

UNIVERSITE DE BLIDA 1

Faculté des Sciences

Département d'Informatique

THESE DE DOCTORAT LMD

En Science Informatiques.

ETUDE ET CONCEPTION DES ALGORITHMES ET DES MÉCANISMES DE TRANSPORT DE DONNÉES AVEC LA PRISE EN COMPTE DE LA COEXISTENCE TECHNOLOGIQUE DANS L'INTERNET DES VÉHICULES

Par

Mahmoud BERSALI

Devant le jury composé de :

Mr. Y. CHERFA	Professeur, U. de Blida 1	Président
Mr. A. KACI	Maître de conférences, E. ENST	Examineur
Mme. M.FARAH	Maître de conférences, U. de Blida 1	Examinatrice
Mme. H. ABED	Professeur, U. de Blida 1	Directrice de thèse
Mr. A. RACHEDI	Professeur, U. Gustave Eiffel	Co-Directeur de thèse

Blida, Février 2023

Remerciements

Avant tout, je tiens à remercier Dieu tout-puissant de m'avoir donné la force, la patience, la foi et le courage pour accomplir ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude, mes sincères remerciements et toute ma reconnaissance à l'égard de mes directeurs de thèse, Madame Hafida ABED et Monsieur Abderrazak RACHEDI. Je les remercie d'avoir accepté de diriger ce travail et pour leurs précieux conseils, leur patience, et surtout leur générosité. Je souhaite exprimer ma grande reconnaissance aux professeurs du département d'informatique de l'université de Blida1 qui m'ont tant apporté pour devenir ce que je suis aujourd'hui.

Par ailleurs, je tiens à remercier vivement les membres du jury qui ont fait l'honneur d'accepter de participer en tant qu'examineurs à ma soutenance.

Enfin, merci à toutes les personnes qui ont aidé de près ou de loin à la réalisation de ce travail. Je dédie cette thèse à mes parents pour leur motivation et leur encouragement constant, ainsi qu'à ma sœur ASMA, à mes frères et à toute ma famille.

ملخص

الأشياء المتصلة بالانترنت مثل السيارات ذاتية القيادة والطائرات بدون طيار وأجهزة الاستشعار والآلات الصناعية والأجهزة المنزلية تشكل مجموعة تسمى إنترنت الأشياء. وفقاً للدراسات التي أجرتها Stastita و IoT و Analytics و Gartner، يمكن أن يزيد عدد الأشياء المتصلة من أقل من 10 مليارات إلى أكثر من 25 ملياراً ، مما يعطي إجمالاً تراكمياً أقل من 50 ملياراً للنطاق المنخفض وإلى أكثر من 200 مليار للنطاق المرتفع بحلول عام 2025 [1]. لذلك ، يتم إنشاء بيانات ضخمة بواسطة هذه الأشياء وسيشغل نقلها نسبة 35٪ من حركة مرور الشبكة على مستوى العالم [2]. لم تعد البنية التحتية للشبكة الحالية (سلكية ولاسلكية بشكل خاص) قادرة على دعم مثل هذا الحمل.

تركز هذه الرسالة على إنترنت المركبات (IoV) حيث تعتبر السيارة شيئاً متحرك مزود بعدة أجهزة استشعار وواجهات اتصالات لاسلكية. الهدف الرئيسي من هذا العمل هو تصميم الحلول التي تتيح النقل الفعال للبيانات ، وإنشاء اتصال شبكة موثوق به وتقليل الحمل الزائد على الشبكة في سياق إنترنت المركبات.

لتحقيق أهدافنا: (1) قدمنا نهج تجميع تعاوني جديد لإنترنت المركبات (CCA-IoV) ، مناسب لبيئات الطرق السريعة والذي يستفيد من قدرات الحوسبة والتخزين الكبيرة للمركبات الحديثة لتشغيل عملية التجميع باستخدام نقاط العقدة (SC) والتعاون بين المركبات. (2) لقد اقترحنا امتداداً للنهج (CCA-IoV) والذي يفتح النموذج السابق باستخدام طريقتين رياضيتين لصنع القرار متعدد المعايير (MCDM) تسمى AHP و PROMETHEE. بالإضافة إلى ذلك ، يدعم هذا الامتداد استقرار المجموعة عن طريق اختيار نائب قائد المجموعة بالإضافة إلى قائد المجموعة. (3) لقد اقترحنا حلاً يستخدم نموذج الشبكة العصبية التلافيفية (CNN) للتنبؤ بفئة تنقل المستخدم النهائي لاختيار مراحل متنقلة مناسبة دون اللجوء إلى بنية تحتية ثابتة للاتصال بالشبكة.

لتقييم عملنا ، استخدمنا مجموعة من المحاكيات مثل NS3 و SUMO و ++ Omnet لاختبار الخوارزميات المقترحة بشكل صحيح ، والتي أعطت نتائج مقنعة ، متجاوزة الخوارزميات الأساسية المذكورة.

الكلمات المفتاحية: إنترنت الأشياء (IoT) ، إنترنت المركبات (IoV) ، اتصالات المركبات (V2X) ، التجميع ، تقييم الأداء.

RESUME

Les objets connectés comme les voitures autonomes, les drones, les capteurs, machines industrielles et appareils ménagers forment un ensemble nommé l'Internet des Objets. Selon les études menées par Statista, IoT Analytics and Gartner, le nombre d'objets connectés pourrait augmenter entre moins de 10 milliards jusqu'à plus de 25 milliards, ce qui donne un total cumulé à moins de 50 milliards pour la fourchette basse et à plus de 200 milliards pour la fourchette haute d'ici 2025 [1]. Par conséquent, des données massives sont générées par ces objets et leurs transports occuperont 35% du trafic réseau au niveau mondial [2]. L'infrastructure réseau actuelle (filaire et en particulier sans fil) n'est plus en mesure de supporter une telle charge.

Cette thèse se focalise sur l'Internet des véhicules (IoV) où le véhicule est considéré comme un objet mobile doté de plusieurs capteurs et d'interfaces de communication radio. L'objectif principal de ce travail consiste à concevoir des solutions qui permettent de transporter de données de manière efficace, d'établir une connectivité réseau fiable et de réduire la surcharge du réseau dans le contexte de l'internet des véhicules.

Pour atteindre nos objectifs : (1) nous avons introduit une nouvelle approche de clustering collaboratif pour l'Internet des véhicules (CCA-IoV), adaptée aux environnements autoroutiers et qui tire parti des importantes capacités de calcul et de stockage des véhicules modernes pour faire opérer le processus de clustering en utilisant le score du nœud (SC) et la coopération inter-véhicules. (2) nous avons proposé une extension de l'approche (CCA-IoV) qui affine le modèle précédent, en utilisant deux méthodes mathématiques de prise de décision multicritères (MCDM) appelées AHP et PROMETHEE. En outre, cette extension soutient la stabilité des clusters en sélectionnant un vice-chef de cluster en complément du chef de cluster. (3) nous avons proposé une solution qui utilise un modèle de réseau neuronal convolutif (CNN) pour prédire la classe de mobilité de l'utilisateur final afin de choisir les relais mobiles appropriés sans avoir recours à une infrastructure fixe pour la connexion au réseau.

Pour valider notre travail, nous avons utilisé une combinaison de simulateurs tels que NS3, SUMO et Omnet++ pour tester de manière appropriée les algorithmes proposés, qui ont donné des résultats convaincants, dépassant les algorithmes de base mentionnés.

Mots clés : Internet des objets (IoT), Internet des véhicules (IoV), Communication véhiculaire (V2X), Clustering, Evaluation de performance.

SUMMARY

Connected objects such as autonomous cars, drones, sensors, industrial machines and household appliances form a whole called the Internet of Things. According to studies conducted by Statista, IoT Analytics and Gartner, the number of connected objects could grow from less than 10 billion to more than 25 billion, resulting in a cumulative total of less than 50 billion in the low range and more than 200 billion in the high range by 2025 [1]. Therefore, massive data is generated by these objects and their transport will occupy 35% network traffic globally [2]. The current network infrastructure (wired and especially wireless) is no longer able to support such a load.

This thesis focuses on the Internet of Vehicles (IoV) where the vehicle is considered as a mobile object with multiple sensors and radio communication interfaces. The main objective of this work is to design solutions that enable efficient data transport, establish reliable network connectivity and reduce network overhead in the context of the Internet of Vehicles.

To achieve our goals : (1) we introduced a novel collaborative clustering approach for the Internet of Vehicles (CCA-IoV), adapted to highway environments, which takes advantage of the large computational and storage capabilities of modern vehicles to operate the clustering process using node score (SC) and inter-vehicle cooperation. (2) We proposed an extension of the approach (CCA-IoV) and which refines the previous model by using two mathematical multi-criteria decision making (MCDM) methods called AHP and PROMETHEE. In addition, this extension supports cluster stability by selecting a cluster vice-leader to complement the cluster leader. (3) We proposed a solution that uses a convolutional neural network (CNN) model to predict the mobility class of the end user to select appropriate mobile relays without using a fixed infrastructure for network connection.

To validate our work, we used a combination of simulators such as NS3, SUMO and Omnet++ to appropriately test the proposed algorithms, which yielded convincing results, outperforming the basic algorithms mentioned.

Keywords : Internet of Things(IoT), Internet of Vehicles(IoV), Vehicular Communication (V2X), Clustering, Performance Evaluation.

Table des matières

Remerciements	iii
Résumé	v
Introduction générale	1
0.1 Contexte et problématique :	2
0.2 Organisation du manuscrit :	5
1 L'internet des véhicules	7
1.1 Introduction	7
1.2 L'Internet des véhicules	8
1.2.1 Contexte et motivation	9
1.2.1.1 VANETs conventionnels	9
1.2.1.2 Motivations	10
1.2.1.3 Aperçu sur l'IoV	13
1.2.2 Architecture en couches et pile de protocoles en IoV	15
1.2.2.1 Architecture en couches	15
1.2.2.2 Pile de protocoles	18
1.2.3 Modèle de réseau IoV	21
1.2.3.1 Cloud	22
1.2.3.2 Connexion	24
1.2.3.3 Client	30
1.2.4 Avantages de l'Internet des Véhicules	38
1.2.5 Les défis du réseau IoV	41
1.2.6 Simulations et modèles de mobilité pour l'IoV	42
2 Transport de données dans l'internet des véhicules	45
2.1 Introduction	45
2.2 Transport de données dans l'IoV	45
2.2.1 Etude de l'existant	48
2.2.1.1 Clustering	48

2.2.1.2	Selection des relais	51
2.2.2	Termes et définitions	54
2.2.2.1	Critères	54
2.2.2.2	Méthodes d'aide à la décision multicritères	56
2.2.2.3	Réseaux Neuronaux Convolutionnels Unidimensionnels (1D CNN)	64
2.3	Conclusion	66
3	Une nouvelle approche de clustering collaboratif pour l'IoV (CCA-IoV)	67
3.1	INTRODUCTION	67
3.2	Préliminaires :	69
3.2.1	configuration du réseau :	69
3.2.2	Score du noeud :	69
3.3	Approche proposée :	70
3.3.1	Construction :	70
3.3.1.1	Exploration du voisinage :	70
3.3.1.2	Évaluation du noeud :	71
3.3.1.3	Sélection du CH :	71
3.3.1.4	Annonce :	71
3.3.1.5	Sélection du VCH :	71
3.3.2	Maintenance :	72
3.3.2.1	Quitter un cluster :	72
3.3.2.2	Rejoindre un cluster :	73
3.4	Résultats de la simulation :	74
3.4.1	Durée du CH :	75
3.4.2	Durée du CM :	75
3.4.3	Clusters SUM :	76
3.5	Conclusion :	77
4	Une nouvelle approche de clustering coopératif basée sur les méthodes MCDM pour l'Internet des véhicules	79
4.1	Introduction :	79
4.2	Approche proposée :	81
4.2.1	Construction :	81
4.2.2	Maintenance :	83
4.2.2.1	Quitter un cluster	83

4.2.2.2	Rejoindre un cluster	83
4.3	Évaluation des performances :	85
4.3.1	Analyse expérimentale	85
4.3.2	Paramètres de comparaison	87
4.3.2.1	La durée du CH	87
4.3.2.2	La durée du CM	88
4.3.2.3	La somme des clusters	88
4.4	Conclusion :	89
5	Réseau neuronal convolutif pour la sélection de relais dans l'Inter- net des véhicules	91
5.1	Introduction	91
5.2	Architecture et modèle de classification	92
5.2.1	Architecture proposée :	93
5.2.2	Modèle de classification :	94
5.2.2.1	DataSet :	94
5.2.2.2	Processus d'apprentissage :	96
5.3	Évaluation des performances	98
5.3.1	Configuration de la simulation :	98
5.3.2	Résultats de la simulation :	98
5.3.2.1	Taux de livraison des paquets (PDR)	99
5.3.2.2	Délai de bout en bout	99
5.3.2.3	Utilisation du débit	101
5.4	Conclusion	101
6	Conclusion et Perspectives	103

Table des figures

1.1	Les architectures de communication des VANETs : (a) WAVE basé Wi-Fi;(b) Adhoc; (c) Hybride	10
1.2	La prévision des ventes de voitures connectées jusqu'en 2025	13
1.3	Les cinq types de communications véhiculaires de l'IoV	14
1.4	L'architecture à cinq couches de l'IoV	16
1.5	La pile de protocoles pour l'architecture à cinq couches de l'IoV.	19
1.6	Les trois éléments de réseau de l'IoV.	21
1.7	Le rôle du cloud computing en tant que trois niveaux d'opération.	23
1.8	La relation logique des composantes du TPNIO.	25
1.9	La relation logique des composantes du GIN.	27
1.10	La classification des WAT pour les applications de l'IoV.	29
1.11	La taxonomie des applications clients de l'IoV.	30
2.1	Structure hiérarchique AHP	57
2.2	Algorithme AHP	59
2.3	Algorithme PROMETHEE	64
2.4	Schéma d'un 1D CNN	65
2.5	Architecture d'un 1D CNN simple	66
3.1	Construction du Cluster.	72
3.2	Duration du CH	75
3.3	Duration du CM	76
3.4	Clusters SUM	76
4.1	Processus de construction des Clusters	84
4.2	Capture d'écran depuis OSM.	85
4.3	La duration du CH	87
4.4	La duration du CM	88
4.5	La somme des clusters	89
5.1	Architecture proposée	93

5.2	L'architecture de réseau du modèle 1D-CNN	94
5.3	Résumé de l'architecture du modèle	96
5.4	Le taux de livraison des paquets à différentes charges	100
5.5	Le délai de bout en bout	100
5.6	L'utilisation du débit	101

Liste des tableaux

1.1	La préférence prioritaire du WAT	29
1.2	La préférence prioritaire du WAT pour les clients	37
1.3	La comparaison qualitative entre l'IoV et les VANETs.	40
2.1	Tableau comparatif des méthodes d'aide à la décision multi-critère	56
2.2	Échelle de comparaison standardisée à 9 niveaux	58
2.3	Tableau d'évaluation	60
2.4	Importance of criteria	60
3.1	Paramètres de simulation	74
4.1	Paramètres de simulation	86
5.1	Paramètres de simulation	99

Liste des abréviations

AC	Autonomous Cloud
ADV	Advertisement
AS	Application Service
BDA	Big Data Analysis
C-ITS	Cooperative Intelligent Transport Systems
C2C	Car-2-Car communication
C2C-net	Car2Car network protocol
CALM	Communications access for land mobiles
CALM-SL	CALM Service Layer
CaaS	Cooperation as a Service
CC	Cloud Computing
CH	Chef de Cluster
CM	Membre de Cluster
CMM	Commercialization
CO	Connectivity
COMaaS	Computing as a Service
CPU	Central Processing Unit
CT	Communication Types
DaaS	Data as a Service
DC	Device Compatibility
DM	Decision Making
DS	Date Size
ENaaS	Entertainment as a Service
FAV	Foreign Agent Vehicle
FAST	Fast Application and Communication Enabler
GaaS	Gateway as a Service
GAAB	Global Authentication, Authorization and Billing
GHM	Global Handoff Manager

GIN Gateway of Internetworking

GPS Global Positioning System

GSM Global System for Mobile communication

HAV Home Agent Vehicle

HSM Hardware Security Module

HyDRA Heterogeneous physical Devices in a DistRibuted Architecture

INaaS Infrastructure as a Service

INS Insurance

IoT Internet of Things

IoT-A Internet of Things Architecture

IoT6 Internet of Things through IPv6

IoV Internet of Vehicles

IS Internet Service

LAAB Local Authentication, Authorization and Billing

LLC Logical Link Control

LTE Long Term Evolution

M2M Machine-to-Machine

MIP Mobile IP

MM Mobility Management

MOST Media Oriented System Transport

NA Network Architecture

NaaS Network as a Service

NAW Network Awareness

NDB Network Database

NFC Near Field Communication

NDN Named Data Networking

OB Objectives

ODB Operator Database

OAA Open Automobile Alliance

PC Processing Capability

- PICaaS** Picture as a Service
- PIB** Produit Intérieur Brut
- QoS** Quality Of Service
- RSU** Road Side Unit
- RTOS** Real Time Operating Systems
- S-IC** Security Information Connector
- S-MIB** Security Management Information Base
- SAL** Sale
- SBO** Smart Business Oriented
- SC** Scalability
- SER** Service
- SLA** Service Level Agreement
- SM** Service Management
- SOA** Service-Oriented Architecture
- SSE** Smart Safety and Efficiency
- STaaS** cloud services Storage as a Service
- STI** Système de Transport Intelligent
- TM** Traffic Management
- TPNIO** Third Party Network Inter Operator
- VANET** Vehicular Ad-Hoc Network
- V2I** Vehicle-to-Infrastructure
- V2P** Vehicle-to-Personal devices
- V2R** Vehicle-to-Roadside unit
- V2S** Vehicle-to-Sensors
- V2V** Vehicle-to-Vehicle
- VCC** Vehicular Cloud Computing
- VCH** Vice Chef de Cluster
- VCPS** Vehicular Cyber Physical System
- VNDN** Vehicular Named Data Networking
- WAT** Wireless Access Technology

WAVE Wireless Access in Vehicular Environment

WLAN Wireless Local Area Network

WiFi Wireless Fidelity

WiMax Worldwide Interoperability for Microwave Access

WSMP Wave Short Message Protocol

Introduction générale

Au cours de la dernière décennie, le monde a connu une grande évolution dans l'industrie automobile, ce qui a conduit à une augmentation considérable du nombre de véhicules. Cette révolution a certes facilité la vie quotidienne des peuples et a même permis l'accélération de la croissance économique dans le monde, mais elle a aussi engendré certains défis, tels que la congestion routière, les accidents de la circulation, la consommation d'énergie et la pollution environnementale [1]. Ces questions ont ouvert la voie à des innovations mondiales, qui ont contribué à la naissance du concept de réseau de véhicules. Ce concept est fourni par un réseau ad hoc de véhicules (VANET), qui permet aux véhicules de communiquer avec d'autres véhicules (V2V) et aux unités de bord de route (V2R) via des messages.

Dans les VANETs, chaque véhicule est soit une source, soit une destination, soit une passerelle dans le réseau, ce qui permet de créer un réseau à large portée [2]. Cependant, lorsqu'un véhicule sort de la portée du réseau, il devient un nœud orphelin. En conséquence, on peut conclure que VANET ne couvre qu'un très petit réseau mobile en raison des contraintes de mobilité et du nombre de véhicules connectés [3].

Au cours des dernières années, il n'y a pas eu de mise en œuvre classique ou populaire de VANET. Les intérêts commerciaux souhaités n'ont pas non plus émergé. Par conséquent, l'utilisation de VANET a commencé à stagner. L'émergence de l'Internet des objets (IoT) a conduit à l'évolution des VANET classiques vers un nouveau paradigme appelé Internet des véhicules (IoV). L'IoV peut être considéré comme un nouveau paradigme du système de transport intelligent. Il étend l'échelle, la structure et les applications de VANETs. Cette évolution conduit à l'émergence de nouvelles interactions au niveau de la route entre les véhicules, les hommes et les infrastructures. Le paradigme IoV est un large éventail de technologies et d'applications, notamment les transports intelligents, les services d'information sur les véhicules, les technologies modernes d'information et de communication et l'électronique automobile.

0.1 Contexte et problématique :

Ces dernières années, nous avons assisté à une évolution significative des réseaux ad hoc de véhicules (VANET), principalement en raison des différents besoins actuellement exprimés en termes de sécurité et de confort routier. Ils peuvent offrir à la fois aux conducteurs et aux passagers. L'émergence de l'Internet des objets (IoT) a conduit à l'évolution des VANETs conventionnels vers un nouveau paradigme appelé Internet des véhicules (IoV). Ce dernier peut être considéré comme un nouveau paradigme de système de transport intelligent (STI). Selon des statistiques récentes, 15 milliards de " objets " sont connectés à l'Internet en 2015 et 75 milliards de " objets " seront connectés à l'Internet d'ici 2025, parmi lesquels les véhicules constitueront une part importante [4].

La différence du concept de véhicule dans les réseaux VANET et IoV rend ces deux paradigmes essentiellement différents en termes de dispositifs, de technologies de communication, de défis, d'exigences, de services et d'applications. Dans le VANET, un véhicule est considéré comme un nœud mobile utilisé pour diffuser des messages entre les véhicules et les infrastructures. D'autre part, un véhicule dans l'IoV est considéré comme un objet mobile intelligent doté d'un puissant système multicapteur, de technologies de communication et d'une connectivité IP à l'Internet, aux infrastructures et aux autres véhicules [5]. En outre, un véhicule dans l'IoV est perçu comme un système de communication mobile dynamique, qui permet les modes de communication suivants : mode composants intra-véhicule et mode véhicule à X (V2X), où X peut être le véhicule, la route, l'infrastructure, l'homme, le cloud ou Internet. Par conséquent, l'IoV permet l'acquisition et le traitement d'une grande quantité de données (big data) provenant de différentes zones géographiques via les systèmes informatiques des véhicules intelligents afin d'offrir aux conducteurs et aux passagers diverses catégories de services de sécurité routière et d'autres services non liés à la sécurité.

Par rapport aux VANET classiques, l'IoV présente de nombreux avantages et caractéristiques spécifiques, tels que le développement et l'extension de l'exploitation des STI dans différents domaines de la recherche et de l'industrie. L'un des principaux avantages est la capacité d'intégrer plusieurs utilisateurs, plusieurs véhicules et plusieurs réseaux utilisant différentes technologies de communication. Cet avantage permet de partager des informations de sécurité entre les véhicules et de fournir des informations utiles, telles

que la disponibilité des hôtels, des parkings, des emplacements, des stations-service, et même des applications de confort pour les conducteurs. En outre, le système IoV permet d'exploiter les différentes technologies d'accès sans fil, ce qui facilite l'extension du réseau avec un nombre important de véhicules connectés. En outre, la technologie du Vehicular Cloud Computing (VCC) peut être intégrée dans les réseaux de véhicules. Cette technologie émergente permet de stocker des applications, des ressources et des données dans le Cloud, afin qu'elles puissent être utilisées par des clients à faible capacité. Par conséquent, la technologie VCC peut gérer la grande quantité de données générées par le nombre élevé de véhicules connectés [6].

Bien que l'IoV présente de nombreux avantages, elle doit relever un certain nombre de défis. Le principal défi est l'intégration de tous les composants et des communications entre objets dans l'écosystème IoV. Deuxièmement, l'augmentation rapide du nombre de véhicules et d'autres objets connectés au système IoV. Troisièmement, les données volumineuses à traiter et à stocker dans le réseau IoV, en raison du grand nombre de véhicules connectés. Ce défi affecte négativement la surcharge du réseau. Enfin, il a été constaté que l'IoV est confronté à de nombreux problèmes de mise en œuvre, tels que la sécurité et la fiabilité des communications entre véhicules et les multiples demandes d'assistance simultanées qui génèrent un grand nombre de collisions [7, 8]. Enfin, les défis qui existent déjà dans les réseaux VANET classiques, tels que la grande mobilité des véhicules, la topologie dynamique, densité variable, fragmentation du réseau et modèles de communication.

Compte tenu de toutes les problématiques évoquées ci-dessus, le choix d'une technique de structuration de réseau efficace pour le paradigme IoV est un sujet toujours d'actualité, d'autant plus que ce type de réseau est en pleine expansion, en raison de son énorme potentiel de contributions bénéfiques, notamment pour la sécurité dans laquelle la vie des individus est en jeu. Dans ce contexte, les chercheurs se sont tournés vers l'utilisation de nouvelles techniques de structuration de réseau, pour gérer leurs défis et fournir des conditions appropriées pour exécuter les différentes applications. En tant que technique importante de structuration de réseau utilisée dans les VANET classiques, le clustering a considérablement amélioré leurs performances par rapport à la structure plate classique dans de nombreuses applications, telles que la diffusion et l'agrégation de données, la qualité de service

(QoS), la minimisation de la surcharge du réseau, la sécurité routière, la sécurité, le contrôle d'accès aux canaux, la découverte de topologie, le confort des conducteurs et principalement les protocoles de routage [9,10].

Pour cette raison, nous avons concentré nos travaux sur la technique de clustering, qui est largement déployée dans les réseaux de véhicules pour améliorer les performances du système IoV et répondre à leurs exigences. Selon Yang et al. [11], le clustering est la technique qui consiste à diviser le réseau en groupes de nœuds appelés clusters. Chaque cluster a un chef de cluster et le reste des nœuds du cluster sont appelés membres du cluster. Ce regroupement est effectué en fonction des exigences de l'application afin de fournir une zone facilement gérable. Ainsi, les véhicules sont comparés les uns aux autres, de sorte que le plus similaire, selon certaines métriques, telles que les métriques de mobilité, les métriques de poids, les métriques de localisation géographique et les métriques d'information sur les voisins, est sélectionné pour rejoindre le même cluster. En général, la méthode de mise en cluster se compose de cinq phases principales : découverte du voisinage, sélection de la tête de cluster (CH), annonce, affiliation et maintenance [12]. La mise en cluster est donc un mécanisme clé pour la conception et la modélisation des protocoles et des applications des réseaux de véhicules afin d'assurer :

— **Équilibrage de la charge :**

La mise en cluster vise à répartir uniformément les tâches les plus coûteuses dans le réseau en observant la densité des nœuds et la taille des clusters afin d'éviter les points de congestion [13,14]. Cela permet de minimiser considérablement la surcharge totale du réseau.

— **Extensibilité :**

Le clustering vise un bon fonctionnement même avec un nombre élevé de nœuds sans affecter les performances du réseau.

— **Structure stable :**

Le clustering permet de former des clusters avec des structures plus stables dans un environnement très dynamique, car les clusters sont formés en tenant compte de différentes métriques liées aux nœuds, telles que : la mobilité, la position, la densité, la vitesse, etc.

— **Exploitation optimale de la bande passante :**

Pendant le processus de clustering, les membres interagissent uniquement avec leur CH, ce qui évite l'échange inutile de messages entre les

nœuds d'un même cluster. Par conséquent, le taux de collisions diminue de manière significative.

— **Qualité de service (QoS) :**

La grande mobilité des nœuds ou d'autres défauts transitoires peuvent provoquer des déconnexions fréquentes dans les liens de communications ce qui provoque un arrêt temporaire du service fourni par l'application du réseau. Il est donc nécessaire d'assurer et de fournir une haute qualité de service, même en présence de coupures dans les liens de communication, pour garantir le service requis [15].

0.2 Organisation du manuscrit :

Dans cette thèse, nous avons opté pour le format " articles ". Certains chapitres sont donc la transcription d'articles publiés dans des revues scientifiques ou des conférences. Ainsi, la thèse contient cinq chapitres divisés en deux parties principales : le background et les contributions, et elle est organisée comme suit :

Dans la partie Background :

— **Chapitre 1 :**

présente l'état de l'art sur l'internet des véhicules (IoV), son architecture, ses caractéristiques, ses défis, ses technologies de communication et ses applications.

— **Chapitre 2 :**

présente les mécanismes de transport de données dans l'Internet des véhicules, ainsi qu'un tour d'horizon des travaux existants dans ce domaine. Il aborde également les principales méthodes et techniques utilisées dans les contributions des chapitres suivants.

La partie contributions de cette thèse présente les approches proposées :

— **Chapitre 3 :**

présente un nouveau algorithme de clustering collaboratif pour l'Internet des véhicules nommé : CCA-IoV, qui tire parti des importantes capacités de calcul et de stockage des véhicules modernes pour opérer le processus de clustering. Ce dernier est basé sur le score de nœud (SC) introduit par notre approche et par la coopération entre les véhicules plutôt que par l'accès à des serveurs distants. CCA- IoV renforce

la structure de stabilité du cluster en choisissant un vice-chef de cluster en complément du chef de cluster.

— **Chapitre 4 :**

propose une nouvelle approche de clustering coopératif basée sur des méthodes de prise de décision multicritères (MCDM) pour l'IoV : CMC-IoV, qui combine les méthodes AHP (analyse multicritère hiérarchique) et PROMETHEE (méthode d'organisation du classement des préférences pour les évaluations d'enrichissement) pour sélectionner le leader le plus approprié pour chaque cluster. CMC-IoV soutient la stabilité du cluster en sélectionnant un vice-chef de cluster en complément du chef de cluster. Nous validons l'efficacité de l'approche proposée en utilisant un scénario réaliste de l'autoroute de 640, Knoxville, aux États-Unis, comme entrée du simulateur de réseau NS-3.

— **Chapitre 5 :**

il introduit une nouvelle stratégie qui applique l'apprentissage profond, en particulier un modèle de réseau neuronal convolutif (CNN), pour classer les utilisateurs en fonction de leurs type de mobilité. Les meilleurs utilisateurs sont ensuite sélectionnés pour servir de relais mobiles permettant aux utilisateurs finaux de se connecter à Internet. Par rapport à la sélection aléatoire ou à l'utilisation de relais fixes, les simulations montrent que la proposition peut prendre en charge un grand nombre d'utilisateurs simultanément, améliorer le taux de livraison des paquets, générer une topologie stable, et faire moins de retard.

— Nous concluons notre thèse par une brève discussion et quelques perspectives futures.

Chapitre 1

L'internet des véhicules

1.1 Introduction

Au cours de ces dernières années, l'industrie automobile a subi une évolution substantielle, entraînant une augmentation significative du parc automobile. Alors que cette révolution a indubitablement amélioré la qualité de vie quotidienne et impulsé la croissance économique mondiale, elle a également engendré des défis majeurs tels que la congestion routière, les accidents, la consommation d'énergie, et la pollution environnementale. Ces enjeux ont suscité des innovations à l'échelle mondiale, donnant naissance aux réseaux ad hoc véhiculaires (VANET), facilitant la communication entre les véhicules (V2V) et les infrastructures routières (V2I).

Toutefois, la portée du VANET demeure restreinte à un réseau mobile restreint en raison des contraintes liées à la mobilité et au nombre de véhicules connectés. Malgré l'absence d'une mise en œuvre généralisée et d'un intérêt commercial prépondérant pour le VANET, l'émergence de l'Internet des objets (IoT) a impulsé l'évolution des VANET conventionnels vers le paradigme novateur de l'Internet des véhicules (IoV), étendant ainsi l'échelle, la structure et les applications. L'IoV englobe diverses technologies, telles que le transport intelligent, les services d'information sur les véhicules, les technologies de l'information et de la communication modernes, ainsi que l'électronique automobile.

Ce chapitre introductif expose les concepts fondamentaux de l'IoV, explorant les définitions, l'architecture, les applications, les technologies de communication, les caractéristiques, les défis, ainsi que les exigences auxquels de tels réseaux sont confrontés.

1.2 L'Internet des véhicules

Le concept d'un environnement de réseau universel comprenant tous les réseaux hétérogènes existants est fortement expérimenté et modelé en raison du nombre croissant des objets connectés : par exemple, les véhicules sur la route, les Smartphones sur les mains des gens, les ordinateurs portables et les tablettes dans les bureaux, les téléviseurs et les systèmes de musique dans les maisons et d'autres appareils équipés de capteurs dans notre vie quotidienne. Ce réseau mondial d'objets n'est rien d'autre qu'un futur Internet qui est en train de prendre la forme d'un Internet des objets (IoT) pour les chercheurs et les praticiens des universités et des industries [16].

Dans l'IoT, des interfaces intelligentes sont utilisées pour une intégration fiable de réseau hétérogènes et de l'interopérabilité entre les différents dispositifs [17]. L'IoT intègre l'intelligence dans les domaines existants, par exemple la santé intelligente, la maison intelligente, l'énergie intelligente, l'industrie intelligente et les transports intelligents [18]. L'Internet des véhicules (IoV) est l'une des révolutions mobilisées par l'IoT. L'IoV évolue les réseaux ad hoc de véhicules (VANET) pour atteindre la vision "du smartphone à la voiture intelligente" [3].

L'objectif principal des VANET conventionnels était d'améliorer la sécurité et l'efficacité du trafic en utilisant la communication en temps réel entre les véhicules équipés d'une technologie d'accès sans fil avancée, avec ou sans l'aide des unités de bord de route (RSU). Bien qu'il ait un potentiel énorme pour résoudre les problèmes de sécurité et d'efficacité du trafic avec un coût opérationnel plus faible, le VANET n'a pas réussi à attirer l'intérêt commercial [19].

Le problème de la commercialisation des VANET comprend les problèmes liés à l'architecture de réseau purement adhoc [20], au manque de fiabilité du service Internet [21], à l'incompatibilité avec les appareils personnels [22], à l'indisponibilité du cloud computing [23], à la moindre précision des services et à la dépendance opérationnelle coopérative du réseau. En outre, malgré la modernisation continue des véhicules et des infrastructures routières qui considère la sécurité comme un objectif primordial, le nombre croissant de victimes de la route dans le monde entier est une sérieuse source de préoccupation.

Dans ce contexte, ce chapitre présente un cadre complet sur l'IoV en mettant

l'accent sur l'architecture, les applications, les technologies de communication, les caractéristiques, les défis et les exigences auxquels un tel réseau est confronté.

1.2.1 Contexte et motivation

1.2.1.1 VANETs conventionnels

En raison des importantes avancées de la recherche et de la technologie en matière de communication sans fil, le système de transport intelligent (STI) traditionnel a évolué vers la communication à bord des véhicules. Le concept de communication entre véhicules (V2V) et entre véhicules et unités routières (V2R) est né de la recherche et du développement d'un autre réseau de communication connu sous le nom de réseaux ad hoc de véhicules (VANET) [9]. Il permet la communication entre les véhicules routiers avec et sans l'aide d'une infrastructure préétablie le long des routes ou se déplaçant sur les routes.

Un certain nombre d'équipements de pointe liés à la technologie d'accès sans fil (WAT) de nouvelle génération sont intégrés aux véhicules. L'équipement comprend un écran d'affichage, un capteur, une antenne, une caméra, un radar, un Système mondial de positionnement (GPS), une unité centrale de traitement (CPU), etc. L'incorporation en tant qu'unités embarquées des véhicules permet la communication véhiculaire pour améliorer la sécurité, le confort et l'accessibilité. Dans un environnement de réseau de véhicules peu dense, des infrastructures préétablies ou des véhicules réguliers prédéfinis d'une ligne particulière, tels que des bus, sont utilisés comme unités de bord de route (RSU) pour assurer la communication entre les véhicules routiers [24].

L'architecture de communication des VANETs peut être divisée en trois catégories, dont l'accès sans fil dans les environnements de véhicules (WAVE) basé sur le Wi-Fi, adhoc et hybride (voir Figure 1.1). Dans l'architecture Wi-Fi basée sur la technologie WAVE, les RSUs situés le long des routes sont utilisés comme points d'accès sans fil qui assurent la couverture de communication aux véhicules se trouvant dans sa zone de couverture. Dans l'architecture adhoc, des groupes de véhicules routiers forment des réseaux adhoc

en utilisant WAVE. Ces réseaux effectuent des opérations de manière indépendante, sans aucun support d'infrastructure. Dans l'architecture hybride, les architectures cellulaires et adhoc utilisant toutes deux WAVE effectuent leurs opérations en collaboration [25].

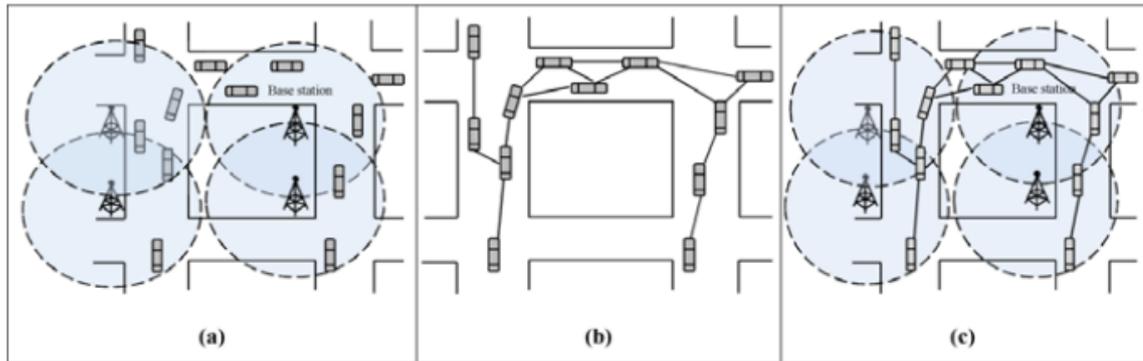


FIGURE 1.1 – Les architectures de communication des VANETs :
(a) WAVE basé Wi-Fi;(b) Adhoc; (c) Hybride [26]

Lors de la conceptualisation des VANETs, deux objectifs majeurs ont été identifiés. Premièrement, améliorer la sécurité du trafic et deuxièmement, améliorer l'efficacité du trafic en termes de réduction du temps, des coûts et des émissions polluantes. En raison des problèmes liés à la commercialisation des VANETs, la plupart des pays du monde ne disposent pas d'une véritable mise en œuvre des VANETs. Certains pays développés, dont les États-Unis et le Japon, utilisent l'implémentation de base des VANETs. Cela conduit à la conception et au développement d'une architecture plus fiable et orientée vers le marché pour la communication véhiculaire [27].

1.2.1.2 Motivations

La motivation pour la conception et le développement de l'IoV se divise en trois volets. Tout d'abord, les questions liées à la commercialisation des VANETs sont mises en évidence. Deuxièmement, le volume des victimes de la circulation est examiné. Troisièmement, l'énorme opportunité de marché à venir pour l'IoV est évaluée.

1. Les enjeux de la commercialisation des VANETs :

Malgré l'énorme potentiel des Vanets pour résoudre les problèmes de sécurité et d'efficacité du trafic avec un coût opérationnel moindre, ils n'ont pas réussi à susciter l'intérêt commercial des industries au cours

des deux dernières décennies [19]. Certaines des raisons de cet intérêt commercial moindre pour les réseaux Vanets sont indiquées ci-dessous :

- Le system des VANET ne pouvait pas garantir les services globaux et durables des applications STI. Cela est dû à l'architecture de réseau purement adhoc. Une fois qu'un véhicule est déconnecté d'un réseau adhoc, il perd les services du réseau malgré le fait que le véhicule soit sur la route. Cela est dû à l'incapacité de collaborer avec d'autres réseaux alternatifs accessibles [20].
- Dans le system actuel des VANETs, la connectivité Internet ne pouvait pas être garantie. Par conséquent, les applications commerciales ne sont pas disponibles pour les conducteurs et les passagers. Cela est dû au fait que les applications commerciales dépendent d'une connectivité Internet fiable [21].
- Malgré la croissance considérable des appareils personnels dans notre vie quotidienne, ces appareils ne sont pas capables de communiquer avec les Vanets. Cela est dû à l'incompatibilité de l'architecture du réseau [22].
- Les décisions intelligentes basées sur les grands calculs de data mining ne sont pas possibles dans l'architecture actuelle des VANETs. Cela est dû aux contraintes de calcul et de stockage et à l'indisponibilité des services de cloud computing dans les véhicules [23].
- La précision des services dans les applications STI est nettement inférieure, compte tenu du risque lié à l'utilisation de ces services pour améliorer l'expérience de conduite. Cela est dû au calcul basé sur la connaissance locale des environnements de circulation dans les VANETs.
- Le fonctionnement du réseau de véhicules est fortement dépendant de la coopération des utilisateurs du réseau. Cette dépendance diminue la fiabilité des services des réseaux de transport de véhicules [25].

2. **L'augmentation du nombre de victimes du trafic :**

Les trois principaux problèmes liés au trafic routier sont la sécurité, l'efficacité et la pollution. Ce sont les principales causes de préoccupation

concernant la conception et le développement de L'IoV. L'IoV offrirait un cadre plus fiable pour les communications à bord des véhicules, par rapport aux VANETs pour les applications STI intelligentes. Des communications fiables entre véhicules permettraient de réduire efficacement le nombre de victimes de la route [27]. Diverses études ont fait état de l'augmentation des accidents de la circulation dans le monde entier [28, 29]. Les faits principaux de certains de ces rapports sont indiqués ci-dessous.

Selon un rapport de l'Organisation mondiale de la santé (OMS), le nombre total de décès dus aux différents accidents de la route dans le monde est de 1,25 million par an [28]. Le nombre moyen de décès par jour est de près de 32876. Si l'on considère uniquement les jeunes ($15 \leq \text{age} \leq 29$), les accidents de la route ont causé le plus grand nombre de décès en 2012 parmi les dix premières causes de décès. Selon un autre rapport, les accidents de la route entraînent un coût économique énorme, à savoir 3 % du Produit Intérieur Brut (PIB) mondial [29]. L'énorme croissance du nombre de véhicules sur les routes est l'une des principales causes de la pollution de l'air, en particulier dans les capitales.

Les rapports suggèrent qu'il y a un besoin émergent de réduire le nombre de victimes de la route en utilisant des applications de sécurité basées sur une communication plus fiable entre les véhicules.

3. Opportunités de marché :

L'IoV offre d'énormes opportunités de marché non seulement pour l'industrie automobile, mais aussi pour toute une série d'autres industries, notamment la fabrication de matériel informatique, l'industrie des logiciels et les fournisseurs de services Internet. On prévoit que le nombre de véhicules routiers augmentera considérablement dans le monde [30]. En raison du taux de motorisation plus élevé, les encombrements se traduiraient par un allongement de la durée des trajets routiers dans les années à venir. Même si 5 minutes du temps perdu à voyager dans le monde sont monétisées, on s'attend à ce que cela génère 25 milliards d'euros de recettes par an d'ici 2030 [31].

L'utilisation efficace du temps de déplacement est également l'un des principaux objectifs de IoV. Les progrès récents et l'augmentation du taux de pénétration du marché de IoV constituent un autre facteur clé pour la conception et le développement de IoT [32]. Dans la croissance

de IoT, l'industrie automobile est l'une des industries qui connaît la plus forte croissance [33]. Les ventes de voitures connectées atteindraient 81 millions par an et 80 % des ventes de voitures neuves seraient équipées d'une forme de technologie de propulsion connectée d'ici 2025 (voir Figure 1.2) [34]. La valeur économique potentielle produite par l'IoV est estimée entre 210 et 740 milliards de dollars par an d'ici 2025 [35].

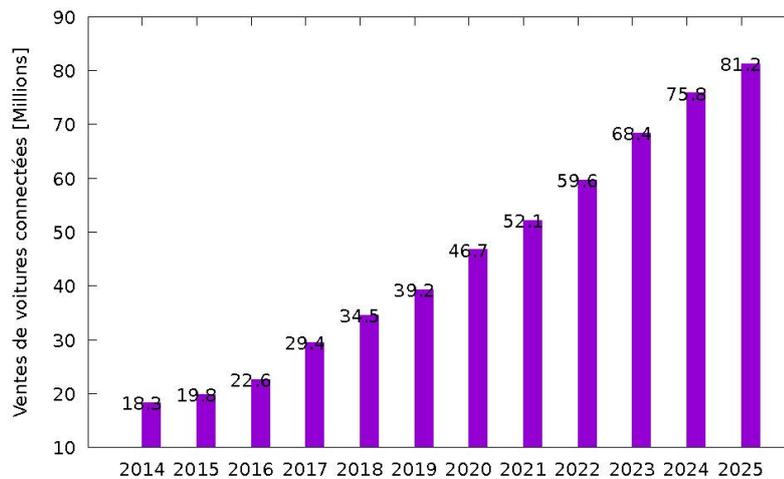


FIGURE 1.2 – La prévision des ventes de voitures connectées jusqu'en 2025 [36]

1.2.1.3 Aperçu sur l'IoV

Bien que l'IoV soit un nouveau concept et qu'il devrait devenir un domaine de recherche et de développement établi dans un avenir proche, l'utilisation du concept a déjà commencé comme étape initiale dans de nombreux pays.

Aux États-Unis, une puce de sécurité est en cours d'installation dans chaque dispositif en ligne, y compris les véhicules, afin de définir l'identité de chaque entité sur Internet [37]. À Delhi, tous les véhicules immatriculés, les véhicules électroniques, les bus gouvernementaux et les métros sont équipés de GPS et de WiFi [38]. La Commission européenne a pris un certain nombre d'initiatives pour le développement de la prochaine génération de systèmes de transport intelligents coopératifs (C-ITS) [39]. Plusieurs rapports suggèrent

que les "véhicules connectés" sont bien perçus dans certains pays, notamment aux États-Unis, au Royaume-Uni et en Australie [40]. Google travaille avec des entreprises automobiles et informatiques de premier plan pour développer le système Android pour la "conduite connectée" dans le cadre du consortium Open Automobile Alliance (OAA) [41]. Apple a développé un système "CarPlay" qui permet au conducteur d'utiliser tous les services de l'iPhone grâce à l'affichage de la voiture avec une fonction d'assistance vocale [42]. Tous les efforts susmentionnés constituent les étapes de la conception et du développement de l'IoV.

Un réseau mondial de véhicules équipés de WAT, impliquant l'Internet et d'autres réseaux hétérogènes, est proposé sous le nom d'Internet des véhicules (IoV). L'architecture de réseau hétérogène de l'IoV comprend cinq types de communications entre véhicules. Ces types comprennent les communications de véhicule à véhicule (V2V), de véhicule à unité routière (V2R), de véhicule à infrastructure (V2I) de réseaux mobiles, de véhicule à dispositifs personnels (V2P) et de véhicule à capteurs (V2S) (voir Figure 1.3).

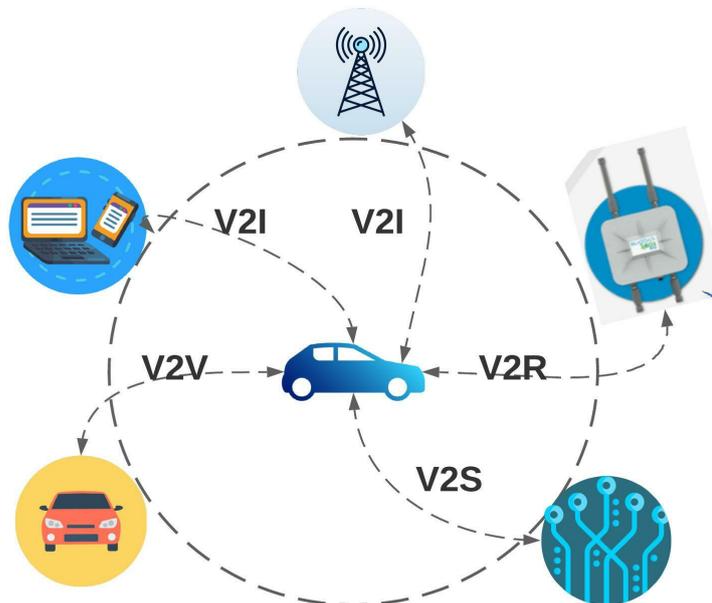


FIGURE 1.3 – Les cinq types de communications véhiculaires de l'IoV [3]

Chaque communication IoV à bord d'un véhicule est activée à l'aide d'un WAT différent. Les WATs comprennent IEEE WAVE pour V2V et V2R, Wi-Fi et 4G/LTE pour V2I, CarPlay/OAA pour V2P et MOST/Wi-Fi pour V2S. L'architecture de communication comprend non seulement les véhicules et

les RSUs, mais aussi d'autres dispositifs de communication. L'inclusion d'une gamme de dispositifs rend l'architecture plus complexe mais plus orientée vers le marché que celle des VANETs. Le cadre du réseau hétérogène de véhicules de l'IoV présente un potentiel important pour guider et superviser les véhicules. Il est en mesure de fournir une plate-forme de communication fiable pour l'Internet mobile et les applications multimédias.

La réalisation d'une architecture de réseau véhiculaire hétérogène est une tâche difficile [43]. L'IoV est examinée en détail dans les parties suivantes, qui se concentrent sur l'architecture en couches, le modèle de réseau, les avantages, les défis et les aspects futurs.

1.2.2 Architecture en couches et pile de protocoles en IoV

La conception d'une architecture en couches d'un réseau universel qui comprend des réseaux hétérogènes est une tâche assez complexe. Il faut identifier et regrouper efficacement les fonctionnalités similaires et les éléments représentatifs des réseaux hétérogènes en tant que couche. L'optimisation du nombre de couches et l'amélioration de la différenciabilité entre les couches sont les principales priorités de la conception de l'architecture en couches. Outre la superposition des fonctionnalités et des éléments représentatifs, diverses caractéristiques de l'architecture hétérogène du réseau sont prises en compte. Les caractéristiques du réseau comprennent l'interopérabilité, l'extensibilité, la fiabilité et la modularité. L'architecture de l'IoV devrait permettre d'interconnecter les véhicules à des réseaux et des dispositifs hétérogènes. Par conséquent, une architecture ouverte et flexible en termes d'adaptation technologique est plus adaptée à l'architecture. Parmi les principaux objectifs de la conception de l'architecture de l'IoV figurent une forte intégration avec l'internet, une architecture orientée services (SOA) et une interface plug-and-play.

1.2.2.1 Architecture en couches

Une architecture à cinq couches est conçue, comprenant la perception, la coordination, l'intelligence artificielle (IA), les applications et les couches commerciales. Les représentations et les fonctionnalités de chaque couche sont décrites en détail ci-dessous et une vue résumée est présentée à la Figure 1.4.

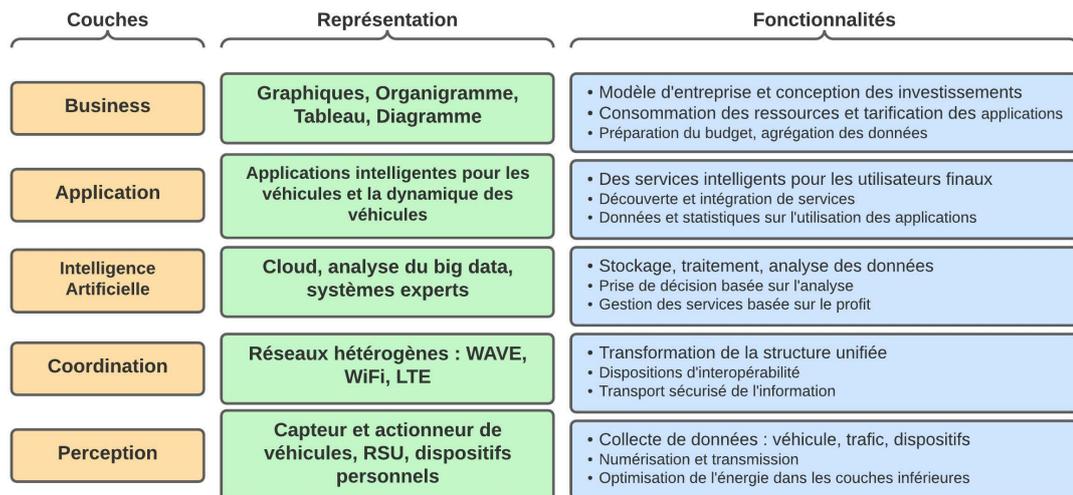


FIGURE 1.4 – L'architecture à cinq couches de l'IoV [26]

1) Couche de perception :

La première couche de l'architecture est représentée par les différents types de capteurs et d'actionneurs fixés aux véhicules, Les RSUs, les smartphones et autres appareils personnels qui sont pris en compte dans le cadre. La responsabilité première de la couche est de rassembler des informations concernant le véhicule, l'environnement du trafic et les dispositifs. La vaste gamme d'informations comprend la vitesse, la direction, l'accélération, la position, l'état du moteur, la densité des véhicules sur la route et les conditions météorologiques liées à l'environnement de la circulation, ainsi que les enregistrements multimédia et d'info-divertissement relatifs aux personnes.

La couche est également responsable de la transformation électromagnétique et de la transmission sécurisée des données perçues vers la couche de coordination. Les principaux enjeux de cette couche sont la collecte et la différenciation des informations capturées de manière efficace en termes de coût et d'énergie.

2) Couche de coordination :

La deuxième couche de l'architecture est représentée par un module de coordination de réseau universel virtuel pour les réseaux hétérogènes impliquant des réseaux WAVE, Wi-Fi, 4G/LTE et satellites, par lequel les informations perçues de la couche inférieure sont transférées de manière sécurisée à la couche d'intelligence artificielle pour traitement. En raison de l'absence de normes, l'interopérabilité et la coopération entre

les différents types de réseaux est l'une des principales préoccupations de l'IoV pour assurer une connectivité de réseau fiable gérée par cette couche. La principale responsabilité de cette couche est de traiter les différentes structures d'informations reçues de réseaux hétérogènes et de les rassembler en une structure unifiée qui peut être identifiée et traitée dans chaque réseau candidat.

3) **Couche d'Intelligence artificielle :**

La troisième couche de l'architecture est représentée par l'infrastructure virtuelle en Cloud. C'est le cerveau de l'IoV et il est responsable du stockage, du traitement et de l'analyse des informations reçues de la couche inférieure et de la prise de décision basée sur l'analyse critique. Il fonctionne comme un centre de gestion de l'information où les techniques de calcul et d'analyse, notamment le Cloud Computing pour les Véhicules (VCC)", l'analyse des grandes données (BDA) et le système expert sont des éléments opérationnels majeurs. En raison du nombre de services offerts dans l'environnement Cloud, la gestion des services est également l'une des principales préoccupations de l'IoV, où des services exclusifs et dédiés sont nécessaires pour les applications intelligentes qui sont également gérées par cette couche.

4) **Couche d'Application :**

La quatrième couche de l'architecture est représentée par des applications intelligentes, allant de la sécurité et de l'efficacité du trafic à l'info-divertissement multimédia et aux applications utilitaires basées sur le web. Cette couche est chargée de fournir aux utilisateurs finaux des services intelligents basés sur une analyse intelligente et critique des informations traitées par la couche IA. Une couche d'application a également été envisagée dans l'architecture des VANETs, où les applications de sécurité et d'efficacité sont les principales cibles et où les applications intelligentes à des fins commerciales ne sont pas prévues. La découverte efficace des services fournis par la couche IA pour les combiner en applications intelligentes pour les utilisateurs finaux est l'une des principales responsabilités de cette couche. Il fournit également des données sur l'utilisation des applications par l'utilisateur final à la couche Business. En raison de la réalisation d'un certain nombre d'applications intelligentes, le cadre de l'IoV est en train de devenir un

réseau mondial de communication fiable pour les véhicules. Par conséquent, ces applications intelligentes de la couche sont le moteur des efforts de recherche et de développement en matière d'IoV.

5) Couche de Business :

La cinquième couche de l'architecture est représentée par le module de gestion opérationnelle de l'IoV. La principale responsabilité de la couche est de prévoir des stratégies pour le développement de modèles commerciaux basés sur les données d'utilisation des applications et l'analyse statistique des données. Différents types d'outils d'analyse, notamment des graphiques, un organigramme, des tableaux de comparaison, un diagramme de cas d'utilisation, etc. Les autres responsabilités de la couche comprennent la prise de décision relative à l'investissement économique et à l'utilisation des ressources, la tarification de l'utilisation des applications, la préparation du budget global pour l'exploitation et la gestion des données agrégées.

1.2.2.2 Pile de protocoles

Une pile de protocoles est conçue en organisant efficacement les protocoles existants appropriés à l'une des cinq couches dédiées (voir Figure 1.5). La pile de protocoles vise à satisfaire les exigences fonctionnelles de chaque couche identifiée dans l'architecture. Divers protocoles sont utilisés, suggérés dans les projets liés aux VANETs, notamment WAVE [44], C2C [45], CALM [46] et les projets liés à l'IoT, notamment IoT-A [47], IoT6 [48], HyDRA [49].

La pile de protocoles comporte trois niveaux, à savoir la sécurité, les opérations et le management. Les protocoles appropriés sont identifiés pour les différentes couches et plans de l'architecture de l'IoV en gérant assez efficacement la plupart des exigences fonctionnelles à l'aide des protocoles existants. Chaque niveau est décrit en détail ci-dessous.

1) Plan de la sécurité

À ce niveau, il est possible d'utiliser des protocoles de sécurité tels que IEEE 1609.2, le connecteur d'information de sécurité (S-IC), la base d'information de gestion de la sécurité (S-MIB) et le module de sécurité du matériel (HSM), qui ont été développés dans le cadre des projets WAVE, C2C et CALM, respectivement. Les protocoles de sécurité pour

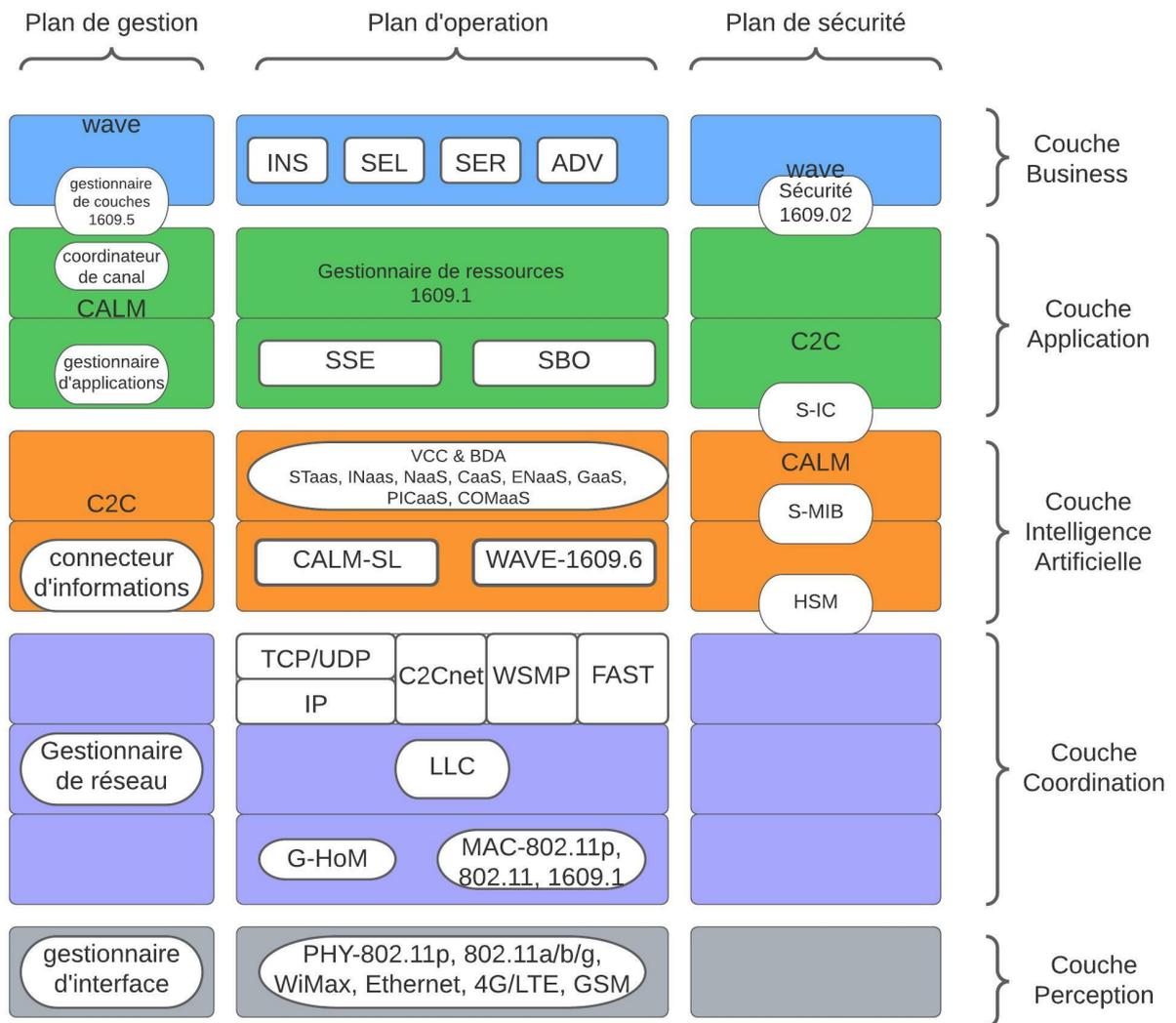


FIGURE 1.5 – La pile de protocoles pour l'architecture à cinq couches de l'IoV. [26]

l'IoV restent un défi de recherche ouvert en raison de l'absence de définitions claires des protocoles de sécurité par couches, qui sont étudiés dans certains projets de l'IoT [50].

2) Plan d'opérations

Dans la couche perception, un certain nombre de protocoles d'accès sans fil pourraient être considérés dans la couche physique, notamment 802.11p [51] de WAVE, 802.11a/b/g de réseau local sans fil (WLAN) [52], Interopérabilité mondiale pour un accès par micro-ondes (WiMax) [53], Ethernet, 4G/ Evolution à long terme (LTE) [54], Système mondial de communication mobile (GSM) et communications par satellite

[55]. La couche de coordination est divisée en trois sous-couches : inférieure, moyenne et supérieure. Les différents protocoles MAC pourraient être utilisés à la sous-couche inférieure, notamment les protocoles IEEE 802.11p, 802.11 (a/b/g/n) et 1609.4, ainsi qu'un gestionnaire de transfert global (GHM). La conception des GHMs est un défi de recherche ouvert dans l'IoV compte tenu de l'éventail des technologies considérées au niveau de la couche de perception. Un protocole de contrôle des liens logiques (LLC) pourrait être envisagé dans la sous-couche intermédiaire. Dans les sous-couches supérieures, trois protocoles, dont le protocole de réseau C2C (C2C-net), le protocole de message court (WSMP) et le Facilitateur d'application et de communication rapide (FAST), pourraient être envisagés pour effectuer les opérations des couches réseau et transport en dehors des combinaisons traditionnelles IP et UDP/TCP.

Ces protocoles sont proposés dans les projets C2C, WAVE et CALM comme protocoles de la couche réseau. Le WSMP et le FAST n'utilisent pas l'IP alors que C2C-net utilise l'IP6 pour certaines opérations. Dans la couche d'intelligence artificielle (IA), la couche de service CALM (CALM-SL) et WAVE-1609. 6 protocoles liés aux services pourraient être envisagés dans la sous-couche inférieure, les protocoles liés au Cloud Computing pour les Véhicules (VCC) et à l'analyse des grandes données (BDA) pourraient être utilisés dans la sous-couche supérieure, notamment le stockage sur le Cloud en tant que service (STaaS), Infrastructure en tant que service (INaaS), Réseau en tant que service (NaaS), Coopération en tant que service (CaaS), Divertissement en tant que service (ENaaS), Passerelle en tant que service (GaaS), Image en tant que service (PICaaS) et L'informatique en tant que service (COMaaS). La couche application comprend deux ensembles d'applications, à savoir Sécurité et efficacité intelligentes (SSE) et l'orientation commerciale intelligente (SBO). En plus de ces applications, un protocole de gestion des ressources 1609.1 défini dans WAVE pourrait être utilisé pour gérer les ressources parmi les applications intelligentes.

Dans la couche commerciale, quatre types de modèles commerciaux sont pris en compte, à savoir l'assurance (INS), la vente (SAL), le service (SER) et la publicité (ADV). Les modèles commerciaux de cette couche constituent un défi de recherche ouvert dans l'IoV [56]. Le succès de

l'IoV dépend aussi fortement du développement effectif et efficace de ces modèles commerciaux qui sont les plus importants pour la commercialisation de l'IoV dans les industries connexes.

3) **Plan de gestion**

Dans ce plan, trois groupes de protocoles appartenant aux opérations de management dans WAVE, CALM et C2C pourraient être considérés. Le gestionnaire de couches IEEE 1609.5 et les protocoles des coordonnateurs de canaux sont développés dans WAVE. CALM a proposé trois protocoles pour la gestion, à savoir les gestionnaires d'applications, de réseaux et d'interfaces. Un Protocole de connecteur d'information a été proposé dans le C2C dans le même but.

1.2.3 **Modèle de réseau IoV**

Dans cette partie, un modèle de réseau d'IoV est proposé en identifiant les principaux éléments du réseau. Les éléments constitutifs de l'IoV en termes d'éléments de réseau expriment plus efficacement la signification et les fonctionnalités de l'IoV en tant que réseau hétérogène complet. Les trois principaux éléments de réseau de l'IoV sont identifiés, à savoir le Cloud, la Connexion et le Client (voir Figure 1.6).

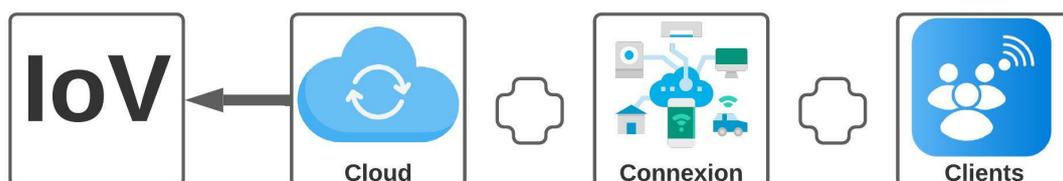


FIGURE 1.6 – Les trois éléments de réseau de l'IoV.

Le premier élément de l'IoV est le "**Cloud**" qui représente le cerveau de l'IoV. Une série de services liés à l'informatique intelligente et au traitement sont proposés en tant que principaux services de cloud. Les services sont offerts sur une plateforme de Cloud fournie par l'infrastructure de Cloud. Les services de traitement et d'informatique intelligente basés sur le Cloud sont accessibles par une "**Connexion**" fiable, qui est le deuxième élément de l'IoV. Une série de technologies d'accès sans fil peuvent être utilisées pour établir une connexion. Les différents types de communications véhiculaires de l'IoV

représentent une connexion différente en raison de l'utilisation de différentes technologies d'accès sans fil. Les différents types de connexions sont utilisés par des applications "Client" intelligentes, qui constituent le troisième élément de l'IoV. Chaque demande de Client a des exigences de service qui peuvent être différentes de celles des autres clients. Les exigences de service d'un client sont définies en termes de caractéristiques d'une technologie d'accès sans fil. Par conséquent, les applications clientes utilisent en priorité les technologies d'accès sans fil. Ces éléments et leur rôle dans l'IoV sont décrits en détail dans les sous-sections suivantes.

1.2.3.1 Cloud

L'ampleur des informations liées au trafic augmenterait considérablement avec la réalisation de l'IoV. Ceci est dû à l'intégration de différents types de réseaux avec le réseau de véhicules. Un STI intelligent d'une ville pour la collecte, le traitement et la diffusion dynamiques d'informations routières en temps réel nécessiterait un système de traitement de l'information à l'échelle du pétaoctet [57]. Pour traiter des informations de cette ampleur, le cadre du cloud computing est le meilleur environnement. Un cadre est proposé pour souligner le rôle du cloud computing en tant qu'élément de l'IoV en utilisant le concept de serveurs d'applications basés sur le cloud (voir Figure 1.7). Le cadre comporte trois grands niveaux de fonctionnement, à savoir les services de base du cloud, les serveurs d'application intelligents et les consommateurs et producteurs d'informations. Les niveaux d'opération sont basés sur le cloud où les informations sur le trafic sont téléchargées, traitées, stockées et diffusées à l'aide d'une architecture en cloud. Les services de base du cloud constituent le cadre opérationnel de base pour la réalisation de serveurs d'applications STI intelligents basés sur le cloud dans l'IoV. Les trois niveaux d'opération sont présentés ci-dessous en termes de composantes principales et de leurs responsabilités.

1) Services de base du cloud

Les services de base du cloud comprennent les services offerts aux serveurs d'applications de trafic intelligent, notamment la coopération en tant que service (CaaS), le stockage en tant que service (STaaS), la passerelle en tant que service (GaaS), l'informatique en tant que service

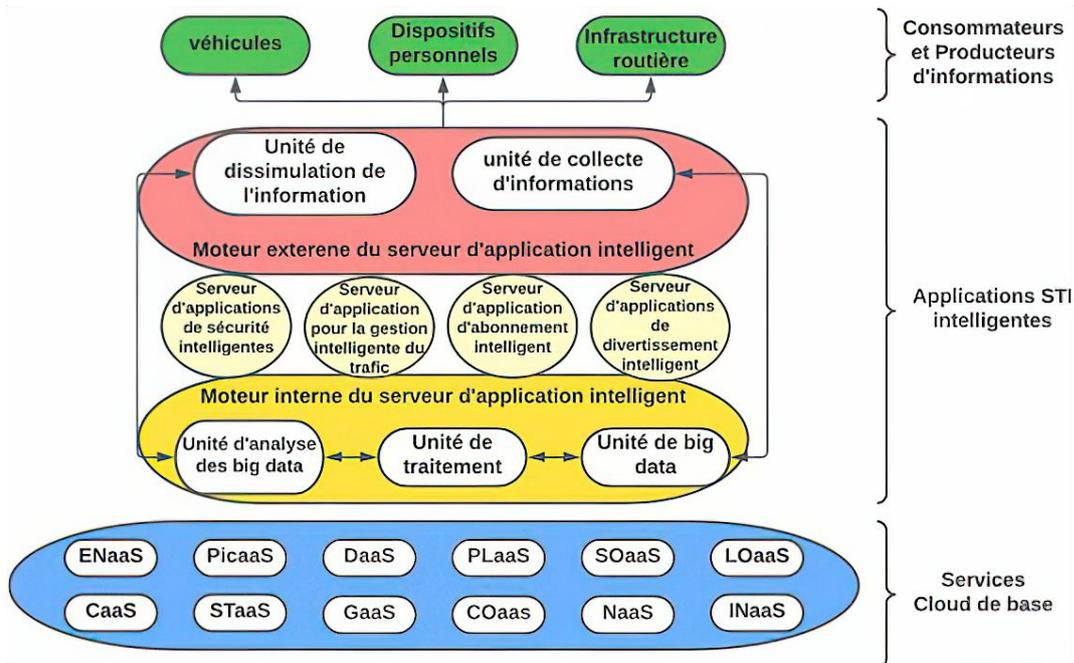


FIGURE 1.7 – Le rôle du cloud computing en tant que trois niveaux d'opération. [58]

(COMaaS), le réseau en tant que service (NaaS), les données en tant que service (DaaS). Les serveurs d'application STI intelligents sont considérés comme étant développés et déployés sur une plateforme de cloud qui fournit des services de cloud de base aux applications pour l'IOV [59].

2) **Serveurs d'application intelligents**

Les serveurs d'application intelligents de l'IOV sont divisés en quatre catégories, dont la sécurité routière, la gestion du trafic, l'abonnement à des services et le divertissement [60]. Deux moteurs de traitement, à savoir un moteur interne et un moteur externe, sont envisagés pour les serveurs intelligents. Le moteur interne comprend une unité des grandes données, une unité de traitement des grandes données et une unité d'analyse des grandes données traitées. Toutes les opérations de ces trois unités sont effectuées en utilisant les services de base du cloud offerts sur la plateforme du cloud. Le moteur externe comprend une unité de diffusion de l'information responsable de la fourniture de services de bout en bout aux applications des clients et une unité de collecte de l'information responsable de la collecte de données à la source.

3) Consommateur et producteur d'informations

Les dispositifs intelligents de l'IoV, notamment les véhicules, les appareils personnels et les RSUs, sont les utilisateurs finaux des informations intelligentes fournies par les serveurs intelligents. Ces appareils sont chargés de collecter des données sur les environnements de circulation des véhicules. Le développement de modèles commerciaux pour les organisations liées aux assurances, à la production et à la réparation automobiles et à d'autres services basés sur Internet est également l'une des principales utilisations des données recueillies par les appareils intelligents [61].

Le rôle susmentionné du cloud computing fait du "Cloud" l'un des éléments importants de la conception et du développement de l'IoV. Les services offerts par les quatre serveurs d'application intelligents, notamment la sécurité intelligente, la gestion intelligente du trafic, le divertissement intelligent et l'abonnement intelligent, sont à la base de l'intelligence dans l'IoV [62]. La principale responsabilité des serveurs cloud est de traiter et d'appliquer l'intelligence artificielle aux données en temps réel relatives au trafic important afin de prendre des décisions intelligentes pour les applications clientes intelligentes [63]. Elle nécessiterait un système d'exploitation en temps réel (RTOS) pour l'activation des services IoV. L'effort de Google pour développer des RTOS basés sur Android pour IoV avec l'aide de l'Open Automobile Alliance (OAA) est l'un des bons candidats [64].

1.2.3.2 Connexion

La "Connexion" est utilisée pour établir et maintenir la communication entre le "cloud" et les véhicules pour accéder aux services intelligents basés sur le cloud dans l'IoV. En raison de la prise en compte de différents types de réseaux, y compris les VANETs, le Wi-Fi, la 3G/LTE et le satellite, l'interconnexion entre ces réseaux est un défi important [65]. Une connexion comporte deux éléments principaux, à savoir l'Interopérateur de réseau tiers (TPNIO) et la Passerelle d'interconnexion (GIN). TPNIO est responsable de la gestion de la connexion tandis que GIN représente la connexion. Ces deux éléments et la préférence hiérarchique accordée aux technologies d'accès sans fil (WAT)

pour la connexion sont décrits en détail ci-dessous.

1) **Interopérateur de réseau tiers (TPNIO)**

La nécessité d'entente de niveau de service (SLA) direct entre les opérateurs de réseaux est réduite en IoV en raison de la prise en compte du TPNIO [66]. Le SLA direct est une contrainte difficile pour tout réseau hétérogène. Le TPNIO permet une itinérance transparente sans compromettre la qualité et la sécurité des services des opérateurs de réseau. Les cinq principales composantes du TPNIO sont proposées, à savoir le Manager du transfert global (GHM), Authentification, Autorisation et Facturation Globales (GAAB), le Service Management (SM), la Base de données du réseau (NDB) et la Base de données des opérateurs (ODB). Une relation logique entre ces composantes est présentée à la Figure 1.8. Les responsabilités opérationnelles des composantes de la TPNIO sont décrites ci-dessous.

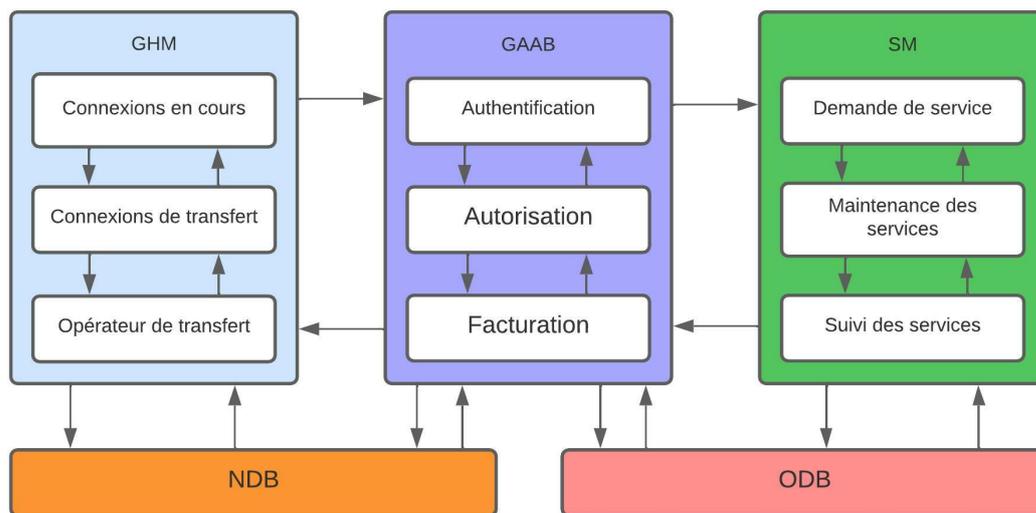


FIGURE 1.8 – La relation logique des composantes du TPNIO.
[67]

1.1. **Manager du transfert global (GHM)**

Le GHM est responsable du transfert transparent des communications en cours entre deux opérateurs de réseaux en IoV. Il s'agit d'un gestionnaire de transfert global qui peut effectuer des opérations de transfert entre deux opérateurs de différents types de réseaux en IoV. Le développement du GHM est un défi de recherche

ouvert en IoV pour lequel l'intégration efficace de modules de transfert de réseaux hétérogènes pourrait être considérée comme un moyen général de réaliser le GHM [68].

1.2. **Authentification, Autorisation et Facturation Globales (GAAB)**

Le GAAB est chargé de vérifier les références du véhicule et d'accorder les autorisations d'accès aux services du réseau. La tarification des services de réseau en fonction de l'utilisation est également gérée par le GAAB. Le fonctionnement du GAAB est assez complexe et difficile, étant donné que les véhicules peuvent appartenir à des opérateurs de différents types de réseaux. Par conséquent, la notion de tiers est considérée comme un TPNIO qui aide le GAAB dans la vérification et la tarification.

1.3. **Service Management (SM)**

SM est responsable de la fourniture et du contrôle de la qualité du service offert aux véhicules. Elle utilise l'accord de qualité de service entre les opérateurs des différents réseaux. Il contribue à fournir des services garantis aux véhicules en utilisant l'accord de qualité de service. Le maintien de la qualité du service entre les différents types de réseaux nécessite une observation constante. Le concept d'évaluation de la qualité du service pourrait être utilisé pour le maintien de la qualité.

1.4. **Base de données du réseau (NDB)**

NDB est une base de données des réseaux enregistrés avec leurs technologies et protocoles en IoV. La base de données est utilisée pour identifier un réseau tout en établissant des communications entre les opérateurs de différents types de réseaux.

1.5. **Base de données des opérateurs (ODB)**

ODB est une base de données des opérateurs enregistrés des différents types de réseaux en IoV. Ces opérateurs ont des SLA avec le TPNIO, ce qui rend inutile la nécessité d'un SLA direct entre opérateurs. La base de données est utilisée pour identifier les opérateurs et leurs SLAs afin de fournir une qualité de service garantie.

2) **Passerelle d'interconnexion (GIN)**

En raison de l'hétérogénéité des environnements réseau en IoV, différentes technologies d'accès sans fil sont utilisées pour établir des connexions. Il existe cinq types de réseaux de véhicules dans l'IoV, à savoir V2V,

V2R, V2I, V2P et V2S. Les réseaux de véhicules sont représentés par différentes technologies d'accès sans fil (voir Figure 1.9). Les réseaux V2V et V2R représentent les communications véhiculaires par WAVE. Le réseau V2I représente les communications véhiculaires par Wi-Fi ou 4G/LTE [69]. Le réseau V2P représente les communications des appareils personnels des véhicules utilisant le CarPlay d'Apple ou le système Android d'OAA ou la communication en champ proche (NFC). Le réseau V2S représente les communications des capteurs embarqués sur les véhicules par Ethernet, Wi-Fi ou le Système de transport orienté vers les médias (MOST) [70].

Ces réseaux sont utilisés par des applications clientes pour accéder aux services de serveurs intelligents à l'aide de la Passerelle d'Interconnexion (GIN) (voir Figure 1.9). Chaque réseau de véhicules a son GIN qui se coordonne avec le TPNIO pour établir et maintenir une connexion. Les trois principales composantes du GIN sont proposées, à savoir le Management de la mobilité (MM), l'authentification, l'autorisation et la facturation locales (LAAB) et le Management du trafic (TM). Une relation logique entre ces composantes est présentée à la Figure 1.9. Les responsabilités opérationnelles de ces composantes sont décrites ci-dessous.

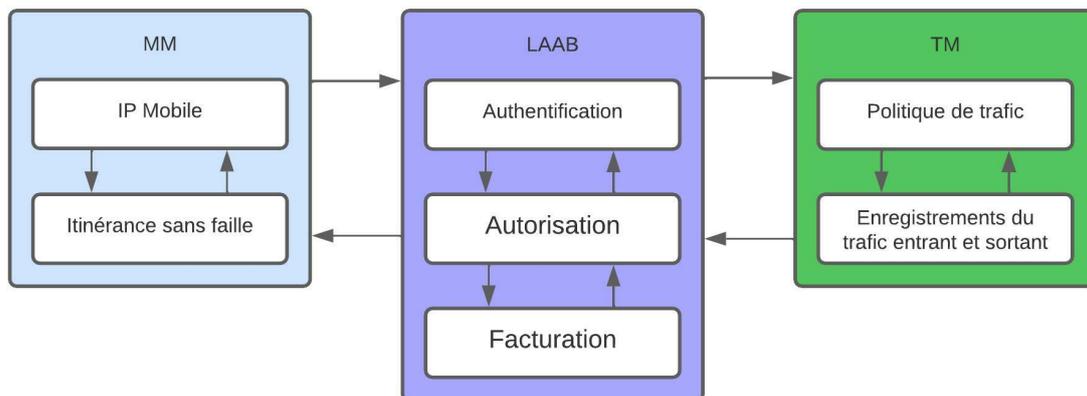


FIGURE 1.9 – La relation logique des composantes du GIN. [26]

2.1. Management de la mobilité (MM)

Le GM est responsable de fournir les fonctionnalités liées à l'IP Mobile (MIP). Les concepts de véhicule d'agent étranger (FAV) et de véhicule d'agent local (HAV) sont utilisés pour mettre en œuvre

le MIP [71]. En IoV, un véhicule enregistré auprès d'un opérateur de réseau est considéré comme un HAV pour l'opérateur et un FAV pour les autres opérateurs du réseau. Le module d'itinérance transparente communique avec le GHM pour effectuer l'opération d'itinérance. Le concept de Tunneling pourrait être utilisé pour la conversion des versions IP afin d'éviter les restrictions liées à l'utilisation d'une version particulière d'IPv4 ou d'IPv6.

2.2. Authentification, Autorisation et la Facturation Locales (LAAB)

Le LAAB est chargée de fournir des services d'authentification, d'autorisation et de facturation aux HAVs qui sont des utilisateurs locaux des réseaux. Il aide également le GAAB de TPNIO à fournir les mêmes services à la FAV.

2.3. Management du trafic (TM)

Le TM est chargé de fournir des services de surveillance du trafic réseau en mettant en œuvre les politiques du réseau. Les politiques peuvent varier d'un réseau à l'autre. La surveillance aide les opérateurs de réseau à fournir des services de qualité aux applications clientes. La surveillance est basée sur l'analyse de l'utilisation des données de trafic ainsi que sur les données de trafic en temps réel des connexions.

3) Préférence priorisée aux technologies sans fil

En raison de l'environnement réseau hétérogène en IoV, une gamme de technologie d'accès sans fil (WAT) serait disponible pour les applications clientes afin d'établir des connexions avec des serveurs intelligents basés sur le Cloud. Les WATs sont divisées en trois catégories, à savoir les communications mobiles dans les véhicules, les communications mobiles cellulaires et les communications statiques à faible portée basées sur le réseau de communication où les WATs sont utilisées (voir la Figure 1.10). Ces technologies ont été développées pour différents types de réseaux de communication. Par conséquent, leurs caractéristiques, c'est-à-dire leurs points forts et leurs limites, sont différentes.

Le tableau 1.1 présente une liste de priorités pour les technologies sans fil, basée sur les six paramètres qui caractérisent effectivement ces technologies. Les six paramètres importants de la WAT sont le débit de données, la portée de communication, support de la mobilité, le délai de

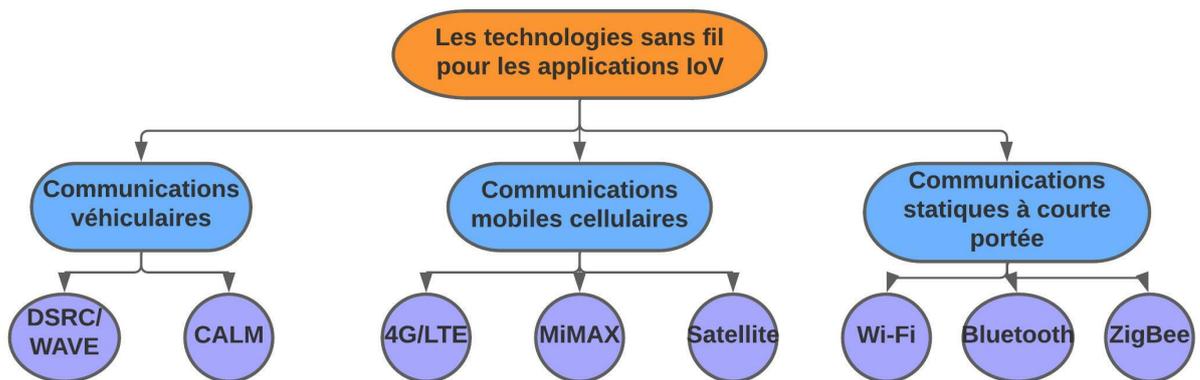


FIGURE 1.10 – La classification des WAT pour les applications de l’IoV. [26]

communication, la sécurité et l’extensibilité. La priorité accordée aux technologies sans fil est utilisée pour sélectionner la WAT appropriée à une application client spécifique. Le choix de la technologie appropriée serait utile pour maintenir la qualité de service (QoS) [72].

Propriété	Préférence prioritaire basée sur la propriété HAUT \longrightarrow BAS
Débit	Wi-Fi(a/b/g/n) -> 4G/LTE -> WiMAX -> DSRC/WAVE -> CALM -> Bluetooth -> ZigBee
Portée de communication	WiMAX -> 4G/LTE -> DSRC/WAVE -> CALM -> Wi-Fi(a/b/g/n) -> ZigBee -> Bluetooth
Support de mobilité	DSRC/WAVE -> CALM -> WiMAX -> 4G/LTE -> Wi-Fi(a/b/g/n) -> ZigBee -> Bluetooth
Délai de communication	DSRC/WAVE -> CALM -> 4G/LTE -> ZigBee -> Wi-Fi(a/b/g/n) -> Bluetooth -> WiMAX
Sécurité	4G/LTE -> WiMAX -> Wi-Fi(a/b/g/n) -> ZigBee -> Bluetooth -> CALM -> DSRC/WAVE
Extensibilité	WiMAX -> 4G/LTE -> DSRC/WAVE -> CALM -> Wi-Fi(a/b/g/n) -> ZigBee -> Bluetooth

TABLE 1.1 – La préférence prioritaire du WAT

1.2.3.3 Client

Les services des serveurs intelligents basés sur le Cloud sont utilisés par les applications "Client" des véhicules à l'aide d'une connexion réseau. Les applications clientes ou clients dans l'IoV peuvent être divisées en deux grandes catégories : celles qui sont axées sur la sécurité routière et la gestion du client, et celles qui sont axées sur le business (voir Figure 1.11). Certains des clients potentiels et leur préférence priorisée aux technologies sont décrits dans les parties suivantes.

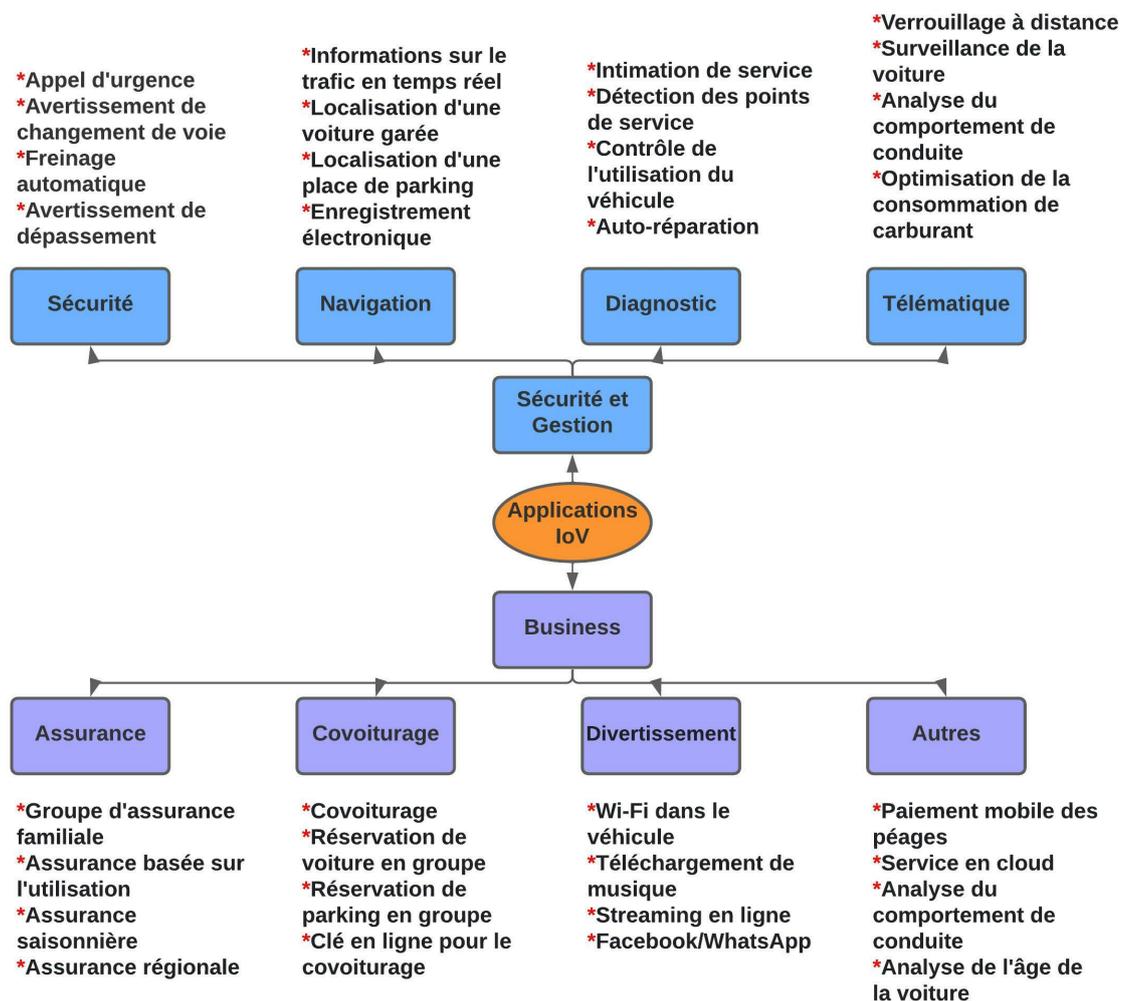


FIGURE 1.11 – La taxonomie des applications clients de l'IoV.

[73]

1.2.3.3.1 Sécurité et la gestion : Les applications STI liées à la sécurité et à la gestion du trafic sont globalement divisées en quatre groupes, dont la sécurité routière, la navigation, le diagnostic et la télématique à distance.

1. Sécurité routière

Les applications STI liées à la sécurité routière sont des applications basées sur la communication M2M. La performance et la qualité des opérations pourraient être considérablement améliorées en intégrant des serveurs intelligents basés sur le Cloud [74]. Les serveurs utilisent les données de trafic importantes pour prendre des décisions intelligentes en IoV. Ces applications améliorent les performances et la qualité de conduite des conducteurs. Les applications intègrent des opérations automatiques sur les roues, et réduisent ainsi les efforts nécessaires à une conduite de qualité. Certaines des applications de sécurité routière sont présentées ci-dessous.

■ Prévention des accidents

Il s'agit d'un système de communication M2M pour les véhicules. Il permet de prévenir les accidents grâce à l'échange d'informations en temps réel entre les véhicules. Il permet diverses opérations automatiques, notamment le contrôle de la vitesse, le changement de voie, l'arrêt, le contrôle de la direction, etc. Le système serait très utile pour les autoroutes et les environnements à trafic urbain dense. Dans ces deux environnements, le contrôle automatique des véhicules a un impact significatif sur la sécurité en cas de situations critiques.

■ Appel d'urgence

Il s'agit d'un système d'appel d'urgence pour les véhicules. Il permet de contacter les services tels que la police, les pompiers et la famille ou les amis en cas d'urgence. Il est à la fois automatique et manuel. L'appel fournit toutes les informations relatives à la situation actuelle et passée du véhicule. Les informations comprennent le nombre de passagers, la vitesse, la direction, l'emplacement, la voie, la cause de l'urgence, etc. Ces informations peuvent être considérées comme des informations de la boîte noire du véhicule.

2. Navigation

Les applications STI liées à la navigation sont des services basés sur la

localisation [75]. Les performances de ces applications dépendent essentiellement de l'exactitude des informations de localisation. Les informations sont obtenues à partir du récepteur GPS installé sur les véhicules. Ces applications aident à gérer le trafic et donc à améliorer l'efficacité du trafic. La fluidité de la circulation et la réduction des émissions de carbone dans l'environnement sont quelques-uns des principaux objectifs des applications de navigation basées sur la localisation. Certaines de ces applications sont présentées ci-dessous.

■ Informations sur le trafic en temps réel

Il s'agit d'un système d'information sur le trafic. Il fournit des informations sur le trafic en temps réel en utilisant des capteurs vidéo des véhicules et des réseaux de communication hétérogènes. Il pourrait remplacer efficacement les systèmes actuels d'information routière en temps réel basés sur l'analyse d'images et la diffusion radio. Le système repose sur la diffusion en ligne efficace d'informations sur le trafic en utilisant des réseaux de véhicules hétérogènes.

■ Aide-parking

Il s'agit d'un système de stationnement pour les véhicules. Il aide à trouver la place de parking disponible la plus proche en communiquant avec les véhicules garés. Le système repose sur le positionnement précis des véhicules à l'intérieur de toute infrastructure de stationnement. Il utilise un récepteur GPS et des techniques de positionnement coopératif. Le système permet de réduire le gaspillage de carburant et le temps de recherche d'une place de parking, en particulier dans un environnement urbain à forte densité de trafic.

■ Transports multimodaux

Il s'agit d'un système de transport pour les personnes. Il optimise les ressources, notamment le temps, l'argent, le confort, le carburant, les divertissements, etc., en fonction du choix des utilisateurs. Il fournit un service de planification d'itinéraire incluant plusieurs moyens de transport et optimisant les préférences des utilisateurs. Ce système serait l'une des applications les plus innovantes de l'IoV pour les scénarios urbains actuels. Cela est dû aux différents modes de disponibilité des transports intra et interurbains.

3. **Diagnostic**

Les applications liées au diagnostic des véhicules fonctionnent comme un consultant personnel en matière de santé pour les véhicules [76]. Outre la surveillance en temps réel de l'état général des véhicules, la gestion des données sur l'état des véhicules dans le cloud est l'une des opérations clés de ces applications. Les données de diagnostic basées sur le cloud sont utilisées pour la prévision en ligne et les conseils d'entretien des véhicules. Les applications de diagnostic permettraient de réduire les coûts d'entretien. Les applications permettent de détecter à temps les besoins de réparation et de repérer les points de service. L'un des clients de diagnostic est décrit ci-dessous.

■ **Auto-réparation**

Il s'agit d'un système de guidage de réparation étape par étape basé sur le cloud. Il aide le propriétaire du véhicule à résoudre les problèmes de matériel/logiciels du véhicule. Le système s'appuie sur une base de données basée sur le cloud. La base de données évolue automatiquement en fonction des progrès de la technologie. Le guidage clair est disponible pour tous les types de véhicules grâce aux technologies audio et vidéo. Le système permettrait de réduire considérablement le montant des dépenses de réparation. Il pourrait réduire le nombre total de propriétaires de véhicules.

4. **Télématique à distance**

L'accès à distance à certaines des opérations de non conduite des véhicules pourrait être rendu possible par l'utilisation d'applications télématiques à distance hautement sécurisées [77]. Ces applications sont basées sur des méthodes précises de suivi, d'authentification et d'autorisation à distance. Ces applications sont en fait la conversion d'opérations traditionnelles basées sur des entités physiques en opérations basées sur des entités numériques. Les applications améliorent la facilité d'utilisation et de surveillance des véhicules. Parmi les exemples de cette catégorie figurent le verrouillage et le déverrouillage à distance, la surveillance des véhicules, etc.

1.2.3.3.2 Client orienté business : Les applications STI de l'IoV orientées vers le business peuvent être réparties en quatre grandes catégories : assurance, covoiturage, info-divertissement et autres applications.

1. Assurance

Les applications STI basées sur l'assurance sont des modèles différents de fourniture d'assurance. Les modèles sont basés sur une analyse statistique des informations, notamment l'utilisation des véhicules, le comportement de conduite, le lieu d'utilisation et la durée d'utilisation [78]. Ces applications permettraient de réduire les coûts d'assurance et donc d'optimiser les coûts de possession des véhicules. L'une des applications basées sur l'assurance est présentée ci-dessous.

■ Assurance sur les statistiques de conduite

Il s'agit d'un système d'assurance pour les véhicules. Il calcule automatiquement les frais d'assurance en utilisant les informations des statistiques de conduite. Ces informations comprennent la durée de conduite quotidienne, mensuelle ou annuelle ou la quantité de véhicules que vous conduisez et les infractions quotidiennes, mensuelles ou annuelles au code de la route ou la façon dont vous conduisez. Le système repose entièrement sur les statistiques d'utilisation des véhicules basées sur le cloud. Il pourrait permettre d'optimiser considérablement le coût de l'assurance.

2. Covoiturage

Les applications STI de partage de voitures sont basées sur le concept d'amélioration de l'utilisation des ressources lors de l'utilisation des voitures, et donc de réduction des coûts de transport. Cela peut être réalisé en se déplaçant en voiture en groupe. L'une des applications de covoiturage est présentée ci-dessous.

■ CarPooling

Il s'agit d'une application de partage de voitures basée sur une plateforme de cloud. Elle attribue les demandeurs de services de voitures aux propriétaires de voitures. L'attribution est basée sur l'optimisation des critères de correspondance des passagers. Ces critères comprennent l'adresse locale, le lieu de travail, le moment de la demande, le sexe, l'âge et la situation professionnelle. Dans l'application, l'enregistrement des propriétaires de voitures et des demandeurs de services automobiles est vérifié par le prestataire de services.

3. **Info-divertissement**

Après les concepts de connectivité entre le domicile, le bureau et la mobilité, l'heure est à la connectivité des véhicules. C'est le concept central des applications STI d'info-divertissement de l'IoV [79]. Ces applications reposent sur une connectivité Internet fiable. L'application améliorerait la productivité et l'expérience de voyage en étant en ligne tout en conduisant. L'une des applications d'info-divertissement est présentée ci-dessous

■ **Conduite connectée**

Il s'agit d'un système de synchronisation des dispositifs pour les véhicules. Il relie l'unité d'affichage du véhicule à l'ordinateur du bureau ou de la maison, au smartphone et à d'autres appareils en ligne. Le système est basé sur la connexion à distance à différents types d'appareils en ligne avec des références de sécurité. Le système permettrait d'améliorer la productivité en termes de durée de conduite tout en évitant les accidents mortels sur la route. Cela est dû à l'utilisation d'applications d'assistance automatique pour les conducteurs dans l'IoV.

4. **Autres applications**

Il existe d'autres demandes qui n'entrent pas dans les catégories susmentionnées. Ces applications sont très utiles en termes de commercialisation des services de trafic. Ces applications sont basées sur des concepts commerciaux et des technologies différents. Une des applications de cette catégorie est présentée ci-dessous.

■ **Service de cloud**

Le système de cloud forme un cloud autonome d'un groupe de véhicules ou relie les véhicules à un cloud traditionnel. Dans les deux cas, les ressources des véhicules connectés sont disponibles pour une utilisation en tant que service de cloud ainsi que les véhicules peuvent utiliser des services de cloud intelligents. Le système éliminerait les limites de calcul et de stockage des véhicules. Il pourrait ouvrir de nouveaux modèles commerciaux dans le domaine des véhicules connectés.

1.2.3.3.3 Préférence priorisée aux clients Les applications clientes susmentionnées ont des exigences de service différentes en termes de paramètres de réseau. Les exigences de service dépendent du type d'applications ou des objectifs clés des applications. Le tableau 1.2 donne une liste des préférences de technologie d'accès sans fil (WAT) pour chaque type de client en utilisant la liste des préférences du tableau 1.1. Les clients utiliseront cette préférence pour sélectionner le WAT approprié tout en établissant la connexion.

Application	Exigences de service	Préférences prioritaires HAUT ————— —————> BAS	Ref
Sécurité routière	Les applications critiques pour la vie nécessitent un délai de communication plus court et une garantie de livraison.	DSRC/WAVE -> CALM -> 4G/LTE -> ZigBee -> Wi-Fi-> Bluetooth -> WiMAX	[74]
Navigation	Les applications de navigation axées sur l'efficacité du trafic nécessitent une meilleure prise en charge de la mobilité, de la sécurité et de l'évolutivité de la confidentialité.	DSRC/WAVE et WiMAX -> CALM et 4G/LTE -> WiMAX et DSRC/WAVE-> 4G/LTE et CALM -> Wi-Fi -> ZigBee -> Bluetooth	[75]
Diagnostic	Les applications de diagnostic qui optimisent les coûts de propriété nécessitent une meilleure portée de communication et un meilleur débit de données pour surveiller les véhicules en continu.	WiMAX et Wi-Fi -> 4G/LTE -> DSRC/WAVE et WiMAX -> CALM et DSRC/WAVE -> CALM et Wi-Fi -> Bluetooth et ZigBee	[76]

Assurance	Les applications d'assurance qui optimisent les coûts nécessitent une évolutivité et une sécurité pour le suivi des statistiques sur les véhicules.	WiMAX et 4G/LTE -> DSRC/WAVE et Wi-Fi -> CALM et ZigBee -> Wi-Fi et Bluetooth -> ZigBee et CALM ->Bluetooth et DSRC/WAVE	[78]
Covoiturage	Les applications de covoiturage axées sur l'utilisation des ressources nécessitent un support de mobilité et une évolutivité pour assurer une connectivité durable à tous les utilisateurs.	DSRC/WAVE et WiMAX -> CALM et 4G/LTE -> WiMAX et CALM -> 4G/LTE et Wi-Fi -> ZigBee et Bluetooth	[80]
Info-divertissement	Les applications d'info-divertissement basées sur le streaming en ligne nécessitent un meilleur débit de données et une meilleure prise en charge de la mobilité pour une connectivité durable.	Wi-Fi et DSRC/WAVE -> 4G/LTE et CALM -> DSRC/WAVE et 4G/LTE -> CALM et Wi-Fi -> Bluetooth et ZigBee	[79]

TABLE 1.2 – La préférence prioritaire du WAT pour les clients

1.2.4 Avantages de l'Internet des Véhicules

Une étude comparative entre l'IoV et les VANET est menée pour mettre en évidence l'impact fructueux de la réalisation de l'IoV sur la communication véhiculaire, ses services et l'orientation commerciale de la communication (voir tableau 1.3). Plus précisément, quinze paramètres sont pris en compte pour l'évaluation comparative, à savoir la commercialisation (CMM), les objectifs (OB), l'architecture du réseau (NA), le service Internet (IS), les types de communication (CT), la compatibilité des appareils (DC), la capacité de traitement (PC), la taille des données (DS), la prise de décision (DM), l'informatique en cloud (CC), le cloud autonome (AC), le service d'application (AS), la scalabilité (SC), la connectivité (CO) et la sensibilisation au réseau (NAW). Les remarques suivantes peuvent être faites à partir de cette évaluation comparative :

- * Les communications véhiculaires de l'IoV seraient fortement commercialisées. Cela est dû aux applications commerciales intelligentes et aux applications d'info-divertissement, en plus des applications intelligentes de sécurité et de gestion.
- * L'architecture de réseau de l'IoV intégrerait la communication véhiculaire avec d'autres réseaux de communication. Cela est dû à l'hétérogénéité de l'architecture du réseau.
- * L'IoV fournirait un service Internet fiable dans les véhicules. Ceci est dû à l'inclusion de la communication V2I.
- * La plupart des dispositifs informatiques et de communication existants dans notre quotidien seraient compatibles avec les réseaux de véhicules IoV.
- * La capacité de traitement et de prise de décision des véhicules, la taille des réseaux de véhicules, le volume des données de réseau augmenteraient considérablement en IoV.

Paramètre	IoV	VANETs
CMM	D'énormes opportunités pour les applications commerciales grâce à l'architecture orientée vers les entreprises et à la fiabilité de la connectivité Internet.	Impossible de susciter un intérêt commercial en raison de l'architecture non favorable aux applications commerciales et de l'indisponibilité d'Internet [81].
OB	Sécurité routière, efficacité et info-divertissement commercial.	Sécurité et efficacité du trafic [82].
NA	Interconnexion collaborative entre réseaux hétérogènes.	Une architecture de réseau singleton qui n'est pas en mesure de collaborer avec d'autres réseaux existants [83].
IS	Un service Internet fiable serait disponible.	Le service Internet n'est pas disponible en raison de l'architecture de réseau non coopérative [84].
CT	Cinq types de communications, dont V2V, V2R, V2I, V2P et V2S.	Deux types de communications, dont V2V et V2R [85].
DC	La plupart des appareils personnels sont compatibles avec le réseau et peuvent communiquer avec les véhicules, notamment les téléphones intelligents, les ordinateurs portables, les tablettes.	La compatibilité des communications entre les appareils personnels et le réseau reste une question difficile en raison de l'architecture de réseau unique [86].
PC	La meilleure capacité de traitement disponible grâce au service à la demande basé sur le cloud.	Capacité de traitement limitée en raison de la disponibilité du système autonome [87].
DS	Des données volumineuses grâce à la collaboration de différents types de réseaux.	Données limitées en raison de la prise en compte des seules statistiques sur les véhicules voisins dans l'opération et la prise de décision [88].

DM	Les décisions relatives aux applications et aux protocoles sont basées sur l'exploration de données basée sur l'IA et le calcul de grandes données.	Les décisions sont basées sur un calcul simple et logique à partir de données locales car l'utilisation de l'IA reste une tâche difficile en raison des ressources limitées [89].
CC	Toute l'opération est basée sur le cloud computing et l'analyse de données volumineuses qui rendent l'IoV plus intelligent.	Le fonctionnement basé sur le cloud est possible, mais il n'est actuellement pas pris en charge en raison de l'absence d'une connectivité Internet fiable [23].
AC	La formation, la gestion et les services du cloud sont efficaces et fiables.	La formation de cloud est possible, mais la gestion et les services ne sont pas garantis [90].
AS	Les services des applications STI seront efficaces et fiables grâce à l'architecture client-serveur utilisant la connectivité Internet.	Aucune application STI ne garantit la disponibilité du service en raison du problème de déconnexion du réseau [91].
SC	En raison de la capacité d'intégration collaborative entre différents types de réseaux (VANET, Wi-Fi, 4G/LTE), l'architecture du réseau est évolutive.	En raison de l'impossibilité de travailler en collaboration, l'architecture du réseau n'est pas évolutive [92].
CO	Les véhicules sont toujours connectés au réseau par le meilleur réseau disponible.	Les véhicules sont connectés et déconnectés du réseau en fonction de la disponibilité du réseau [93].
NAW	En raison de la disponibilité des services de calcul et de stockage basés sur le cloud, la connaissance du réseau mondial est utilisée pour améliorer les performances du réseau.	La connaissance du réseau est réduite à la connaissance du voisin en raison de l'indisponibilité des informations et des contraintes de stockage et de traitement des véhicules [94].

TABLE 1.3 – La comparaison qualitative entre l'IoV et les VANETs.

1.2.5 Les défis du réseau IoV

En raison de la forte interaction des composants du réseau tels que les utilisateurs, les véhicules et les objets, le réseau de l'Internet des Véhicules doit fournir la meilleure capacité de communication qui soit gérable, contrôlable, opérationnelle et crédible [95]. L'Internet des Véhicules est confronté à de nombreux défis qui doivent être étudiés afin d'assurer une plus grande fiabilité, robustesse et stabilité des communications.

— **Tolérance aux fautes :**

L'architecture IoV étant basée sur des communications en cloud, certains véhicules peuvent tomber en panne ; cette panne ne devrait donc pas affecter le reste du réseau.

— **Latence :**

elle est définie comme la période de temps nécessaire à la transmission d'un paquet dans le réseau. dans certaines applications critiques telles que l'alerte en cas d'accident, la latence doit être minimisée autant que possible afin de garantir un transfert rapide des messages.

— **Compatibilité des réseaux :**

les différents types de technologies d'accès prises en charge par l'IoV obligent les chercheurs à tenir compte de ces technologies d'accès multiples lors de la conception d'applications et de protocoles pour l'IoV.

— **Sécurité :**

Les informations échangées via le réseau IoV sont très importantes et confidentielles, surtout avec l'accès à l'Internet. Par conséquent, l'opération de sécurisation de ces réseaux est une tâche fondamentale et une condition préalable au déploiement de l'IoV [96].

— **Connectivité :**

La vitesse élevée des véhicules en mouvement peut entraîner des changements fréquents dans la topologie du réseau. Par conséquent, un taux élevé d'arrivée et de départ des nœuds peut être affecté. La gestion d'une telle limitation entraîne une importante surcharge de communication. Les nœuds doivent fréquemment choisir une route fiable afin d'assurer la livraison des données à des destinations spécifiques. Les véhicules doivent être connectés en permanence.

— **Qualité de services (QoS) :**

L'IoV est considéré comme un système distribué en temps réel qui doit

satisfaire à des contraintes de temps, de fiabilité et de sécurité, ainsi qu'à des exigences de qualité spécifiques à l'application, afin de gérer l'ordonnancement des services intégrés en temps réel [97]. Pour résoudre ce problème diversifié, les exigences de qualité de service doivent gérer les ressources du réseau afin de fournir des garanties de qualité de service dans l'IoV. Le système IoV le plus robuste fournit une meilleure QoS.

1.2.6 Simulations et modèles de mobilité pour l'IoV

La simulation du réseau est la méthode la plus utile pour évaluer théoriquement les performances des réseaux avant leur déploiement physique. En fait, le simulateur de réseau doit prendre en compte toutes les caractéristiques spécifiques des véhicules en mouvement, c'est-à-dire le modèle de mobilité des nœuds, afin de reproduire l'environnement réel de l'IoV. Dans l'IoV, le mouvement des véhicules est limité aux routes et à l'interaction avec les autres véhicules (accélération, décélération et changement de voie). Ainsi, l'utilisation de modèles aléatoires où le changement de vitesse et de position des nœuds est aléatoire ne donne pas une évaluation réelle des protocoles conçus pour les environnements véhiculaires. Par conséquent, la simulation des réseaux IoV doit être effectuée par des simulateurs conçus spécialement pour les VANET. Les modèles de simulation de trafic sont classés en trois catégories : microscopique, mésoscopique et macroscopique [98]. La modélisation microscopique de la mobilité considère le flux du véhicule en détail, comme l'accélération/décélération, le comportement du conducteur, la longueur de la voiture, la vitesse de la voiture. Les propriétés macroscopiques sont générales par nature. Lorsqu'un grand nombre de véhicules sont en mouvement, les paramètres globaux peuvent être représentés sous forme de flux (masse et densité). La modélisation mésoscopique représente un niveau intermédiaire de modélisation du flux de trafic. Elle peut conduire à un compromis efficace entre la modélisation de véhicules individuels et la modélisation de grandes quantités de véhicules.

Ce modèle peut prendre différentes formes telles que la modélisation de la distance d'avancement comme une moyenne d'un grand nombre de véhicules, parfois la taille ou la densité d'un groupe de véhicules. Ce modèle inclut le comportement dynamique du véhicule et les propriétés macroscopiques telles que la densité et la vitesse pour un grand nombre de véhicules.

Parmi les générateurs de mobilité dans les VANET, nous avons par exemple : SUMO et VanetMobiSim. Les modèles de mobilité fournissent une description précise de la mobilité des véhicules dans le réseau. Selon la littérature disponible, il existe de nombreux modèles de mobilité, qui sont largement utilisés pour les réseaux IoV. Par rapport aux réseaux VANET classiques, les véhicules IoV sont beaucoup plus restrictifs en termes de trafic sur le réseau et nécessitent davantage d'applications et de services de trafic. Ces scénarios ne peuvent donc pas être traités par les solutions de mise en réseau classiques. Ces générateurs de mobilité, appelés aussi simulateurs de trafic véhiculaire, reposent sur une théorie de l'écoulement du trafic. Par exemple, Simulation of Urban MObility "SUMO" [99] est une simulation de trafic multimodal microscopique à code source ouvert. La simulation permet d'aborder un large éventail de sujets liés à la gestion du trafic, en permettant de simuler comment une demande de trafic donnée, constituée de véhicules individuels, se déplace sur un réseau routier donné. Elle est purement microscopique : chaque véhicule est modélisé de manière explicite, avec son propre itinéraire, et se déplace individuellement sur le réseau. MOVE [100] est construit à partir d'un simulateur de micro-traffic open source, SUMO. Il permet aux utilisateurs de générer rapidement des modèles de mobilité réalistes pour les simulations de réseaux VANET. Le résultat de MOVE est un modèle de mobilité réaliste et peut être immédiatement utilisé par des simulateurs de réseau populaires tels que NS2, NS3, OMNET++, etc.

Chapitre 2

Transport de données dans l'internet des véhicules

2.1 Introduction

L'évolution rapide des technologies de l'information a ouvert la voie à de nouvelles perspectives révolutionnaires dans le domaine des transports, notamment avec l'avènement de l'Internet des véhicules (IoV). L'IoV représente une convergence innovante entre les technologies de l'Internet des objets (IoT) et le secteur automobile, permettant une connectivité avancée entre les véhicules eux-mêmes et avec les infrastructures routières. Au cœur de cette révolution réside le transport de données au sein de l'IoV, une composante cruciale qui facilite la communication entre les véhicules, les systèmes routiers, et même les utilisateurs. Cette dimension essentielle de l'IoV promet de remodeler fondamentalement la façon dont nous percevons et gérons la mobilité, avec des implications notables pour la sécurité routière, la gestion du trafic, et le développement de véhicules intelligents. Dans cette perspective, ce chapitre se propose d'explorer en profondeur les mécanismes, les défis et les opportunités liés au transport de données dans l'Internet des véhicules.

2.2 Transport de données dans l'IoV

L'avènement de l'Internet des objets a conduit à une transformation des réseaux ad hoc de véhicules (VANET) vers un nouveau modèle connu sous le nom d'Internet des véhicules (IoV). La conception du véhicule dans les réseaux VANET et IoV diffère, ce qui rend ces deux modèles distincts en termes

d'appareils, de communications, de services et d'applications. Dans le VANET, le véhicule est vu comme un objet mobile qui sert à transmettre des messages entre les véhicules et les infrastructures.

Par contre, dans l'IoV, chaque véhicule est perçu comme un objet intelligent équipé d'un système multicapteur puissant. De plus, un véhicule dans l'IoV est envisagé comme un système de communication mobile dynamique, qui autorise les modes de communication suivants : mode intra-véhicule et mode véhicule-à-X, où X peut être un autre véhicule, une route, une infrastructure, une personne ou Internet. Par conséquent, l'IoV facilite la collecte et le traitement d'une grande quantité de données (big data) provenant de diverses régions géographiques via des véhicules intelligents pour fournir divers services aux conducteurs et aux passagers.

La majorité des recherches sur les VANET et les IoV se sont concentrées sur des problèmes et des applications spécifiques, tels que la diffusion et l'agrégation de données, la gestion de l'accès aux canaux, la sécurité du trafic et principalement les mécanismes de transport de données. Parmi ces mécanismes, on peut distinguer quatre grandes catégories, à savoir :

1) Mécanismes basés sur la géolocalisation :

La géolocalisation dans l'Internet des véhicules (IoV) est une stratégie de transmission de données qui utilise les informations de position géographique des véhicules pour déterminer le chemin optimal de transmission. Ce type de routage exploite la connaissance de la localisation des véhicules pour prendre des décisions intelligentes sur la manière de diriger les données vers leur destination, améliorant ainsi l'efficacité des communications dans des environnements mobiles et dynamiques. [101]

2) Mécanismes de contrôle de congestion :

Les mécanismes de contrôle de congestion dans l'IoV sont des techniques visant à réguler le flux de données afin d'éviter la saturation du réseau. Ces mécanismes ajustent la quantité de données transmises en fonction des conditions du trafic et de la capacité du réseau, garantissant ainsi une utilisation efficace des ressources et une communication fluide entre les véhicules. [102]

3) Mécanismes de dissémination de données :

Les mécanismes de dissémination de données dans l'IoV sont des stratégies permettant de partager efficacement des informations entre les

véhicules. Ces mécanismes déterminent comment distribuer les données, en particulier dans des scénarios d'alerte, de sécurité routière ou de coopération entre véhicules. Ils sont cruciaux pour assurer une diffusion rapide et fiable des informations au sein du réseau. [103]

4) Mécanismes basés sur la gestion de topologie réseau :

La gestion de la topologie réseau dans l'IPv englobe différentes méthodes pour optimiser la connectivité entre les véhicules. Cela inclut la surveillance de la structure du réseau, la gestion des liens entre les véhicules, et l'ajustement dynamique de la topologie pour s'adapter aux changements de conditions. Une topologie bien gérée garantit une communication efficace et stable entre les véhicules connectés. [104, 105]

Dans notre thèse, nous nous sommes concentrés sur le mécanisme de gestion de la topologie réseau, en mettant particulièrement l'accent sur le clustering et la sélection de relais pour le transport de données dans l'Internet des véhicules. Cette orientation est motivée par plusieurs raisons par rapport aux autres approches, que nous énumérons comme suit :

- **Réduction de la surcharge du réseau :**

Le clustering vise à diminuer la surcharge du réseau en regroupant les véhicules en clusters. Seuls quelques véhicules dans chaque cluster agissent en tant que nœuds de relais, réduisant ainsi le nombre de transmissions directes entre tous les véhicules. Cela contribue à une utilisation plus efficace des ressources réseau.

- **Amélioration de l'efficacité de la communication :**

En limitant les transmissions aux membres du même cluster, le clustering réduit la complexité des échanges d'informations, améliorant ainsi l'efficacité de la communication en réduisant la probabilité de collisions, d'interférences et de délais dans la transmission des données.

- **Conservation de l'énergie :**

En minimisant les transmissions directes à longue portée, le clustering permet aux véhicules de conserver leur énergie. Les véhicules non impliqués dans le relais de données peuvent passer en mode veille, économisant ainsi leur énergie et prolongeant la durée de vie des batteries.

- **Meilleure gestion de la mobilité :**

Les clusters peuvent être reconfigurés dynamiquement en fonction des changements de mobilité des véhicules. Cela permet une gestion plus

flexible de la topologie réseau, s'adaptant aux mouvements des véhicules et maintenant une connectivité efficace.

2.2.1 Etude de l'existant

2.2.1.1 Clustering

Le processus de clustering vise à structurer les noeuds du réseau en petits groupes appelés clusters. Typiquement, les véhicules, géographiquement voisins, sont regroupés dans un même cluster en fonction de différents paramètres et métriques. Dans cette partie, nous allons passer en revue les algorithmes de clustering existants dans ces réseaux, afin de proposer de nouvelles approches de clustering adaptées au paradigme IoV dans les prochains chapitres.

2.2.1.1.1 Historique : À l'origine, l'approche de clustering a été proposée pour coordonner entre les nœuds interconnectés dans les réseaux mobiles ad hoc (MANET) à la fin des années 1980 [12]. Par la suite, le clustering a été appliqué avec succès dans les VANET [106] et plus tard dans les réseaux IoV [107], en tenant compte de la grande mobilité et de l'évolutivité des nœuds dans ces réseaux. Un certain nombre d'algorithmes de clustering ont été proposés dans la littérature sur les réseaux véhiculaires et ils peuvent être classés en deux catégories :

2.2.1.1.2 Clustering dans les VANETs : Dans les VANETs, le protocole de clustering est largement utilisé et bien étudié pour répondre à leurs nombreux défis. Certains de ces protocoles proposés sont discutés dans cette partie :

Parmi les premières recherches, Fan et al. (2005) [106] ont tenté d'adapter les algorithmes de clustering des MANET aux VANETs. Cependant, cette adaptation n'est toujours pas capable de résoudre les caractéristiques spécifiques que possèdent les VANETs [108]. Dans les VANETs, par exemple, l'énergie n'est plus une préoccupation, et les véhicules très mobiles rendent la topologie du réseau très dynamique. En ce qui concerne les réseaux VANET, l'un des premiers algorithmes de clustering de véhicules est proposé par Kayis et Acarman [109], qui classe les véhicules en cluster de vitesse, de telle sorte que le véhicule n'atteigne qu'un groupe de vitesse similaire.

Plus tard, Wang et al. (2008) [110] ont suggéré une nouvelle technique de clustering pour le VANET basée sur la localisation. Les clusters sont créés sur la base des coordonnées géographiques des véhicules et des priorités relatives attribuées aux véhicules et aux données de trafic. En outre, l'algorithme utilise l'ensemble dominant minimal (MDS) pour sélectionner le nœud qui agira comme chef de Cluster (CH) pour chaque cluster.

Dans [111], les auteurs ont proposé un nouvel algorithme de sélection des CH pour les VANET. Les chefs de groupe sont élus et réélus de manière distribuée en fonction de leur vitesse relative et de la distance qui les sépare des membres de leur groupe. La grande stabilité du schéma proposé résulte de son adaptabilité au comportement des conducteurs sur la route et de son processus d'apprentissage pour prédire la vitesse et la position futures de tous les membres du cluster en utilisant le système d'inférence à logique floue.

Dans une autre étude, Azizian et al. (2016) [112] ont suggéré une approche de clustering D- Hop pour VANETs (DHCVs), qui utilise les informations de mobilité relative pour construire des clusters stables de manière distribuée. L'algorithme DHCV utilise les différences de vitesse et de position des véhicules comme mesures pour effectuer le clustering dans la zone D-drop.

Dans la même année, Ahwazi et NooriMehr (2016) [113] ont introduit un nouveau clustering Mobility aware and Single-hop (MOSIC) pour VANETs adapté aux zones autoroutières. MOSIC présente un nouvel algorithme de clustering qui utilise le modèle de mobilité de Gauss Markov (GMM) [114] pour la prédiction de la mobilité et permet au véhicule de prédire sa mobilité par rapport à ses voisins. Hadded et al. (2017) [115] ont également conçu un nouvel algorithme de clustering basé sur l'angle (ACA) qui tire parti de la position angulaire et de l'orientation des véhicules pour sélectionner les véhicules les plus stables afin qu'ils fonctionnent comme chefs de cluster le plus longtemps possible. Dans l'algorithme ACA, deux véhicules ou plus peuvent être rattachés au même clustering uniquement si l'angle entre leurs vecteurs est aigu.

2.2.1.1.3 Clustering dans l'IoV : Plus récemment, un certain nombre d'algorithmes de clustering ont été proposés par des chercheurs pour l'IoV. Certains de ces protocoles proposés sont discutés dans cette partie :

Aadil et al. (2018) [107] ont développé un algorithme de clustering efficace pour l'IoV en utilisant l'optimiseur Dragonfly (CAVDO). Pour s'assurer que

la topologie reste stable, un algorithme multi-objectif basé sur l'essaim est utilisé. En outre, l'algorithme MA-DTR (Mobility Aware- Dynamic Transmission Range) est intégré pour renforcer le dynamisme de la portée de transmission.

Puis, toujours dans la même année, dans Khan et al. (2018) [116], les auteurs ont proposé un nouveau paradigme basé sur l'amélioration de l'algorithme de regroupement des flammes de papillon de nuit pour l'Internet des véhicules (MFCA-IoV). Ils ont introduit un optimiseur de flamme de papillon de nuit (MFO), qui est un processus inspiré de la nature. Le MFCA-IoV optimise la génération de clusters pour garantir une transmission efficace.

Dans une autre nouvelle étude réalisée par Dutta et al. (2019) [117], les auteurs ont proposé un protocole de clustering hiérarchique efficace (EHCP). Ce dernier présuppose que pour relier n'importe quel véhicule à Internet, la RSUGateway (RSU-G) est nécessaire. Ensuite, afin de mener le processus de clustering, chaque véhicule collecte des informations sur son voisinage et les envoie au Cloud. Une métrique de coût est définie par l'EHCP et utilisée pour choisir les chefs de cluster (CLs) appropriés.

Oussama et al. [118] Cette recherche présente un nouvel algorithme de clustering heuristique basé sur l'unité de bord de route (RSU) pour IoV nommé HCAR. Cette approche comprend la centralisation de l'algorithme de clustering pour les RSU décentralisées. Ces dernières exécutent le clustering en se basant sur les concepts de la théorie des graphes tels que le degré des nœuds et la matrice des adjacences.

Plus récemment, Senouci et al. (2020) [119] ont proposé une nouvelle approche de clustering distribué qui utilise l'ensemble dominant dans le contexte de l'IoV (DCADS). L'ensemble dominant est construit sur la base d'une approche heuristique simple utilisant une stratégie gourmande et un nouveau critère appelé "span de nœud", qui se réfère au nombre de nœuds voisins qui ne sont pas encore séparés du cluster, pas même le nœud lui-même.

En ligne avec la littérature disponible, la plupart des algorithmes de clustering proposés sur le contexte de l'Internet des véhicules ont besoin de l'utilisation du cloud computing pour effectuer le processus de clustering, ce qui implique un accès fréquent à des serveurs distants. Par conséquent, l'utilisation d'un tel serveur en Cloud centralisé entraîne une utilisation élevée de la bande passante et des retards importants. En conséquence, le Cloud peut

ne pas répondre aux exigences de qualité de service (QoS) des applications en temps réel. En outre, permettre à tous les véhicules d'accéder directement au Cloud augmentera l'utilisation des ressources radio, le taux de collision et pourrait conduire à la congestion. Permettre à un seul ensemble de véhicules, appelés "Cluster Heads", d'accéder au serveur du Cloud est une solution appropriée pour résoudre les problèmes susmentionnés.

2.2.1.2 Selection des relais

Face à l'augmentation du nombre de voitures et d'appareils connectés comportant de plus en plus de capteurs, le développement d'architectures et d'algorithmes intelligents pour transporter efficacement les données est une préoccupation majeure. Les réseaux doivent être conçus en conséquence afin d'absorber une telle quantité de données et d'assurer la qualité de service (QoS).

Bien que plusieurs utilisateurs puissent se connecter directement à Internet en utilisant une connexion 4G, ce n'est pas forcément possible pour tout le monde. Les coûts élevés, l'absence de connectivité due à des facteurs environnementaux ou à des zones mal desservies sont quelques exemples où la connexion d'un utilisateur peut poser problème.

Une solution consiste à utiliser des relais pour transmettre des données depuis et vers ces utilisateurs afin de leur permettre d'avoir accès au réseau. Le choix des relais à utiliser aura un impact majeur sur les performances et, dans certains contextes, il n'est pas toujours possible de disposer de relais statiques dédiés (par exemple, dans une zone faiblement peuplée), car le coût de leur déploiement est trop élevé par rapport au nombre d'utilisateurs (potentiels). En outre, dans un contexte où tous les utilisateurs se déplacent, comme l'Internet des véhicules (IoV), la topologie en constante évolution pose un défi encore plus grand au processus de sélection des relais. En effet, certains utilisateurs peuvent se déplacer suffisamment loin pour quitter la zone de couverture ou un embouteillage peut faire en sorte qu'une section de route présente soudainement un pic de trafic réseau en raison d'une augmentation soudaine du nombre d'utilisateurs. Dans de telles situations, il peut être difficile de décider où placer des relais statiques et le recours à des relais mobiles (MR) peut grandement aider à adapter la topologie à ce contexte très dynamique, sans encourir un coût plus élevé.

La sélection des relais est un problème qui a été largement étudié [120]. Dans

cette partie, nous allons passer en revue les approches de sélection de relais existantes qui sont divisées en deux catégories : générales et basées sur le DL.

2.2.1.2.1 Approches générales : Les approches générales de sélection des relais représentent une catégorie de méthodes qui s'appuient principalement sur des modèles mathématiques pour déterminer les relais les plus appropriés dans un réseau. Dans la section suivante, nous allons explorer ces approches en détail.

Abada et al. [121] ont proposé une méthode pour choisir les MR parmi les véhicules afin de permettre au reste des véhicules d'accéder à l'Internet par leur intermédiaire. Les véhicules adjacents sont connectés via le WiFi, et les relais se connectent à l'Internet via une antenne cellulaire. De nombreux paramètres sont utilisés pour sélectionner les relais, comme la vitesse, la puissance du signal reçu, la distance entre les véhicules et la stabilité de la connexion. Bien qu'il s'agisse d'une bonne méthode, elle ne prend pas en compte plusieurs types de mobilité, et les simulations sont effectuées en ligne droite sur des autoroutes.

Dans une autre étude [122], les auteurs ont utilisé le Matching Game pour prévoir les circonstances radio des drones. Le système proposé modifie dynamiquement la sélection du mode, l'ordonnancement du temps et l'allocation des canaux afin d'optimiser les performances du réseau une fois que les UAV ont décidé de leurs besoins. Les auteurs de ce travail, en revanche, se sont penchés sur des cas où le nombre de drones se compte en dizaines et où seule une fraction d'entre eux génère des paquets de données. Par conséquent, cette technique n'est pas adaptée à un réseau routier où des centaines d'utilisateurs génèrent des données simultanément.

L'approche présentée dans [123] utilise une technique de sélection de relais pour aider les nœuds souffrant d'interférences excessives. Si les circonstances radio d'un nœud sont trop faibles, il cherchera des voisins appropriés pour relayer ses données. L'approche de planification "premier arrivé, premier servi" est utilisée pour choisir le meilleur voisin. Cette approche permet à n'importe quel nœud d'agir comme un relais. Cependant, elle a été développée dans un environnement statique ; elle n'est donc pas adaptée au contexte de l'IoV.

Dans [124], l'auteur suggère d'ajouter des MR pour aider les relais fixes pendant les périodes de trafic élevé. Des chaînes de Markov sont utilisées pour prévoir les moments où le trafic sera important. Les chemins idéaux pour

les MR sont calculés à l'aide de ces informations, et ils sont transmis sur ces chemins pour aider les relais fixes. Bien que ce système prenne en compte la mobilité des utilisateurs (fixes ou mobiles), on suppose que les MR se déplacent à une vitesse constante et que les utilisateurs finaux ne peuvent se connecter qu'à un relais. Cela limite la flexibilité de la solution proposée, car tout utilisateur doit être à portée de relais, et une architecture spécifique est requise (relais statiques).

La majorité des solutions sont basées sur la sélection du relais auquel les utilisateurs se connectent. Les relais, qu'ils soient mobiles ou non, sont généralement des appareils dédiés.

2.2.1.2.2 Approches basées sur le DL : Les approches basées sur le Deep Learning (DL) représentent une catégorie de méthodes innovantes pour la sélection des relais, qui tirent parti des techniques d'apprentissage profond pour résoudre ce problème complexe. Dans la section suivante, nous allons explorer ces approches en détail.

Les auteurs dans le travail [125] ont proposé un modèle qui utilise l'apprentissage profond avec le processus de décision de Markov (MDP) pour la sélection des relais dans un réseau coopératif. La probabilité d'échec et l'information mutuelle sont prises pour entraîner le modèle proposé. Cependant, ce modèle est conçu pour une faible mobilité, ce qui n'est pas adapté à l'environnement IoV.

Dans [126], les auteurs ont proposé une sélection de relais basée sur l'apprentissage profond pour améliorer les performances du réseau. L'approche a été appliquée dans le contexte d'un réseau Adhoc routier pour véhicules. Les véhicules peuvent se connecter à l'Internet via des RSU. Dans un système d'apprentissage profond, la combinaison de nombreuses caractéristiques est intrigante. En revanche, les RSU sont statiques, ce qui rend l'approche proposée inadaptée dans les situations où le déploiement d'équipements dédiés n'est pas toujours disponible.

Dans la référence [127], les auteurs utilisent l'apprentissage profond pour choisir un relais dans la situation où un nœud a de mauvaises circonstances radio liées à l'ombrage. Le meilleur relais est déterminé en utilisant un certain nombre de paramètres différents. Toutefois, cette méthode ne tient compte que de la capacité d'un utilisateur à se connecter à une RSU par l'intermédiaire d'un seul relais.

En ligne avec la littérature disponible, les solutions actuelles de sélection de relais soient efficaces dans certains contextes, elles présentent des limites significatives. Elles ne prennent pas en compte plusieurs types de mobilité, sont souvent conçues pour des environnements statiques, et ne tiennent compte que de la capacité d'un utilisateur à se connecter à une RSU via un seul relais. Par conséquent, il est nécessaire de développer des solutions plus flexibles et dynamiques qui peuvent s'adapter à une variété de situations de mobilité et qui peuvent fonctionner efficacement même lorsque le déploiement d'équipements dédiés n'est pas possible.

2.2.2 Termes et définitions

Pour bien appréhender la suite de nos contributions, voici les définitions des critères et méthodes que nous utiliserons par la suite :

2.2.2.1 Critères

1. Degré du nœud (D_i) :

Il est défini comme le nombre de voisins du nœud, qui est égal à :

$$D_i = |N_i| \quad (2.1)$$

où N_i est l'ensemble des voisins à un saut du nœud i

2. Ecart moyen (AG) :

Il est défini comme la distance moyenne entre un nœud et ses voisins. Un nœud avec un AG minimum est plus proche du milieu du voisinage. Il est calculé comme suit :

$$AG_i = \frac{1}{D_i} \sum_{j=1, j \neq i}^{D_i} \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (2.2)$$

3. Stabilité du lien (LS) :

Elle est définie comme la stabilité du lien du nœud par rapport à ses voisins. Supposons que $AG_i(t1)$ est l'écart moyen du nœud i à $t1$ et $AG_i(t2)$ est l'écart moyen du nœud i à $t2$, alors la stabilité de liaison LS

du nœud i à un instant T (t_2-t_1) est calculée comme suit :

$$LS_i = | AG_i(t_1) - AG_i(t_2) | \quad (2.3)$$

4. Vitesse relative (Rs) :

La vitesse relative du nœud i et le nœud j est calculé comme suit :

$$Rs_{(i,j)} = \ln \left(\frac{|v_i - v_j|}{V_{max}} \right) \quad (2.4)$$

où : V_{max} est la vitesse maximale autorisée sur l'itinéraire.

5. Vitesse relative moyenne (ARs) :

La vitesse relative moyenne du nœud i par rapport à ses voisins à un saut (N_i), est calculée comme suit :

$$ARs_{(i,N_i)} = \frac{\sum_{j=1}^{D_i} Rs_{(i,j)}}{D_i} \quad (2.5)$$

6. Accélération relative (Ra) :

L'accélération relative du nœud i et du nœud j est calculée comme suit :

$$Ra_{(i,j)} = \ln \left(\frac{|a_i - a_j|}{a_{max}} \right) \quad (2.6)$$

Où : a_{max} est l'accélération maximale autorisée sur l'itinéraire.

7. Accélération relative moyenne (ARa) :

L'accélération relative moyenne du nœud i par rapport à ses voisins à un saut (N_i) est calculée comme suit :

$$ARa_{(i,N_i)} = \frac{\sum_{j=1}^{D_i} Ra_{(i,j)}}{D_i} \quad (2.7)$$

8. Facteur de mobilité (MF) :

Ce facteur dépend de deux mesures principales : la vitesse relative moyenne et l'accélération relative moyenne. Il est calculé comme suit :

$$MF_i = ARv_{(i,N_i)} \times ARa_{(i,N_i)} \quad (2.8)$$

2.2.2.2 Méthodes d'aide à la décision multicritères

Les méthodes d'aide à la décision multicritères sont des techniques utilisées pour résoudre des problèmes de décision complexes qui impliquent plusieurs critères. Ces méthodes visent à pallier les faiblesses de l'approche classique de résolution des problèmes de décision, qui consiste à optimiser une seule fonction [128]. Parmi ces méthodes, on peut citer : AHP, VIKOR, PROMETHEE, ELECTRE et TOPSIS. Ci-dessous, un tableau 2.1 comparatif de ces méthodes.

Méthode	Description	Avantages	Inconvénients
AHP (Analytic Hierarchy Process) [129]	Une méthode basée sur la hiérarchisation des critères et des alternatives pour faciliter la prise de décision.	Facile à comprendre et à utiliser, permet d'intégrer les préférences des décideurs et calcule le poids des actions.	Sensible aux changements dans les poids des critères, nécessite des comparaisons par paires.
VIKOR [130]	Une méthode qui vise à classer et sélectionner les alternatives en fonction de leur proximité à l'idéal.	Permet de prendre en compte les compromis entre les critères, offre une solution unique.	Nécessite des poids pour les critères, moins connue que d'autres méthodes.
PROMETHEE (Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations) [131]	Une méthode de classement des alternatives basée sur les préférences des décideurs.	Facile à mettre en œuvre, permet de prendre en compte les préférences des décideurs et le classement complet et partiel des actions (ou alternatives) .	Peut être sensible aux changements dans les poids des critères, nécessite des fonctions de préférence.
ELECTRE (ELimination Et Choix Traduisant la REalité) [132]	Une méthode de classement des alternatives basée sur la concordance et la discordance entre les critères.	Permet de prendre en compte les contradictions entre les critères, offre une solution robuste.	Peut être complexe à mettre en œuvre, nécessite des seuils de concordance et de discordance.
TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) [133]	Une méthode qui classe les alternatives en fonction de leur proximité à l'idéal et de leur éloignement de la solution la moins idéale.	Facile à comprendre et à utiliser, permet de prendre en compte les compromis entre les critères.	Sensible aux changements dans les poids des critères, nécessite des poids pour les critères.

TABLE 2.1 – Tableau comparatif des méthodes d'aide à la décision multicritère

2.2.2.2.1 Méthode AHP : AHP, proposé par Saaty (1980) [134], se concentre sur la manière de fixer le poids relatif des différentes activités dans un processus de décision multicritères. Cette technique permet d'intégrer des jugements sur des critères qualitatifs inconcrets à côté de critères quantitatifs concrets [135].

Le processus AHP est fondé sur trois axes : premièrement, la construction du système, deuxièmement, la comparaison entre les critères et les alternatives, troisièmement, l'établissement d'une synthèse des priorités. Dans la première phase, un problème complexe de prise de décision est organisé sous forme de hiérarchie. L'AHP décompose d'abord un problème compliqué de MCDM en une hiérarchie d'éléments de décision interdépendants (alternatives et critères). Dans l'AHP, la cible, les alternatives et les critères sont organisés en un arbre hiérarchique. Une hiérarchie comporte au minimum trois couches : la cible principale du problème au sommet, les alternatives dans la couche inférieure, et au milieu les multiples critères qui déterminent les alternatives [136], comme le montre la Figure 2.1

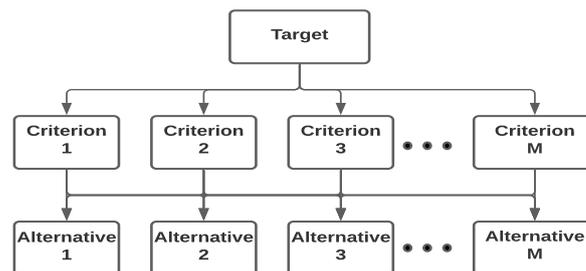


FIGURE 2.1 – Structure hiérarchique AHP

La deuxième phase compare les critères et les alternatives. Une fois que le problème est décomposé, que la hiérarchie des composants est formée, le processus de hiérarchisation commence pour déterminer le poids relatif des critères à chaque couche. Le jugement par paire commence à la deuxième couche et se termine à la couche inférieure : la couche des alternatives. Sur chaque couche, les critères sont comparés par paires en fonction de leur degré d'importance et sur la base des critères spécifiés au niveau supérieur [136].

Dans l'AHP, les comparaisons multiples par paires sont basées sur une échelle comparative standardisée à 9 niveaux, comme indiqué dans le Tableau 2.1

On considère $R = \{r_j \mid j = 1, 2, \dots, m\}$ l'ensemble qui représente tous les critères. Le résultat de la comparaison par paires sur m critères peut être résumé dans une matrice d'évaluation $E(m \times m)$, où chaque élément $e_{ij}(i, j =$

Level of intensity	Definition
1	Importance égale
3	Modérément important
5	Fortement important
7	Très fortement important
2,4,6,8	Valeurs intermédiaires
9	Extrêmement important

TABLE 2.2 – Échelle de comparaison standardisée à 9 niveaux

$1, 2, \dots, m$) représente le rapport des poids des critères, comme donné dans l'équation 2.9 :

$$E = \begin{matrix} & r_1 & r_2 & \dots & r_m \\ \begin{matrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_m \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & e_{12} & \dots & e_{1m} \\ e_{21} & 1 & \dots & e_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{m1} & e_{m2} & \dots & 1 \end{pmatrix} & , e_{ij} \neq 0, e_{ji} = 1/e_{ij}. \end{matrix} \quad (2.9)$$

Dans la phase finale, la procédure mathématique commence à normaliser et à déterminer les poids de chaque matrice. Les poids sont calculés en utilisant le vecteur propre droit (v) qui correspond à la valeur propre la plus élevée (λ_{max}), tel que :

$$Ev = \lambda_{max}v. \quad (2.10)$$

Si les comparaisons par paires sont totalement cohérentes, la matrice E a la valeur 1 et $\lambda_{max} = m$. Dans ce cas, les poids peuvent être calculés en normalisant soit les lignes soit les colonnes de E [137]. La qualité du résultat de l'AHP dépend du fait que les paires sont jugées cohérentes ou non.

La cohérence est déterminée par la corrélation entre les entrées de E : $e_{ij} \times e_{jk} = e_{ik}$. L'indice de cohérence (IC) est :

$$CI = (\lambda_{max} - n)/(n - 1). \quad (2.11)$$

Le rapport de cohérence final (CR), qui est utilisé pour juger si les évaluations sont suffisamment cohérentes, est calculé comme le quotient du CI et du RI qui représente un nombre aléatoire, comme défini dans l'équation 2.12.

$$CR = \frac{CoherencyIndex(CI)}{RandomIndex(RI)} \quad (2.12)$$

La valeur 0,1 est la limite maximale acceptée pour la CR. Si le résultat final de la cohérence est supérieur à cette valeur, le processus d'évaluation doit être répété pour améliorer la cohérence. La mesure de cohérence pourrait être utilisée pour évaluer la cohérence des décideurs et également pour évaluer la cohérence de l'ensemble de la hiérarchie [137]. La mise en œuvre de la technique AHP est illustrée dans la Figure 2.2.

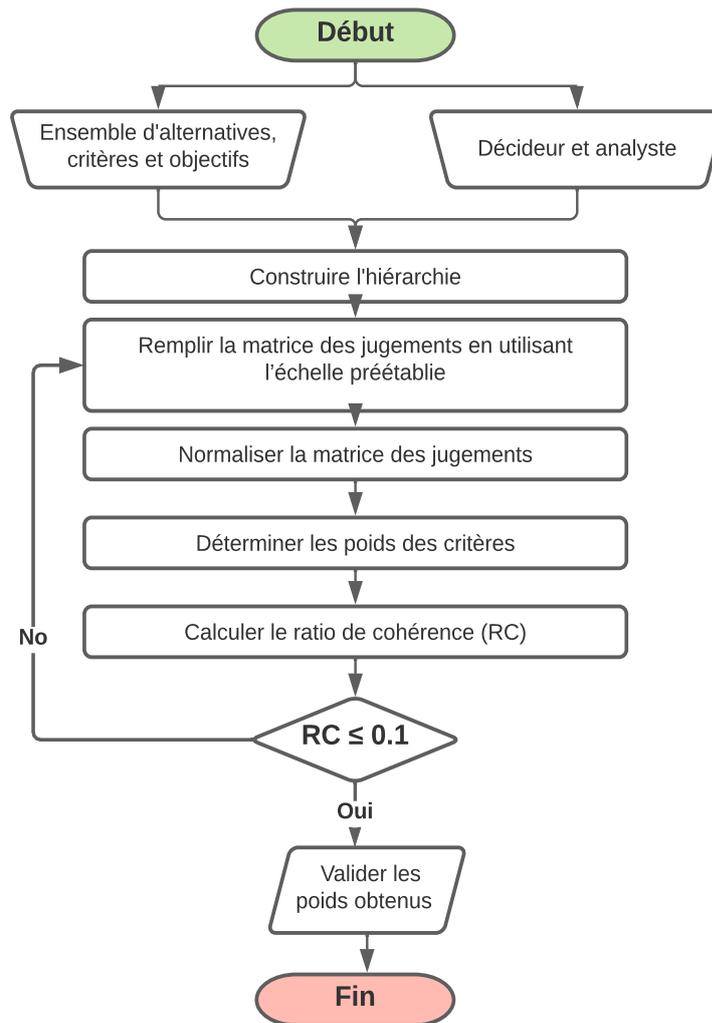


FIGURE 2.2 – Algorithme AHP

2.2.2.2.2 Méthode PROMETHEE : La technique PROMTHEREE a été proposée par Brans et Vincke (1985) [138]. Elle est basée sur la définition de critères généralisés permettant une bonne modélisation des préférences du décideur et sur la construction d'une relation de sur-classement évaluée. Par rapport aux autres techniques couramment utilisées pour la prise de décision multicritères (MCDM), cette technique de classement est assez basique

dans sa conception et sa mise en œuvre. Elle est bien adaptée aux problèmes dans lesquels un ensemble limité de différentes alternatives doivent être classées [136]. Le tableau d'évaluation constitue la base de la technique PROMETHEE. Les alternatives de ce tableau peuvent être évaluées sur la base des différents critères.

Cette technique permet de traiter des problèmes multicritères où $A = \{a_i \mid i = 1, 2, \dots, n\}$ est un ensemble d'alternatives potentielles. Dans ce cas, les données de base du problème sont disposées dans un tableau d'évaluation du type suivant :

	$r_1(\cdot)$	$r_2(\cdot)$	$r_3(\cdot)$	...	$r_m(\cdot)$
	w_1	w_2	w_3	...	w_m
a_1	$r_1(a_1)$	$r_2(a_1)$	$r_3(a_1)$	...	$r_m(a_1)$
a_2	$r_1(a_2)$	$r_2(a_2)$	$r_3(a_2)$	...	$r_m(a_2)$
a_3	$r_1(a_3)$	$r_2(a_3)$	$r_3(a_3)$	...	$r_m(a_3)$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
a_n	$r_1(a_n)$	$r_2(a_n)$	$r_3(a_n)$	...	$r_m(a_n)$

TABLE 2.3 – Tableau d'évaluation

La modélisation des préférences des décideurs requise par PROMETHEE comprend deux types d'informations :

1) **Information inter-critères :**

Ils font référence aux poids d'importance relative associés aux différents critères, comme le montre le tableau suivant :

$r_1(\cdot)$	$r_2(\cdot)$	$r_3(\cdot)$...	$r_m(\cdot)$
w_1	w_2	w_3	...	w_m

TABLE 2.4 – Importance of criteria

Où les w_j ; $j= 1,2,\dots,m$ sont les poids d'importance relative associés aux différents critères $r_j(\cdot)$; $j= 1,2,\dots,m$. Ces poids sont supposés être positifs tels que : $\sum_{j=1}^m w_i = 1$.

2) **Informations intra-critères :**

Ils se réfèrent à la détermination de critères généralisés et procèdent ensuite à leur classification, comme le montrent les étapes suivantes :

— **Détermination des critères généralisés**

Dans le cas d'une comparaison d'alternatives par paires, des différences sont observées entre les évaluations pour chaque critère. Ces différences sont notées d_j :

$$d_j(a, b) = r_j(a) - r_j(b) \quad (2.13)$$

Où $r_j(a)$ et $r_j(b)$ sont l'évaluation des alternatives a et b par rapport au critère r_j .

Les préférences du décideur sont modélisées par une fonction de préférence P_j associée à chaque critère où :

$$P_j : A \times A \rightarrow [0, 1]$$

$$(a, b) \rightarrow P_j(a, b)$$

$$P_j(a, b) = F_j[d_j(a, b)]; \forall a, b \in A$$

$P_j(a, b)$: la préférence du décideur pour les alternatives a et b en fonction des critères r_j .

Il existe quatre situations privilégiées :

$P_j(a, b) = 0$: Si a n'est pas préféré à b ou si a et b sont indifférents ;

$P_j(a, b) \approx 0$: Si a est faiblement préféré à b ;

$P_j(a, b) = 1$: Si a est strictement préféré à b ;

$P_j(a, b) \approx 1$: Si a est fortement préféré à b .

Le couple (r_j, P_j) est appelé "**critère généralisé**".

— **Types de critères généralisés :**

Pour faciliter le choix du décideur et lui permettre d'établir une fonction de préférence pour chaque critère, les auteurs de PROMETHEE [138] ont classé les critères généralisés en six types (fonction habituelle, fonction en U, fonction en V, fonction de niveau, fonction linéaire et fonction gaussienne). Ces six fonctions sont les plus simples pour exprimer la préférence d'un décideur. Cependant, d'autres fonctions peuvent être choisies. Les trois premiers types de critères conviennent à la modélisation des critères qualitatifs, tandis que les trois derniers types sont particulièrement adaptés à la représentation des critères quantitatifs.

— **L'indice de préférence agrégé :**

Soit $a, b \in A$, et soit :

$$\begin{cases} \pi(a,b) = \sum_{j=1}^k P_j(a,b)w_j \\ \pi(b,a) = \sum_{j=1}^k P_j(b,a)w_j \end{cases}$$

Cet indice représente l'indice de préférence agrégé. Il exprime comment et avec quel degré l'alternative a est préférée à l'alternative b au regard de tous les critères.

Les propriétés suivantes sont vérifiées pour toutes les alternatives a et b :

$$\begin{cases} \pi(a,a) = 0 \\ 0 \leq \pi(a,b) \leq 1 \\ 0 \leq \pi(b,a) \leq 1 \\ 0 \leq \pi(a,b) + \pi(b,a) \leq 1 \end{cases}$$

— **Les flux de classement**

Afin d'exploiter la relation de classement évaluée, trois flux de classement sont définis :

1. Flux positif : $\varphi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(a, x)$

$\varphi^+(a)$ exprime combien l'alternative a est meilleure par rapport à toutes les autres alternatives. Il représente la puissance de l'action a .

2. Flux négatif : $\varphi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(x, a)$

$\varphi^-(a)$ exprime à quel point l'alternative a est plus mauvaise que toutes les autres alternatives. Il représente la faiblesse de a .

3. Flux net : $\varphi(a) = \varphi^+(a) - \varphi^-(a)$

Le flux net est la différence entre les flux positifs et négatifs. Ce flux est élevé et positif si a est meilleur que les autres alternatives ou il est négatif si a est moins bon que les autres alternatives.

Les flux définis ci-dessus sont normalisés. On a toujours :

$$0 \leq \varphi^+(a) \leq 1$$

$$0 \leq \varphi^-(a) \leq 1$$

En considérant le facteur de normalisation : $(\frac{1}{n-1})$

■ **PROMETHEE I (Classement partiel) :**

Les flux de classement positif et négatif conduisent chacun à un arrangement d'alternatives. Le classement partiel du PROMETHEE I est leur intersection comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} aP^I b; \text{ si } \begin{cases} \varphi^+(a) > \varphi^+(b) \text{ et } \varphi^-(a) < \varphi^-(b); \text{ Ou} \\ \varphi^+(a) > \varphi^+(b) \text{ et } \varphi^-(a) = \varphi^-(b); \text{ Ou} \\ \varphi^+(a) = \varphi^+(b) \text{ et } \varphi^-(a) < \varphi^-(b); \end{cases} \\ \\ aI^I b; \text{ si } \varphi^+(a) = \varphi^+(b) \text{ et } \varphi^-(a) = \varphi^-(b); \\ \\ aR^I b; \text{ si } \begin{cases} \varphi^+(a) > \varphi^+(b) \text{ et } \varphi^-(a) > \varphi^-(b); \text{ Ou} \\ \varphi^+(a) < \varphi^+(b) \text{ et } \varphi^-(a) < \varphi^-(b); \end{cases} \end{array} \right.$$

Ou P^I , I^I et R^I sont respectivement des relations de préférence, d'indifférence et d'incomparabilité.

■ **PROMETHEE II (classement complet) :**

Le décideur exige souvent un classement complet. En effet, un classement complet facilite la prise de décision finale. À cette fin, PROMETHEE II construit un classement complet (P , I) sur A en utilisant le flux net.

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi(a) = \varphi^+(a) - \varphi^-(a) \\ aP^{II} b; \text{ if } : \varphi(a) > \varphi(b) \\ aI^{II} b; \text{ if } : \varphi(a) = \varphi(b) \end{array} \right.$$

Ou P^{II} et I^{II} sont respectivement les relations de préférence et d'indifférence.

Il est important de noter que PROMETHEE II ne laisse aucune

place à l'incomparabilité entre les alternatives. La mise en œuvre de la technique PROMETHEE est illustrée dans la Figure 2.3

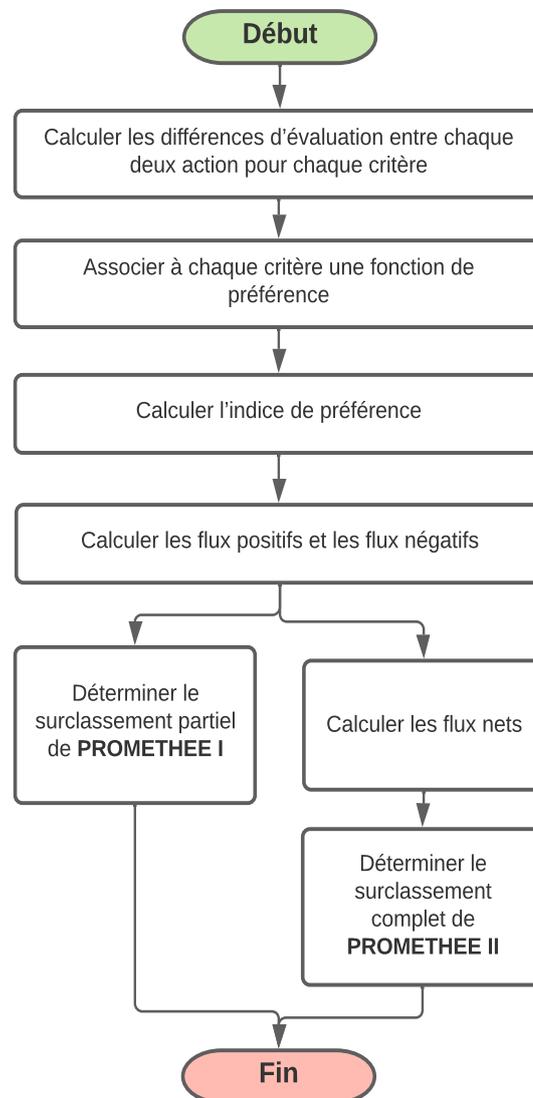


FIGURE 2.3 – Algorithme PROMETHEE

2.2.2.3 Réseaux Neuronaux Convolutionnels Unidimensionnels (1D CNN)

Les réseaux neuronaux convolutionnels unidimensionnels (1D CNN) sont une variante des réseaux neuronaux convolutionnels (CNN) qui sont généralement utilisés pour l'analyse de séries temporelles ou de données qui ne sont pas structurées spatialement en deux dimensions. Dans un 1D CNN, le noyau se déplace dans une seule direction, ce qui est particulièrement utile pour les données de séries temporelles.

2.2.2.3.1 Couche Convolutionnelle La couche convolutionnelle d'un 1D CNN extrait automatiquement des caractéristiques des données d'entrée en les convoluant avec des noyaux entraînaables. Ces noyaux sont des filtres qui scannent l'entrée suivant ses dimensions en effectuant des opérations de convolution. L'activation des cartes de caractéristiques générées est ensuite propagée vers l'avant. Un avantage majeur des réseaux convolutifs est l'utilisation d'un poids unique associé aux signaux entrant dans tous les neurones d'un même noyau de convolution. Cette méthode réduit l'empreinte mémoire, améliore les performances et permet une invariance du traitement par translation.

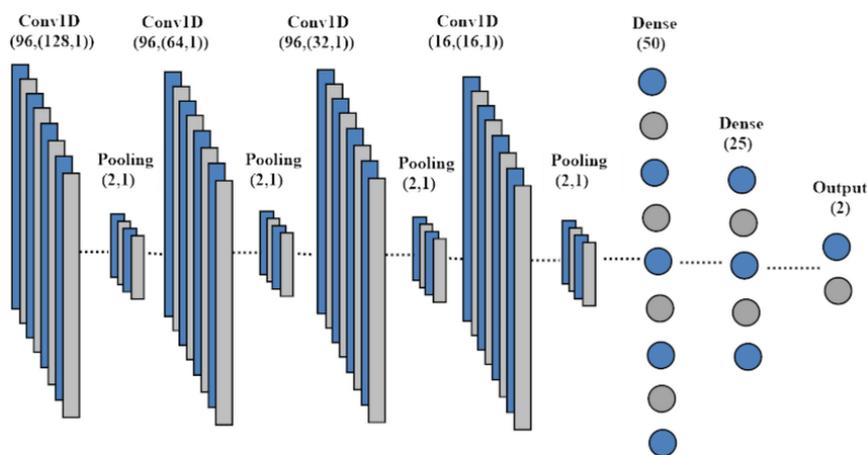


FIGURE 2.4 – Schéma d'un 1D CNN [139]

2.2.2.3.2 Couches de Max-Pooling Les couches de max-pooling réduisent l'échantillon des cartes de caractéristiques de la couche convolutionnelle précédente et sont déclenchées en fonction de la valeur maximale à l'intérieur de la foulée prédéfinie des cartes de caractéristiques précédentes. En réduisant la dimensionnalité, les couches de max-pooling mettent l'accent sur les caractéristiques critiques dans la propagation vers l'avant vers les couches entièrement connectées inférieures.

2.2.2.3.3 Couches Entièrement Connectées Les couches entièrement connectées catégorisent de manière non linéaire les caractéristiques extraites des données d'entrée et fournissent des vecteurs de probabilité pour l'inférence. Ces couches sont communes à tous les modèles de réseaux de neurones et correspondent à un modèle de perceptron multicouche (MLP). Leur objectif

est d'attribuer à chaque échantillon de données une étiquette correspondant à sa classe d'appartenance.

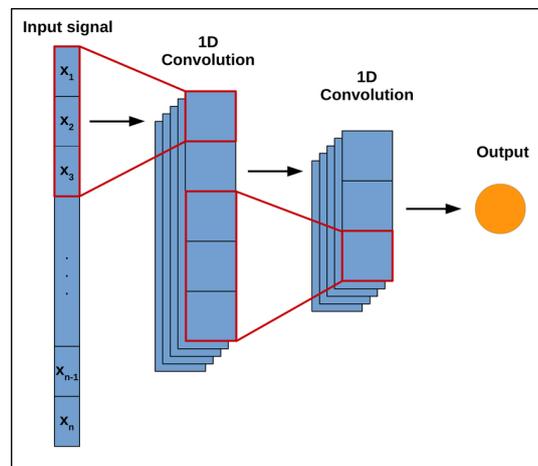


FIGURE 2.5 – Architecture d'un 1D CNN simple [140]

En résumé, un 1D CNN est un outil puissant pour l'analyse de séries temporelles et d'autres types de données unidimensionnelles. Il utilise une combinaison de couches convolutionnelles, de max-pooling et entièrement connectées pour extraire des caractéristiques, réduire la dimensionnalité et effectuer des inférences non linéaires à partir des données d'entrée.

2.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un aperçu de la technologie émergente de l'Internet des Véhicules (IoV) et des perspectives pour ses futures applications. Dans l'introduction, nous avons abordé l'évolution du VANET vers le nouveau paradigme de l'IoV. Par la suite, nous avons défini l'IoV, expliqué sa pile de protocoles, sa plateforme, ses technologies de réseau et ses applications.

Ensuite, nous avons discuté du transport de données dans ces réseaux, en commençant par les méthodes existantes jusqu'aux mécanismes choisis dans notre thèse, à savoir le clustering et la sélection de relais. Cela nous a permis de tirer profit des algorithmes proposés dans la littérature et de prendre en compte leurs points faibles pour proposer de nouveaux algorithmes de transport de données dans l'environnement IoV. Ces algorithmes visent à améliorer les réseaux véhiculaires et à générer une structure plus stable. La conception et l'évaluation de ces algorithmes font l'objet des prochains chapitres de notre thèse.

Chapitre 3

Une nouvelle approche de clustering collaboratif pour l'IoV (CCA-*IoV*)

3.1 INTRODUCTION

L'ère moderne de l'Internet des objets pousse le développement des réseaux de véhicules ad-hoc traditionnels vers l'Internet des véhicules (*IoV*). En tant qu'évolution rapide des technologies informatiques et de communication, l'*IoV* présente un grand intérêt commercial et une grande valeur pour la recherche, attirant un nombre important de chercheurs et d'entreprises [141]. Actuellement, les véhicules sont dotés de diverses ressources (traitement, stockage et bande passante) [142]. Ces capacités permettent aux passagers et aux conducteurs de bénéficier d'un certain nombre d'applications et de services [143]. En particulier, permettre la collaboration entre un groupe de véhicules peut conduire à une meilleure utilisation des ressources du véhicule, afin d'optimiser l'exploitation des ressources du véhicule.

Les changements topologiques continus dans les communications entre véhicules constituent un problème majeur dans l'*IoV* qui peut affecter la modification de l'extensibilité du réseau et le routage par le plus court chemin [26]. Par conséquent, l'organisation de routes d'intercommunication efficaces et fiables entre les nœuds de véhicules, en fonction des conditions de densité du trafic, est un problème de plus en plus difficile. Pour de tels problèmes, le clustering est aujourd'hui l'une des solutions les plus efficaces parmi d'autres protocoles de routage, tels que le géocast et le routage basé sur la position.

Selon Aissaoui et al. [144], le clustering est la stratégie utilisée pour segmenter le réseau en clusters de nœuds. Chaque cluster a un chef et les autres

nœuds du cluster sont considérés comme des membres du cluster. Typiquement, le processus de clustering est divisé en cinq phases de base : exploration du voisinage, sélection du chef de cluster (CH), annonce, affiliation et enfin phase de maintenance. Dans la littérature, plusieurs approches de clustering sont discutées et décrites dans la prochaine section.

Conformément à la littérature disponible, la plupart des algorithmes de clustering proposés dans le contexte de l'Internet des véhicules [107,116,117] ont besoin du "Cloud" pour effectuer le processus de clustering, ce qui implique un accès fréquent à des serveurs distants. Par conséquent, l'utilisation d'un tel serveur centralisé entraîne une utilisation élevée de la bande passante et des retards importants. Par conséquent, le Cloud peut ne pas répondre aux exigences de qualité de service (QoS) des applications en temps réel. En outre, permettre à tous les véhicules d'accéder directement au Cloud augmentera l'utilisation des ressources radio, le taux de collision et pourrait conduire à la congestion. Permettre à un seul ensemble de véhicules, appelés têtes de clusters, d'accéder au serveur du Cloud est une solution appropriée pour résoudre les problèmes susmentionnés.

Compte tenu de toutes ces questions, ce chapitre de recherche vise à proposer un nouvel algorithme de clustering collaboratif pour l'Internet des véhicules, appelé CCA-IoV, qui convient à l'environnement autoroutier : CCA-IoV exploite les capacités de calcul et de stockage sous-utilisées des véhicules pour effectuer le processus du clustering par la coopération entre les véhicules plutôt que par l'accès à des serveurs distants. Pour démontrer l'efficacité de l'approche proposée, des simulations sont réalisées à l'aide du simulateur de réseau NS-2 et de l'environnement intégré SUMO.

3.2 Préliminaires :

Cette partie présente les préliminaires de l'approche proposée en décrivant la configuration du réseau et le Score utilisé.

3.2.1 configuration du réseau :

L'approche proposée repose sur les hypothèses suivantes. Premièrement, chaque véhicule du réseau possède une Identité (ID) unique. Deuxièmement, chaque véhicule est équipé d'une carte numérique et d'un dispositif de navigation GPS qui lui permet d'obtenir sa position géographique en temps réel, sa vitesse instantanée et la localisation directe de son voisinage. Troisièmement, chaque véhicule dispose d'une interface sans fil pour communiquer avec les autres véhicules. Enfin, nous supposons que nous avons une autoroute avec deux routes (une dans chaque direction), et pour chaque route il y a trois voies. De plus, le réseau de véhicules est théoriquement conçu comme un graphe non orienté $G(V, L)$ où V est un ensemble de sommets symbolisant les véhicules du réseau, et L est un ensemble d'arêtes symbolisant un ensemble de liens de communication entre les véhicules. Il existe un lien $(x, y) \in L$, si et seulement si la distance euclidienne qui les sépare est inférieure ou égale à la plus petite portée de transmission de ceux-ci :

$$\exists (x, y) \in L \implies Ed(x, y) \leq \min(Tr_x, Tr_y) \quad (3.1)$$

Dans laquelle Tr_x et Tr_y sont la portée de transmission de x , y véhicules consécutivement.

3.2.2 Score du noeud :

Pour calculer le score d'un nœud, nous avons utilisé la somme pondérée des attributs de mobilité pour évaluer et sélectionner le CH avec le meilleur score (Maximum). Cette méthode a été choisie pour plusieurs raisons : elle prend en compte l'importance relative des attributs, permet une interprétation claire des résultats et offre une flexibilité pour ajuster les pondérations en fonction des retours d'utilisateur ou des changements dans les exigences du système [145] [146]. Nous calculons d'abord le degré du nœud, l'écart moyen, la stabilité du lien, la vitesse relative, la vitesse relative moyenne,

l'accélération relative, l'accélération relative moyenne, et le facteur de mobilité comme présenté dans les équations de 2.1 à 2.8. Ainsi, le score du nœud i est déterminé en se basant sur les paramètres énumérés ci-dessus :

$$Sc_i = (C_1 \times D_i) + (C_2 \times LS_i) + (C_3 \times MF_i) \quad (3.2)$$

Où : C_1, C_2 et C_3 sont des coefficients tels que $\sum_{i=1}^3 C_i = 1$.

La valeur de chaque coefficient reflète l'importance du paramètre par rapport aux autres paramètres. Dans la présente recherche, nous considérons le facteur de mobilité (MF) comme le paramètre le plus critique, et un coefficient plus élevé lui est donc attribué. Le deuxième paramètre critique concerne la stabilité du lien (LS), et le dernier concerne la connectivité qui est représentée par le degré du nœud (Di). En outre, ces coefficients peuvent être configurés en fonction des exigences du système, et par conséquent, nous choisissons $C_1 = 0,1, C_2 = 0,3$ et $C_3 = 0,6$ comme valeurs des coefficients pour les expériences de cette étude.

3.3 Approche proposée :

Dans cette section, nous présentons une nouvelle approche de clustering collaboratif pour l'Internet des véhicules, appelée : CCA-IPv, afin d'améliorer les performances du réseau. L'idée clé de ce travail est d'exploiter les importantes capacités de calcul et de stockage des véhicules modernes pour effectuer le processus de clustering. Ce dernier est basé sur un score de nœud (SC) introduit par notre approche et par la coopération entre les véhicules plutôt que par l'accès à des serveurs distants. Dans le système CCA-IPv, un véhicule ayant un score élevé (SC) peut être choisi comme chef de cluster (CH). La CCA-IPv renforce la structure de stabilité des clusters en choisissant un Vice chef de cluster (VCH) en complément du Cluster Head. L'approche CCA-IPv est divisée en deux phases principales : La construction des clusters et la maintenance des clusters. Le reste de cette section décrit ces phases en détail.

3.3.1 Construction :

3.3.1.1 Exploration du voisinage :

Au début, chaque véhicule est dans l'état indéfini (IS). Ensuite, tous les véhicules diffusent un message BEACON à leurs nœuds voisins adjacents,

qui comprend l'adresse MAC (ID), la vitesse, l'accélération, la portée de communication et les coordonnées GPS.

3.3.1.2 Évaluation du nœud :

Après avoir reçu le message BEACON de tous ses voisins à un saut (N_i), chaque véhicule calcule les différentes métriques telles que le degré du nœud, la stabilité du lien et le facteur de mobilité, afin de calculer son score (SC) sur la base des équations 2 à 10. Ensuite, le véhicule diffuse un message JOIN à ses voisins à un saut, incluant son ID et son score.

3.3.1.3 Sélection du CH :

Chaque véhicule, après avoir reçu le message JOIN de tous ses voisins à un saut, compare son score à tous les scores reçus. Si son score a la valeur la plus élevée, le véhicule change son état en CH. Sinon, le véhicule sélectionne le véhicule avec le score le plus élevé comme son nouveau CH, change la variable `currentCH` en ID du nouveau CH et attend le message ANNOUNCE de ce CH. Lorsque deux ou plusieurs véhicules ont le score le plus élevé, le véhicule avec l'ID le plus bas sera choisi comme CH.

3.3.1.4 Annonce :

Après que chaque véhicule se soit identifié comme le nouveau CH, il doit envoyer un message ANNOUNCE à ses voisins, et attendre leurs réponses. A la réception du message ANNOUNCE d'un nouveau CH, chaque véhicule compare l'ID de l'expéditeur avec l'ID du CH actuel, s'ils sont égaux, le véhicule envoie un message RESPOND au CH et change son état en CM (Cluster Member). Dans le cas contraire, le véhicule rejette le message et attend un autre message ANNOUNCE d'un CH avec le même ID enregistré dans sa variable `currentCH`. A la fin, chaque CH ajoute un véhicule expéditeur à sa liste de membres du cluster pour chaque message RESPOND reçu.

3.3.1.5 Sélection du VCH :

Lors de la création du cluster, le CH choisira parmi les membres du cluster un véhicule avec la valeur de score maximale comme Vice CH (VCH), et envoie un SET VCH au véhicule assigné. Ce dernier change son état en VCH.

La phase de construction du cluster effectuée par chaque véhicule est résumée dans la Figure suivante 3.1.

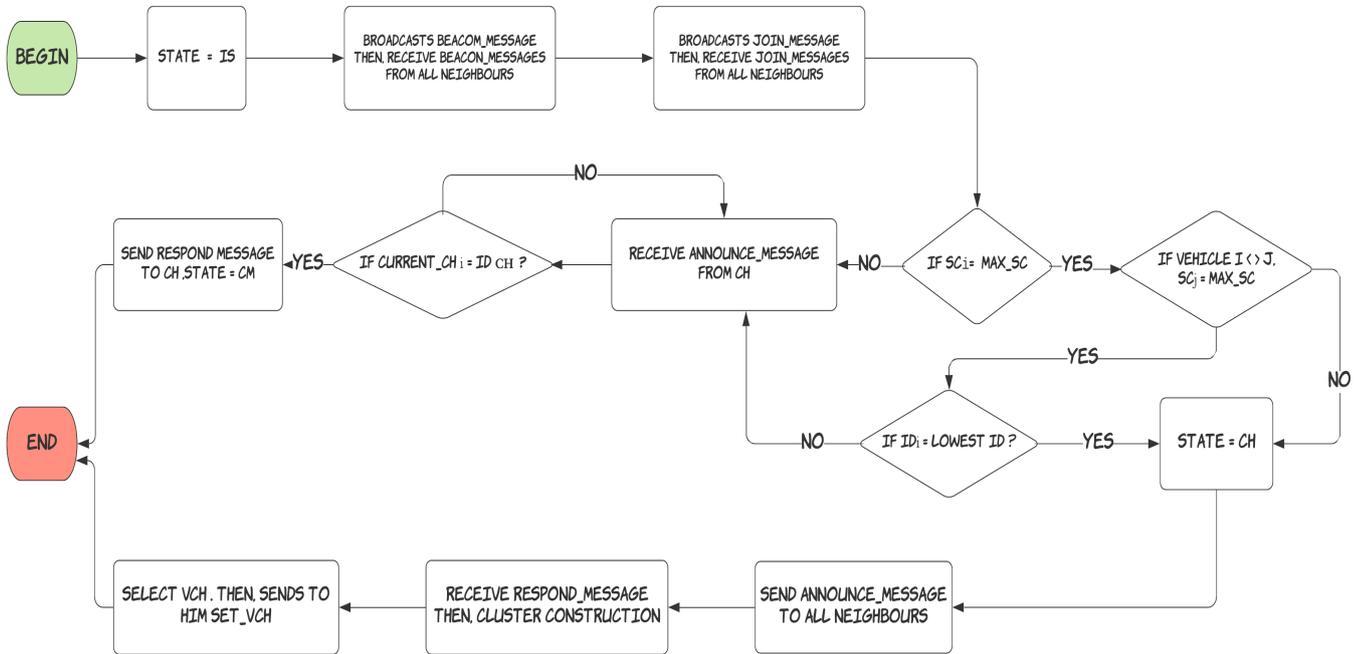


FIGURE 3.1 – Construction du Cluster.

3.3.2 Maintenance :

Afin de maintenir la topologie du réseau et la structure des clusters stables, une phase de maintenance est nécessaire. En raison de la grande mobilité des véhicules, différents événements se sont produits dans la structure des clusters et sont discutés ci-dessous :

3.3.2.1 Quitter un cluster :

3.3.2.1.1 CH : Chaque véhicule VCH garde la trace de son CH en s’envoyant périodiquement des messages privés. Lorsqu’un VCH ne reçoit pas de messages de son CH pendant la période T , cela signifie que le CH a quitté le cluster. Dans ce cas, le VCH va immédiatement remplacer le CH et devenir le nouveau CH. Ensuite, il sélectionne un nouveau VCH en fonction de son score dans la liste des membres du cluster. De plus, il envoie à ses CMs un message UPDATE pour modifier leur nouveau CH.

3.3.2.1.2 CM : Chaque CH surveille les actions des CM en échangeant des messages entre eux. Lorsqu'un CM quitte le cluster pendant une période T , le CH doit identifier l'incident et retirer immédiatement le véhicule de sa liste de membres du cluster et envoyer les mises à jour au VCH. Simultanément, si un CM ne reçoit pas de messages de son CH pendant une période T , il change l'état actuel en IS et rejoint ensuite d'autres clusters.

3.3.2.2 Rejoindre un cluster :

Lorsqu'un véhicule IS s'approche d'un cluster, il envoie au cluster CM le plus proche une demande de jonction incluant sa vitesse et sa position. Le CM transmet la demande d'adhésion à son CH qui calcule la vitesse relative avec le véhicule IS. Si la vitesse relative est inférieure ou égale à la vitesse relative moyenne du cluster, le CH l'ajoute dans sa liste de membres du cluster et envoie une réponse au véhicule IS. Le véhicule passe alors de l'état IS à l'état CM et rejoint le cluster.

3.4 Résultats de la simulation :

Le CCA-IoV proposé est simulé à l'aide du simulateur de réseau NS-2 (version 2.35) avec le simulateur de trafic SUMO. Les simulations sont effectuées sur une autoroute avec 70 à 90 véhicules. La vitesse des véhicules est comprise entre 10 m/s et 35 m/s, avec une vitesse maximale de 40 m/s. Les expériences de mobilité sont simulées sur une autoroute de 1000 m de long en trafic unidirectionnel à trois voies. Les paramètres de l'approche proposée sont résumés dans le Tableau 3.1.

Parameter	Value
CPU	Core i7 processor
CPU frequency	2.4 GHz
RAM	8 GB
Simulation time	360 s
Area	1000 m × 50 m
Number of vehicles	100
Vehicle density	70 to 90 vehicles/km
Maximum speed allowed	40 m/s
Speed of vehicles	10 m/s to 35 m/s
Mobility model	Freeway mobility
Propagation model	Two Ray Ground
Antenna model	Omnidirectional
MAC Protocol	IEEE 802.11p
Number of simulations	10

TABLE 3.1 – Paramètres de simulation

Nous utilisons les mesures suivantes pour comparer les résultats de notre approche proposée au protocole HCAR [118] :

- 1) **Durée CH (CHD)** : Le temps que le véhicule passe de son état à CH jusqu'à ce qu'il passe à un autre état.
- 2) **Durée du CM (CMD)** : Le temps que le véhicule passe de son état à CM

jusqu'à ce qu'il passe à un autre état.

3) Clusters SUM (CS) : Le nombre de clusters créés pendant la durée de la simulation. Moins il y a de clusters, plus l'approche proposée est efficace.

3.4.1 Durée du CH :

La Figure 3.2 représente le CHD moyen à différentes vitesses de notre approche proposée CCA-IoV par rapport au protocole HCAR. Sur la base de la Figure 3.2, nous constatons que le CHD des deux protocoles diminue avec l'augmentation de la vitesse. Ceci est dû aux changements dynamiques de topologie dus au mouvement des véhicules, ce qui complique la capacité des CHs à maintenir des liens stables avec leurs CMs. Néanmoins, notre approche CCA-IoV surpasse le protocole HCAR en termes de durée des CH.

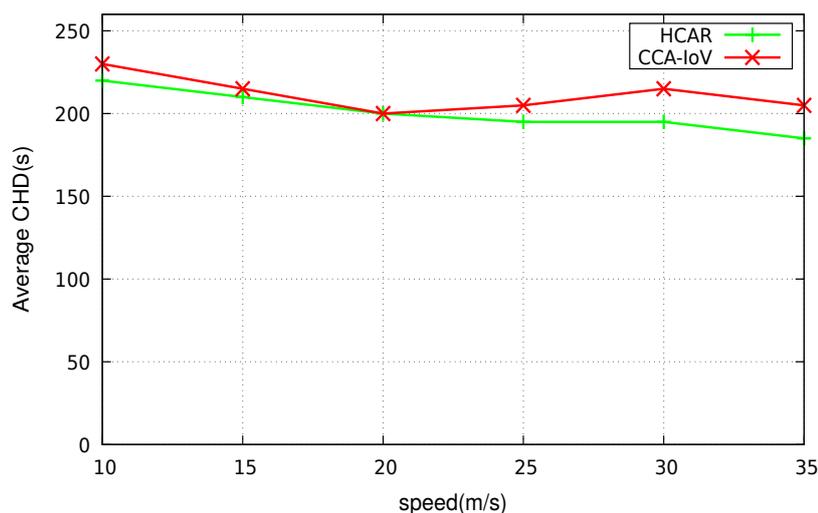


FIGURE 3.2 – Durée du CH

3.4.2 Durée du CM :

La Figure 3.3 montre la CMD moyenne à différentes vitesses de notre approche proposée CCA-IoV par rapport au protocole HCAR. Comme l'illustre la Figure 3.3, nous constatons que la CMD de notre approche est légèrement influencée par l'augmentation de la vitesse du véhicule, en raison de la stratégie d'élection d'un vice CH qui assure la stabilité des clusters. Ainsi, notre approche CCA-IoV surpasse le protocole HCAR en termes de durée de la CM.

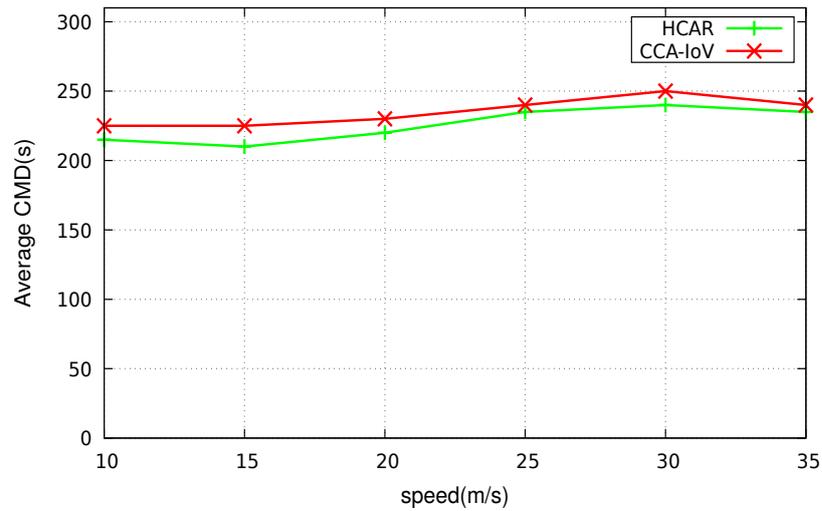


FIGURE 3.3 – Duration du CM

3.4.3 Clusters SUM :

La Figure 3.4 montre la somme moyenne des clusters à différentes vitesses de notre approche proposée CCA-IoV par rapport au protocole HCAR. Comme le montre la Figure 3.4, notre CCA-IoV a moins de clusters que le HCAR, en raison de l'efficacité du processus de création et de maintenance des clusters de notre approche.

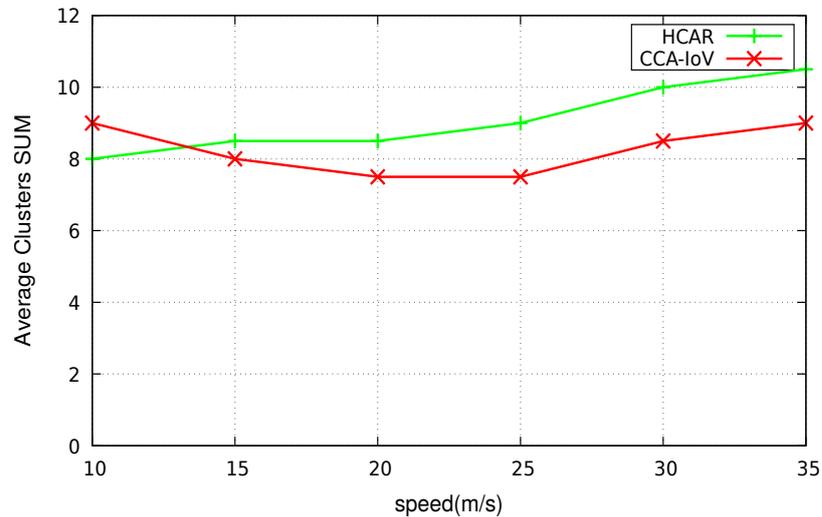


FIGURE 3.4 – Clusters SUM

3.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons proposé un nouvel algorithme de clustering collaboratif pour l'Internet des véhicules (CCA-IoV), adapté aux environnements autoroutiers. Il tire parti des importantes capacités de calcul et de stockage des véhicules modernes pour opérer le processus de clustering. Pour atteindre cet objectif, nous avons utilisé une nouvelle métrique de score des nœuds (SC) et la coopération inter-véhicules. En outre, CCA-IoV renforce la structure de stabilité du cluster en choisissant un vice-chef de cluster en complément du chef de cluster.

Malgré les résultats satisfaisants donnés par cet algorithme, il y a encore quelques points à améliorer dans le prochain chapitre qui se concentrera sur l'extension de ce modèle qui sont résumés comme suit : Premièrement, dans la formule de calcul du score, nous avons utilisé les poids des critères selon nos expériences de simulation réalisées, ce qui ne donne pas forcément des poids optimaux, pour résoudre ce problème, nous utiliserons dans le prochain chapitre des méthodes de prise de décision multicritères afin de déterminer les valeurs optimales des poids des critères utilisés dans la sélection du chef de cluster. Deuxièmement, on va utiliser un scénario plus réaliste de l'autoroute 640 Knoxville aux États-Unis comme entrée du simulateur de réseau NS-3 par rapport à celui utilisé dans ce chapitre qui est un modèle de mobilité non réel. Enfin, nous visons à réaliser un modèle plus raffiné en termes de classement hiérarchique des éléments du cluster à l'aide des méthodes de décision multicritères pour le comparer aux approches plus récentes de la littérature disponible.

Chapitre 4

Une nouvelle approche de clustering coopératif basée sur les méthodes MCDM pour l'Internet des véhicules

4.1 Introduction :

La naissance de l'Internet des objets (IoT) entraîne les réseaux ad hoc de véhicules (VANET) conventionnels dans un nouveau paradigme appelé l'Internet des véhicules (IoV). Comme le développement exponentiel des technologies de l'informatique et de la communication, l'IoV offre un potentiel économique et une valeur scientifique considérables, attirant un nombre important de chercheurs et d'entreprises [141]. Actuellement, les véhicules sont équipés de nombreuses ressources (traitement, stockage et bande passante) [142]. Ces capacités permettent aux passagers et aux conducteurs de profiter d'un certain nombre d'applications et de services [143]. Plus précisément, permettre la coordination entre un groupe de véhicules conduira à une utilisation plus importante et maximale des ressources du véhicule.

Les changements topologiques fréquents dans les réseaux de véhicules constituent un défi majeur de l'IoV qui peut avoir un impact sur l'évolutivité et le routage du chemin le plus court du réseau. Ainsi, l'organisation de routes d'intercommunication efficaces et fiables entre les véhicules, en fonction des conditions de densité du trafic, est un problème de plus en plus difficile. Pour de tels cas, le clustering est aujourd'hui une des solutions parmi d'autres protocoles de routage, tels que le geocast et le routage basé sur la position. Selon Aissaoui et al. (2015) [144], le clustering est la technique utilisée pour

diviser le réseau en groupes de nœuds. Chaque groupe a un leader, et les autres nœuds du groupe sont appelés membres du groupe. La procédure de clustering est généralement divisée en cinq étapes de base : exploration du voisinage, sélection du chef de cluster (CH), annonce, affiliation et enfin maintenance. Dans la section 2, la littérature explique et discute plusieurs approches de clustering.

En ligne avec la littérature disponible, la plupart des algorithmes de clustering proposés sur le contexte de l'Internet des véhicules [107, 116, 117] ont besoin de l'utilisation du cloud computing pour effectuer le processus de clustering, ce qui implique un accès fréquent à des serveurs distants. Par conséquent, l'utilisation d'un tel serveur en Cloud centralisé entraîne une utilisation élevée de la bande passante et des retards importants. En conséquence, le Cloud peut ne pas répondre aux exigences de qualité de service (QoS) des applications en temps réel. En outre, permettre à tous les véhicules d'accéder directement au Cloud augmentera l'utilisation des ressources radio, le taux de collision et pourrait conduire à la congestion. Permettre à un seul ensemble de véhicules, appelés "Cluster Heads", d'accéder au serveur du Cloud est une solution appropriée pour résoudre les problèmes susmentionnés.

En tenant compte de tous les problèmes susmentionnés, le travail présenté dans [147] a conçu une approche de clustering qui exploite les capacités sous-utilisées des ressources des véhicules pour effectuer le processus de clustering par la coopération entre les véhicules plutôt que par l'accès à des serveurs distants. Dans ce chapitre, nous affinons le modèle précédent en utilisant la coopération entre les deux approches mathématiques de prise de décision multicritères appelées AHP et PROMETHEE. Tout d'abord, nous utilisons la méthode AHP pour déterminer les valeurs optimales du coefficient de pondération des critères utilisés dans la sélection du chef de cluster, puis nous utilisons la méthode PROMETHEE pour classer tous les nœuds afin de sélectionner le chef le plus approprié. Des simulations sont réalisées en utilisant le simulateur de réseau NS3.32 et SUMO avec l'environnement intégré OSM pour évaluer l'efficacité de la solution proposée. Les principales contributions de ce chapitre sont résumées comme suit :

- Nous formulons l'approche du clustering comme un problème de décision à critères multiples pour la sélection d'un chef de cluster approprié.

- En plus du modèle proposé dans le travail précédent (Bersali et al., 2020 [147]), nous appliquons les méthodes AHP et PROMETHEE, pour trouver les poids des critères sélectionnés et pour classer les nœuds, respectivement.
- Le CMC-IoV exploite les capacités sous-utilisées des ressources des véhicules pour effectuer le processus de mise en cluster plutôt que l'accès à des serveurs distants et soutient également la stabilité du cluster en sélectionnant un vice-chef de cluster en complément du chef du cluster.

4.2 Approche proposée :

Dans cette section, nous présentons notre nouvelle approche de clustering coopératif basée sur des méthodes de prise de décision multicritères (MCDM) pour l'Internet des véhicules, appelée CMC-IoV, dont l'objectif principal est d'améliorer la performance du réseau dans l'Internet des véhicules. D'après le tableau (2.1) comparatif des méthodes d'aide à la décision multicritères (MCDMs) et selon la littérature disponible [148, 149], on remarque que les méthodes AHP et PROMETHEE sont complémentaires, travaillant en coopération pour obtenir les meilleurs résultats. L'idée clé de notre approche est d'exploiter cette caractéristique afin de l'utiliser pour sélectionner le leader le plus approprié pour chaque cluster en exploitant également les importantes capacités de calcul et de stockage des véhicules modernes pour réaliser le processus de clustering.

Dans notre approche, chaque cluster est constitué et soutenu par au moins trois éléments : le chef de cluster (CH), le membre de cluster (CM) et un vice-chef de cluster (VCH) en complément du CH.

La partie restante de cette section présente les principales étapes de l'approche proposée, y compris les phases de construction et de maintenance des clusters.

4.2.1 Construction :

Les principales étapes de cette phase sont définies comme suit :

4.2.1.0.1 Étape 1 : Au début, chaque véhicule est dans l'état indéfini (IS). Ensuite, tous les véhicules diffusent un message BEACON à leurs nœuds

voisins adjacents, qui comprend l'adresse MAC (ID), la vitesse, l'accélération et les coordonnées GPS.

4.2.1.0.2 Étape 2 : Après avoir reçu le message BEACON de tous ses voisins à un saut (Ni), chaque véhicule calcule les critères utilisés dans le processus de mise en cluster, tels que le degré de nœud, la stabilité de la liaison, la vitesse relative moyenne et l'accélération relative moyenne, sur la base des équations 1 à 7. Ensuite, le véhicule exécute l'algorithme AHP pour déterminer les valeurs optimales du coefficient de pondération des critères et diffuse un message JOIN à ses voisins à un saut, comprenant son ID et les valeurs des critères avec leurs pondérations.

4.2.1.0.3 Étape 3 : Chaque véhicule, après avoir reçu le message JOIN de tous ses voisins à un saut, exécute d'abord l'algorithme PROMETHEE pour classer tous ses voisins à un saut en fonction de leurs valeurs de critères afin de sélectionner le leader le plus approprié. Ensuite, il change sa variable temporaireCH à l'ID du véhicule le mieux classé, envoie un message de demande à ce dernier et attend le message ANNOUNCE.

4.2.1.0.4 Étape 4 : Après que chaque véhicule a reçu au moins deux messages de demande de ses voisins à un saut, il passe à l'état CH, ajoute un véhicule expéditeur à sa liste de membres du groupe pour chaque message de demande reçu et envoie un message ANNOUNCE à ses voisins.

4.2.1.0.5 Étape 5 : A la réception du message ANNOUNCE d'un CH, chaque véhicule compare l'ID de l'expéditeur avec l'ID du CH temporaire. Si ces deux ID sont égaux, il change la variable currentCH pour l'ID du nouveau CH reçu et change son état en CM. Dans le cas contraire, le véhicule rejette le message et attend un autre message ANNOUNCE provenant d'un CH avec le même ID enregistré dans sa variable temporaryCH.

4.2.1.0.6 Étape 6 : Lors de la création du cluster, le CH exécute l'algorithme PROMETHEE pour classer tous les membres de son cluster et sélectionne le véhicule ayant le rang le plus élevé comme Vice CH (VCH). Le CH envoie un message SET VCH au véhicule assigné. Ce dernier change son état en VCH.

La phase de construction du cluster est illustrée par un exemple simple dans la Figure 4.1.

4.2.2 Maintenance :

Pour maintenir la topologie du réseau et la stabilité du système de clusters, un processus de maintenance est nécessaire. Dans la structure du cluster, en raison du mouvement important des véhicules, de multiples incidents se sont produits et sont décrits ci-dessous :

4.2.2.1 Quitter un cluster

4.2.2.1.1 CH : chaque véhicule VCH garde la trace de son CH en s'échangeant régulièrement des messages privés. Lorsqu'un VCH ne reçoit pas de messages de son CH pendant la période T , cela signifie que le CH a quitté le cluster. Dans cette situation, le VCH va rapidement remplacer le CH et devenir le nouveau CH. Ensuite, il élit un nouveau VCH en exécutant l'algorithme PROMETHEE sur sa liste de membres du cluster. De plus, il envoie à ses CMs un message UPDATE pour notifier leur nouveau CH.

4.2.2.1.2 CM : Chaque CH suit le comportement de ses CM en échangeant des messages entre eux. Le CH doit détecter l'événement où un CM a quitté le cluster pendant une durée T et supprimer rapidement le véhicule de sa liste de membres du cluster et envoyer les notifications au VCH. De manière synchrone, si un CM ne reçoit aucun message de son CH pendant une durée T , il passe l'état actuel à l'IS et rejoint ensuite d'autres clusters.

4.2.2.2 Rejoindre un cluster

Lorsqu'un véhicule IS se rapproche d'un cluster, une demande conjointe comprenant sa vitesse et sa position est envoyée au cluster CM le plus proche. Le CM envoie la demande de jonction à son CH qui calcule la vitesse relative avec le véhicule IS. Si la vitesse relative est inférieure ou égale à la vitesse relative moyenne du cluster, le CH l'ajoute à sa liste de membres du cluster et envoie une réponse au véhicule IS. En conséquence, le véhicule peut passer du statut IS à CM et rejoindre le cluster.

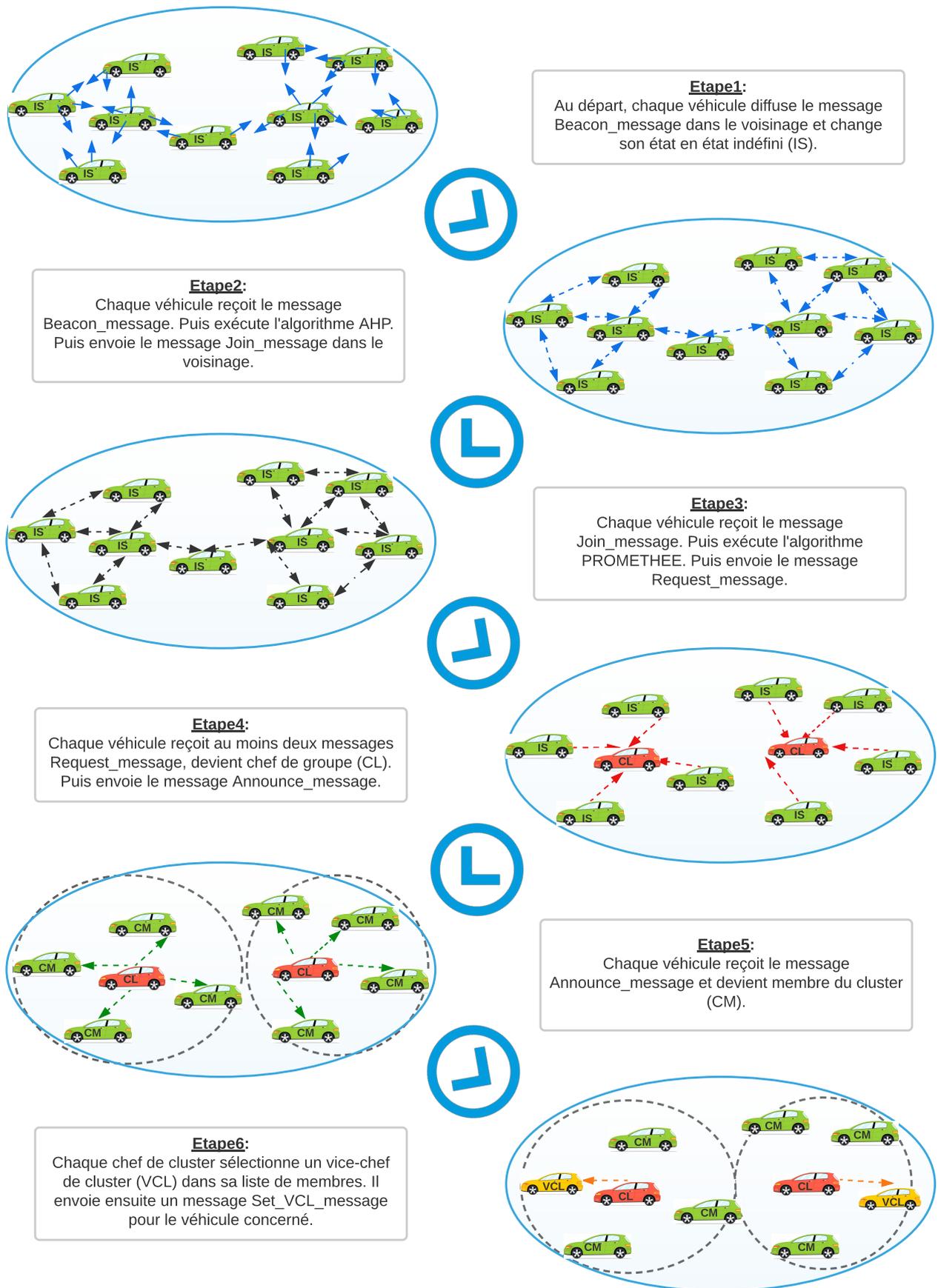


FIGURE 4.1 – Processus de construction des Clusters

4.3 Évaluation des performances :

4.3.1 Analyse expérimentale

Dans cette section, nous étudions la performance de l'approche CMC-IoV proposée en utilisant le simulateur de réseau NS-3 (version 3.32) avec une mobilité réaliste des véhicules générée par le simulateur de mobilité urbaine (SUMO). De plus, afin d'avoir un environnement autoroutier plus réaliste, nous utilisons OpenStreetMap (OSM) pour exécuter notre simulation sur l'autoroute 640 à Knoxville, aux États-Unis, comme illustré dans la capture d'écran de la Figure 4.2.

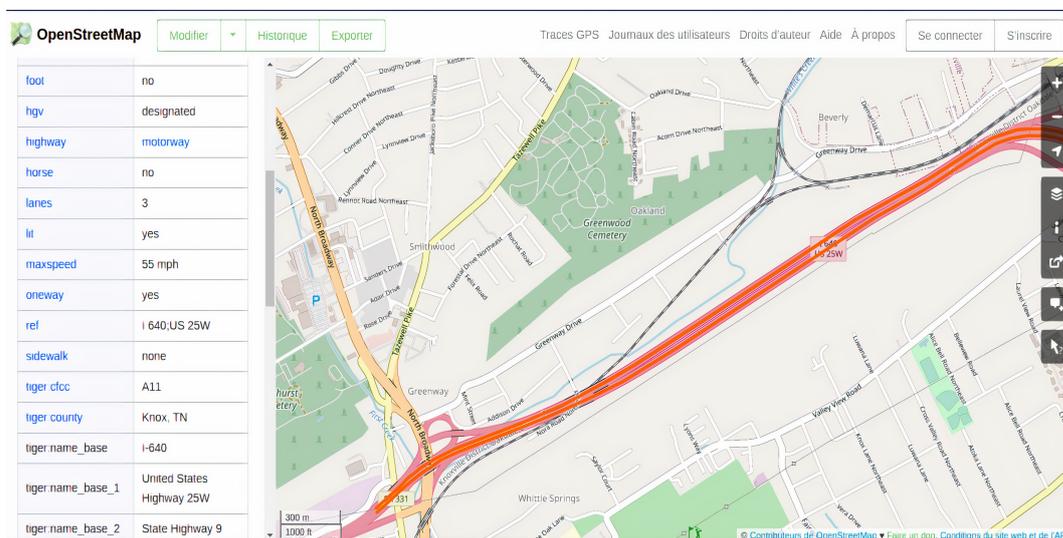


FIGURE 4.2 – Capture d'écran depuis OSM.

SUMO peut importer des informations sur le réseau routier à partir d'un certain nombre de sources, la plus populaire étant OpenStreetMap (OSM). Le projet OSM fournit des cartes de villes du monde entier fournies par une vaste communauté d'utilisateurs, qui sont généralement considérées comme les données routières de la plus haute qualité disponibles publiquement à ce jour.

La topologie de la route consiste en une route à trois voies et à double sens d'une longueur de 10 km. Les véhicules sont injectés dans la route selon une distribution binomiale avec un taux égal à deux véhicules par seconde. La décision d'accélération et de dépassement des véhicules est déterminée en utilisant la distance au véhicule de tête, la vitesse de déplacement, la dimension des véhicules et le profil d'accélération-décélération.

La durée totale de la simulation est de 420 s. Le processus de clustering commence à la 60e seconde, lorsque tous les véhicules sont entrés sur la route. Toutes les mesures de performance sont évaluées pendant les 360 s restantes. Quatre classes de véhicules avec différentes plages de vitesse maximale sont utilisées dans la simulation pour créer un scénario réaliste avec différents types de véhicules sur la route, tels que les voitures normales, les voitures sportives, les bus et les camions.

Compte tenu de l'injection des véhicules sur la route et de leur contrainte de vitesse maximale, le nombre moyen de voisins des véhicules varie de 8 à 24 à différents moments pour différents scénarios.

Les paramètres de l'approche proposée sont résumés dans le tableau 4.1.

Parameter	Value
Simulation time	420 s
Simulation area	10Km × 50m
Number of lane	3
Transmission range	100–300 m
Number of vehicles	100
Speed of vehicles	10 m/s to 35 m/s
Maximum speed allowed	40 m/s
Channel model	YANS
Propagation model	Two Ray Ground
MAC Protocol	IEEE 802.11p
Wifi data rate	6 Mbps
Wifi channel bandwidth	10 MHz
Wifi frequency band	5.9 GHz

TABLE 4.1 – Paramètres de simulation

Les résultats de notre approche CMC-IoV proposée sont comparés à d'autres approches appartenant à la même catégorie de clustering appelées : DCA-DS [119] et MOSIC [113], et également avec une approche basée sur le cloud appelée : EHCP [117].

4.3.2 Paramètres de comparaison

La performance de stabilité de l'approche de clustering proposée est évaluée sur la base de trois métriques : la durée du CH, la durée du CM et la somme des clusters.

4.3.2.1 La durée du CH

La durée des CH est une mesure importante pour prouver l'efficacité de l'approche proposée utilisée pour sélectionner les CHs et la stabilité des clusters. La durée moyenne des CH est l'intervalle pendant lequel le véhicule est dans l'état de CH avant de passer à un autre état. La Figure 4.3 illustre la durée moyenne des CH de l'approche proposée, par rapport aux protocoles DCA-DS, MOSIC et EHCP à différentes vitesses.

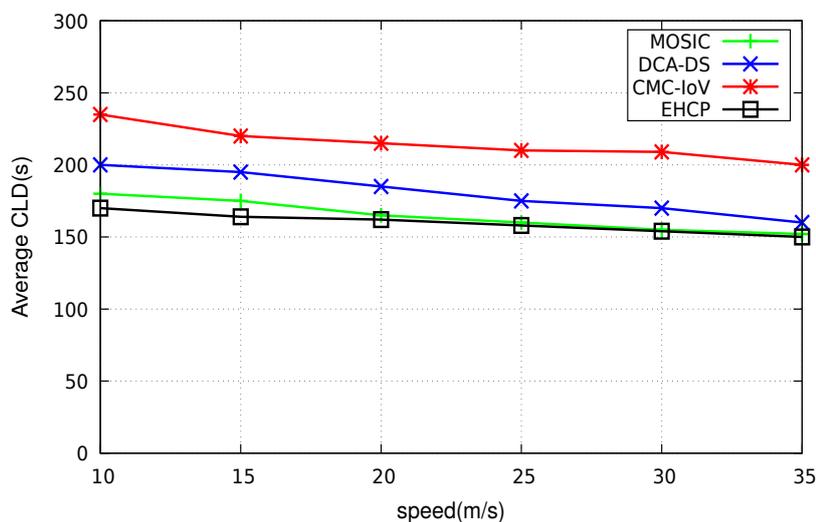


FIGURE 4.3 – La durée du CH

A partir de la Figure 4.3, nous avons remarqué que la durée moyenne des CHs de notre protocole proposé, DCA-DS, MOSIC, et EHCP diminue avec l'augmentation de la vitesse du véhicule, ceci est principalement dû au mouvement élevé des véhicules qui rend difficile pour les CHs de maintenir des liens stables avec leurs CMs, puisque les topologies du réseau deviennent très dynamiques.

Dans l'approche que nous proposons, la sélection des CH est effectuée par une modélisation mathématique basée sur les méthodes MCDM, impliquant : a) la méthode AHP pour déterminer les valeurs optimales du coefficient de pondération des critères utilisés dans la sélection des CH, b) la méthode PROMETHEE pour classer tous les véhicules et ensuite sélectionner le leader le

plus approprié. Par conséquent, comme l'illustre la Figure 4.3, l'approche de clustering que nous proposons surpasse DCA-DS, MOSIC et EHCP en termes de durée des CH.

4.3.2.2 La durée du CM

La durée du CM est une métrique utilisée pour démontrer l'efficacité de l'algorithme de clustering et prouver la stabilité des clusters créés. La durée moyenne du CM est l'intervalle pendant lequel le véhicule est dans l'état de CM avant de passer à un autre état. La Figure 4.4 présente la durée moyenne du CM de l'approche proposée, par rapport aux protocoles DCA-DS, MOSIC et EHCP à différentes vitesses.

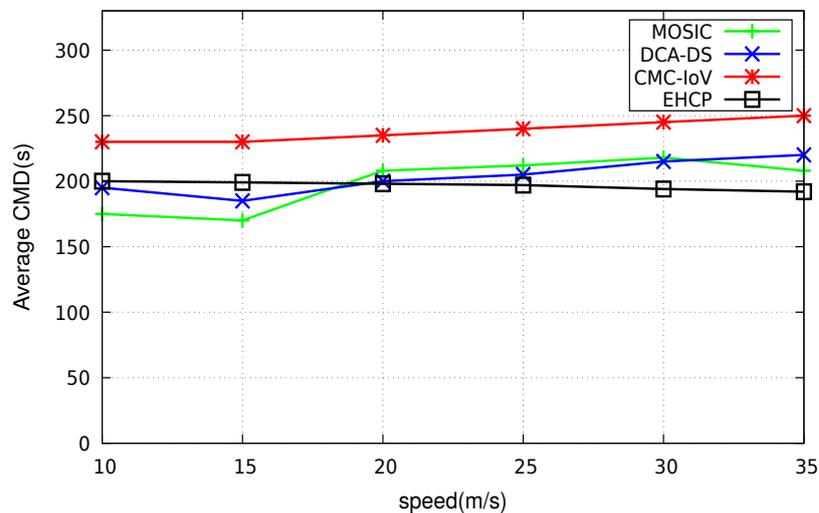


FIGURE 4.4 – La durée du CM

Dans la Figure 4.4, nous pouvons remarquer que la vitesse du véhicule affecte légèrement la durée du CM dans notre approche proposée par rapport aux approches DCA-DS, MOSIC et EHCP, en raison du mode de maintenance efficace adopté. Ce dernier permet aux CMs de garder des liens stables avec leurs CHs. Ainsi, comme l'illustre la Figure 4.4, l'approche de clustering que nous proposons surpasse DCA-DS, MOSIC et EHCP en termes de durée de CM.

4.3.2.3 La somme des clusters

En général, un nombre réduit de clusters peut améliorer de manière significative les performances de l'algorithme de clustering. La somme moyenne

des clusters nous permet d'évaluer la qualité globale du processus de clustering. La Figure 4.5 montre la somme moyenne des clusters de l'approche proposée, par rapport aux protocoles DCA-DS, MOSIC et EHCP à différentes vitesses.

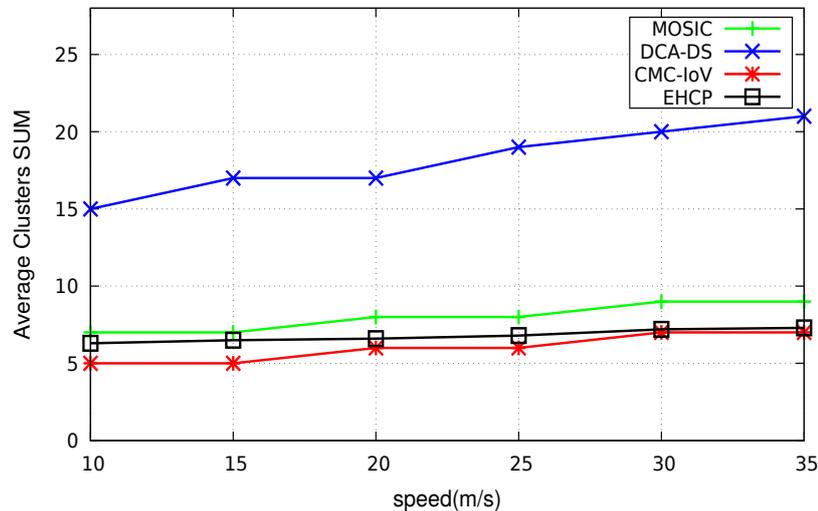


FIGURE 4.5 – La somme des clusters

D'après la Figure 4.5, nous pouvons voir que la somme des clusters est légèrement augmentée lorsque la vitesse augmente. Notre approche proposée implique moins de clusters que celle de DCA-DS, MOSIC et EHCP, en raison du succès des phases de construction et de maintenance des clusters.

4.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons proposé une nouvelle approche de clustering coopératif basée sur des méthodes de prise de décision multicritères (MCDM) pour l'Internet des véhicules (CMC-IoV), afin d'améliorer la performance du réseau. La principale contribution de ce chapitre est d'exploiter les importantes capacités de calcul et de stockage des véhicules modernes pour réaliser le processus de clustering. Ce dernier est basé sur la coopération entre les véhicules plutôt que sur l'accès à des serveurs distants et sur la combinaison des techniques AHP et PROMETHEE pour sélectionner le leader le plus approprié pour chaque cluster. En outre, CMC-IoV soutient la stabilité des clusters en sélectionnant un vice-chef de cluster en complément du chef de cluster. Les simulations ont été effectuées à l'aide du simulateur

de réseau NS-3 et de la simulation de mobilité urbaine (SUMO) avec OpenStreetMap (OSM) pour un scénario plus réaliste. Les résultats démontrent que notre approche proposée surpasse les approches DCA-DS, MOSIC et EHCP en termes de durée du CH, de durée du CM et de nombre de clusters.

Chapitre 5

Réseau neuronal convolutif pour la sélection de relais dans l'Internet des véhicules

5.1 Introduction

Les appareils mobiles connectés sont de plus en plus présents [150–152] : les piétons avec des smartphones, les automobiles équipées d'une unité embarquée (OBU), ou les vélos publics connectés et les trottinettes électriques. Tous ces appareils constituent ensemble l'Internet des Véhicules. Ils peuvent soit communiquer entre eux, soit accéder à internet via un réseau cellulaire comme la 4G ou via une architecture dédiée comme les unités en bord de route (RSUs). Cependant, dans un réseau d'appareils mobiles aussi dynamiques, il est difficile de garantir la stabilité de la topologie et, par conséquent, la qualité de service (QoS). En effet, la topologie change continuellement à mesure que les utilisateurs et les appareils se déplacent dans de nouvelles directions à des vitesses variables, qu'ils rejoignent et quittent le réseau, ou que des objets comme les automobiles induisent un affaiblissement multipath, provoquant certains appareils à gagner ou à perdre la connectivité. De plus, les utilisateurs et les appareils ont des exigences variées, comme un haut débit pour le streaming multimédia sur téléphone mobile, une latence minimale pour les voitures autonomes pour éviter un accident, ou une faible consommation d'énergie pour garantir qu'un appareil a une énergie résiduelle adéquate jusqu'à la prochaine recharge.

Un appareil ne peut pas toujours se connecter directement à un réseau cellulaire parce qu'un fournisseur d'accès à Internet (FAI) particulier n'en propose pas dans les zones peu peuplées, ou l'utilisateur n'a pas d'abonnement

ou parce que le signal radio est faible. Tous ces problèmes peuvent être résolus en déployant des relais pour transférer les données vers et depuis un utilisateur final. Plusieurs idées suggèrent l'utilisation de relais fixes (comme les unités en bord de route (RSUs)), de relais mobiles (MR), ou d'automobiles stationnées. Les relais fixes ont des inconvénients tels que des coûts de déploiement élevés, une limitation de la flexibilité, et un entretien régulier. En revanche, les MR offrent une plus grande flexibilité et peuvent réduire les coûts de déploiement.

La sélection des relais est un problème qui a été largement étudié [120]. La majorité des solutions sont basées sur la sélection du relais auquel les utilisateurs se connectent. Les relais, qu'ils soient mobiles ou non, sont généralement des appareils dédiés. Plusieurs scientifiques suggèrent des solutions basées sur l'intelligence artificielle (IA), en particulier l'apprentissage profond (DL) : ces méthodes permettent la résolution efficace de problèmes compliqués en raison de leur adaptabilité dans des environnements dynamiques, comme la mobilité des réseaux sans fil [153]. Récemment, le DL a été appliqué dans les réseaux pour résoudre divers problèmes, comme le routage [154]. Ici, nous nous concentrons sur le problème de la sélection des relais.

Ce chapitre présente une nouvelle stratégie qui applique l'apprentissage profond, spécifiquement un modèle de réseau neuronal convolutif (CNN), pour catégoriser les utilisateurs en fonction de leurs modèles de mobilité. Les meilleurs utilisateurs sont ensuite sélectionnés pour servir de relais mobiles. Contrairement à la plupart des travaux, notre stratégie ne nécessite pas d'infrastructure fixe, ce qui la rend flexible pour différents scénarios. Cependant, une antenne cellulaire est toujours nécessaire pour accéder à Internet. Après la sélection des MR, n'importe quel protocole de routage peut être appliqué pour transporter les données. Il existe plusieurs façons dont la stratégie proposée peut être utilisée avec d'autres indicateurs pertinents (tels que la connectivité, l'énergie, le délai) pour améliorer encore la qualité de service (QoS) [155]. De plus, dans ce chapitre, nous étudions une véritable interaction entre différents types de mobilité ensemble (Automobile, Vélo, et Piéton).

5.2 Architecture et modèle de classification

Cette section présente l'architecture proposée puis détaille le modèle de classification utilisé.

5.2.1 Architecture proposée :

Comme le montre la Figure 5.1, nous sommes dans le contexte de l'IoV. Différentes classes d'utilisateurs sont attendues dans le réseau : des utilisateurs à faible mobilité comme les piétons, des utilisateurs à mobilité moyenne comme les vélos ou les trottinettes électriques, et des utilisateurs à haute mobilité comme les voitures et les camionnettes. Ces appareils peuvent soit être un relais mobile et se connecter directement au réseau cellulaire, soit utiliser d'autres MR intermédiaires pour accéder au réseau.

Ces utilisateurs finaux forment la couche Client de l'architecture. La deuxième partie de l'architecture est la couche Cloud. Elle est constituée de l'antenne cellulaire et du serveur Cloud. La topologie résultante est un ensemble de clusters où les relais agissent comme des têtes de cluster du cluster qu'ils gèrent. L'antenne collecte et transmet les données des utilisateurs au serveur Cloud pour exécuter l'algorithme DL à partir de ces données.

La topologie peut être créée lorsque la prédiction est terminée : la Figure 5.1 représente un réseau déjà construit : 2 utilisateurs (1 trottinette électrique et 1 vélo) sont choisis par le modèle pour servir de relais. Le reste des utilisateurs finaux sont connectés à ces relais mobiles pour accéder à l'antenne. Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur la manière dont le serveur Cloud choisit les MR dans la couche Cloud de l'architecture. La partie suivante présente l'algorithme DL suggéré en détail.

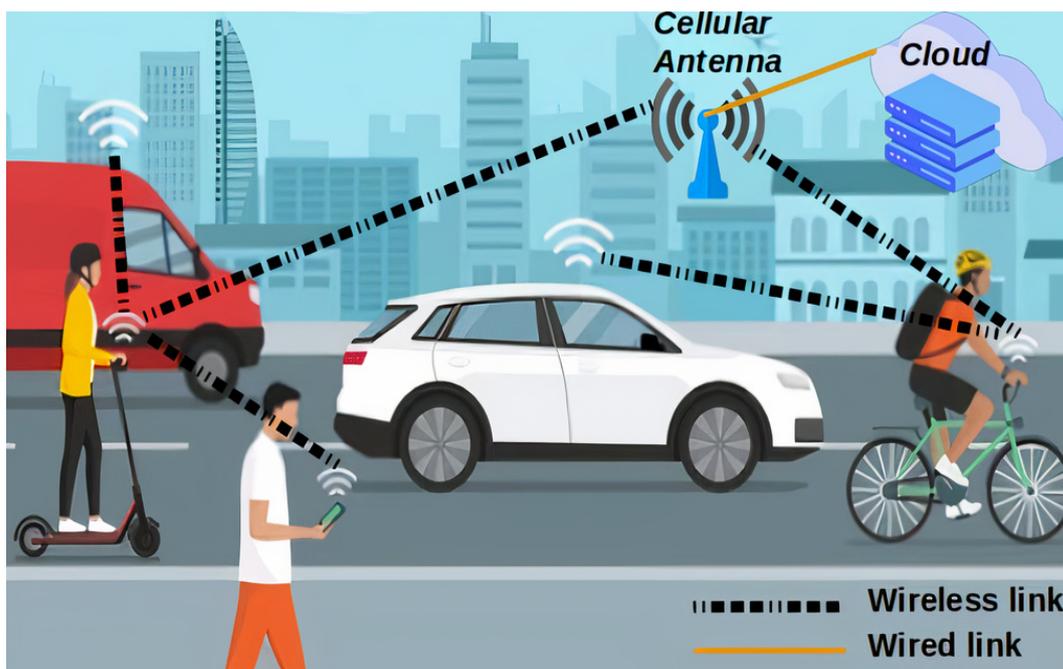


FIGURE 5.1 – Architecture proposée

5.2.2 Modèle de classification :

L'approche suggérée utilise l'apprentissage profond supervisé (DL supervisé), en particulier les réseaux neuronaux convolutifs unidimensionnels (1D CNN). Pour la classification, l'apprentissage supervisé est basé sur l'entraînement du modèle pour le problème avec des classes connues et la prédiction par la suite. Comme on peut le voir sur la Figure 5.2, notre classificateur de mobilité basé sur le 1D-CNN est composé de trois types de couches qui sont courantes dans les réseaux neuronaux convolutifs en général [156, 157] : les couches convolutionnelles, de pooling, et entièrement connectées. Ces trois couches sont empilées les unes sur les autres et forment l'architecture du modèle.

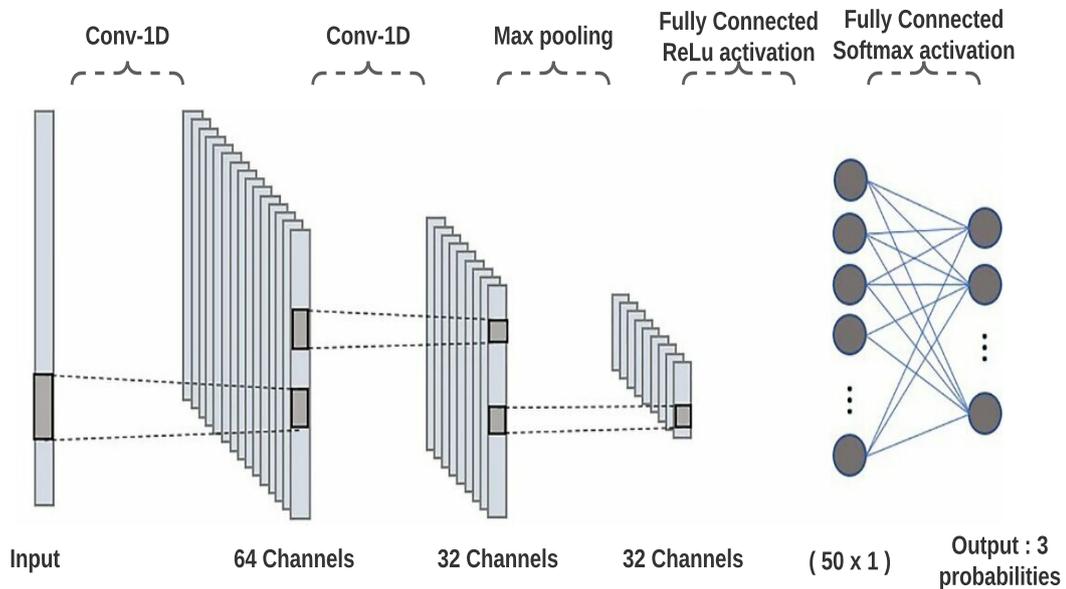


FIGURE 5.2 – L'architecture de réseau du modèle 1D-CNN

5.2.2.1 DataSet :

Pour l'entraînement de notre modèle de classification CNN-1D, nous avons utilisé un ensemble de données généré à l'aide de SUMO (Simulation of Urban MObility) version 1.10.0. SUMO est un outil de simulation de trafic urbain open source qui permet de modéliser des itinéraires réalistes pour divers types d'utilisateurs, y compris les Automobiles, les Vélos et les Piétons, Voici les étapes de création de notre DataSet :

1. **Création des itinéraires** : La zone d'étude a été récupérée à partir d'OpenStreetMap et est située à Munich, en Allemagne. Les utilisateurs suivent

les règles de circulation et les itinéraires de la zone OpenStreetMap récupérée. Les itinéraires des utilisateurs sont exportés vers un fichier XML une fois générés dans SUMO.

2. **Conversion des données** : Les itinéraires générés par SUMO ont été convertis en un format CSV pour faciliter leur utilisation dans notre modèle de classification CNN-1D. Le fichier CSV obtenu contient plus de 200 000 données d'entrée pour le réseau CNN-1D.
3. **Classes de mobilité** : Dans notre modèle d'apprentissage CNN-1D, les données d'entrée comprennent les coordonnées géographiques et la vitesse des utilisateurs. Ces données sont associées aux données de sortie qui représentent les trois classes de mobilité : Automobile, Vélo et Piéton.

En résumé, l'utilisation de SUMO pour générer des itinéraires réalistes à partir d'une zone d'étude spécifique, combinée à la conversion de ces itinéraires en un format CSV utilisable, a permis de créer un ensemble de données robuste pour l'entraînement de notre modèle de classification CNN-1D.

5.2.2.2 Processus d'apprentissage :

Le modèle reçoit les données d'entrée et produit un vecteur de probabilité spécifiant à quelle classe prédéfinie les données peuvent appartenir. Dans notre scénario, l'entrée du modèle comprend des données collectées auprès des utilisateurs finaux, comme la vitesse, l'accélération, et la localisation actuelle, qui ont été enregistrées périodiquement par chaque appareil du réseau. Les sorties sont les trois classes de mobilité possibles : Automobile, Vélo, et Piéton. La capture 5.3 montre un résumé concis de l'architecture du modèle utilisé ainsi que des informations importantes sur chaque couche du réseau, y compris le type de couche, la forme de la sortie (output shape), le nombre de paramètres entraînables, et le total des paramètres.

Layer (type)	Output Shape	Param #
conv1d (Conv1D)	(None, 2, 64)	192
max_pooling1d (MaxPooling1D)	(None, 1, 64)	0
flatten (Flatten)	(None, 64)	0
dense (Dense)	(None, 50)	3250
dense_1 (Dense)	(None, 1)	51
dense_2 (Dense)	(None, 3)	6
=====		
Total params: 3499 (13.67 KB)		
Trainable params: 3499 (13.67 KB)		
Non-trainable params: 0 (0.00 Byte)		

FIGURE 5.3 – Résumé de l'architecture du modèle

Dans le cadre de notre réseau de neurones convolutifs (CNN-D), nous avons utilisé plusieurs paramètres et techniques pour optimiser notre modèle. Voici une présentation détaillée de ces paramètres :

— **Algorithme d'optimisation : Adam**

Il est utilisé pour calculer les taux d'apprentissage adaptatifs pour chaque paramètre.

— **Fonction de coût : categorical_crossentropy**

La fonction de coût categorical_crossentropy est couramment utilisée

dans les problèmes de classification multiclasse. Elle mesure la dissimilitude entre la distribution de probabilité prédite par le modèle et la distribution de probabilité réelle (les vraies étiquettes des échantillons).

— **Fonction d'activation de la dernière couche de prédiction : softmax**

La fonction softmax est souvent utilisée comme la dernière fonction d'activation d'un réseau de neurones pour normaliser la sortie d'un réseau à une distribution de probabilité sur les classes de sortie prédites.

— **Nombre d'époques : 50**

Le modèle a convergé après 50 époques.

— **Précision de prédiction : 94%**

Après l'entraînement, le modèle a atteint une précision de prédiction de 94%. Cela signifie que le modèle a correctement prédit la classe de 94% des échantillons de l'ensemble de test.

Ces paramètres ont été choisis pour optimiser les performances de notre modèle CNN-D, en tenant compte de la nature de notre problème de classification et des données disponibles. À la fin de ce processus, les meilleurs candidats pour la position de relais mobile peuvent être identifiés. Un "meilleur candidat" peut être un utilisateur final à faible mobilité (par exemple, un piéton avec un smartphone), un appareil avec des ressources sous-utilisées, ou tout autre appareil cible approprié au contexte actuel.

5.3 Évaluation des performances

La solution proposée a été testée à l'aide du simulateur de réseau OM-NeT++. Nous avons également intégré le logiciel de mobilité urbaine (SUMO) pour obtenir une simulation plus réaliste.

5.3.1 Configuration de la simulation :

Le simulateur Omnet++ 5.6.2 a été utilisé pour exécuter les simulations. SUMO 1.10.0 a été utilisé pour créer les itinéraires des utilisateurs. La zone d'étude a été récupérée à partir d'OpenStreetMap et est située à Munich, en Allemagne.

Omnet++ génère ensuite un "nœud" pour chaque utilisateur généré dans SUMO. Le cadre Veins permet également d'effectuer une simulation OM-NeT en utilisant les modèles de mouvement d'utilisateur générés par SUMO (par exemple, vélo, trottinette, etc.) pour générer et déplacer les nœuds de manière plus réaliste.

Le tableau 5.1 montre un résumé des paramètres essentiels. La zone est d'environ $1,02 \text{ Km}^2$, et de nouveaux utilisateurs sont ajoutés au réseau toutes les 3 secondes. Le nombre total et instantané d'utilisateurs reflète le nombre d'utilisateurs générés lors d'une seule exécution et le nombre d'utilisateurs présents à un moment donné, respectivement. Les relais sont sélectionnés par environ 5% du nombre total d'utilisateurs. Les automobiles représentent la majorité des utilisateurs, les vélos et les piétons représentant un faible pourcentage. Les simulations ont duré 900 secondes avec cinq répétitions pour améliorer la précision des résultats.

À l'exception des relais, tous les autres utilisateurs génèrent des données à un débit binaire variable. Les utilisateurs ont un débit d'environ 11 Mbps, avec des paquets de données réglés à la taille minimale du paquet IPv4. Les utilisateurs ont également une portée de transmission maximale d'environ 100 à 120 mètres.

5.3.2 Résultats de la simulation :

Les métriques suivantes sont utilisées pour comparer les résultats de notre solution proposée avec des relais sélectionnés sans classification ou l'utilisation de relais fixes.

PARAMETRE	VALEUR
Zone de simulation	1700m . 600m
Période de génération d'utilisateurs	3 s
Nombre. D'utilisateurs, total	300
Nombre. D'utilisateurs, par instant.	25 to 40
Rapport de relais	Max. 5%
voiture :vélo :piéton	Rapport 4 :1 :1
Durée de la simulation	900 seconds
Répétitions	5
Max. débit utilisateur	11 Mbps
Modèle de propagation	Two Ray Ground
Protocol MAC	IEEE 802.11p
Bande de fréquence Wifi	5.9 GHz

TABLE 5.1 – Paramètres de simulation

5.3.2.1 Taux de livraison des paquets (PDR)

Le ratio du nombre moyen de paquets reçus avec succès par la destination au nombre moyen de paquets envoyés par la source. La Figure 5.4 représente le PDR à différentes charges de notre solution proposée (avec classification) par rapport aux autres solutions. À des charges plus élevées, on peut voir que la solution proposée se comporte nettement mieux. Cela est dû au fait que l'utilisation d'utilisateurs à faible mobilité comme relais rend la topologie plus stable, minimisant ainsi la perte de paquets. D'autre part, les relais fixes ont un PDR inférieur à celui des relais mobiles, car les utilisateurs mobiles finissent par quitter la portée de ces relais.

5.3.2.2 Délai de bout en bout

Le temps de la source à la destination pour chaque paquet est calculé pour tester le délai de fin dans le réseau. La Figure 5.5 représente le délai moyen de bout en bout des paquets de données à différentes charges pour notre solution proposée (avec classification) par rapport aux autres solutions. En raison de l'efficacité du processus de classification et de sélection de notre

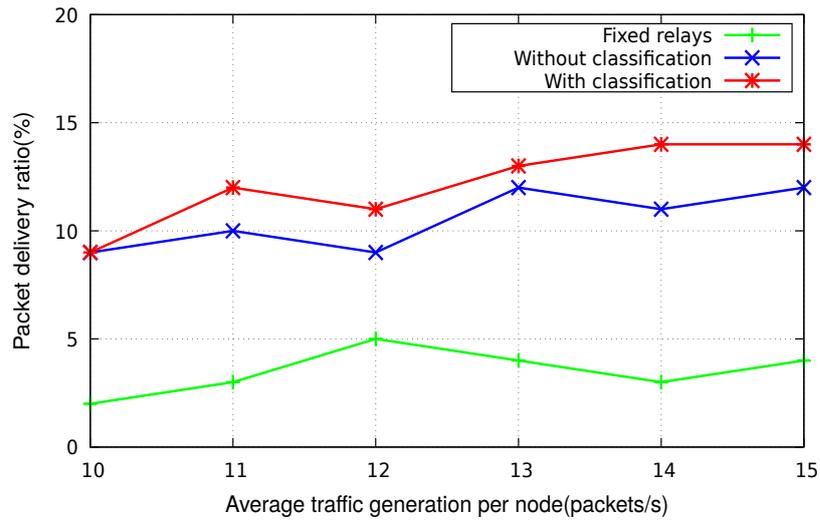


FIGURE 5.4 – Le taux de livraison des paquets à différentes charges

approche, notre solution génère moins de délais. D'autre part, les relais fixes ont un taux de délai très élevé car les utilisateurs se déplacent hors de leur portée.

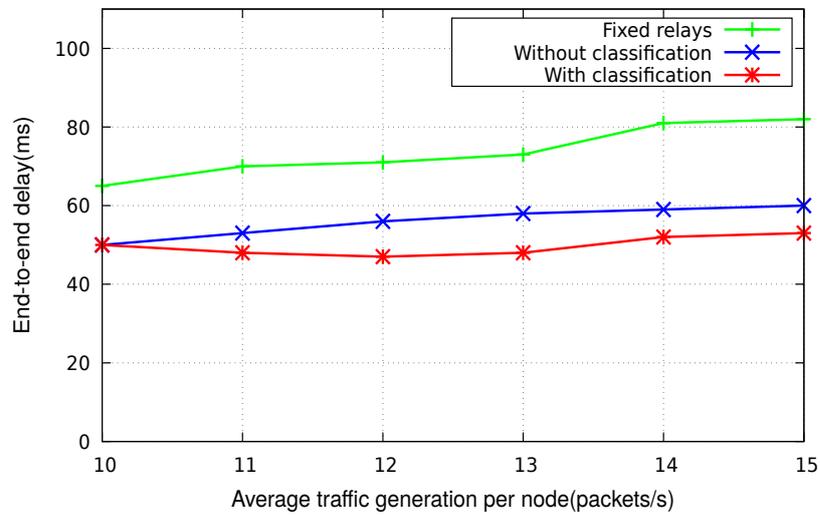


FIGURE 5.5 – Le délai de bout en bout

5.3.2.3 Utilisation du débit

La proportion du débit total d'un nœud actuellement utilisée. La Figure 5.6 montre l'utilisation moyenne du débit par nœud à différentes charges pour notre solution proposée (avec classification) par rapport aux autres solutions. On peut voir que l'utilisation du débit augmente avec l'augmentation de la charge pour toutes les solutions en raison d'un PDR plus élevé et de plus de retransmissions nécessaires.

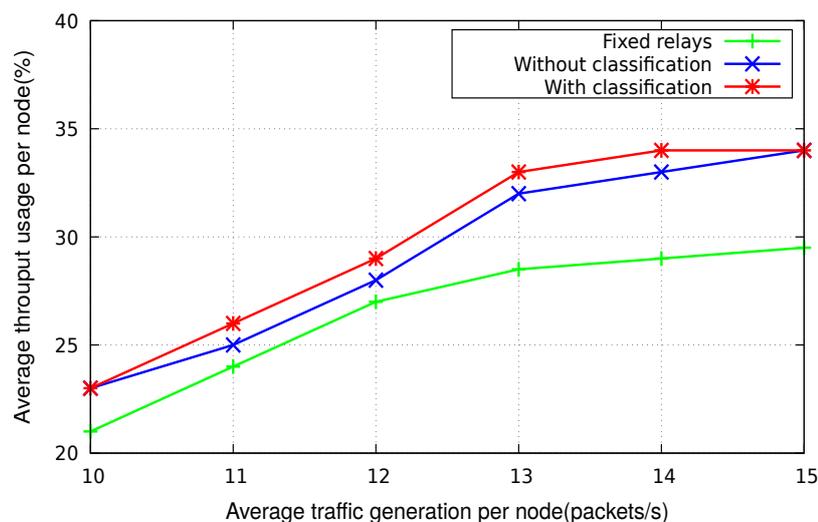


FIGURE 5.6 – L'utilisation du débit

5.4 Conclusion

La solution proposée dans ce chapitre utilise un modèle de réseau neuronal convolutif (CNN) pour prédire la classe de mobilité de l'utilisateur final afin de choisir les relais mobiles appropriés sans avoir recours à une infrastructure fixe. Cette solution peut être utilisée seule pour améliorer l'efficacité du réseau ou combinée à d'autres techniques pour améliorer encore les performances. D'après les simulations, la proposition peut prendre en charge un nombre élevé d'utilisateurs, améliorer le taux de livraison des paquets, générer une topologie stable et réduire la latence par rapport aux solutions sans classification ou relais fixes. Les travaux futurs étendront le modèle à d'autres types de mobilité (par exemple, les motos) et à une plus grande congestion du trafic.

Chapitre 6

Conclusion et Perspectives

En tant que nouveau paradigme ITS, l'IoV devient l'un des domaines de recherche les plus actifs et joue un rôle important dans la résolution de divers problèmes de conduite et de traçage grâce aux technologies avancées d'information et de communication. Malgré ces avantages, les IoV présentent de nombreux défis et limites de conception qui doivent être pris en compte par les chercheurs pour proposer de nouvelles solutions pour ces réseaux et améliorer les solutions existantes.

À cet égard, le choix d'une technique de structuration de réseau efficace pour le paradigme IoV est un sujet qui reste d'actualité, d'autant plus que ce type de réseau est en pleine expansion, en raison de son énorme potentiel de contributions bénéfiques, notamment pour la sécurité dans laquelle la vie des individus est en jeu. Le clustering et la sélection de relais font partie des techniques prometteuses pour la structuration du réseau, qui vise à optimiser les performances et l'évolutivité du réseau. Dans cette thèse, nous avons exploré en profondeur la question afin de proposer de nouveaux algorithmes de clustering et de sélection de relais adaptés au système IoV.

Bien que les approches de clustering et de sélection des relais proposés pour l'IoV soient très prometteuses et puissent fournir des performances très acceptables, il existe d'autres sujets importants que nous prévoyons de mener et d'étudier plus avant dans la recherche. Nous les résumons comme suit :

- Étudier l'utilisation des algorithmes proposés dans les zones urbaines en concevant des algorithmes correspondants efficaces et en comparant leurs performances aux protocoles existants.
- Considérer l'impact des collisions et des terminaux cachés, qui ont un impact sur le taux de livraison lorsque le nombre de véhicules connectés augmente.

- Étendra le modèle de sélection des relais à d'autres types de mobilité (par exemple, les motos) et à davantage d'embouteillages.
- Prendre en considération l'aspect de la cybersécurité entre les nœuds du cluster en supposant le cas d'existence des nœuds malicieux qui peuvent potentiellement avoir un impact négatif sur les paramètres de performance du réseau. Le nœud attaquant peut affecter le débit du réseau en provoquant la dégradation du temps de réponse du réseau.

Bibliographie

- [1] F. Yang, J. Li, T. Lei, and S. Wang, "Architecture and key technologies for internet of vehicles : a survey," 2017.
- [2] A. Dua, N. Kumar, and S. Bawa, "A systematic review on routing protocols for vehicular ad hoc networks," *Vehicular Communications*, vol. 1, no. 1, pp. 33–52, 2014.
- [3] F. Yang, S. Wang, J. Li, Z. Liu, and Q. Sun, "An overview of internet of vehicles," *China communications*, vol. 11, no. 10, pp. 1–15, 2014.
- [4] "Statista web site." [Online]. Available : <https://www.statista.com/statistics/471264/iot-number-of-connected-devices-worldwide/>
- [5] C. A. Kerrache, N. Lagraa, R. Hussain, S. H. Ahmed, A. Benslimane, C. T. Calafate, J.-C. Cano, and A. M. Vegni, "Tacashi : Trust-aware communication architecture for social internet of vehicles," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 4, pp. 5870–5877, 2018.
- [6] A. Boukerche and E. Robson, "Vehicular cloud computing : Architectures, applications, and mobility," *Computer networks*, vol. 135, pp. 171–189, 2018.
- [7] O. Senouci, Z. Aliouat, and S. Harous, "A review of routing protocols in internet of vehicles and their challenges," *Sensor Review*, 2019.
- [8] L.-M. Ang, K. P. Seng, G. K. Ijamaru, and A. M. Zungeru, "Deployment of iov for smart cities : Applications, architecture, and challenges," *IEEE access*, vol. 7, pp. 6473–6492, 2018.
- [9] S. Al-Sultan, M. M. Al-Doori, A. H. Al-Bayatti, and H. Zedan, "A comprehensive survey on vehicular ad hoc network," *Journal of network and computer applications*, vol. 37, pp. 380–392, 2014.
- [10] I. Salhi, M. O. Cherif, and S.-M. Senouci, "A new architecture for data collection in vehicular networks," in *2009 IEEE International Conference on Communications*. IEEE, 2009, pp. 1–6.

- [11] P. Yang, J. Wang, Y. Zhang, Z. Tang, and S. Song, "Clustering algorithm in vanets : A survey," in *2015 IEEE 9th international conference on anti-counterfeiting, security, and identification (ASID)*. IEEE, 2015, pp. 166–170.
- [12] C. Cooper, D. Franklin, M. Ros, F. Safaei, and M. Abolhasan, "A comparative survey of vanet clustering techniques," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 1, pp. 657–681, 2016.
- [13] Y. Huo, Y. Liu, L. Ma, X. Cheng, and T. Jing, "An enhanced low overhead and stable clustering scheme for crossroads in vanets," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2016, no. 1, pp. 1–13, 2016.
- [14] Y. Zheng, Y. Wu, Z. Xu, and X. Lin, "A cluster-on-demand algorithm with load balancing for vanet," in *International Conference on Internet of Vehicles*. Springer, 2016, pp. 120–127.
- [15] O. A. Wahab, H. Otrok, and A. Mourad, "Vanet qos-olsr : Qos-based clustering protocol for vehicular ad hoc networks," *Computer Communications*, vol. 36, no. 13, pp. 1422–1435, 2013.
- [16] Y. Sun, H. Song, A. J. Jara, and R. Bie, "Internet of things and big data analytics for smart and connected communities," *IEEE access*, vol. 4, pp. 766–773, 2016.
- [17] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami, "Internet of things (iot) : A vision, architectural elements, and future directions," *Future generation computer systems*, vol. 29, no. 7, pp. 1645–1660, 2013.
- [18] M. A. Feki, F. Kawsar, M. Boussard, and L. Trappeniers, "The internet of things : the next technological revolution," *Computer*, vol. 46, no. 2, pp. 24–25, 2013.
- [19] M. Saini, A. Alelaiwi, and A. E. Saddik, "How close are we to realizing a pragmatic vanet solution? a meta-survey," *ACM Computing Surveys (CSUR)*, vol. 48, no. 2, pp. 1–40, 2015.
- [20] S. F. Hasan, X. Ding, N. H. Siddique, and S. Chakraborty, "Measuring disruption in vehicular communications," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 1, pp. 148–159, 2010.
- [21] B. Aslam, P. Wang, and C. C. Zou, "Extension of internet access to vanet via satellite receive-only terminals," *International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing*, vol. 14, no. 3, pp. 172–190, 2013.

- [22] J. Toutouh and E. Alba, "Light commodity devices for building vehicular ad hoc networks : An experimental study," *Ad Hoc Networks*, vol. 37, pp. 499–511, 2016.
- [23] S. Bitam, A. Mellouk, and S. Zeadally, "Vanet-cloud : a generic cloud computing model for vehicular ad hoc networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 22, no. 1, pp. 96–102, 2015.
- [24] D. Kwak, R. Liu, D. Kim, B. Nath, and L. Iftode, "Seeing is believing : Sharing real-time visual traffic information via vehicular clouds," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 3617–3631, 2016.
- [25] W. Liang, Z. Li, H. Zhang, S. Wang, and R. Bie, "Vehicular ad hoc networks : architectures, research issues, methodologies, challenges, and trends," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 11, no. 8, p. 745303, 2015.
- [26] O. Kaiwartya, A. H. Abdullah, Y. Cao, A. Altameem, M. Prasad, C.-T. Lin, and X. Liu, "Internet of vehicles : Motivation, layered architecture, network model, challenges, and future aspects," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 5356–5373, 2016.
- [27] J. Barbaresso, G. Cordahi, D. Garcia, C. Hill, A. Jendzejec, K. Wright, and B. A. Hamilton, "Usdot's intelligent transportation systems (its) its strategic plan, 2015-2019." United States. Department of Transportation. Intelligent Transportation . . . , Tech. Rep., 2014.
- [28] World Health Organization, *Global Status Report on Road Safety*, pp.1257,2015. [Online]. Available : http://www.who.int/violence_injury_prevention/road_safetystatus/2015/en/
- [29] International Road Assessment Programme, *Global Cost of Road Crash*, 2013. [Online]. Available : <http://www.irap.net/en/about-irap-3/research-and-technical-papers>
- [30] European Environment Agency, *Assessment of Global Megatrends-States and Outlook*, Report, 2015. [Online]. Available : <http://www.eea.europa.eu/soer/europe-and-the-world/megatrends>
- [31] Mckinsey & Company, *Mobility of the future*, 2013. [Online]. Available : http://www.mckinsey.com/client_service/automotive_and_assembly/latest_thinking

- [32] M. Walport, "The internet of things : making the most of the second digital revolution," *A report by the UK Government Chief Scientific Adviser*, 2014.
- [33] Gartner, *Internet of Things Units Installed Base by Category*, 2014. [Online]. Available : <http://www.gartner.com/newsroom/id/2905717>
- [34] SBD, *Connected Car Global Forecast*, 2015. [Online]. Available : <http://www.sbd.co.uk/browse/con536-2013-connected-car-forecast-2/>
- [35] Mckinsey & Company, *Unlocking the potential of the Internet of Things*, 2015. [Online]. Available : http://www.mckinsey.com/insights/business_technology/the_internet_of_things_the_value_of_digitizing_the_physicalworld
- [36] SBD. (2015) Connected Car Global Forecast. [Online; accessed 17-December-2023]. [Online]. Available : <http://www.sbd.co.uk/browse/con536-2013-connected-car-forecast-2/>
- [37] The White House, US, *National Strategy for Trusted Identities in Cyberspace (NSTIC) : Enhancing Online Choice, Efficiency, Security, and Privacy*, 2011. [Online]. Available : https://www.whitehouse.gov/sites/default/files/rss_viewer/NSTICstrategy_041511.pdf
- [38] Transport Department, GOVT of NCT of Delhi, *Installation of GPS in buses and autos*, Order No : Odr(2010)/75/8, 2010.
- [39] European Commission, *Digital Signal Market Strategy*, 2015. [Online]. Available : <http://ec.europa.eu/priorities/digital-single-market/>
- [40] University of Michigan, *Public opinion about self-driving vehicles in China, India, Japan, the U.S., the U.K., and Australia*, Transportation Research Institute(UMTRI),pp.122,2014. [Online]. Available : <http://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/106590/102996.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [41] Google, "Open Automobile Alliance," 2015. [Online]. Available : <http://www.openautoalliance.net/>
- [42] Apple, "Car-Play," 2014. [Online]. Available : <http://www.apple.com/ios/carplay/>
- [43] K. Zheng, Q. Zheng, P. Chatzimisios, W. Xiang, and Y. Zhou, "Heterogeneous vehicular networking : A survey on architecture, challenges, and solutions," *IEEE communications surveys & tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2377–2396, 2015.

- [44] U.S. Department of Transportation, *IEEE 1609 - Family of Standards for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE)*, 2013. [Online]. Available : <https://www.standards.its.dot.gov/Factsheets/Factsheet/80>
- [45] R. Baldessari, B Bödekker, M. Deegener, A. Festag, W. Franz, C. C. Kellum, T. Kosch, A. Kovacs, M. Lenardi, C. Menig, and T. Peichl, T., *Car-2-car communication consortium-manifesto*, 2007. [Online]. Available : <https://www.car-2-car.org/index.php?id=31>
- [46] B. Richard, B. Roberto, *European ITS Communication Architecture : Overall Framework-Proof of Concept Implementation*, Deliverable 31, COME-Safety Project, 2009.
- [47] M. Bauer, M. Boussard and Nicola Bui, *IoT-A : Internet of Things- Architecture*, European Lighthouse Integrated Project, Deliverable D1.5, 2013. [Online]. Available : <http://www.iot-a.eu/public/public-documents>
- [48] European Union Project, *IoT6 : Universal Integration of the Internet of Things through an IPv6 based Service Oriented Architecture enabling heterogeneous components interoperability*, Deliverable 9.5, Final Report,Switzerland,2014. [Online]. Available : <http://www.iot6.eu/sites/default/files/IoT6%20-%20D9.5%20final%20report.pdfA>
- [49] European Union Project, *HyDRA : Heterogeneous physical devices in a distributed architecture*, Deliverable 13.9, Report, Germany, 2008. [Online]. Available : http://www.hydramiddleware.eu/hydra_documents/D13.9_Report_on%20projects_connected_to_Hydra.pdf
- [50] European Union Project, *RERUM : Reliable, Resilient and Secure IoT for Smart City Applications*, Deliverable Report, 1.0, Germany, 2015. [Online]. Available : https://bscw.ictrerum.eu/pub/bscw.cgi/d31967/RERUM%20deliverable%20D6_3.pdf
- [51] L. Armstrong, and W. Fisher, *IEEE Std 802.11P Wireless Access for Vehicular Environment*, Project Report, Internet Task Force (IETF), 2010. [Online]. Available : <https://www.ietf.org/mailarchive/web/its/current/pdfqf992dHy9x.pdf>
- [52] IEEE Working Group for Wireless Standard, *IEEE 802.11 TM Wireless Local Area Networks*. [Online]. Available : <http://www.ieee802.org/11/>

- [53] IEEE 802.16 based standards, *WiMax Forum-Technology*. [Online]. Available : <http://www.wimaxforum.org/>
- [54] C. Cox, *An introduction to LTE : LTE, LTE-advanced, SAE and 4G mobile communications*. John Wiley & Sons, 2012.
- [55] G. Maral, M. Bousquet, and Z. Sun, *Satellite communications systems : systems, techniques and technology*. John Wiley & Sons, 2020.
- [56] European Union Project,, *B-IoT : Enabling Business based Internet of Things and Servoces*, Deliverable Reports, D5.1.1, Germany. [Online]. Available : <http://www.ebbits-project.eu/>
- [57] R. Kitchin, "The real-time city? big data and smart urbanism," *GeoJournal*, vol. 79, no. 1, pp. 1–14, 2014.
- [58] —, "The real-time city? big data and smart urbanism," *GeoJournal*, vol. 79, no. 1, pp. 1–14, 2014.
- [59] N. Mitton, S. Papavassiliou, A. Puliafito, and K. S. Trivedi, "Combining cloud and sensors in a smart city environment," 2012.
- [60] K. Su, J. Li, and H. Fu, "Smart city and the applications," in *2011 international conference on electronics, communications and control (ICECC)*. IEEE, 2011, pp. 1028–1031.
- [61] N. Walravens and P. Ballon, "Platform business models for smart cities : from control and value to governance and public value," *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 6, pp. 72–79, 2013.
- [62] C. Campolo, A. Iera, A. Molinaro, S. Y. Paratore, and G. Ruggeri, "Smartcar : An integrated smartphone-based platform to support traffic management applications," in *2012 first international workshop on vehicular traffic management for smart cities (VTM)*. IEEE, 2012, pp. 1–6.
- [63] K. D. Singh, P. Rawat, and J.-M. Bonnin, "Cognitive radio for vehicular ad hoc networks (cr-vanets) : approaches and challenges," *EURASIP journal on wireless communications and networking*, vol. 2014, no. 1, p. 49, 2014.
- [64] Google, *Android Auto*. [Online]. Available : <https://www.android.com/auto/>
- [65] K. Zheng, L. Zhang, W. Xiang, and W. Wang, *Heterogeneous vehicular networks*. Springer, 2016, vol. 1.

- [66] I. F. Akyildiz, S. Mohanty, and J. Xie, "A ubiquitous mobile communication architecture for next-generation heterogeneous wireless systems," *IEEE Communications Magazine*, vol. 43, no. 6, pp. S29–S36, 2005.
- [67] —, "A ubiquitous mobile communication architecture for next-generation heterogeneous wireless systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 43, no. 6, pp. S29–S36, Jun 2005.
- [68] A. Walid, A. Kobbane, A. Mabrouk, E. Sabir, T. Taleb, and M. El Koutbi, "Group vertical handoff management in heterogeneous networks," *Wireless Communications and mobile computing*, vol. 16, no. 10, pp. 1256–1270, 2016.
- [69] Q. Zhao, Y. Zhu, C. Chen, H. Zhu, and B. Li, "When 3g meets vanet : 3g-assisted data delivery in vanets," *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, no. 10, pp. 3575–3584, 2013.
- [70] Most Corporation, *MOST : Media Oriented System Transport for multimedia and automotive Industries*. [Online]. Available : <http://www.mostcooperation.com/>
- [71] A. Benslimane, T. Taleb, and R. Sivaraj, "Dynamic clustering-based adaptive mobile gateway management in integrated vanet—3g heterogeneous wireless networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 29, no. 3, pp. 559–570, 2011.
- [72] K. Dar, M. Bakhouya, J. Gaber, M. Wack, and P. Lorenz, "Wireless communication technologies for its applications [topics in automotive networking]," *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no. 5, pp. 156–162, 2010.
- [73] W. Wu, Z. Yang, and K. Li, "Internet of vehicles and applications," in *Internet of Things*. Elsevier, 2016, pp. 299–317.
- [74] J. Zhang, X. Ma, and T. Wu, "Performance modeling and analysis of emergency message propagation in vehicular ad hoc networks," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 14, no. 3, pp. 366–379, 2014.
- [75] T. W. Chim, S.-M. Yiu, L. C. Hui, and V. O. Li, "Vspn : Vanet-based secure and privacy-preserving navigation," *IEEE Transactions on Computers*, vol. 63, no. 2, pp. 510–524, 2012.

- [76] Z. Li, C. Liu, and C. Chigan, "Vehicleview : A universal system for vehicle performance monitoring and analysis based on vanets," *IEEE Wireless Communications*, vol. 19, no. 5, pp. 90–96, 2012.
- [77] T.-W. Chang and J.-L. Chen, "Remote vehicular system management functions and information structure," in *Telematics Communication Technologies and Vehicular Networks : Wireless Architectures and Applications*. IGI Global, 2010, pp. 310–330.
- [78] S. Al-Sultan, A. H. Al-Bayatti, and H. Zedan, "Context-aware driver behavior detection system in intelligent transportation systems," *IEEE transactions on vehicular technology*, vol. 62, no. 9, pp. 4264–4275, 2013.
- [79] M. Amadeo, C. Campolo, and A. Molinaro, "Enhancing iee 802.11 p/wave to provide infotainment applications in vanets," *Ad Hoc Networks*, vol. 10, no. 2, pp. 253–269, 2012.
- [80] S.-I. Sou and O. K. Tonguz, "Enhancing vanet connectivity through roadside units on highways," *IEEE transactions on vehicular technology*, vol. 60, no. 8, pp. 3586–3602, 2011.
- [81] Y. Toor, P. Muhlethaler, A. Laouiti, and A. De La Fortelle, "Vehicle ad hoc networks : applications and related technical issues," *IEEE communications surveys & tutorials*, vol. 10, no. 3, pp. 74–88, 2008.
- [82] C. T. Barba, M. A. Mateos, P. R. Soto, A. M. Mezher, and M. A. Igarua, "Smart city for vanets using warning messages, traffic statistics and intelligent traffic lights," in *2012 IEEE intelligent vehicles symposium*. IEEE, 2012, pp. 902–907.
- [83] E. Hossain, G. Chow, V. C. Leung, R. D. McLeod, J. Mišić, V. W. Wong, and O. Yang, "Vehicular telematics over heterogeneous wireless networks : A survey," *Computer Communications*, vol. 33, no. 7, pp. 775–793, 2010.
- [84] M. Gerla and L. Kleinrock, "Vehicular networks and the future of the mobile internet," *Computer Networks*, vol. 55, no. 2, pp. 457–469, 2011.
- [85] J. Guerrero-Ibáñez, C. Flores-Cortés, and S. Zeadally, "Vehicular ad-hoc networks (vanets) : architecture, protocols and applications," in *Next-generation wireless technologies*. Springer, 2013, pp. 49–70.
- [86] C. Spelta, V. Manzoni, A. Corti, A. Goggi, and S. M. Savaresi, "Smartphone-based vehicle-to-driver/environment interaction system

- for motorcycles," *IEEE Embedded Systems Letters*, vol. 2, no. 2, pp. 39–42, 2010.
- [87] W. He, G. Yan, and L. Da Xu, "Developing vehicular data cloud services in the iot environment," *IEEE transactions on industrial informatics*, vol. 10, no. 2, pp. 1587–1595, 2014.
- [88] D. Eckhoff and C. Sommer, "Driving for big data? privacy concerns in vehicular networking," *IEEE Security & Privacy*, vol. 12, no. 1, pp. 77–79, 2014.
- [89] N. Kumar, S. Misra, and M. S. Obaidat, "Collaborative learning automata-based routing for rescue operations in dense urban regions using vehicular sensor networks," *IEEE Systems Journal*, vol. 9, no. 3, pp. 1081–1090, 2014.
- [90] S. Olariu, I. Khalil, and M. Abuelela, "Taking vanet to the clouds," *International Journal of Pervasive Computing and Communications*, 2011.
- [91] H. Hartenstein and K. Laberteaux, *VANET : vehicular applications and inter-networking technologies*. John Wiley & Sons, 2009, vol. 1.
- [92] T. Kosch, C. J. Adler, S. Eichler, C. Schroth, and M. Strassberger, "The scalability problem of vehicular ad hoc networks and how to solve it," *IEEE Wireless Communications*, vol. 13, no. 5, pp. 22–28, 2006.
- [93] M. Khabazian and M. K. M. Ali, "A performance modeling of connectivity in vehicular ad hoc networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 57, no. 4, pp. 2440–2450, 2008.
- [94] O. Abumansoor and A. Boukerche, "A secure cooperative approach for nonline-of-sight location verification in vanet," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 61, no. 1, pp. 275–285, 2011.
- [95] J. Contreras-Castillo, S. Zeadally, and J. A. Guerrero Ibáñez, "A seven-layered model architecture for internet of vehicles," *Journal of Information and Telecommunication*, vol. 1, no. 1, pp. 4–22, 2017.
- [96] J. Jakubiak and Y. Koucheryavy, "State of the art and research challenges for vanets," in *2008 5th IEEE Consumer Communications and Networking Conference*. IEEE, 2008, pp. 912–916.
- [97] G. Karagiannis, O. Altintas, E. Ekici, G. Heijenk, B. Jarupan, K. Lin, and T. Weil, "Vehicular networking : A survey and tutorial on requirements, architectures, challenges, standards and solutions," *IEEE communications surveys & tutorials*, vol. 13, no. 4, pp. 584–616, 2011.

- [98] O. Derbel, "Modélisation microscopique et macroscopique du trafic : Impact des véhicules automatisés sur la sécurité du conducteur," Ph.D. dissertation, Université de Haute Alsace - Mulhouse, 2014. [Online]. Available : <https://theses.hal.science/tel-01314140>
- [99] R. T. Hay, "Sumo : a history of modification," *Molecular cell*, vol. 18, no. 1, pp. 1–12, 2005.
- [100] K.-C. Lan, "Move : a practical simulator for mobility model in vanet," in *Telematics communication technologies and vehicular networks : wireless architectures and applications*. IGI Global, 2010, pp. 355–368.
- [101] S.-C. Choi, H. R. Hussen, J.-H. Park, and J. Kim, "Geolocation-based routing protocol for flying ad hoc networks (fanets)," in *2018 Tenth international conference on ubiquitous and future networks (ICUFN)*. IEEE, 2018, pp. 50–52.
- [102] L. Wischhof and H. Rohling, "Congestion control in vehicular ad hoc networks," in *IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, 2005*. IEEE, 2005, pp. 58–63.
- [103] G. Grilli, "Data dissemination in vehicular networks," *Philosophiæ Doctor (PhD) dissertation in Computer Science and Automation Engineering/University of Rome" Tor Vergata*, 2010.
- [104] A. Boukerche and N. Aljeri, "Design guidelines for topology management in software-defined vehicular networks," *IEEE Network*, vol. 35, no. 2, pp. 120–126, 2021.
- [105] M. Ayyub, A. Oracevic, R. Hussain, A. A. Khan, and Z. Zhang, "A comprehensive survey on clustering in vehicular networks : Current solutions and future challenges," *Ad Hoc Networks*, vol. 124, p. 102729, 2022.
- [106] P. Fan, J. G. Haran, J. Dillenburg, and P. C. Nelson, "Cluster-based framework in vehicular ad-hoc networks," in *International conference on ad-hoc networks and wireless*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2005, pp. 32–42.
- [107] F. Aadil, W. Ahsan, Z. U. Rehman, P. A. Shah, S. Rho, and I. Mehmood, "Clustering algorithm for internet of vehicles (ioV) based on dragonfly optimizer (cavdo)," *The Journal of Supercomputing*, vol. 74, no. 9, pp. 4542–4567, 2018.

- [108] M. S. Anwer and C. Guy, "A survey of vanet technologies," *Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences*, vol. 5, no. 9, pp. 661–671, 2014.
- [109] O. Kayis and T. Acarman, "Clustering formation for inter-vehicle communication," in *2007 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*. Bellevue, WA, USA : IEEE, 2007, pp. 636–641.
- [110] Z. Wang, L. Liu, M. Zhou, and N. Ansari, "A position-based clustering technique for ad hoc intervehicle communication," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, vol. 38, no. 2, pp. 201–208, 2008.
- [111] K. A. Hafeez, L. Zhao, Z. Liao, and B. N.-W. Ma, "A fuzzy-logic-based cluster head selection algorithm in vanets," in *2012 IEEE international conference on communications (ICC)*. IEEE, 2012, pp. 203–207.
- [112] M. Azizian, S. Cherkaoui, and A. S. Hafid, "A distributed d-hop cluster formation for vanet," in *2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, Doha, Qatar, Apr 2016, pp. 1–6.
- [113] A. Z. Ahwazi and M. NooriMehar, "Mosaic : mobility-aware single-hop clustering scheme for vehicular ad hoc networks on highways," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 7, no. 9, pp. 424–431, 2016.
- [114] B. Liang and Z. J. Haas, "Predictive distance-based mobility management for pcs networks," in *IEEE INFOCOM'99. Conference on Computer Communications. Proceedings. Eighteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. The Future is Now (Cat. No. 99CH36320)*, vol. 3. IEEE, 1999, pp. 1377–1384.
- [115] M. Hadded, P. Muhlethaler, A. Laouiti, and L. A. Saidane, "A novel angle-based clustering algorithm for vehicular ad hoc networks," in *Vehicular Ad-Hoc Networks for Smart Cities*. Singapore : Springer, 2017, pp. 27–38.
- [116] M. F. Khan, F. Aadil, M. Maqsood, S. H. R. Bukhari, M. Hussain, and Y. Nam, "Moth flame clustering algorithm for internet of vehicle (mfca-iov)," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 11 613–11 629, 2018.
- [117] A. K. Dutta, M. Elhoseny, V. Dahiya, and K. Shankar, "An efficient hierarchical clustering protocol for multihop internet of vehicles

- communication," *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 31, no. 5, p. e3690, 2020, e3690 ETT-19-0204.R1. [Online]. Available : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ett.3690>
- [118] O. Senouci, S. Harous, and Z. Aliouat, "A new heuristic clustering algorithm based on rsu for internet of vehicles," *Arabian Journal for Science and Engineering*, pp. 1–19, 2019.
- [119] O. Senouci, Z. Aliouat, and S. Harous, "Dca-ds : A distributed clustering algorithm based on dominating set for internet of vehicles," *Wireless Personal Communications*, vol. 115, no. 1, pp. 401–413, 2020.
- [120] K. Shamganth and M. J. Sibley, "A survey on relay selection in cooperative device-to-device (d2d) communication for 5g cellular networks," in *2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS)*. IEEE, 2017, pp. 42–46.
- [121] D. Abada, A. Massaq, A. Boulouz, and M. B. Salah, "An adaptive vehicular relay and gateway selection scheme for connecting vanets to internet via 4g lte cellular network," in *Emerging technologies for connected internet of vehicles and intelligent transportation system networks*. Springer, 2020, pp. 149–163.
- [122] D. Liu, J. Wang, Y. Xu, Y. Xu, Y. Yang, and Q. Wu, "Opportunistic mobility utilization in flying ad-hoc networks : A dynamic matching approach," *IEEE Communications Letters*, vol. 23, no. 4, pp. 728–731, 2019.
- [123] N.-N. Dao, M. Park, J. Kim, J. Paek, and S. Cho, "Resource-aware relay selection for inter-cell interference avoidance in 5g heterogeneous network for internet of things systems," *Future Generation Computer Systems*, vol. 93, pp. 877–887, 2019.
- [124] Z. Liao, J. Liang, and C. Feng, "Mobile relay deployment in multihop relay networks," *Computer Communications*, vol. 112, pp. 14–21, 2017.
- [125] Y. Su, X. Lu, Y. Zhao, L. Huang, and X. Du, "Cooperative communications with relay selection based on deep reinforcement learning in wireless sensor networks," *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, no. 20, pp. 9561–9569, 2019.
- [126] A. Mchergui, T. Moulahi, and S. Nasri, "Relay selection based on deep learning for broadcasting in vanet," in *2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC)*. IEEE, 2019, pp. 865–870.

- [127] A. Abdelreheem, O. A. Omer, H. Esmail, and U. S. Mohamed, "Deep learning-based relay selection in d2d millimeter wave communications," in *2019 International Conference on Computer and Information Sciences (ICCIS)*. IEEE, 2019, pp. 1–5.
- [128] S. B. Mena, "Introduction aux méthodes multicritères d'aide à la décision," *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, vol. 4, pp. 83–93, 2000. [Online]. Available : <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:83267729>
- [129] O. S. Vaidya and S. Kumar, "Analytic hierarchy process : An overview of applications," *European Journal of operational research*, vol. 169, no. 1, pp. 1–29, 2006.
- [130] S. Opricovic and G.-H. Tzeng, "Extended vikor method in comparison with outranking methods," *European journal of operational research*, vol. 178, no. 2, pp. 514–529, 2007.
- [131] M. Behzadian, R. B. Kazemzadeh, A. Albadvi, and M. Aghdasi, "Promethee : A comprehensive literature review on methodologies and applications," *European journal of Operational research*, vol. 200, no. 1, pp. 198–215, 2010.
- [132] B. Roy, "The outranking approach and the foundations of electre methods," *Theory and decision*, vol. 31, pp. 49–73, 1991.
- [133] M. Behzadian, S. K. Otaghsara, M. Yazdani, and J. Ignatius, "A state-of-the-art survey of topsis applications," *Expert Systems with applications*, vol. 39, no. 17, pp. 13 051–13 069, 2012.
- [134] T. Saaty, "The analytical hierarchical process (vol. 1)," New York : McGraw-Hill, 1980.
- [135] M. A. Badri, "A combined ahp–gp model for quality control systems," *International Journal of Production Economics*, vol. 72, no. 1, pp. 27 – 40, 2001.
- [136] E. Y. C. Albayrak, Esra, "Using analytic hierarchy process (ahp) to improve human performance : An application of multiple criteria decision making problem," *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 15, p. 491–503, 2004.
- [137] J. Wang and D. Yang, "Using a hybrid multi-criteria decision aid method for information systems outsourcing," *Comput. Oper. Res.*, vol. 34, pp. 3691–3700, 2007.

- [138] J.-P. Brans and P. Vincke, "Note—a preference ranking organisation method : (the promethee method for multiple criteria decision-making)," *Management science*, vol. 31, no. 6, pp. 647–656, 1985.
- [139] S. Sharma and S. Sen, "One-dimensional convolutional neural network-based damage detection in structural joints," *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, vol. 10, no. 5, pp. 1057–1072, 2020.
- [140] A. Shenfield and M. Howarth, "A novel deep learning model for the detection and identification of rolling element-bearing faults," *Sensors*, vol. 20, no. 18, p. 5112, 2020.
- [141] M. Keertikumar, M. Shubham, and R. Banakar, "Evolution of iot in smart vehicles : An overview," in *2015 International Conference on Green Computing and Internet of Things (ICGCIoT)*. Greater Noida, India : IEEE, 2015, pp. 804–809.
- [142] S. Abdelhamid, H. S. Hassanein, and G. Takahara, "Vehicle as a resource (vaar)," *IEEE Network*, vol. 29, no. 1, pp. 12–17, 2015.
- [143] X. Hou, Y. Li, M. Chen, D. Wu, D. Jin, and S. Chen, "Vehicular fog computing : A viewpoint of vehicles as the infrastructures," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 6, pp. 3860–3873, 2016.
- [144] R. Aissaoui, A. Dhraief, A. Belghith, H. Menouar, H. Mathkour, F. Filali, and A. Abu-Dayya, "Hcbls : A hierarchical cluster-based location service in urban environment," *Mobile Information Systems*, vol. 2015, 2015.
- [145] A. Frappier, "Méthode d'évaluation de la diversité et de la qualité des alternatives de déplacement de transport en commun." École Polytechnique de Montréal, 2015.
- [146] M. Djellabi, "Mesure d'interactions locales pour les nœuds d'un réseau complexe : approches théorique et pratique." Université Toulouse le Mirail-Toulouse II, 2021.
- [147] M. Bersali, A. Rachedi, and H. Bouarfa, "A new collaborative clustering approach for the internet of vehicles (cca-iov)," in *2020 Second International Conference on Embedded & Distributed Systems (EDiS)*, Oran, Algeria, pp. 58–63.
- [148] V. Balali, B. Zahraie, and A. Roozbahani, "A comparison of ahp and promethee family decision making methods for selection of building

- structural system," *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, vol. 2, no. 5, pp. 149–159, 2014.
- [149] L. Turcksin, A. Bernardini, and C. Macharis, "A combined ahp-promethee approach for selecting the most appropriate policy scenario to stimulate a clean vehicle fleet," *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, vol. 20, pp. 954–965, 2011.
- [150] J. Wang, M. K. Lim, C. Wang, and M.-L. Tseng, "The evolution of the internet of things (iot) over the past 20 years," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 155, p. 107174, 2021.
- [151] S. Sharma and B. Kaushik, "A survey on internet of vehicles : Applications, security issues & solutions," *Vehicular Communications*, vol. 20, p. 100182, 2019.
- [152] M. Veres and M. Moussa, "Deep learning for intelligent transportation systems : A survey of emerging trends," *IEEE Transactions on Intelligent transportation systems*, vol. 21, no. 8, pp. 3152–3168, 2019.
- [153] L. Liu, B. Yin, S. Zhang, X. Cao, and Y. Cheng, "Deep learning meets wireless network optimization : Identify critical links," *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, vol. 7, no. 1, pp. 167–180, 2018.
- [154] F. Tang, B. Mao, Z. M. Fadlullah, N. Kato, O. Akashi, T. Inoue, and K. Mizutani, "On removing routing protocol from future wireless networks : A real-time deep learning approach for intelligent traffic control," *IEEE Wireless Communications*, vol. 25, no. 1, pp. 154–160, 2017.
- [155] M. Bouaziz, A. Rachedi, A. Belghith, M. Berbineau, and S. Al-Ahmadi, "Ema-rpl : Energy and mobility aware routing for the internet of mobile things," *Future Generation Computer Systems*, vol. 97, pp. 247–258, 2019.
- [156] A. Krizhevsky, I. Sutskever, and G. E. Hinton, "Imagenet classification with deep convolutional neural networks," *Communications of the ACM*, vol. 60, no. 6, pp. 84–90, 2017.
- [157] Y. LeCun, "1.1 deep learning hardware : past, present, and future," in *2019 IEEE International Solid-State Circuits Conference-(ISSCC)*. IEEE, 2019, pp. 12–19.

PUBLICATIONS

1. **Mahmoud Bersali**, Abderrezak Rachedi, Hafida Bouarfa, Mohamed El Amine. “**A novel cooperative clustering approach based on multi-criteria decision-making for IoV.**” International Journal of High-Performance Systems Architecture.

CONFERENCES

1. **Mahmoud Bersali**, Abderrezak Rachedi, Hafida Bouarfa. (2020) “**A New Collaborative Clustering Approach for the Internet of Vehicles (CCA-IoV)**” presented at the Second International Conference on Embedded & Distributed Systems (EDiS), Oran, Algeria, 3 November 2020.
2. **Mahmoud Bersali**, Abderrezak Rachedi, Hafida Bouarfa. (2021) “**Convolutional neural network for relays selection in the Internet of Vehicles**” presented at the International Conference on Forthcoming Networks and Sustainability in AIoT Era | Nicosia, Cyprus | December 27-28, 2021.