'agit généralement d'un algorithme distribué reposant sur les dates auxquelles des nœuds décident de passer entre l'état actif et l'état sommeil, et vice-versa. Il permet aux nœuds voisins d'être actifs en même temps, ce qui rend possible l'échange de paquets, même si les nœuds ont un faible duty-cycle (i.e., ils dorment la plupart du temps). [66]

b. Techniques basées sur la mobilité

Selon [67], dans certaines situations, lorsque les nœuds sont mobiles, la mobilité peut servir comme moyen pour réduire la consommation d'énergie. Dans un réseau de capteurs statiques, les données provenant des capteurs empruntent des chemins à sauts multiples pour atteindre la station de base. Cela peut entraîner une surcharge sur certains chemins, obligeant les capteurs situés à proximité de la station de base à relayer davantage de données, ce qui épuise prématurément leurs batteries. Si certains capteurs, ou même la station de base elle-même, sont mobiles, il est possible de modifier la répartition du trafic en leur confiant la collecte directe des données auprès des capteurs statiques. Les nœuds ordinaires stockent leurs données et attendent le passage d'un nœud mobile pour les transmettre.

Les stratégies de mobilité dans les RCSF sont classées en deux grandes catégories : stratégies avec un Sink mobile et stratégies avec un relai mobile, selon le type de l'entité mobile.

Les nœuds mobiles peuvent être classés en deux groupes :

- **Nœuds mobiles d'infrastructure** : Spécialement conçus pour le réseau et contrôlables par le système central.
- **Nœuds mobiles environnementaux** : Existents déjà dans l'environnement et peuvent être mobiles de manière prévisible ou aléatoire.

c. Techniques orientées données

La nature des données transmises dans les réseaux de capteurs n'est pas prise en considération dans les approches de duty cycling. Ainsi, des approches orientées données pourraient être plus utiles et plus efficaces sur le plan énergétique. On distingue deux grandes catégories de ces approches : des techniques de réduction des données qui ont pour objectif de réduire les échantillons inutiles, et des méthodes d'acquisition de données efficace en énergie qui concernent la réduction de l'énergie dépensée par le module de détection (ou le capteur proprement dit).[66]

▪ Technique de réduction de données

Les méthodes orientées données incluent d les méthodes de prédiction et d'agrégation des données.

- **La prédiction** utilise un modèle d'abstraction pour décrire le phénomène observé, permettant au Sink et aux nœuds capteurs de prédire les valeurs avec une certaine limite d'erreurs. Si la précision est suffisante, les requêtes des utilisateurs peuvent être traitées au niveau du Sink sans consulter directement les nœuds capteurs.
- **L'agrégation** combine les données (par exemple, en calculant une moyenne de certaines valeurs détectées) au niveau des nœuds intermédiaires entre la source et le Sink. [66]

▪ Acquisition de données efficaces en énergie

Cette technique vise à réduire la consommation d'énergie du module de détection. Ceci va à l'encontre de l'hypothèse générale selon laquelle la détection n'est pas significative d'un point de vue consommation d'énergie. En fait, la consommation d'énergie du module de détection peut, non seulement être significative, mais encore supérieure à la consommation d'énergie de la radio ou même plus grande que la consommation d'énergie du reste du nœud-capteur. Cela peut être dû à différents facteurs tels que les transducteurs, les convertisseurs A/N et les dispositifs de capture actifs ou simplement liés à un temps d'acquisition long.

Dans ce cas, réduire les communications peut s'avérer insuffisant, mais les stratégies de conservation d'énergie doivent réellement réduire le nombre d'acquisitions (échantillons de données). Il faudrait

Chapitre 02 : Communication et Routage dans les HSVN

également préciser que les techniques d'acquisition de données efficaces en énergie ne visent pas exclusivement à réduire la consommation d'énergie du module de détection. En réduisant les données prélevées par des nœuds sources, elles diminuent aussi le nombre de communications. En fait, beaucoup de techniques d'acquisition de données efficaces en énergie ont été conçues pour réduire au minimum l'énergie consommée par la radio, en supposant que la consommation de la radio est négligeable.

Ces techniques sont classifiées comme suit :

- Techniques d'échantillonnage adaptatif qui exploitent la corrélation entre les échantillons mesurés et les similitudes pour réduire la quantité des données devant être acquises à partir du transducteur.
- Techniques d'échantillonnage hiérarchiques qui supposent l'utilisation de capteurs de types différents et choisissent dynamiquement la classe de capteurs à activer au lieu d'avoir un compromis entre la précision de la détection et l'économie d'énergie.
- Techniques d'échantillonnages actifs qui se basent sur des approches de prédiction de données.[68]

d. Clustering

La méthode de clustering est la technique la plus utilisée pour prolonger la durée de vie et réduire la consommation d'énergie des réseaux de capteurs sans fil (WSN) pendant la transmission. Le clustering est un processus qui consiste à regrouper les nœuds capteurs pour la collecte globale des données. Cette méthode permet également d'améliorer les performances du système. Il existe différentes formes de clustering [69]:

- Clustering hiérarchique (Algorithme BIRCH (Balanced Iterative Reducing and Clustering using Hierarchies), LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy))
- Clustering basé sur les centroïdes (Algorithme K-means).
- Clustering distribué (Algorithme K-means distribué).
- Clustering basé sur la densité (Algorithme DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise)).
- Clustering spectral.

e. Routage

Le routage des données est un aspect essentiel de la communication dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSF). Il permet de minimiser la distance parcourue par les données, réduisant ainsi la

consommation d'énergie liée aux transmissions et retransmissions. Pour optimiser cette économie d'énergie, plusieurs protocoles de routage et de clustering ont été développés, tels que LEACH, TEEN, APTEEN et PEGASIS.[69]

Pour optimiser l'efficacité énergétique, un protocole de routage doit tenir compte de plusieurs paramètres :

- **Basé sur la concession** : les nœuds négocient le meilleur chemin pour acheminer les données.
- **Double chemin** : des chemins redondants sont établis pour assurer la fiabilité de la transmission en cas de défaillance d'un lien.
- **Basé sur la qualité de service (QoS).**

La communication dans les réseaux de capteurs sans fil se fait par sauts successifs. En réduisant le nombre de sauts nécessaires pour acheminer les données, on peut potentiellement économiser de l'énergie, ce qui prolonge indirectement la durée de vie du réseau. Cependant, la plupart des protocoles de routage supposent que les capteurs sont statiques, car le niveau exact de mobilité autorisé n'est pas toujours défini. [69]

f. Protocoles MAC (Media Access Control)

Le protocole MAC définit un ensemble de règles qui organise les transmissions entre les nœuds capteurs d'un réseau sans fil. La communication dans ces réseaux pose deux défis majeurs :

- **Autonomie limitée des capteurs** : ils fonctionnent sur batterie et leur remplacement est souvent difficile ou impossible.
- **Absence de structure fixe** : les capteurs ne sont pas toujours disposés de manière ordonnée, ce qui peut compliquer l'accès au canal.

Le déploiement de nombreuses applications sur un réseau de capteurs sans fil avec un grand nombre de nœuds peut engendrer des problèmes de congestion. Le protocole MAC classique basé sur le TDMA ne convient pas à la gestion de ces situations.

C'est pour cela, le protocole MAC basé sur CSMA est mieux adapté aux RCSF car il permet une gestion efficace de l'accès au canal radio.

Le protocole MAC joue un rôle important dans la réduction de la consommation d'énergie des capteurs sans fil en minimisant les collisions de signaux. Ces collisions se produisent lorsque plusieurs capteurs tentent de transmettre des données en même temps. Le protocole MAC aide à organiser les transmissions et à éviter ces collisions, ce qui permet aux capteurs de fonctionner plus efficacement et de consommer moins d'énergie. [69]

g. Contrôle de topologie

Le contrôle de la topologie est une approche fondamentale qui vise à établir des liens entre les capteurs de manière à minimiser la consommation d'énergie.

Dans cette stratégie, nous avons trois phases, à savoir : la phase d'initialisation, la phase de construction de la topologie et la phase de maintien de la topologie. [70]

- **Initialisation** : tous les nœuds émettent à pleine puissance pour établir une connexion initiale.
- **Construction de la topologie** : la puissance d'émission est réduite pour optimiser la consommation d'énergie tout en maintenant la connectivité du réseau.
- **Maintien de la topologie** : la topologie optimisée est surveillée en continu. En cas de changement (épuisement d'énergie, départ d'un nœud), la construction de la topologie est relancée. Le maintien peut être local ou global.

2.5. Conclusion

Dans ce chapitre dédié à la communication et au routage dans les Réseaux Hybrides de Capteurs et de Véhicules (HSVN), nous avons exploré les technologies de communication et les protocoles de routage spécifiques. Nous avons particulièrement abordé le défi majeur de la consommation d'énergie. En réponse à ce défi, plusieurs techniques de conservation ont été envisagées afin de minimiser la consommation d'énergie.

Dans le chapitre à venir, nous définirons les concepts fondamentaux des Systèmes Multi-Agents (SMA) et des Systèmes de Systèmes (SoS), ainsi que la manière dont ces concepts sont interconnectés avec les HSVN.

3. Chapitre 03 : Outils de Modélisation

3.1. Introduction

Les systèmes multi-agents (SMA) représentent un domaine de recherche fascinant, appliquées dans divers domaines tels que les systèmes distribués, les interfaces homme-machine, le génie logiciel et les réseaux. Ces systèmes sont spécifiquement conçus pour résoudre des problèmes complexes en distribuant la connaissance et les compétences parmi un ensemble d'entités autonomes.

Dans ce chapitre nous allons définir les concepts d'agent, de système multi-agent, ainsi que du système de systèmes (SoS) en explorerons leurs différents types et caractéristiques, puis nous analyserons la relation entre les SMA, les Sos et les HSVN soulignant leur interconnexion et leur complémentarité dans la modélisation et la simulation de systèmes complexes.

3.2. Systèmes Multi-Agents (SMA)

3.2.1. Notion d'agent

Il existe une multitude de définitions d'agents dans la littérature. Elles sont similaires, mais varient selon l'application pour laquelle l'agent est conçu.[71]

Un agent est une entité logicielle conçue pour exister dans un certain environnement et pour atteindre des objectifs spécifiques. L'agent a la capacité de travailler de manière indépendante et sur la base des connaissances qu'il possède soit à l'avance, soit acquises en traitant, en interagissant et en communiquant avec son environnement ou d'autres agents, comme changer son environnement ou coopérer avec d'autres agents pour accomplir des tâches communes.[72]

3.2.1.1. Types d'agents

a. Agent cognitif

L'agent cognitif est un agent qui dispose d'une base de connaissances comprenant l'ensemble des informations et de savoir-faire nécessaires à la réalisation de sa tâche et la gestion des interactions avec les autres agents et avec son environnement.

Ainsi, ces agents possèdent une représentation explicite de leur environnement, des autres agents et d'eux-mêmes. Ils sont aussi dotés de compétences en raisonnement, en planification et en communication.[73]

b. Agent réactif

Comme son nom l'indique, un agent réactif ne fait que réagir aux changements qui surviennent dans l'environnement. En d'autres termes, cet agent acquiert simplement des perceptions et interagit avec elles en appliquant certaines règles prédéfinies. Puisque pratiquement aucun raisonnement n'existe, ces agents ont la capacité d'agir et de réagir très rapidement.[73]

c. Agent hybride

L'agent hybride est conçu pour combiner les capacités réactives à des capacités cognitives, ce qui leur permet d'adapter son comportement en temps réel à l'évolution de l'environnement. Dans ce cas, un agent est composé d'une architecture multicouche qui se base sur la hiérarchie de niveaux.[73]

3.2.1.2. Caractéristiques

- **Autonomie** : L'agent possède une indépendance complète vis-à-vis de son propre fonctionnement, de sa prise de décision et de son interaction avec son environnement.[74]
- **Situation** : Chaque agent est situé dans son propre environnement et il possède la capacité de percevoir cet environnement et d'interpréter les informations qu'il reçoit et d'agir en conséquence.[72]
- **Réflexibilité** : Caractérise un agent intelligent. Cela veut dire qu'est capable de réfléchir et d'adapter son comportement en fonction de la situation pour atteindre ses objectifs. [72]

La réflexibilité signifie dans ce cas :

- **Réactivité** : L'agent est capable de détecter les changements de son environnement, identifier les événements importants et élaborer des mesures dans un délai imparti. [72]
- **Sociabilité** : L'agent est capable d'interagir et de communiquer avec d'autres agents et personnes, et de se déplacer d'un environnement à un autre.[72]
- **Proactivité** : L'agent est capable d'anticiper les événements et de prendre des mesures préventives afin d'atteindre ses objectifs. [74]

Certains agents possèdent des caractéristiques spécifiques comme :

- **La mobilité** : L'agent est capable de se déplacer dans son environnement.

- **La rationalité** : La capacité de l'agent d'atteindre ses objectifs avec le moindre coût, en évaluant les différentes options, en choisissant la meilleure option en fonction de ses objectifs et en la mettant en œuvre de manière efficace.
- **L'intentionnalité** : L'agent possède une représentation explicite de ses états mentaux.[72]

3.2.2. Définition d'un système multi-agents

Un système multi-agent est un système distribué composé d'un ensemble d'agents pouvant être des logiciels, des robots ou des humains qui interagissent le plus souvent selon différents modes (coopération, concurrence, coexistence).

En fait, chaque agent dispose de son propre savoir-faire à exécuter afin d'accomplir une tâche élémentaire tout en coopérant avec les autres agents du SMA. Ces agents sont homogènes et hétérogènes ayant des buts communs ou distincts.[75]

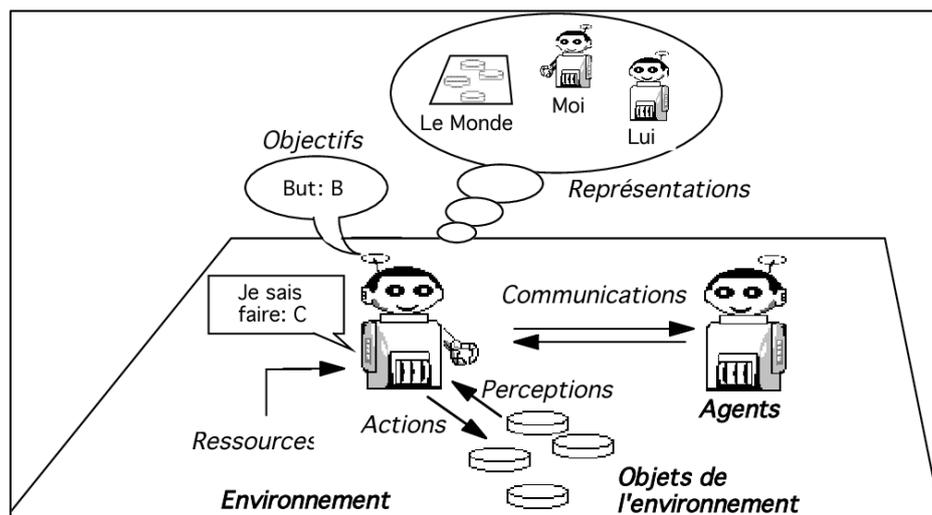


Figure 3.1 Système multi-agents [76]

3.2.3. Environnement d'un SMA

L'environnement peut être considéré comme l'espace commun aux agents du système, peut être modifié par modifiable par les agents, soit de façon globale, soit en faisant la distinction entre objets passifs (soumis aux actions des agents) et entités actives (les agents). [75]

Un environnement peut être :

- **Accessible ou inaccessible** : un agent a accès à l'état complet de l'environnement ou non. [73]

- **Déterministe ou indéterministe** : le changement de l'état de l'environnement est uniquement déterminé par l'état courant et les actions des agents ou non. [73]
- **Statique ou dynamique** : l'environnement peut changer quand l'agent est en action (réflexion) ou non. [73]
- **Discret ou continu** : le nombre de perceptions et d'actions est limité ou pas. En ce qui suit, nous présentons aussi quelques caractéristiques importantes des SMA. [73]

3.2.4. Caractéristiques d'un SMA

Un SMA est généralement caractérisé par :

- **Distribution** : le système est décomposable, l'élément de base étant l'agent.
- **Décentralisation** : les agents sont indépendants, il n'y a pas de décisions centrales valables pour tout le système.
- **Autonomie** : un agent est en activité permanente et prend ses propres décisions en fonction de ses objectifs et de ses connaissances.
- **Organisation** : les interactions créent des relations entre les agents, et le réseau de ces relations forme une organisation qui peut évoluer au cours du temps. [73]

3.2.5. L'interaction dans un Système Multi-Agents(SMA)

3.2.5.1. Définition

Une interaction est une mise en relation dynamique de deux ou plusieurs agents par le biais d'un ensemble d'actions réciproques. Elle représente l'élément essentiel et fondateur des formes d'intelligence.[73]

Les interactions des agents d'un SMA sont motivées par l'interdépendance des agents par rapport à leurs buts, leurs capacités à réaliser certaines tâches et les ressources dont ils disposent. [71]

3.2.5.2. Coopération

Un système multi-agents (SMA) se distingue d'un ensemble d'agents indépendants par la collaboration et la coopération de ses agents afin de réaliser conjointement une tâche ou atteindre un objectif commun. [71]

3.2.5.3. Coordination

Dans un environnement multi-agents, la coordination d'actions représente l'ensemble des activités supplémentaires nécessaires pour établir un ordre commun au niveau physique. Ainsi, au sein d'une

société d'agents autonomes poursuivant des objectifs individuels, la coordination s'impose comme une méthode indispensable pour harmoniser les actions de chacun. De plus, elle définit également une relation d'ordonnancement et de dépendance entre ces actions. [73]

3.2.5.4. Négociation

La négociation est définie comme étant le processus d'améliorer les accords sur des points de vue communs ou des plans d'action grâce à l'échange structuré d'informations pertinentes.

La négociation joue un rôle crucial dans la résolution des conflits et le renforcement de la coopération entre agents.[71]

3.2.5.5. Apprentissage

L'apprentissage associé à l'interaction se focalise sur les stratégies employées par les agents pour communiquer et interagir entre eux. Il peut s'agir de l'acquisition de nouveaux langages d'interaction ou de nouveaux thèmes de communication.[73]

3.2.5.6. Communication

La communication est la base de tous les modes d'interaction, elle caractérise tout échange d'informations entre les agents. Dans un SMA, on trouve deux modes de communication entre agents : communication directe et communication indirecte.[73]

- **Communication directe** : C'est l'échange directe de messages entre agents. La communication peut être point à point si l'information est transmise à un seul agent ou en mode diffusion si l'information est envoyée à tous les autres agents.[73]
- **Communication indirecte** : Elle peut s'effectuer en modifiant l'environnement ou en manipulant les connaissances communes. Les agents peuvent laisser des traces dans l'environnement indiquant leurs actions et leurs états. Dans ce mode de communication, l'information peut ne pas être reçue puisqu'il n'est pas certain que tous les agents aperçoivent ces modifications.[73]

3.3. Système de systèmes (SoS)

3.3.1. Définition d'un SoS

Un système de systèmes (SoS) est une entité complexe composée de systèmes distincts et autonomes, interconnectés et intégrés pour créer un système plus grand et plus complet. En d'autres termes, il s'agit d'un réseau de systèmes interconnectés qui coopèrent pour atteindre un objectif commun.

Un système de systèmes se distingue par son comportement émergent, dans lequel le comportement et les capacités combinées des systèmes interconnectés dépassent ceux des systèmes composants. Les différents systèmes qui forment un système de systèmes conservent leur indépendance et effectuent des tâches spécifiques, mais ils dépendent également des interactions et des interdépendances avec d'autres systèmes pour atteindre des objectifs plus généraux.[77]

3.3.2. Types des SoS

Les systèmes de systèmes peuvent être classés selon différents critères. Voici une classification :

- **SoS dirigé** : il se caractérise par une structure centralisée de propriété et de gestion où le système de systèmes interopérable est conçu et administrer afin d'atteindre des objectifs spécifiques. [78]
- **SoS reconnu** : dans lequel on trouve des objectifs communs reconnus, un responsable désigné pour le SoS et des ressources allouées à son fonctionnement. Cependant, les systèmes constitutifs ne conservent pas leur propriété indépendante, leurs objectifs, leur financement, leurs approches de développement et de maintien. [78]
- **SoS collaboratif** : où les systèmes constitutifs collaborent d'un manière volontaire et agnostique pour atteindre un objectif central défini. Les acteurs principaux prennent collectivement la décision de fournir ou de refuser le service, offrant ainsi certains moyens d'exécution et de maintien des normes. [78]
- **SoS virtuel** : il se caractérise par l'absence d'une autorité de gestion centralisée et d'un objectif commun défini de manière centralisée pour le système. Le comportement global du SoS émerge de l'interaction des systèmes constitutifs, souvent d'une façon invisible et non planifiée. [78]

3.3.3. Caractéristiques des SoS

3.3.3.1. Caractéristiques des composants des SoS

- **Autonomie** : L'autonomie des composant englobe à la fois l'indépendance opérationnelle et managériale, c'est-à-dire les composants peuvent prendre leurs décisions en fonction de leurs propres intérêts. [79]
- **Hétérogénéité** : Une conséquence directe de l'indépendance managériale. Les composants doivent être gérés par des entités différentes.[79]
- **Appartenance** : Les composants choisissent d'appartenir au SoS, même si cela leur fait perdre une partie de leur autonomie. Cette perte est toutefois compensée par les avantages qu'ils retirent du SoS, ce qui constitue la raison même de leur adhésion.[79]

3.3.3.2. Caractéristiques globales d'un SoS

- **Evolution** : L'autonomie des composants leurs permet d'évoluer et de changer, indépendamment du SoS. D'autre part, Les SoS opèrent dans des environnements complexes, dynamiques et souvent imprévisible. Le changement de ces environnements ainsi que les objectifs du SoS conduit à un système en évolution constante, qui doit s'adapter pour tenir compte des changements internes et externes. [79]
- **Emergence** : L'une des caractéristiques la plus importante d'un SoS. Elle fait référence au comportement global du système qui résulte de l'interaction entre ses différents composants, et qui n'est pas une propriété individuelle de chaque composant.[79]
- **Diversité** : Par nécessité, un SoS doit présenter une diversité de capacités bien plus importantes qu'un système individuel, dont la fonctionnalité est généralement limitée par sa conception. Un SoS doit exhiber une large variété de fonctions, mobilisables en fonction des besoins, pour faire face à une incertitude généralisée, des surprises permanentes et des innovations disruptives. [80]

3.4. Relation entre HSVN, SMA et SoS

En effectuant une simulation basée sur les agents, le comportement des systèmes de systèmes (SoS) peut être compris et analysé pour permettre l'amélioration de leurs architectures, à la fois en termes de structure et de comportement/fonctionnalités, tout en maintenant le contrôle et en minimisant la vulnérabilité du SoS. Parmi les approches basées sur les agents, la simulation des Systèmes Multi-Agents (SMA) semble être la technique la plus adaptée et la plus activement utilisée pour modéliser

Chapitre 03 : Outils de Modélisation

les aspects des SoS. En effet, un agent est toute entité autonome qui joue certains rôles et interagit avec d'autres agents pour atteindre des objectifs individuels ou communs. Les SMA sont des systèmes intelligents distribués composés d'agents qui **coopèrent** et **coordonnent entre eux** pour atteindre leurs objectifs locaux ainsi que les objectifs globaux. Par conséquent, ils fournissent les moyens de représenter les architectures des SoS si les concepts des modèles sont fidèlement cartographiés sur les concepts basés sur les agents. [81]

Caractéristique	SoS (Système de systèmes)	SMA(Système Multi-Agents)
Concept	Systèmes distribués composés de plusieurs systèmes indépendants/autonomes qui interagissent/communiquent pour accomplir des objectifs individuels/locaux et des objectifs globaux/collaboratifs.	Ensemble d'agents logiciels autonomes qui interagissent entre eux et avec leur environnement pour atteindre des objectifs individuels et collectifs.
Élément constitutif	Système	Agent
Indépendance/autonomie	Indépendance opérationnelle, autonomie ; opérations individuelles et globales / comportements locaux et collaboratifs ; indépendance managériale, vision locale.	Autonomie opérationnelle, capacité d'agir indépendamment.
Fonctionnalité/opération	Opérations simples ou complexes	Comportement / Tâche

Tableau 3.4-1 Tableau comparatif entre SoS et SMA

Les HSVN, les SoS et les SMA peuvent être entrelacés pour **concevoir des systèmes complexes**, adaptatifs et efficaces. Dans un SoS basé sur HSVN, les véhicules ainsi que les nœuds capteurs peuvent fonctionner en tant qu'**entités autonomes** au sein d'un système multi-agent, **coopérant** pour **coordonner** les activités des systèmes individuels et **atteindre les objectifs communs** du SoS.

3.5. Conclusion

La modélisation des systèmes complexes, tels que les systèmes multi-agents (SMA) et les systèmes de systèmes (SoS), constitue un domaine crucial pour comprendre et concevoir des environnements dynamiques et interconnectés. Ce chapitre a posé les bases théoriques indispensables pour appréhender et appliquer les concepts liés aux SMA et aux SoS. Nous avons vu qu'un système multi-agents est un

Chapitre 03 : Outils de Modélisation

ensemble d'entités autonomes nommées « agents » qui évoluent dans un environnement commun. L'ensemble d'agents interagissent dans un environnement en se basant sur des propriétés comme la coopération, l'autonomie et l'intelligence. Toutes ces interactions entre les agents et les entités appartenant au système global rentrent dans le concept de SoS.

Dans le prochain chapitre nous allons mettre en pratique les notions mentionnées précédemment et détaillé notre scénario ainsi que notre simulation.

4. CHAPITRE 04 : Scénario et Simulation

4.1. Introduction

De nos jours, la simulation connaît une expansion significative, principalement grâce à l'intérêt porté aux modèles informatiques de systèmes simulés. Elle consiste à recréer virtuellement des environnements et des systèmes, permettant ainsi d'observer et d'analyser le comportement des entités qui les constituent et leurs interactions. Dans ce chapitre, nous explorons les motivations qui nous ont amené à opter pour l'environnement NetLogo pour nos simulations. Par la suite, nous exposerons les scénarios de simulation que nous avons élaborés, notamment la modélisation d'une forêt et d'une ville intelligente, en décrivant le processus de réalisation de notre simulation

Ce chapitre offre des perspectives enrichissantes sur les interactions entre les agents au sein de leurs environnements simulés et sur l'utilisation de NetLogo comme outil d'analyse.

4.2. Simulation

La simulation est une méthodologie essentiellement pratique qui permet de modéliser aussi bien des systèmes conceptuels que des systèmes existants déjà. Elle peut aussi être vue comme la conduite d'une expérimentation indirecte dans le but de comparer plusieurs façons de procéder.[82]

Nous pouvons retenir la définition donnée par A.A.B. Pritsker auteur du langage SLAM II formulé comme suit : " La simulation est l'étude du comportement dynamique d'un système, grâce à un modèle que l'on fait évoluer dans le temps en fonction de règles bien définies, à des fins de prédiction."[82]

La simulation peut être caractérisée par les mots clés suivants :

- Un élément fondamental qui est le modèle.
- Exécution du modèle sur ordinateur.
- Le modèle est soumis à des manipulations fournissant une compréhension plus approfondie du système étudié.
- Les solutions obtenues sont celles du modèle et non du système modélisé.
- Son but est de sélectionner parmi un ensemble de solutions celle qui semble être la plus optimale.

4.2.1. Simulation base multi-agents

Les simulations multi-agents (ou simulation orientée agent) utilisent les agents pour représenter les entités ou les agrégats du phénomène étudié. Elles permettent notamment de se focaliser sur l'émergence de caractéristiques globales à partir d'actions et d'interactions locales entre les agents.[83]

Elle consiste à élaborer, construire et modéliser un système complexe composé d'entités individualisées dotées d'un certain degré d'autonomie et interagissant les unes avec les autres. Une telle approche est proposée, aujourd'hui, à la fois pour la résolution de problèmes en intelligence artificielle et pour la représentation de processus en économie, écologie, géographie, ou physique, elle est de plus en plus utilisée pour représenter des systèmes dynamiques.

La simulation à base d'agents (SBA) vise à reproduire la dynamique d'un système en modélisant les entités par des agents, dont le comportement et les interactions ont été définis.

4.2.2. Outils de simulation

Les réseaux hybrides capteurs-véhicules (HVSN) combinent des capteurs fixes et des véhicules mobiles pour collecter et diffuser des données dans un environnement distribué. Les simulateurs de bases multi-agents sont des outils précieux pour modéliser et analyser le comportement de ces réseaux complexes, en tenant compte des interactions entre les capteurs, les véhicules et l'environnement. Dans ce qui suit, nous allons présenter quelques simulateurs :

4.2.2.1. Network Simulator-2 (NS2)

NS2, ou Network Simulator 2, est un outil de simulation basé sur les événements qui permet d'étudier le comportement dynamique des réseaux de communication. Il permet de simuler les fonctions et protocoles des réseaux filaires et sans fil, tels que les algorithmes de routage, TCP et UDP. NS2 offre aux utilisateurs un moyen de spécifier ces protocoles et de simuler leur comportement dans différentes conditions.[84]

4.2.2.2. Network Simulator-3 (NS3)

Ns-3 est un logiciel open-source dédié à la simulation de réseaux informatiques. Il fonctionne selon le principe de la simulation à événements discrets, ce qui signifie que chaque action ou événement est associé à un instant précis dans le temps. La simulation se déroule en suivant l'ordre chronologique de ces événements. Lorsqu'un événement est traité, il peut en générer de nouveaux, aucun, ou un nombre quelconque. Au fur et à mesure de l'exécution, les événements sont traités et retirés de la file d'attente.

Chapitre 04 : Scénario et Simulation

La simulation s'arrête automatiquement lorsqu'il n'y a plus d'événements en attente, ou lorsqu'un événement spécifique "Stop" est déclenché.[85]

4.2.2.3. OMNET++

OMNeT++ est une bibliothèque et un framework de simulation C++ extensible, modulaire et basé sur des composants, principalement destiné à la construction de simulateurs de réseau.

Il propose un EDI basé sur Eclipse, un environnement d'exécution graphique et une multitude d'autres outils.

OMNeT++ se distingue par son architecture basée sur des composants, qui offre une grande flexibilité et une facilité d'utilisation pour la construction de modèles de simulation de réseau. Cette approche permet aux utilisateurs de créer des modèles personnalisés en assemblant des modules préexistants, programmés en langage C++. Ces modules peuvent ensuite être combinés pour former des modèles plus complexes à l'aide d'un langage de haut niveau appelé NED (Network Description Language).[86]

4.2.2.4. 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.[87]

- **Comparaison :** Après avoir brièvement décrit les trois simulateurs réseaux (NS2, NS3 et OMNET ++), nous allons présenter dans le tableau ci-dessous les avantages et les limites de chacun de ces simulateurs :

Simulateur	Avantages	Limites
NS-2	<ul style="list-style-type: none">• Capacité de simulation élevée.• Large éventail d'applications dans les WSN.• Prise en charge de différents systèmes d'exploitation et protocoles MAC.	<ul style="list-style-type: none">• NS-2 ne fournit pas de visualisation des données de simulation (absence de graphiques).• NS-2 peut difficilement gérer les simulations à grande échelle.• NS-2 est difficile à utiliser à cause de son interface textuelle.

Chapitre 04 : Scénario et Simulation

NS-3	<ul style="list-style-type: none">• NS-3 fournit de nombreux modèles statistiques pour les canaux sans fil, la mobilité et la création de trafic.• NS-3 est un simulateur flexible qui peut être utilisé pour simuler une grande variété de scénarios de réseau.• NS-3 est un logiciel open source.	<ul style="list-style-type: none">• Configuration difficile des paramètres réseau (tels que les adresses IP et MAC).• Absence de module MIPv6 et de protocoles de routage DTN.• Support limité pour la simulation en temps réel.
OMNET++	<ul style="list-style-type: none">• Flexible, OMNET++ peut être utilisé pour modéliser et simuler une large gamme de réseaux.• Facile à utiliser grâce à son interface graphique conviviale.• OMNET++ dispose d'une communauté d'utilisateurs active qui fournit un support et développe des extensions.	<ul style="list-style-type: none">• La courbe d'apprentissage est abrupte, surtout pour ceux qui ne sont pas familiers avec C++.• Le développement de modèles requiert des compétences avancées en C++ ou NED.• L'absence de bibliothèques de modèles préconstruits oblige à créer ou adapter des modèles manuellement, ce qui est chronophage.

Tableau 4.2-1 Comparaison entre NS-2, NS-3 et OMNET++ [88]

4.2.3. Choix NetLogo

Le choix de l'utilisation de NetLogo a été motivé par plusieurs raisons :

Tout d'abord, Ce logiciel possède le premier avantage d'être conçu en JAVA (langage orienté objet), ce qui le rend portable sur n'importe quelle machine.

De plus, il est spécifiquement conçu pour modéliser et simuler des systèmes complexes y compris les systèmes multi-agents, simulation sociales et systèmes biologiques, en raison de sa capacité à modéliser problèmes basées sur des abstractions humaines plutôt que des aspects purement technique.

En outre, il dispose également d'une bibliothèque d'agents préprogrammés qui peuvent être utilisés pour créer des modèles de manière rapide et efficace. Ces agents comprennent des tortues, qui peuvent être utilisées pour représenter des individus ou des entités dans un modèle, et des patches, qui peuvent être utilisés pour représenter des emplacements spatiaux dans un modèle.

Enfin, NetLogo offre une interface conviviale et visuellement intuitive, simplifiant ainsi l'exploration des modèles et l'analyse des résultats.

4.2.4. Présentation NetLogo

NetLogo est un langage de programmation et un environnement de modélisation de systèmes multi-agents. Il a été élaboré par Uri Wilenski en 1999 et son développement est poursuivi de manière continue par le Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling.[89]

NetLogo a été conçu pour modéliser et simuler des systèmes complexes évoluant dans le temps dans divers domaines tels que l'économie la physique, la chimie, la psychologie, la dynamique des systèmes et de nombreuses autres sciences naturelles et sociales. [90]



Figure 4.1 logo de NetLogo

4.2.4.1. Concept d'agent dans NetLogo

- **Les agents :** Il existe 4 types d'agents dans Netlogo
 - **Les tortues (Turtles) :** sont les éléments fondamentaux qui se déplacent et interagissent avec l'environnement.
 - **Les patches :** sont des cellules individuelles dans l'espace de la grille. Ces patches forment l'environnement sur lequel les tortues peuvent se déplacer.
 - **Les liens (Link) :** sont des agents qui relient deux tortues. Ces liens peuvent être orientés ou non orientés. :
 - **Les observateurs (Observers) :** Un observateur est considéré comme un contrôleur central du monde virtuel. Il permet de gérer les programmes et de passer des commandes précises aux tortues et aux patches.
- **Les variables :**
 - **Variables globales :** sont accessibles et modifiables par tous les agents.

Exemple : globals [

max_energy ;; énergie maximale

total_sim_time ;; le temps de simulation total]

- **Variables d'agent :** Chaque tortue et chaque patch possède son propre ensemble de variables, appelées variables d'agent. Ces variables peuvent avoir des valeurs différentes pour chaque agent. Elles sont définies comme suit :

Turtles-own [Name]

Patches-own [var4 ...]

- **Variables locales :** sont des variables exclusives à une fonction et ne sont utilisables qu'à l'intérieur de celle-ci. Elles doivent être définies au début de la fonction, avant toute commande. On les définit de la manière suivante : locals [var1 var2 ...].
 - **Variables d'agents prédéfinis :** les turtles partagent avec les patches certaines variable comme la couleur de la turtle (color) ainsi que ses coordonnées sur la grille de patches (xcor et ycor). Comme pour les patches, nous pouvons définir un label ainsi qu'une couleur de label (label et label-color). De plus, les tortues possèdent d'autres variables prédéfinies tels que l'orientation en degrés (heading), la forme (shape), un identifiant id (who), et la taille (size).
- **Les procédures et les fonctions**
 - **Les procédures** (commande) : une procédure est un bloc d'instructions qui définit l'action à mener par les agents. Elle se définit de la manière suivante :

To < nom_procedure > [<parametre1> <parametre2> . . .]

<Instructions>

End

Appel : <nom_procedure> <argument1> <argument2>

Exemple : commande procédure setup

To setup

Ca ;; nettoyer l'écran

crt 90 ;; créer 90 tortues

End

- **Les fonctions** (reporter) : exécutent une opération et retournent une valeur soit à une commande soit à un autre reporter.

Déclaration :

To-report <nom_fonction> [<parametre1> <parametre2> . . .]

<Instructions>

Report <valeur>

End

Appel : <nom_fonction> <argument1> <argument2>

4.3. Scénario de la simulation

4.3.1. Description du scénario

En supposant que nous avons un agent enseignant qui est employé dans une école au sein de la ville intelligente et qui vit dans la montagne.

L'enseignant quitte sa maison à 6h du matin afin qu'il arrive à son lieu de travail à temps. Il emprunte une route à travers une forêt.

L'éclairage de la route s'active et se désactive automatiquement selon le temps (journée ou nuit). Tout au long de son trajet, des capteurs intelligents sont déployés. Ces capteurs détectent tout obstacle ou danger potentiel sur la route. Grâce à ces capteurs, l'enseignant peut conduire en toute sécurité, en lui fournissant des alertes afin de prendre les précautions nécessaires.

Dans la ville, des feux de circulation intelligents qui régulent habilement le flux de véhicules pour éviter les embouteillages.

Une fois arrivé à l'école, l'agent enseignant se dirige vers le parking intelligent. À l'entrée du parking, un jalonnement dynamique lui indique en temps réel la disponibilité des places de stationnement. Il patiente paisiblement jusqu'à ce que le feu de signalisation affiche la couleur rouge, lui permettant ainsi de traverser la route en toute sécurité pour rejoindre l'école.

Pendant ce temps, un intrus tente d'accéder à l'école sans autorisation. La caméra de surveillance installée à l'entrée détecte sa présence et vérifie instantanément dans la base de données de l'école pour

déterminer son statut. Ne trouvant aucune information le concernant en tant que membre du personnel ou étudiant, la caméra refuse l'accès et affiche un message indiquant que l'entrée est interdite.

Pour plus de sécurité, la ville est équipée de caméras de surveillance intelligentes.

4.3.2. Conditions du scénario

- L'éclairage de la forêt s'active de manière automatisée, s'allumant à la tombée de la nuit et se désactivant au lever du jour.
- Les voitures en mouvements s'arrêtent dès qu'elles perçoivent que le feu de signalisation est rouge. Elles reprennent leur avancée lorsque la couleur du feu passe au vert.
- Les piétons désirant de traverser la route s'arrêtent lorsque le feu est vert, ils entreprennent leur traversée lorsque le feu soit rouge.
- Dans le parking, lorsque qu'un véhicule souhaite se garer, il vérifie la disponibilité des emplacements grâce à un jalonnement dynamique qui informe en temps réel les usagers sur l'occupation des zones de stationnement. Si des places sont disponibles, la porte du parking s'ouvre automatiquement et se referme une fois le véhicule stationné. En revanche, si aucun emplacement n'est libre, la porte demeure fermée

4.3.3. Scénario en cas d'incendie et solution

Un matin, alors que l'agent se dirige vers la ville intelligente en empruntant la route forestière, les capteurs intelligents, spécialement conçus pour surveiller en temps réel les conditions environnementales, sont capables de réagir rapidement aux situations d'urgence, dans notre cas l'incendie.

Les capteurs déployés aléatoirement dans la zone forestière se regroupent en créant des clusters. Dans chaque cluster, le capteur ayant le plus de voisins et d'énergie résiduelle est élu comme étant le cluster head.

Dès la détection de l'incendie, le capteur détecteur transmet les informations au cluster-head local. Ce dernier, agissant comme un point central, agrège et évalue les données recueillies. Il communique ensuite ces messages d'alerte entre les différents cluster-heads jusqu'à ce qu'elles atteignent, d'une part, le panneau routier situé sur la route principale près de la forêt, et d'autre part les véhicules présents dans la portée de communication du cluster-head le plus proche de la route, en informant les conducteurs du déclenchement du feu, et les incitant à prendre des précautions des

Chapitre 04 : Scénario et Simulation

itinéraires alternatifs pour éviter la zone dangereuse. Les véhicules relaient ensuite ces informations entre eux, diffusant les alertes à tous les véhicules à portée (communication inter-véhicules).

Cette méthode de clustering améliore considérablement la gestion des données et la réactivité du système de détection d'incendies. En permettant une communication efficace entre les capteurs et une transmission rapide des alertes, elle contribue à la sécurité des conducteurs et à la protection des ressources naturelles contre les incendies.

4.4. Mise en œuvre de la forêt

4.4.1. Définition des agents

- **Agent capteur** : est un dispositif conçu pour surveiller, analyser, et améliorer les conditions environnementales.

Découverte de voisins

Début

//Découverte des voisins où la station de base initie la découverte (Obtenir sa liste de voisins.)

Pour chaque voisin trouvé dans son rayon

 Créer un lien entre eux

Fin pour

//Découverte des voisins par les capteurs

Si (le capteur a déjà découvert ses voisins) **alors**

 Obtenir la liste de ses voisins.

Sinon

 Procéder à la découverte des voisins pour ce capteur.

Fin si

Fin

Clustering

Début

Initialement tous les capteurs ont la même valeur d'énergie

Si (un capteur a un nombre plus élevé de voisins) **alors**

 L'environnement est divisé en zones (cluster)

 Designier un cluster head dans chaque zone

 Changer la couleur de ce capteur en rouge

Fin si

Pour chaque capteur dans la zone

Si (le capteur est un CH) **alors**

 Annoncer à ses voisins qu'il est un CH.

Fin si

Fin pour

//Association des Capteurs aux CH

Pour chaque capteur qui n'est pas un CH

Si (un CH est présent dans son rayon le plu proche) **alors**

 Etablir un lien entre ce capteur et le CH

Fin si

Fin pour

Fin

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

Procédure_allumer

Début

Si temps = nuit **alors**

 L'éclairage s'allume automatiquement.

FinSi.

Fin

Procédure_éteindre

Début

Si temps = jour alors

L'éclairage s'éteints automatiquement.

FinSi.

Fin

- **Agent panneau** : est un dispositif conçu pour signaler une alerte en cas de détection d'incendie.
- **Agent voiture** : représente un individu qui circule sur la route pour se déplacer

Dans cette étude, nous avons utilisé le **modèle de consommation d'énergie de Heinzelman**. les valeurs de consommation pour chaque composante de ce modèle ont été supposées.

Random cluster head (procedure d'épuisement d'énergie)

Début

Choisir un cluster head aléatoirement

Si (un capteur CH est choisi et énergie = seuil d'alerte) **alors**

Afficher l'identifiant du capteur choisi

Réduire l'énergie du capteur de 0.03

Afficher l'énergie résiduelle du capteur

La Liste des voisins de ce CH

Fin si

Demander le remplacement par un voisin

Sélection d'un nouveau CH

nouveau-ch = un capteur parmi les autres capteurs dans un rayon radiuscouv où le nombre voisins est maximal parmi les capteurs dans le même rayon, et où role n'est pas "CH", et son énergie est supérieure à celle du capteur actuel

Si (un nouveau CH est sélectionné) **alors**

Définir le rôle du nouveau-ch à "CH "

Définir la couleur du nouveau-ch à blanc

Définir la taille du nouveau-ch à 2

Réduire l'énergie du nouveau-ch de 0.03

Création de nouveaux liens avec ses voisins

Fin si

Fin

Procédure Périodique

Début

Si (rôle-capteur = "CH") **alors**

 Définir sa liste de voisins

 Simuler l'échange d'informations en envoyant des messages par les voisins à leurs CH

 Exécuter l'échange d'informations après chaque 2 unités de temps

Fin si

Fin

Procédure pour déclencher le feu

Début

Si (feu est déclenché) **alors**

 Définir la liste des capteurs détecteurs et définir le rôle à "DT"

 Sélection du premier détecteur

 Liaison du premier détecteur à son Cluster Head

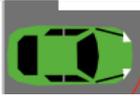
 Transmettre l'information entre les clusters head les plus proches jusqu'à ce que l'alerte atteigne les véhicules et le panneau

Fin si

Fin

4.4.2. Propriétés des agents

Le tableau ci-dessous décrit les agents principaux utilisés dans la forêt :

Logo de l'agent	Nom de l'agent	Personnalisation de l'agent sur NetLogo
	Capteur sans fil	breed [capteurs capteur] set shape "capteur" set size 1
	Voiture	breed [cars car] set shape "car top" set size 5
	Eclairage	breed [eclairages eclairement] set shape "eclairage" set size 6

Chapitre 04 : Scénario et Simulation

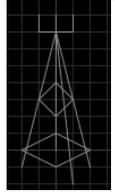
	Panneau	breed [panneaux panneau] set shape "panneau" set size 45
	Feu	breed [fires fire] set shape "fire" set size 2
	Station de base	breed [stations station] set shape "station" set size 6

Tableau 4-4.4-1 Propriétés des agents de la forêt

4.4.3. Présentation de la simulation

4.4.3.1. Description de l'interface de la forêt

L'interface de simulation (figure 4.2) dans NetLogo est composée d'un ensemble de boutons, de sliders et d'un panneau qui affiche le déroulement de la simulation, y compris les actions et les interactions des agents dans leur environnement.

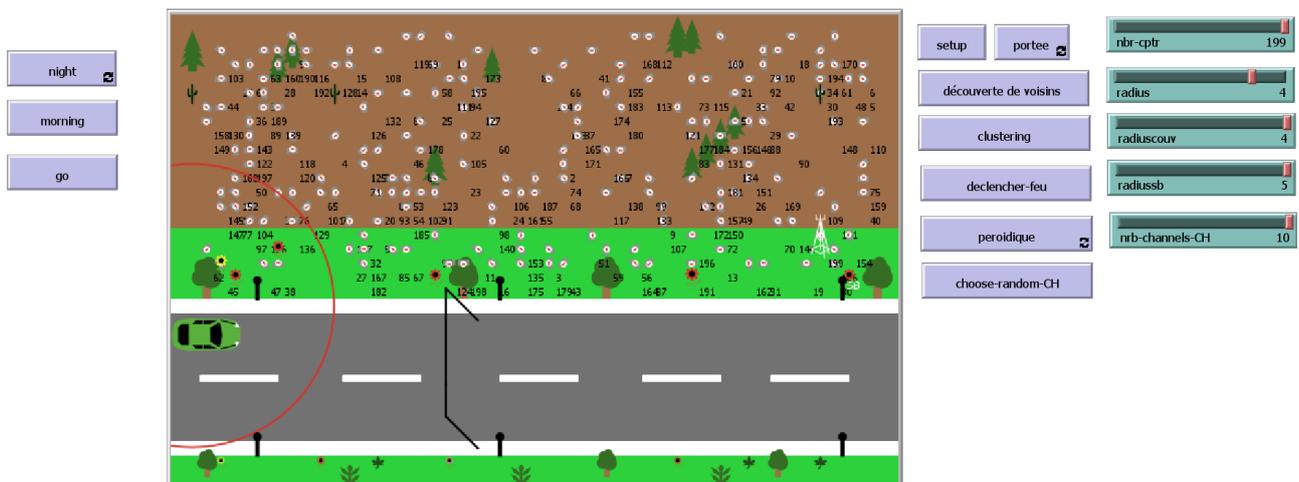


Figure 4.2 Interface de simulation de la zone forestière

4.4.3.2. Déroulement des procédures

Dans NetLogo, un bouton est un élément d'interface graphique qui permet à l'utilisateur de déclencher une action ou d'exécuter un code spécifique. Les boutons sont des outils essentiels pour interagir avec le modèle et contrôler son comportement.

- **Setup** : permet d'initialiser le modèle, c'est-à-dire définir les conditions de départ de modèle, comme la taille de la zone de portée, la création des types d'agents.

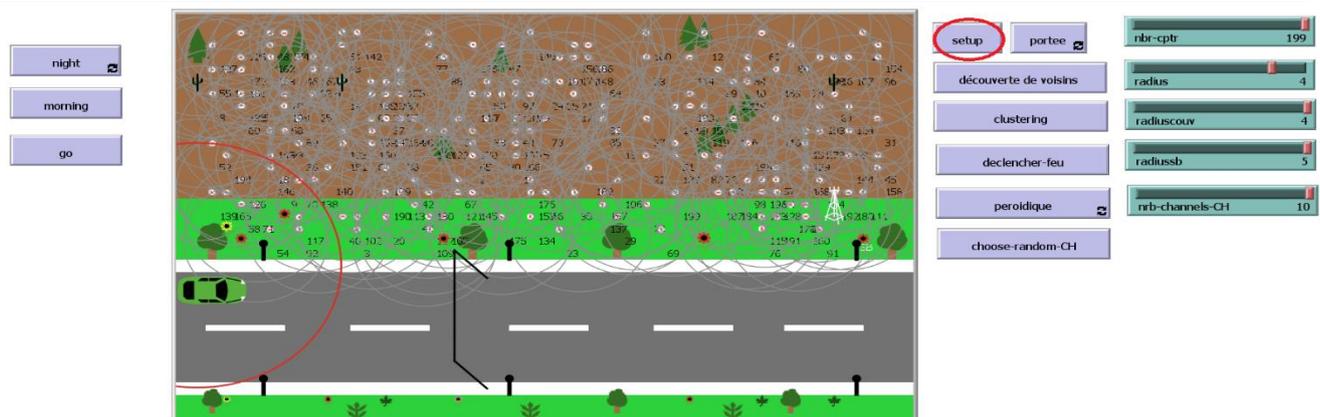


Figure 4.3 Fonctionnement du bouton setup

- **La glissière (slider) radius** : permet de définir la taille de la zone de portée d'un nœud dans le réseau.
- **La glissière (slider) radiuscouv** : la distance maximale à laquelle un nœud peut communiquer avec d'autres nœuds pour former un cluster.
- **La glissière (slider) Nombre-de-capteurs** : permet d'introduire le nombre d'agents capteurs dans le réseau.
- **La glissière (slider) radiussb** : utilisée pour déterminer la taille de la zone autour du patch spécifié.
- **La glissière (slider) nrb-channels-CH** : définit le nombre de Cluster Heads dans le réseau.
- **Le bouton découverte-voisins** : pour chaque nœud capteur du réseau il sélectionne les capteurs se trouvant dans sa portée.

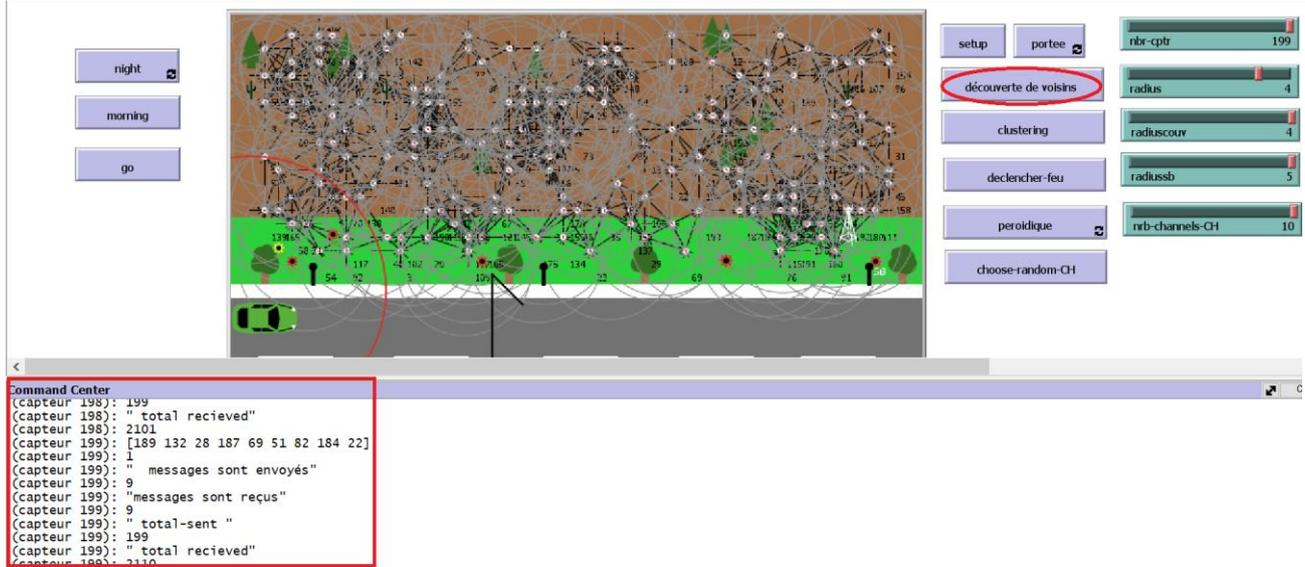


Figure 4.4 Fonctionnement du bouton découverte de voisins

- **Le bouton clustering** : déclenche la procédure **to clustering**. Cette procédure organise un réseau de capteurs sans fil en plusieurs clusters en désignant pour chaque cluster un capteur comme chefs de cluster (Cluster Heads, CH).

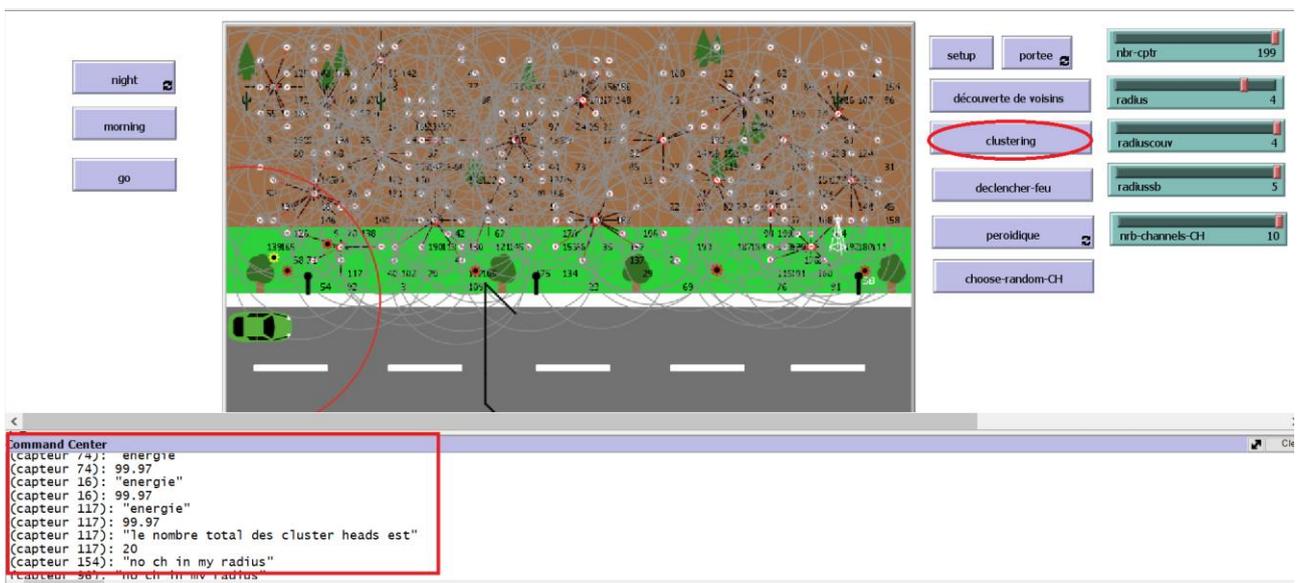


Figure 4.5 Fonctionnement du bouton clustering

- **Le bouton déclencher-feu** : permet à un capteur de détecter un incendie et de transmettre cette information à son Cluster Head (CH). Ce dernier relaie ensuite cette information aux autres CH jusqu'à ce qu'elle parvienne au panneau pour avertir les conducteurs.

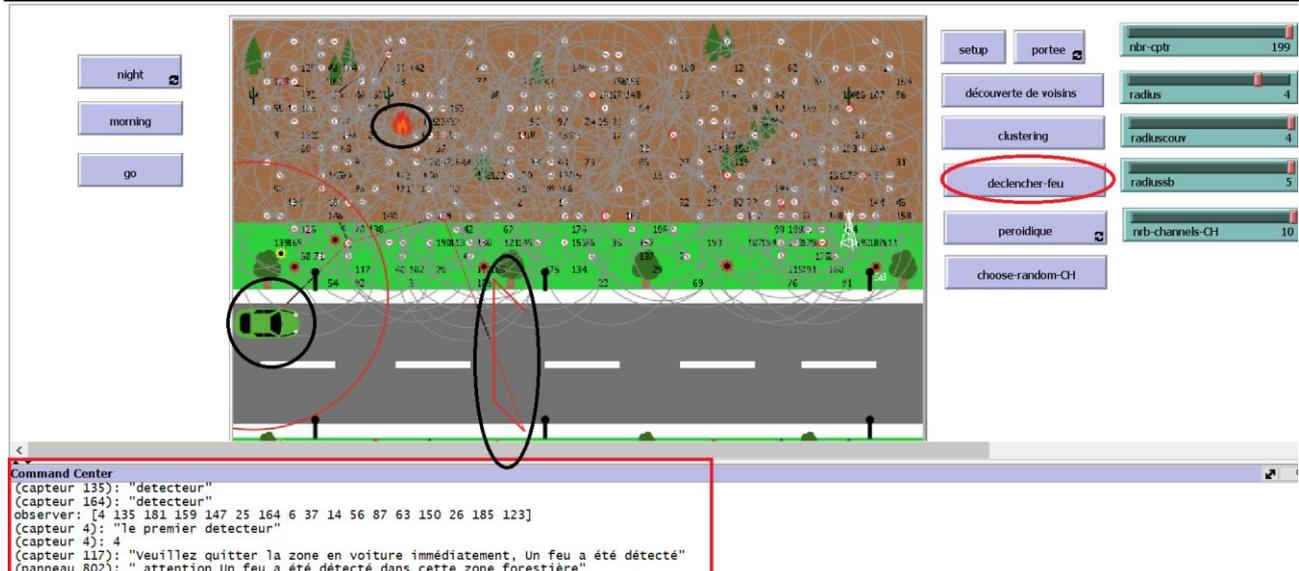


Figure 4.6 Fonctionnement du bouton déclencher feu

- **Le bouton périodique** : déclenche la procédure **to périodique**. Cette procédure simule un échange périodique d'informations entre les capteurs et leurs chefs de cluster (Cluster Heads, CH) après chaque 2 unité de temps (ticks).

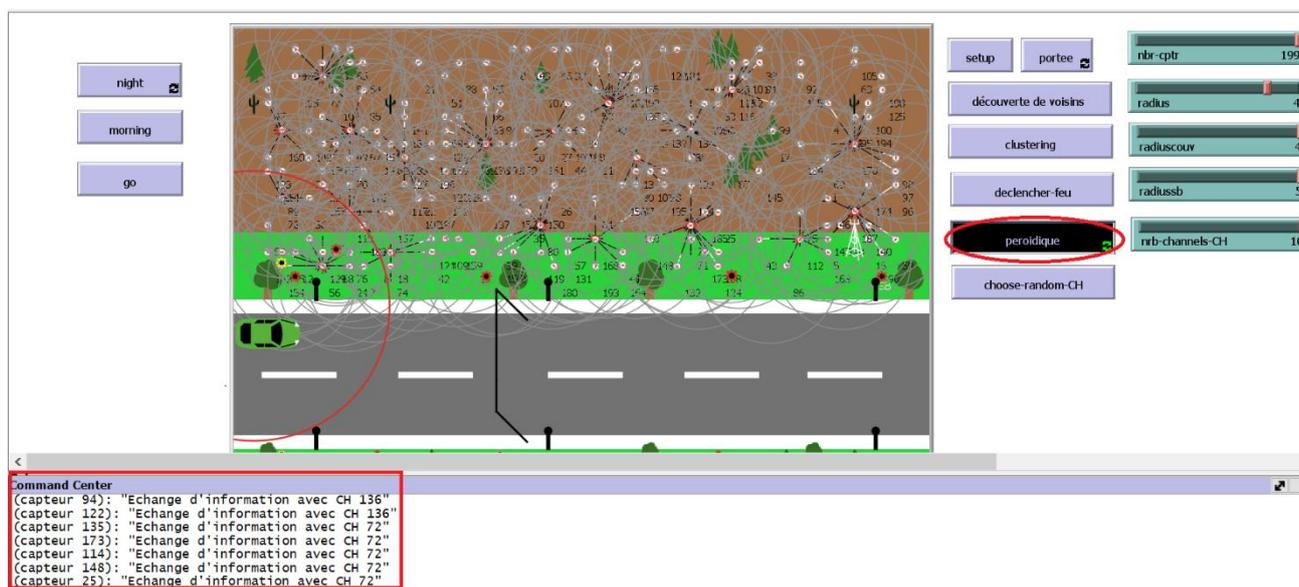


Figure 4.7 Fonctionnement du bouton périodique

- **Le bouton choose-random-CH** : permet de choisir un cluster head aléatoirement, ajuster son niveau d'énergie, puis initier un processus où ce capteur informe ses voisins qu'ils peuvent le remplacer par un capteur ayant plus d'énergie et un nombre de voisins supérieur. Le nouveau CH établit ensuite de nouveaux liens avec ses voisins pour assurer une connectivité optimale dans le réseau.

Chapitre 04 : Scénario et Simulation

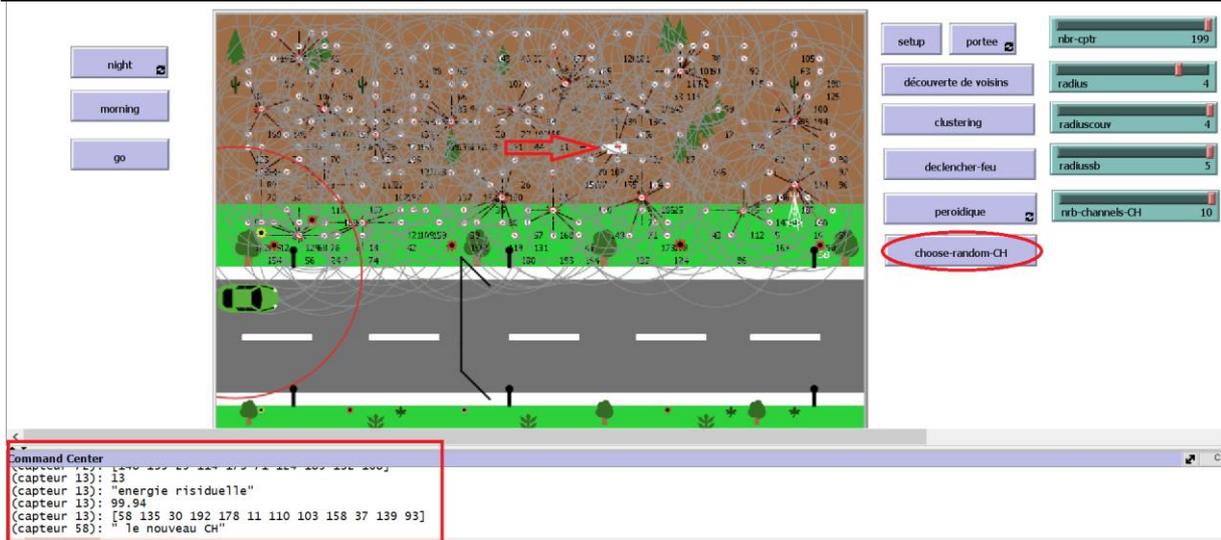


Figure 4.8 Fonctionnement du bouton choose random cluster head

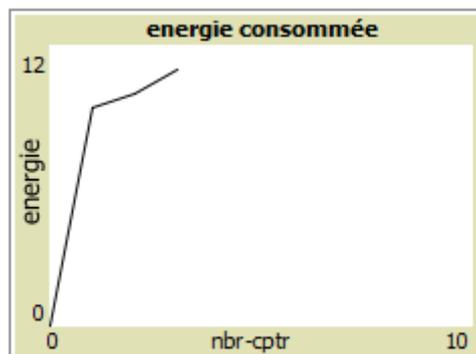


Figure 4.9 graphe de consommation de l'énergie

➤ **Le bouton go :** exécute la procédure **to go**, qui permet de faire déplacer la voiture.

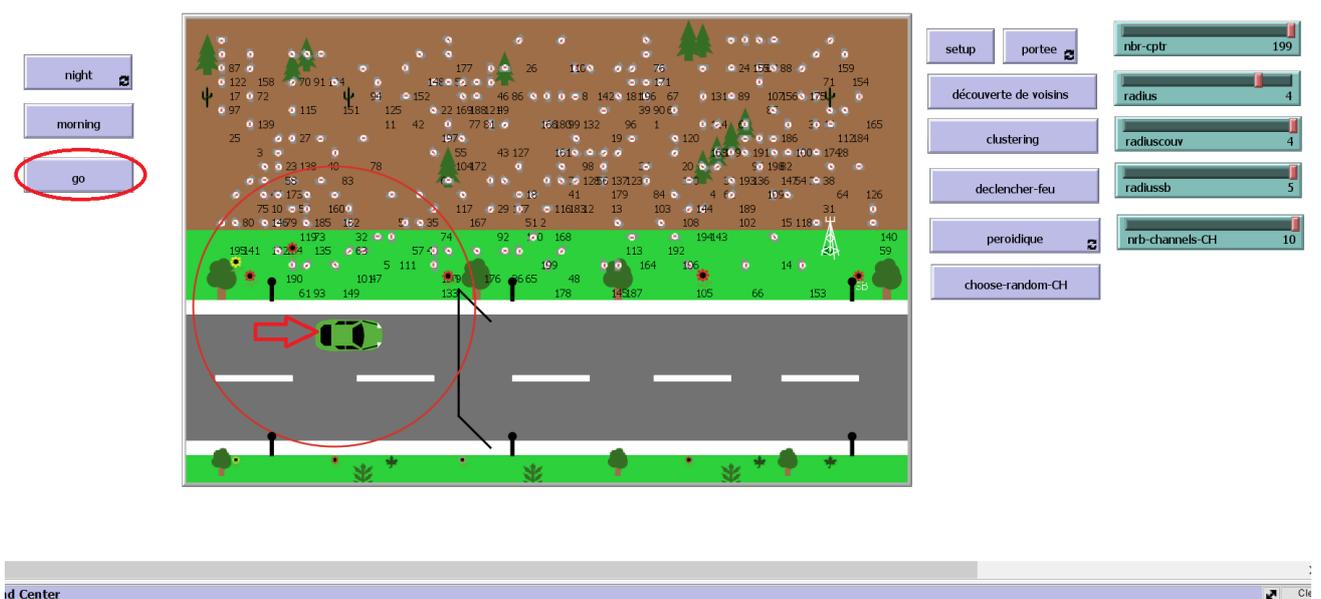


Figure 4.10 Fonctionnement du bouton go

Chapitre 04 : Scénario et Simulation

- **Le bouton night** : exécute la procédure **to night**, et permet d'allumer l'éclairage automatiquement quand il fait noir.

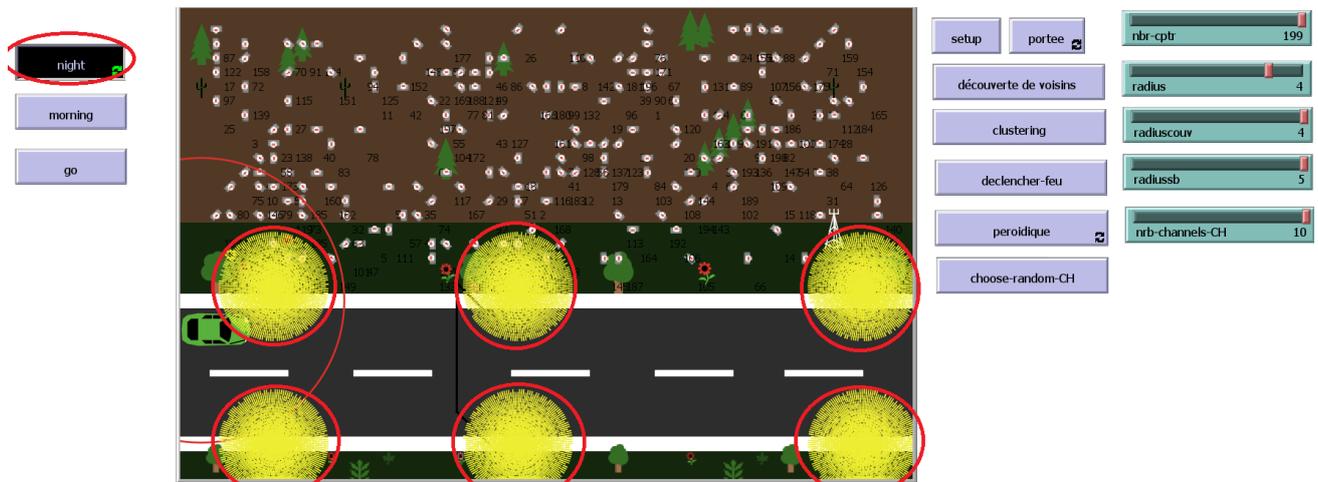


Figure 4.11 Fonctionnement du bouton night

- **Le bouton morning** : exécute la procédure **to morning**, et permet d'éteindre automatiquement l'éclairage durant la journée.

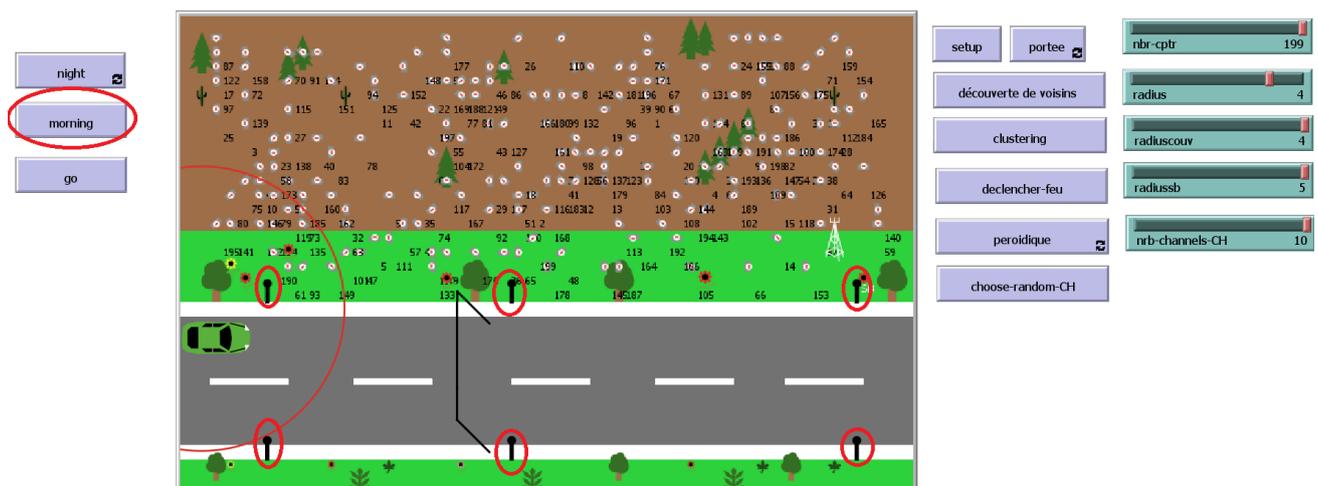


Figure 4.12 Fonctionnement du bouton morning

4.5. Mise en œuvre de la ville intelligente

4.5.1. Définition des agents

- **Agent voiture** : Les voitures naviguent dans la ville et recherchent des places de parking.
- **Agent personne** : Il s'agit d'un citoyen de la ville qui contribue dans son évolution.
- **Agent feux-signalisation** : Les voitures et les personnes réagissent en fonction de la couleur des feux.

Chapitre 04 : Scénario et Simulation

- **Agent capteur** : est un dispositif conçu pour surveiller, analyser et améliorer les conditions de déplacement des piétons, le mouvement des véhicules, ainsi que les conditions environnementales.

Procédure_go

Début

Les voitures se déplacent vers l'avant.

Si feux-signalisation = rouge

Les voitures s'arrêtent jusqu'à nouvel ordre

Les personnes traversent la route.

Sinon

Les voitures démarrent

Les personnes s'arrêtent jusqu'à nouvel ordre

FinSi.

Si distance ≤ 5 alors

Changer la couleur du capteur en jaune

Envoyer une alerte au véhicule : "Piéton à proximité"

Sinon

Afficher : "Aucun piéton détecté"

Fin Si

Si température > 35 alors

Afficher : "la température est élevée"

Fin Si

Fin

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

Procédure_allumer

Début

Si temps = nuit alors

L'éclairage s'allume automatiquement.

FinSi.

Fin

Procédure_éteindre

Début

Si temps = jour **alors**

L'éclairage s'éteint automatiquement.

FinSi.

Fin

- **Agent caméra** : Les caméras sont opérationnelles en continu, de jour comme de nuit, afin d'assurer la sécurité de la ville et des citoyens.

Procédure_sécurité

Début

Les caméras sont activées.

Si la caméra de l'école détecte que la personne fait partie de la communauté scolaire **alors**

La porte se déverrouille pour lui permettre d'y accéder.

Sinon

La porte reste fermée.

FinSi.

Fin

- **Agent jalonnement** : Un jalonnement dynamique est installé près de l'entrée du parking, capable de détecter la proximité d'un véhicule à la porte.

Procédure_parking

Début

Si jalonnement = vert **alors**

Le portail du parking s'ouvre et la voiture se gare à l'emplacement indiqué par le jalonnement

Une fois la voiture sera bien stationnée, le capteur dans le sol passe au rouge.

Le nombre de places disponibles sera décrémenté et le portail se referme.

Sinon

Le portail reste fermé.

La voiture continue sa route.

FinSi.

Fin

4.5.2. Propriétés des agents

Le tableau ci-dessous décrit les agents principaux utilisés dans la ville intelligente :

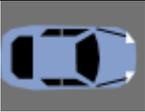
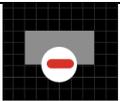
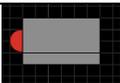
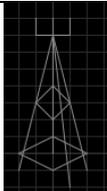
Logo de l'agent	Nom de l'agent	Personnalisation de l'agent sur NetLogo
	Voiture	breed [voitures voiture] set shape "car top" set size 5
	Personne	breed [personnes personne] set shape "person " set size 3
	Feux-signalisation	breed [lightsL lightL] breed [lightsU lightU] breed [lightsD lightD] breed [lightsR lightR] breed [lightsT lightT] set shape "lights" set size 3
	éclairage	breed [eclairages eclaireage] set shape "eclairage" set size 6
	Capteur sans fil	breed [capteurs capteur] set shape "capteur" set size 3.5
	Caméra	breed [cameras camera] set shape "camera" set size 5
	Jalonnement	breed [jalonnements jalonnement] set shape "jalon" set size 8
	Station au bord de la route	breed [stations station] set shape "station" set size 5
	Capteur parking	breed [capteursP capteurP] set shape "capteurP" set size 3
	Portail parking	Breed [portails portail] set shape "portail" set size 13

Tableau 4-4.5-1 Propriétés des agents de la ville intelligente

4.5.3. Présentation de la simulation

4.5.3.1. Description de l'interface de la ville intelligente

L'interface de simulation (la figure ci-dessous) représente une ville intelligente. Elle est composée d'un ensemble de boutons, choosers, sliders et d'un panneau qui affiche le déroulement de la simulation.

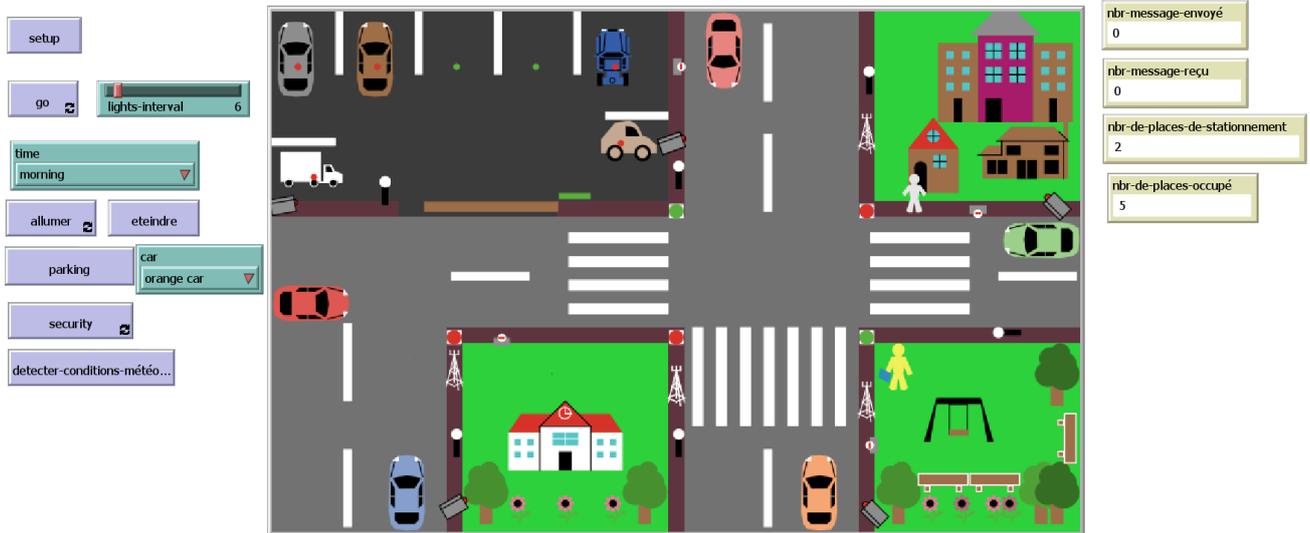


Figure 4.13 Interface de simulation de la ville intelligente

4.5.3.2. Déroulement des procédures

- **Setup** : c'est un bouton qui exécute la procédure **to setup**, et qui permet de créer les agents de la ville intelligente.

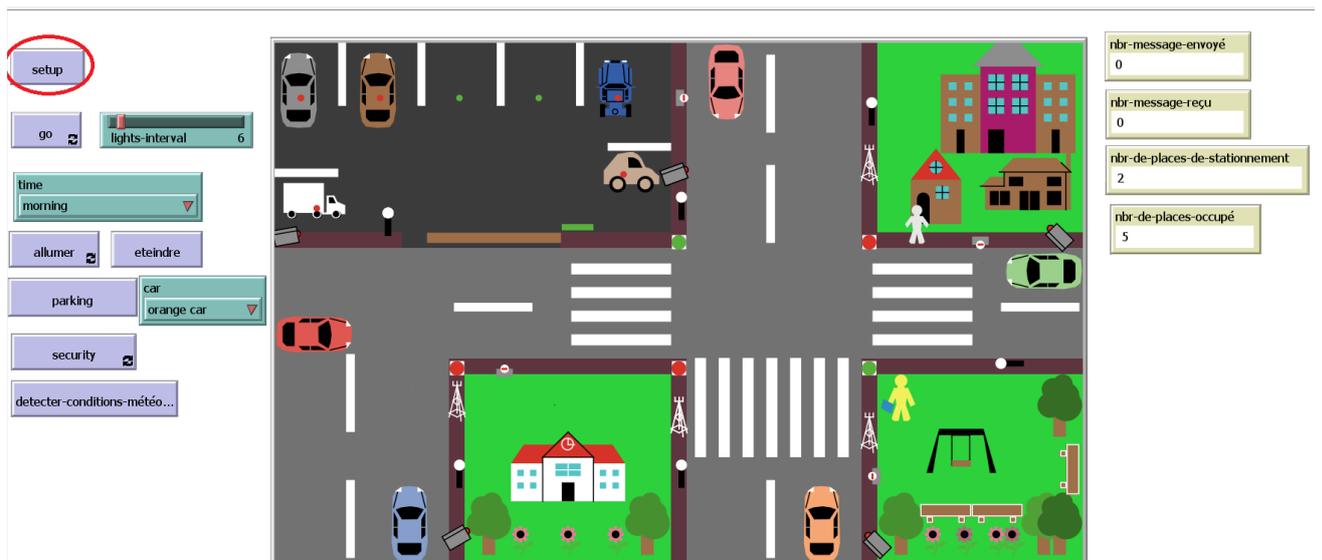


Figure 4.14 Fonctionnement du bouton Setup

Chapitre 04 : Scénario et Simulation

- **Go** : c'est un bouton qui exécute la procédure **to go**, et qui permet de faire circuler les véhicules et les personnes d'une façon automatique (tout en respectant la couleur des feux de signalisation), et qui déclenche une autre procédure qui contrôle les feux de signalisation routiers (**control-traffic-lights**).

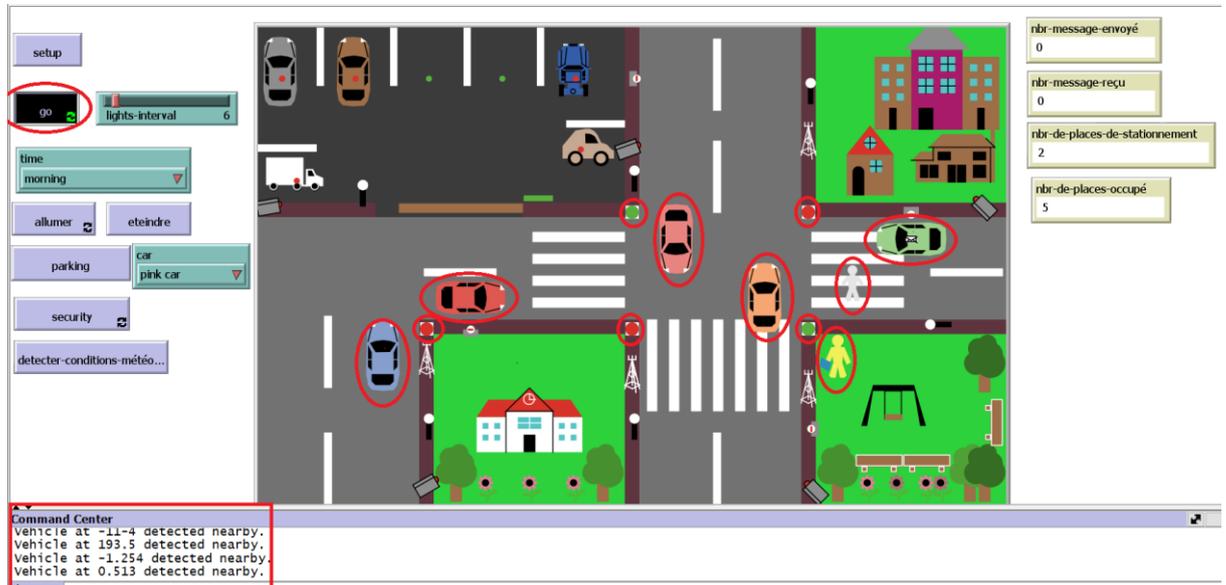


Figure 4.15 Fonctionnement du bouton Go

Le bouton **go** permet également la détection d'un piéton par un capteur et la communication de cette information du capteur au véhicule présente dans sa portée.

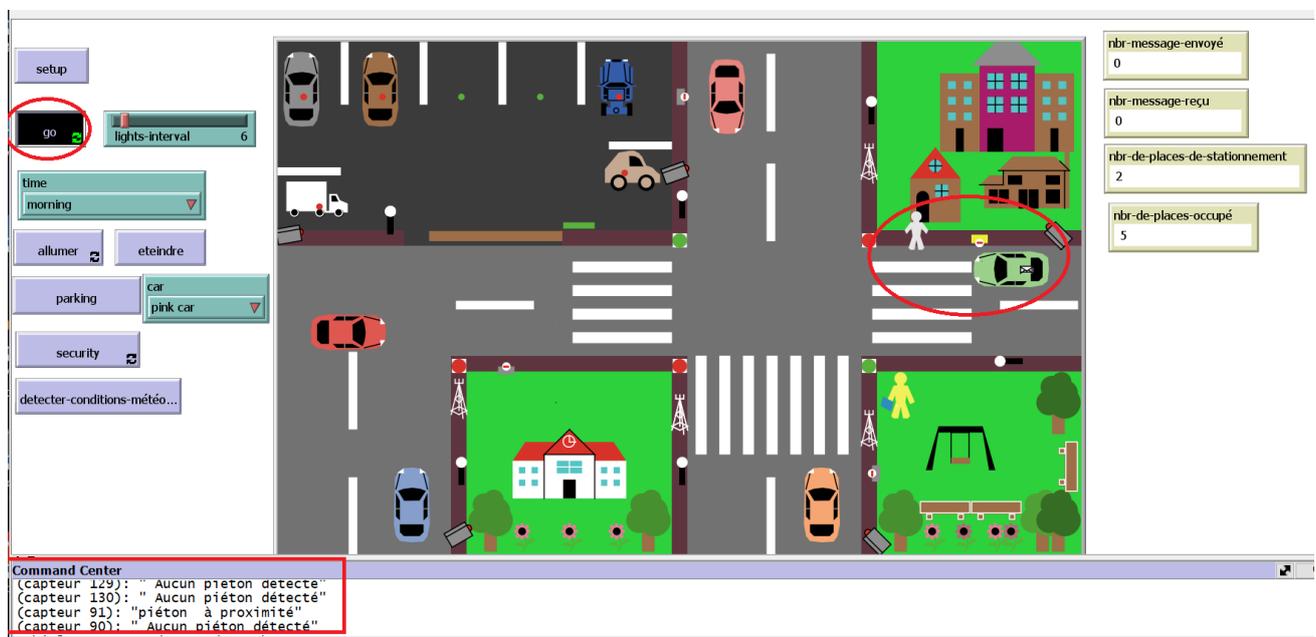


Figure 4.16 Détection d'un piéton par un capteur

- **lights-interval** : Ce slider permet de contrôler l'intervalle de temps pour que les feux de signalisation changent de couleur.

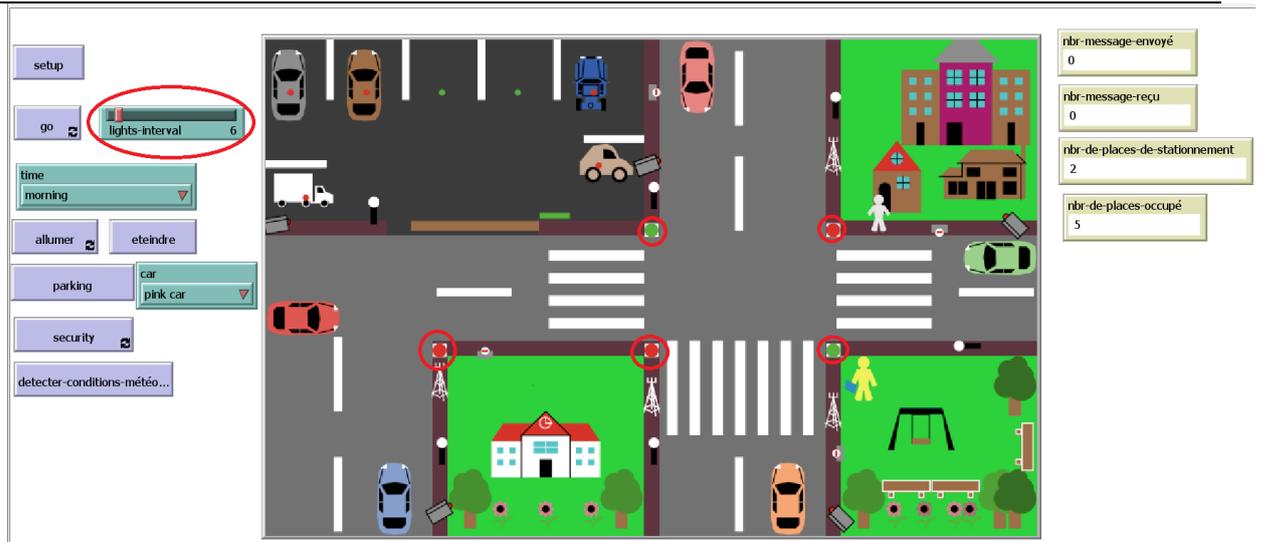


Figure 4.17 Le slider lights-interval

- **Allumer** : C'est un bouton qui exécute la procédure **to allumer**, et qui permet d'allumer l'éclairage uniquement si c'est le soir.

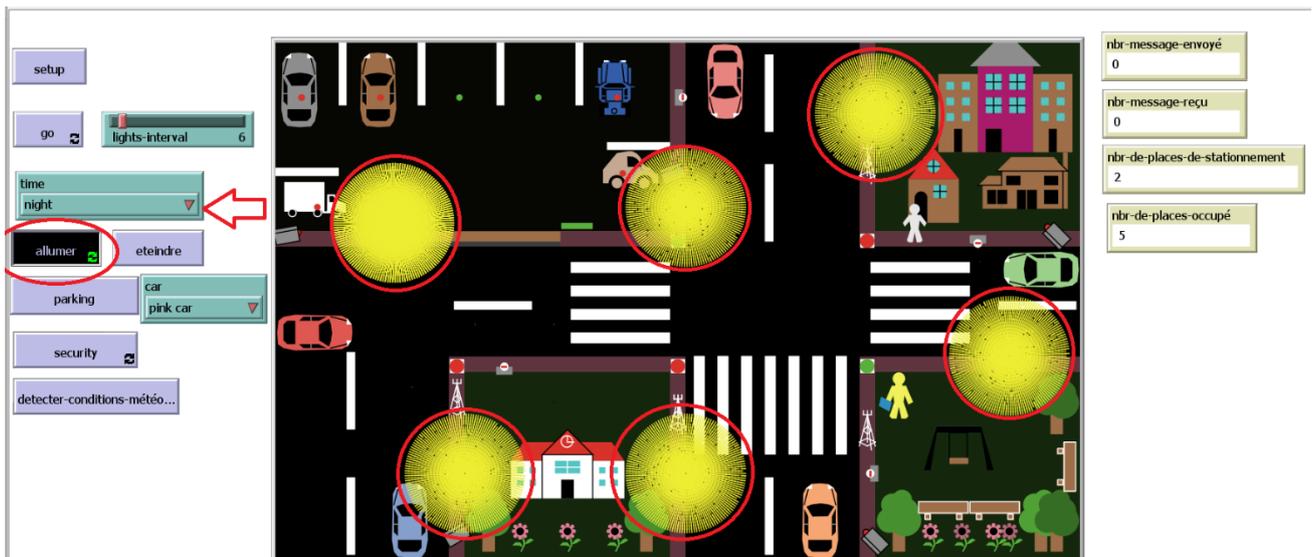


Figure 4.18 Fonctionnement du bouton Allumer

- **Eteindre** : ce bouton exécute la procédure **to eteindre**, et qui permet d'éteindre l'éclairage durant la journée.

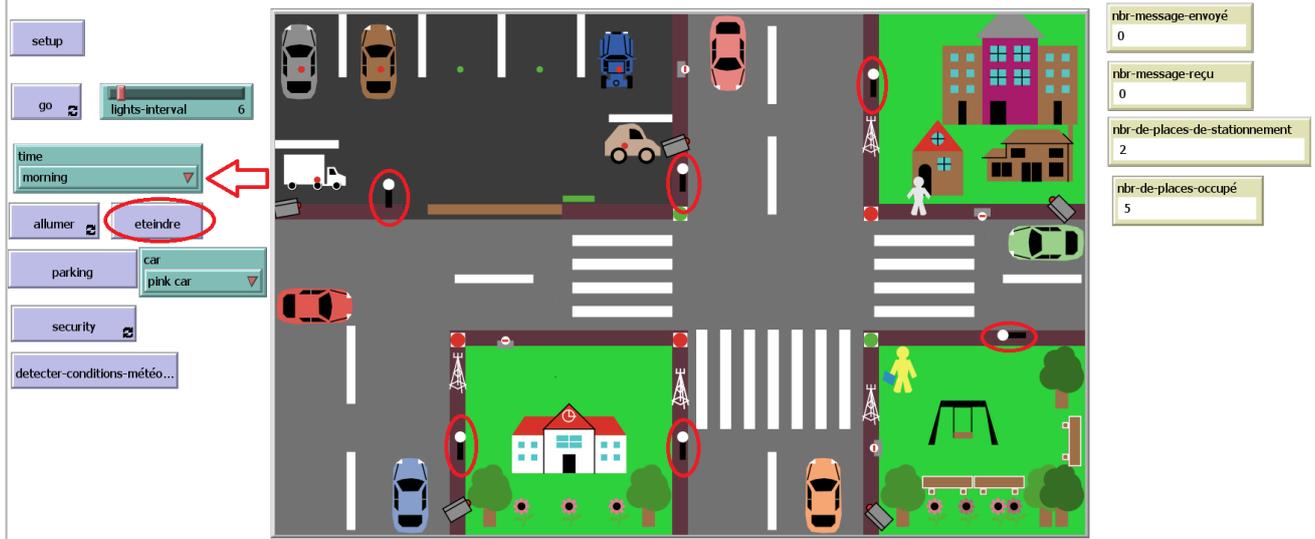


Figure 4.19 Fonctionnement du bouton Eteindre

- **Security** : Ce bouton permet d'exécuter la procédure **to security**, et qui permet d'allumer les caméras de surveillance.

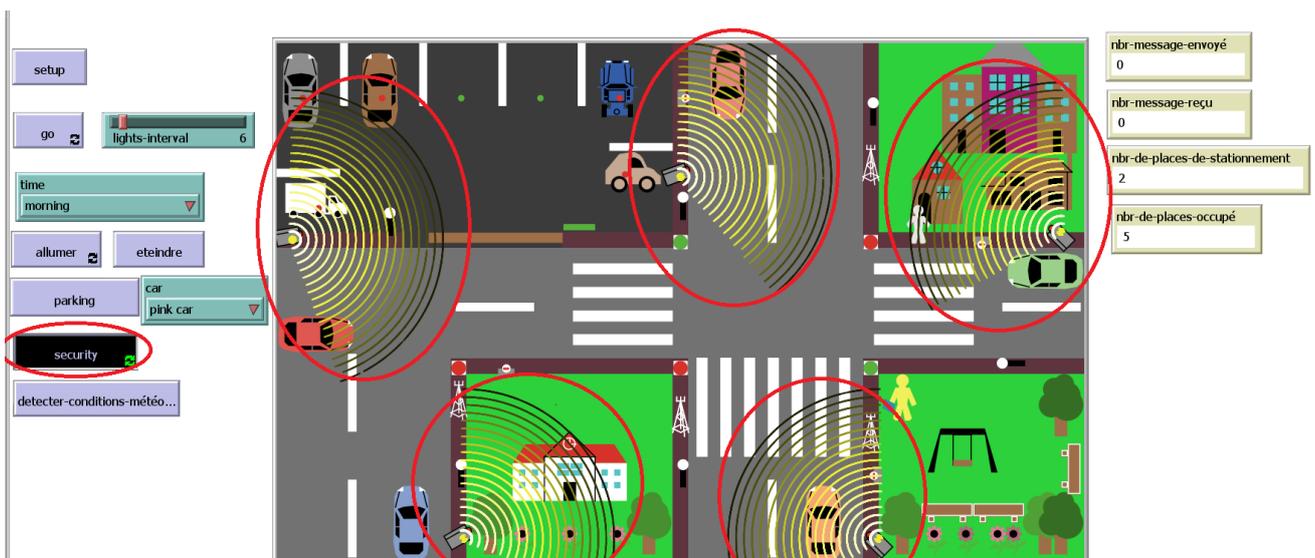


Figure 4.20 Fonctionnement du bouton Security

- **Parking** : Lorsqu'une voiture souhaite se garer, le portail s'ouvre automatiquement. Une fois le véhicule est bien stationné, un capteur détecte sa présence et change de couleur au rouge, signalant ainsi que l'emplacement est occupé. La porte se referme alors automatiquement. Le système met à jour le nombre de places disponibles en le décrémentant. Si toutes les places sont occupées, le jalonnement devient rouge pour signaler que le parking est complet, comme le montre les figures 4.21, 4.22, 4.23 ci-dessous.

Chapitre 04 : Scénario et Simulation

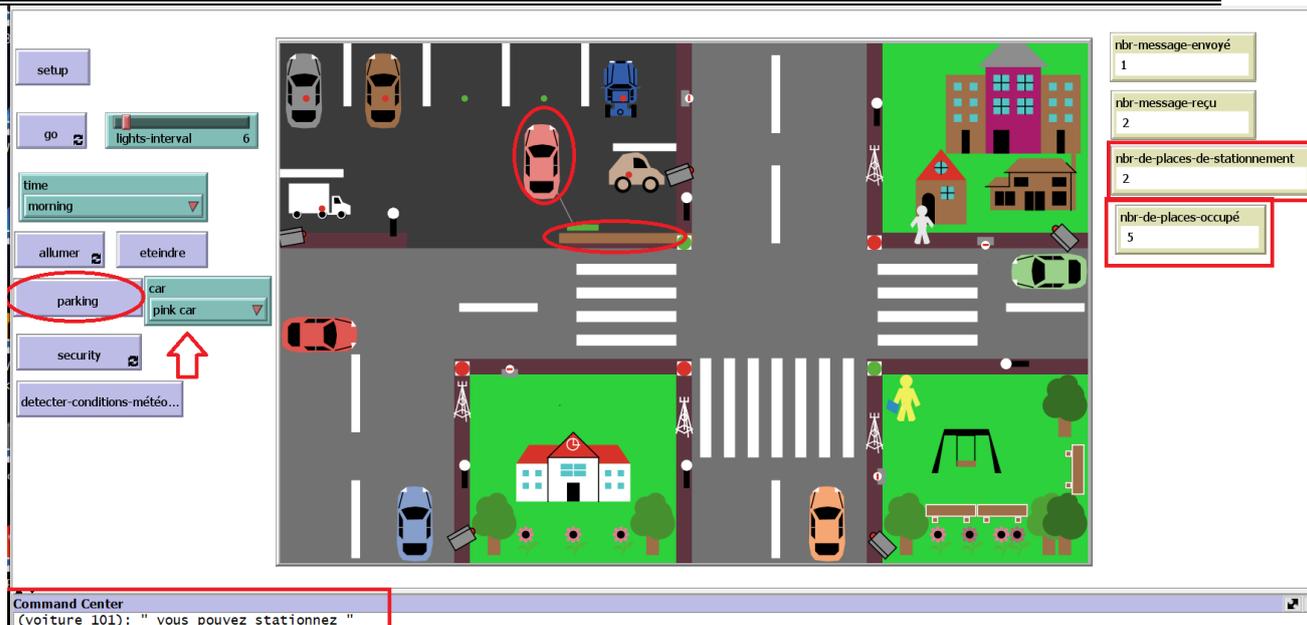


Figure 4.21 Stationnement de la première voiture

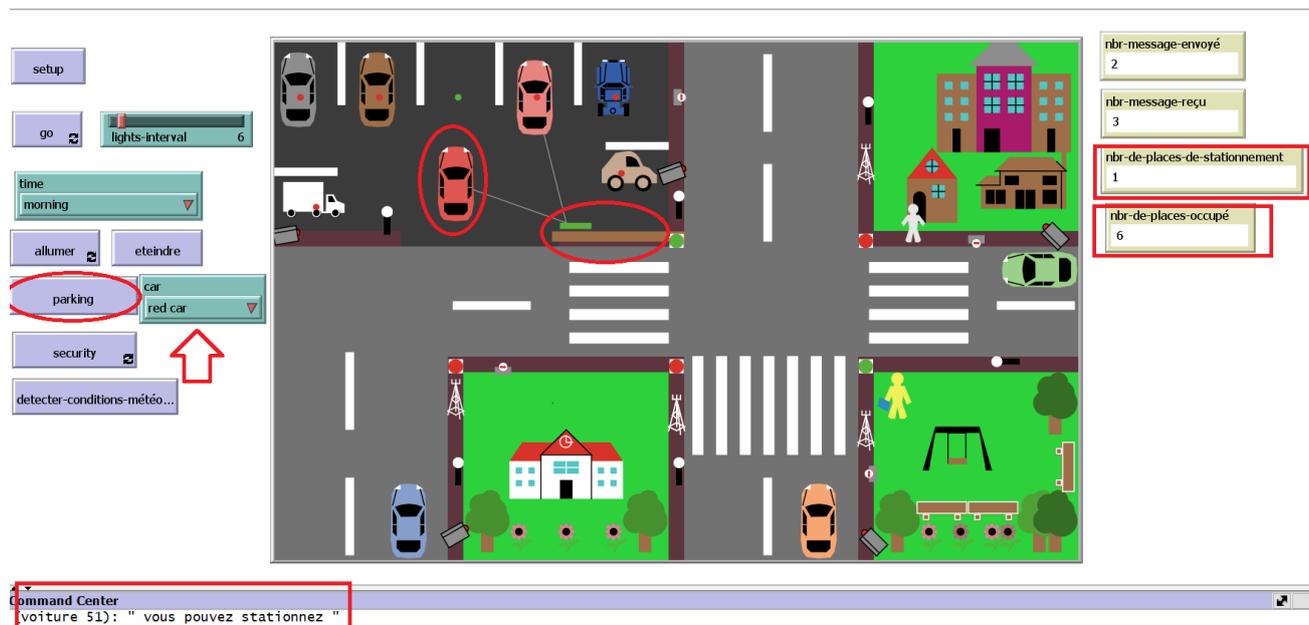


Figure 4.22 Stationnement de la deuxième voiture

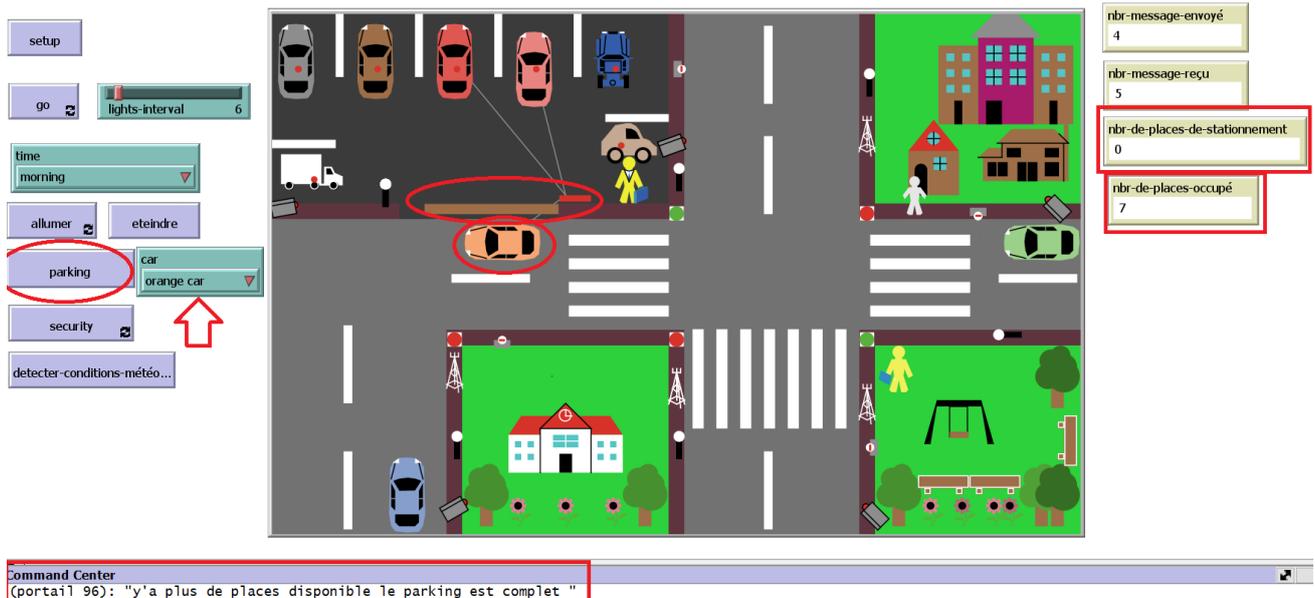


Figure 4.23 La troisième voiture ne peut pas stationner puisque le parking est complet

4.6. Conclusion

Ce chapitre a présenté des scénarios relatifs à la forêt et à la ville intelligente, ainsi que leur simulation dans le simulateur multi-agents NetLogo, en mettant en avant les différents paramètres et agents impliqués.

La simulation d'une ville intelligente a mis en évidence comment divers systèmes et infrastructures connectés peuvent collaborer pour améliorer la qualité de vie urbaine. Les scénarios ont illustré comment les capteurs peuvent suivre le mouvement des véhicules, afficher des informations telles que l'humidité et la température, et envoyer des alertes aux passages piétons. De plus, la simulation a montré la surveillance en temps réel des services urbains tels que l'éclairage public et la gestion des feux de signalisation, ainsi qu'à promouvoir une utilisation efficace des ressources énergétiques.

Quant à la simulation d'une forêt, elle a démontré l'utilisation de capteurs sophistiqués peut détecter les risques d'incendie forestier et transmettre des alertes aux conducteurs, renforçant ainsi la sécurité routière.

En conclusion, cette exploration a démontré comment NetLogo fonctionne non seulement comme une plateforme d'exécution, mais aussi comme un outil d'analyse essentiel pour explorer et simuler des environnements complexes et interconnectés.

Conclusion générale

Depuis quelques années, les réseaux de véhicules ont envahi le domaine de la recherche, s'imposant comme élément essentiel des Systèmes de Transport Intelligents (STI). Toutefois, étant donné la forte mobilité et le changement fréquent de la topologie, les réseaux véhiculaires ne parviennent pas à maintenir une connectivité constante entre les véhicules. En outre, en raison de la couverture limitée, les VANETs (Vehicular Ad hoc Networks) ne garantissent pas une détection rapide des conditions routières dangereuses. Pour surmonter ces limitations, les réseaux de capteurs sans fil (WSN) ont été intégrés aux VANETs afin que chaque type de réseau puisse bénéficier des avantages de l'autre, tout en compensant ses limitations. Cela a donné naissance à une nouvelle approche, les réseaux hybrides capteurs-véhicules « Hybrid Sensor Vehicular Networks-HSVN », où les nœuds de capteurs sont déployés le long de la route pour surveiller les conditions routières et transmettre en temps réel les données capturées aux véhicules. Ces réseaux hybrides combinent les atouts des VANETs et des WSNs pour offrir une solution plus complète et performante afin d'améliorer la sécurité routière, la fluidité du trafic et la conduite responsable.

Afin d'explorer en profondeur la nouvelle technologie HSVN, nous avons consacré le premier chapitre de notre mémoire à une présentation détaillée des deux réseaux qui le composent : les réseaux ad hoc véhiculaires (VANET) et les réseaux de capteurs sans fil (WSN), nous avons illustré leurs architectures, leurs caractéristiques, leurs applications et les défis auxquels ils sont confrontés. Dans la dernière partie du chapitre, nous avons exposé la nouvelle architecture hybride HSVN, ses applications et ses défis de conceptions.

Dans le deuxième chapitre nous avons traité deux aspects : la communication et le routage, et la gestion de l'énergie. Nous avons examiné les protocoles de routage et les différentes technologies de communication utilisés dans les réseaux HSVN. Nous avons exposé également le problème de consommation d'énergie et nous avons proposé quelques méthodes d'optimisation matérielles et logicielles.

Dans le troisième chapitre, nous avons exploré les deux concepts fondamentaux : les Systèmes Multi-Agents (SMA) et les Systèmes de Systèmes (SoS). Vers la fin de ce chapitre, nous avons établi la relation entre les HSVN, les SMA et les SoS.

Conclusion générale

Dans le dernier chapitre, nous avons simulé deux scénarios avec l'outil de simulation NetLogo, qui fonctionne non seulement comme une plateforme d'exécution, mais aussi comme un outil d'analyse essentiel pour explorer et simuler des environnements complexes et interconnectés. La simulation d'une ville intelligente a révélé comment différents systèmes et infrastructures connectés peuvent travailler ensemble afin d'améliorer la qualité de vie en milieu urbain. Les scénarios ont mis en évidence la capacité des capteurs à surveiller le déplacement des véhicules, à fournir des données comme l'humidité et la température, et à signaler les passages des piétons. En outre, la simulation d'une forêt a démontré l'utilisation de capteurs sophistiqués peut repérer les risques d'incendie forestier et fournir des alertes aux conducteurs, ce qui renforce la sécurité routière.

NetLogo se distingue comme un outil de simulation puissant et polyvalent, offrant de nombreux avantages pour l'étude des réseaux HSVN. Sa simplicité d'utilisation, sa flexibilité et sa communauté active en font un choix idéal pour modéliser et analyser des scénarios complexes impliquant des interactions entre capteurs et véhicules. L'utilisation de NetLogo nous a apporté des outils précieux pour approfondir nos connaissances sur les HSVN. Forts de cette expérience, nous sommes prêts à raffiner notre modèle et à créer des extensions NetLogo pour analyser des scénarios et défis plus complexes pour contribuer à l'avancement de la recherche et à l'innovation dans ce domaine.

Nos perspectives visent à proposer des solutions appropriées dans le développement des villes intelligentes et renforcer la sécurité environnementale, en particulier la prévention des incendies.

En conclusion, les réseaux HSVN constituent un domaine d'innovation passionnant et plein de promesses, offrant une multitude d'opportunités pour améliorer notre vie quotidienne et contribuer à un avenir plus sûr, plus durable et plus connecté pour tous.

Bibliographie

- [1] “<https://www.informatique-bureautique.com/moodle/mod/page/view.php?id=185>,” consulté le 30/06/2024.
- [2] C. MEZIOUD and M. K. KHOLLADI, “Planification et réaménagement du réseau cellulaire : Une approche à base d’ontologies spatiales et d’agents,” 2014.
- [3] E. B. WAGIU and C.-M. LIU, “A Comparative Study of Ad Hoc & Peer to Peer Networks,” 2022, pp. 49–54.
- [4] A. ABU TALEB, “VANET routing protocols and architectures: An overview,” *J. Comput. Sci.*, vol. 14, no. 3, pp. 423–434, 2018, doi: 10.3844/jcssp.2018.423.434.
- [5] <https://networksimulationtools.com/wp-content/uploads/2020/12/Manet-Projects.png>, “MANET,” consulté le 05/12/2023.
- [6] J. BERNSEN and D. MANIVANNAN, “Unicast routing protocols for vehicular ad hoc networks: A critical comparison and classification,” *Pervasive Mob. Comput.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–18, 2009, doi: 10.1016/j.pmcj.2008.09.001.
- [7] H. ZHANG and J. LI, “Dynamical topology analysis of VANET based on complex networks theory,” *Cybern. Inf. Technol.*, vol. 14, no. SpecialIssue, pp. 172–186, 2014, doi: 10.2478/cait-2014-0053.
- [8] P. CHOUHAN, G. KAUSHAL, and U. PRAJAPATI, “Comparative Study MANET and VANET,” *Int. J. Eng. Comput. Sci.*, no. October, 2016, doi: 10.18535/ijecs/v5i4.04.
- [9] C. TCHEPNDA, “Authentification dans les Réseaux Véhiculaires Opérés,” Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, 2008.
- [10] Y.-A. BENNAI, “Contrôle d’accès et routage avec qualité de service dans les réseaux VANETs,” Université A.MIRA-BEJAIA Faculté, 2022.
- [11] S. KHAN, I. SHARMA, M. ASLAM, M. Z. KHAN, and S. KHAN, “Security challenges of location privacy in vanets and state-of-the-art solutions: A survey,” *Futur. Internet*, vol. 13, no.

Bibliographie

- 4, pp. 1–22, 2021, doi: 10.3390/fi13040096.
- [12] F. DOMINGOS *et al.*, “Data Communication in VANETs: Survey, Applications and Challenges,” *Ad Hoc Networks*, pp. 90–103, 2016.
- [13] K. ULLAH, “On the use of opportunistic vehicular communication for roadside services advertisement and discovery,” Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação (ICMC/USP), São Carlos – SP, 2016.
- [14] “<https://www.techtarget.com/whatis/definition/vehicle-to-infrastructure-V2I-or-V2X?amp=1>,” consulté le 12/12/2023.
- [15] “<https://www.verizonconnect.com/resources/article/connected-vehicle-technology-v2v-v2i-v2x/>,” consulté le 12/12/2023.
- [16] “<https://blog.rgbsi.com/connection-with-vehicle-to-network-v2n>,” consulté le 20/02/2024.
- [17] “<https://www.everythingrf.com/community/what-is-v2n>,” consulté le 21/02/2024.
- [18] “<https://www.emqx.com/en/blog/what-is-v2x-and-the-future-of-vehicle-to-everything-connectivity>,” consulté le 20/02/2024.
- [19] J. J. ANAYA, P. MERDRIGNAC, O. SHAGDAR, F. NASHASHIBI, and J. E. NARANJO, “Vehicle to pedestrian communications for protection of vulnerable road users,” *IEEE Intell. Veh. Symp. Proc.*, pp. 1037–1042, 2014, doi: 10.1109/IVS.2014.6856553.
- [20] “<https://www.telecomtrainer.com/v2c-vehicle-to-cloud/>,” consulté le 20/02/2024.
- [21] “<https://www.ti.com/document-viewer/lit/html/SSZT418>,” consulté le 21/02/2024.
- [22] “<https://blog.rgbsi.com/7-types-of-vehicle-connectivity>,” consulté le 20/02/2024.
- [23] S. UR REHMAN, M. A. KHAN, T. A. ZIA, and L. ZHENG, “Vehicular Ad-Hoc Networks (VANETs) - An Overview and Challenges,” *J. Wirel. Netw. Commun.*, vol. 2013, no. 3, pp. 29–38, 2013, doi: 10.5923/j.jwnc.20130303.02.
- [24] K. AIT ALI, “Modélisation et étude de performances dans les réseaux VANET,” Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2012.

Bibliographie

- [25] S. AL-SULTAN, M. M. AL-DOORI, A. H. AL-BAYATTI, and H. ZEDAN, “A comprehensive survey on vehicular Ad Hoc network,” *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 37, no. 1, pp. 380–392, 2014, doi: 10.1016/j.jnca.2013.02.036.
- [26] A. FARES, L. M. DJOUDI, and J. T. MBOUKEM, “Développement d’une bibliothèque de capteurs,” 2008.
- [27] C. RAMASSAMY, “Analyse des protocoles des Réseaux de capteurs sans-fil,” UNIVERSIT’E DES ANTILLES ET DE LA GUYANE, 2012. [Online]. Available: <https://www.theses.fr/2012AGUY0586>
- [28] L. KANOUNI, “La délivrance des données dans les réseaux véhiculaires à base des réseaux de capteurs sans fil.,” Université A.MIRA-BEJAIA, 2015.
- [29] M. BOUALLEGUE, K. Raoof, Z. M. BEN, and Al, “Impact of variable transmission power on routing protocols in wireless sensor networks,” in *10th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM 2014)*, 2014, pp. 496–499.
- [30] L. M. MESSAI, “Sécurité dans les Réseaux de Capteurs Sans-Fil,” Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2008.
- [31] I. F. AKYILDIZ, W. SU, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, “A survey on sensor networks,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 40, no. 8, pp. 102–105, 2002, doi: 10.1109/MCOM.2002.1024422.
- [32] A. BELFKIH, B. SADEG, C. DUVALLET, and L. AMANTON, “Les bases de données dans les réseaux de capteurs sans fil,” *Tech. Sci. informatiques*, vol. 33, no. 9–10, pp. 739–776, 2014, doi: 10.3166/tsi.33.739-776.
- [33] T. DUCROCQ, “Auto-organisation des réseaux sans-fil multi-sauts dans les villes intelligentes,” Université des Sciences et Technologies de Lille – Lille 1 D’épartement, 2013.
- [34] K. Hamidatou, “Thème Une nouvelle technique d’optimisation pour l’économie d’énergie dans le réseau de capteur sans fils Préparé par Encadré par,” 2018.
- [35] T. M. TEBBAI, I. BERROUILA, and M. GUEDMANI, “Analyse et optimisation du protocole LEACH pour les réseaux de capteurs sans fil.,” 2020.

Bibliographie

- [36] A. HANNECHE, “Conception d’un nouveau protocole pour les réseaux de capteurs sans fils,” Université L’arbi Ben M’hidi Oum El Bouaghi, 2021.
- [37] N. ALSHARABI, L. R. Fa, F. ZING, and M. GHURAB, “Wireless sensor networks of battlefields hotspot: Challenges and solutions,” 2009, doi: 10.4108/icst.wiopt2008.2983.
- [38] M. BOUDIA and R. OMAR, “AGREGATION DES DONNEES ET SECURITE DES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL,” UNIVERSITE DE TLEMCCEN, 2014.
- [39] D. NGOM, “Optimisation de la durée de vie dans les réseaux de capteurs sans fil sous contraintes de couverture et de connectivité réseau Diery Ngom To cite this version : HAL Id : tel-01531464 Thèse de Doctorat Optimisation de la durée de vie dans les réseaux de cap,” 2017.
- [40] S. SHARMA, R. K. BANSAL, and S. BANSAL, “Issues and challenges in wireless sensor networks,” *Proc. - 2013 Int. Conf. Mach. Intell. Res. Adv. ICMIRA 2013*, no. December 2013, pp. 58–62, 2014, doi: 10.1109/ICMIRA.2013.18.
- [41] S. INGRACHEN and S. OUBABAS, “Elaboration d’un protocole de routage efficace en énergie pour les réseaux de capteurs sans fil,” UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU, 2013.
- [42] L. KANOUNI, “Optimisation de la délivrance des données dans les réseaux véhiculaires à base de réseaux de capteurs sans fil.,” A.MIRA-BEJAIA, 2023.
- [43] R. SOUADIH, “La gestion de la couverture dans les réseaux véhiculaires à base des réseaux de capteurs sans fil,” 2016.
- [44] E. WEINGÄRTNER and F. KARGL, “A Prototype Study on Hybrid Sensor-Vehicular Networks,” *Sensornetzwerke*, p. 79, 2007, [Online]. Available: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.86.6470&rep=rep1&type=pdf#page=82>
- [45] F. ANANE, “La délivrance des alertes dans les réseaux véhiculaires à base des réseaux de capteurs dans fil,” Université Ferhat Abbas Sétif 1, 2020.
- [46] M. SADOU and L. BOUALLOUCHE-MEDJKOUNE, “Hybrid sensor and vehicular networks: A survey,” *Int. J. Veh. Inf. Commun. Syst.*, vol. 3, no. 3, pp. 204–229, 2017, doi:

Bibliographie

10.1504/IJVICS.2017.087608.

- [47] T. BENSIRADJ, S. MOUSSAOUI, and S. HASNI, “Proposition D’un Protocole De Communication Dans Un Réseau Hybride Pour Améliorer La Sécurité Routière,” 2015.
- [48] R. SOUADIH and F. SEMCHEDINE, “Energy-efficient coverage and connectivity of wireless sensor network in the framework of hybrid sensor and vehicular network,” *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 44, no. 5, pp. 444–454, 2022, doi: 10.1080/1206212X.2020.1808346.
- [49] B. WANG, “Coverage Problems in Sensor Networks : A Survey,” vol. 43, no. 4, 2011, doi: 10.1145/1978802.1978811.
- [50] R. U. KALKUNDRI, R. KHANAI, and K. PRAVEEN, “Survey on Security for WSN based VANET using ECC,” *Int. Ann. Sci.*, vol. 8, no. 1, pp. 30–37, 2019, doi: 10.21467/ias.8.1.30-37.
- [51] T. K. BHATIA, R. K. RAMACHANDRAN, R. DOSS, and L. PAN, “Data congestion in VANETs: research directions and new trends through a bibliometric analysis,” *J. Supercomput.*, vol. 77, no. 7, pp. 6586–6628, 2021, doi: 10.1007/s11227-020-03520-7.
- [52] A. GHAFFARI, “Congestion control mechanisms in wireless sensor networks: A survey,” *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 52, pp. 101–115, 2015, doi: 10.1016/j.jnca.2015.03.002.
- [53] “<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/technologies-de-l-information-th9/internet-des-objets-42612210/technologie-zigbee-802-15-4-te7508/presentation-generale-te7508niv10001.html>,” Consulté le 31/03/2024.
- [54] “<https://www.sinopetech.com/blog/2019/04/08/zigbee-101-tout-ce-que-vous-devez-savoir/>,” Consulté le 03/04/2024.
- [55] H. ZHU *et al.*, “Review of state-of-the-art wireless technologies and applications in smart cities,” *Proc. IECON 2017 - 43rd Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.*, vol. 2017-Janua, pp. 6187–6192, 2017, doi: 10.1109/IECON.2017.8217074.
- [56] “<https://www.ram-center.com/blog/bluetooth-low-energy-interface-ble/>,” Consulté le 03/04/2024.
- [57] “<https://www.sigfox.com/what-is-sigfox/>,” Consulté le 03/04/2024.

Bibliographie

- [58] “<https://www.giga-concept.fr/technologies/protocole-sigfox/>,” Consulté le 03/04/2024.
- [59] “<https://www.radiofrquences.gouv.fr/les-autres-technologies-sans-fil-wifi-wimax-a86.html#:~:text=Contrairement%20au%20WiFi%2C%20le%20WiMAX,raccord%C3%A9s%20%C3%A0%20une%20m%C3%Aame%20station.>,” Consulté le 08/05/2024.
- [60] “<https://www.redhat.com/fr/topics/5g-networks>,” consulté le 11/06/2024.
- [61] S. DJAHEL and Y. GHAMRI-DOUDANE, “A framework for efficient communication in hybrid sensor and vehicular networks,” *2012 IEEE Consum. Commun. Netw. Conf. CCNC’2012*, no. October, pp. 209–214, 2012, doi: 10.1109/CCNC.2012.6181088.
- [62] S. SAXENA, S. MISHRA, A. KUMAR, and D. S. CHAUHAN, “Efficient Power Utilization Techniques for Wireless Sensor Networks – A Survey,” *Int. J.*, vol. 3, no. 2, pp. 905–925, 2011.
- [63] T. BENSIRADJ and S. MOUSSAOUI, “Strategy efficient to extend the lifetime of wireless sensor networks in a framework of hybrid sensors and vehicular networks for road safety,” 2019, doi: 10.1049/iet-wss.2019.0056.
- [64] B. HAMLILI, K. BENAHMED, and B. GASBAOUI, “La gestion d’énergie dans les réseaux de capteurs sans fil,” *CEUR Workshop Proc.*, vol. 1849, pp. 37–44, 2017.
- [65] V. RAGHUNATHAN, S. GANERIWAL, and M. SRIVASTAVA, “Emerging techniques for long lived wireless sensor networks,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 44, no. 4, pp. 108–114, 2006, doi: 10.1109/MCOM.2006.1632657.
- [66] N. SGHAIER, “Techniques de conservation de l’énergie dans les réseaux de capteurs mobiles découverte de voisinage et routage,” UNIVERSITÉ PARIS-EST, 2013.
- [67] I. DIANE, “Optimisation de la consommation d’énergie par la prise en compte de la redondance de mesure dans les réseaux de capteurs,” 2014.
- [68] R. KACIMI, “Techniques de conservation d’énergie pour les réseaux de capteurs sans fil,” DOCTORAT DE L’UNIVERSITE DE TOULOUSE, 2009.
- [69] A. KUMAR, P. DADHEECH, and U. CHAUDHARY, “Energy Conservation in WSN: A Review of Current Techniques,” *Proc. 3rd Int. Conf. Emerg. Technol. Comput. Eng. Mach. Learn. Internet Things, ICETCE 2020*, no. February, pp. 256–263, 2020, doi:

Bibliographie

10.1109/ICETCE48199.2020.9091736.

- [70] P. SINGLA and A. MUNJAL, “Topology Control Algorithms for Wireless Sensor Networks: A Review,” *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 113, no. 4, pp. 2363–2385, 2020, doi: 10.1007/s11277-020-07331-0.
- [71] B. CHAIB-DRAA, I. JARRAS, and B. MOULIN, “Systèmes multiagents : Principes généraux et applications,” *J. P. Briot Y. Demazeau « Agent systèmes multiagents » chez Hermès en*, 2001, [Online]. Available: <http://www.fineprint.com>
- [72] A. RAHMANI, “Modélisation et simulation système multi-agent de la propagation d’une épidémie covid-19,” 2022.
- [73] K. BENHAMZA, “Conception d’un système multi-agents adaptatif pour la résolution de .problème,” 2016
- [74] R. BOUCHEBBAH and H. DJERMANI, “Adaptation du simulateur multi-agents NetLogo pour modéliser et simuler le routage dans un réseau mobile Ad hoc [Couche Réseau , Protocole AODV],” 2020.
- [75] S. ARSÈNE, B. MOURAD, and D. SYLVAIN, “Systèmes Multi-agents: une analyse comparative des méthodologies de développement,” Sherbrooke, 2001.
- [76] “<https://www.semanticscholar.org/paper/Les-Syst%C3%A8mes-multi-agents%3A-vers-une-intelligence-Ferber/bdbab64f119657e6be4e82c96ed6c4c41ad7d029>,” Consulté le 10/04/2024.
- [77] M. MAEIR, “Architecting Principles for Systems-of-Systems,” *Syst. Eng.*, vol. 1, no. 4, pp. 267–284, 1998.
- [78] C. NCUBE, S. L. LIM, and H. DOGAN, “Identifying top challenges for international research on requirements engineering for systems of systems engineering,” *2013 21st IEEE Int. Requir. Eng. Conf. RE 2013 - Proc.*, no. July, pp. 342–344, 2013, doi: 10.1109/RE.2013.6636746.
- [79] M. A. ASSAAD, R. TALJ, and A. CHARARA, “A view on Systems of Systems (SoS),” 2018.
- [80] J. BOARDMAN and B. SAUSER, “System of Systems - The meaning of of,” *Proc. 2006 IEEE/SMC Int. Conf. Syst. Syst. Eng.*, vol. 2006, no. May, pp. 118–123, 2006, doi: 10.1109/sysose.2006.1652284.

Bibliographie

- [81] J. EL HACHEM, V. CHIPRIANOV, V. V. GRACIANO NETO, and P. ANIORTE, “Extending a multi-agent systems simulation architecture for systems-of-systems security analysis,” *2018 13th Syst. Syst. Eng. Conf. SoSE 2018*, pp. 276–283, 2018, doi: 10.1109/SYSOSE.2018.8428776.
- [82] B. BELATTAR, “Modélisation & Simulation sur Ordinateur,” 2004.
- [83] S. FOURNIER, “Intégration de la dimension spatiale au sein d’un modèle multi-agents à base de rôles pour la simulation : Application à la navigation maritime,” 2008.
- [84] T. ISSARIYAKUL and E. HOSSAIN, *Introduction to Network Simulator 2 (NS2)*. 2012.
- [85] L. CAMPANILE, M. GRIBAUDO, M. IACONO, F. MARULLI, and M. MASTROIANNI, “Computer network simulation with ns-3: A systematic literature review,” *Electron.*, vol. 9, no. 2, pp. 1–25, 2020, doi: 10.3390/electronics9020272.
- [86] “<https://omnetpp.org/intro/>,” consulté le 22/06/2024.
- [87] M. BABIS and M. Peter, “NetLogo - An alternative way of simulating mobile ad hoc networks,” *Proc. 2012 5th Jt. IFIP Wirel. Mob. Netw. Conf. WMNC 2012*, pp. 122–125, 2012, doi: 10.1109/WMNC.2012.6416163.
- [88] G. H. ADDAY, S. K. SUBRAMANIAN, Z. A. ZUKARNAIN, and N. SAMIAN, “Investigating and Analyzing Simulation Tools of Wireless Sensor Networks: A Comprehensive Survey,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 22938–22977, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3362889.
- [89] T. PARIS, L. CIARLETTA, and V. CHEVRIER, “Co-simulation à base d’outils multi-agents : un cas d’étude avec NetLogo,” 2018.
- [90] A. KUMAR, S. K. KAUSHIK, R. SHARMA, and P. RAJ, “Simulators for wireless networks: A comparative study,” *Proc. Turing 100 - Int. Conf. Comput. Sci. ICCS 2012*, pp. 338–342, 2012, doi: 10.1109/ICCS.2012.65.

Résumé

Les réseaux hybrides capteurs-véhicules (HSVN) émergent comme une technologie révolutionnaire, fusionnant les Réseaux Ad hoc Véhiculaires (VANET) et les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF). Cette combinaison vise à renforcer la sécurité routière et détecter en temps réel les dangers potentiels.

Dans le cadre de notre recherche, nous avons mené des simulations approfondies, en utilisant le simulateur NetLogo, des réseaux HSVN dans deux contextes distincts : une ville intelligente et une zone forestière. Concernant la ville intelligente, nous avons démontré le potentiel des HSVN pour diverses applications comme : le stationnement intelligent, la gestion intelligente des feux de signalisation, etc. Quant à la zone forestière, nous avons simulé la détection d'un feu de forêt par les nœuds capteurs déployés dans cette zone et la communication de cet événement aux véhicules en utilisant la méthode du clustering.

Grâce à NetLogo qui nous a permis de mieux comprendre et concevoir ces réseaux complexes, nous avons pu mettre en évidence le rôle crucial des réseaux HSVN dans le renforcement de la sécurité, l'optimisation de l'efficacité et la promotion de la durabilité au sein des villes intelligentes et des zones rurales.

Mot clés : Les réseaux hybrides capteurs-véhicules, HSVN, les réseaux ad hoc véhiculaires, VANET, les réseaux de capteurs sans fil, WSN, Sécurité routière, Détection en temps réel, NetLogo, ville intelligente, clustering

Abstract

Hybrid Sensor-Vehicular Networks (HSVN) are emerging as a revolutionary technology, merging Vehicular Ad hoc Networks (VANET) and Wireless Sensor Networks (WSN). This combination aims to enhance road safety and detect potential hazards in real time.

As part of our research, we conducted in-depth simulations, using the NetLogo simulator, of HSVN networks in two distinct contexts: a smart city and a forest area. With regard to smart city, we have demonstrated the potential of HSVNs for various applications such as : smart parking, intelligent light management, etc. For the forest area, we simulated the detection of a forest fire by the sensor nodes deployed in that area and the communication of this event to vehicles using the clustering method. With the use of NetLogo, which has enabled us to better understand and design these complex networks, we have been able to highlight the crucial role of HSVN networks in enhancing security, optimizing efficiency and promoting sustainability in smart cities and rural areas.

Keywords : Hybrid Sensor-Vehicular Networks, HSVN, Vehicular Ad hoc Networks, VANET, Wireless Sensor Network, WSN, Road safety, Real-time detection, NetLogo, smart city, clustering