

Vue d'ensemble sur les réseaux d'Internet de véhicules

1.1 Introduction

Les systèmes de transport intelligents (STI) ont connu une grande évolution ces dernières années. L'émergence des techniques de communication sans fil a conduit à l'apparition d'un nouveau type de réseau connu sous le nom des réseaux ad hoc de véhicules ou VANETs pour Vehicular Adhoc Networks en anglais [6]. Les VANETs sont considérés comme le cœur des STIs traditionnels. Avec l'arrivées des villes intelligentes, la démocratisation de l'utilisation de l'Internet mobile et l'apparition de nouveau concept de l'Internet des objets, les nouvelles générations plus récentes des STIs font connaitre des changements profonds dans leur architecture de fonctionnement et leur méthode de conception. Cette transformation a accéléré l'émergence d'un nouvel écosystème appelé les réseaux d'Internet des véhicules ou IoV pour Internet of Vehicles en anglais. L'IoV augmente les VANETs traditionnels par de nouvelles technologies de communications hétérogènes, et principalement par des différents objets connectés au réseau de véhicules via Internet. L'IoV vise à améliorer la sécurité sur les routes, rendre l'expérience de voyage plus agréable ainsi que de faciliter la gestion de trafic autoroutier.

Dans ce chapitre, nous allons commencer par présenter les concepts de base des réseaux de véhicules dans la section 1.2 avant de détailler dans la section 1.3, les notions fondamentales de la technologie d'Internet de véhicules. La section 1.4 conclut le chapitre.

1.2 Réseau ad hoc de véhicules (VANET)

Les réseaux ad hoc de véhicules sont devenus ces dernières années l'un de domaines de recherche les plus attractifs dans le monde des réseaux sans fils. Dans cette section, nous

allons décrire les principaux concepts de base de cette technologie.

1.2.1 Définition

Un réseau ad hoc de véhicules (Vehicular Adhoc Networks, VANETs) est une nouvelle technologie qui tire bénéfice des dernières techniques de communication sans fil pour permettre aux véhicules mobiles de communiquer les uns avec les autres et aussi avec l'infrastructure de bord de la route [7] voir la figure 1.1. Les nœuds mobiles de ce réseau sont les véhicules intelligents. Ces derniers sont équipés de matériels à très hautes technologies tel que : des calculateurs embarqués, des radars, des systèmes de géolocalisation, différents types de capteurs, etc. [8] Les VANETs visent principalement à rendre la route plus sûre, les déplacements plus agréables et la gestion de trafic routier plus efficace.

1.2.2 Architecture

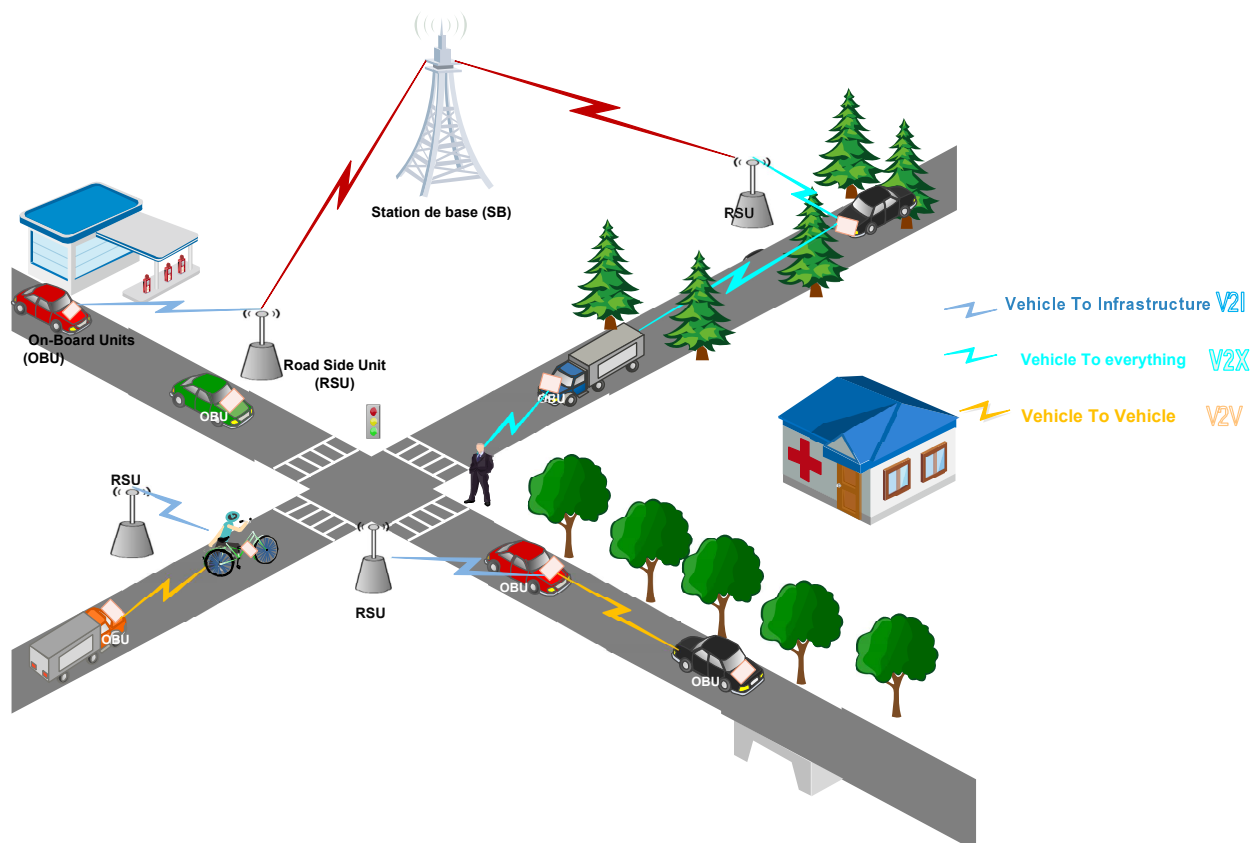


Figure 1.1: Architecture des réseaux ad hoc de véhicules.

L'architecture des réseaux de véhicules (VANETs) peut être décrite par un ensemble d'entités [6] : les véhicules intelligents, les unités embarquées au sein des véhicules OBU (On-Board Units), des unités placées le long des routes RSUs (Road Side Units) et les équipements per-

sonnels des conducteurs/passagers de véhicule. Pour pouvoir échanger les différentes informations et les données liées à la sécurité et au confort des usagers de la route, ces différentes entités doivent établir des communications entre elles. Pour cette raison, on distingue trois types de communications : véhicule à véhicule (Vehicle to Vehicle, V2V), véhicule à infrastructure (Vehicle to Infrastructure, V2I) et la communication hybride (Vehicle to Everything, V2X) [9], [10], voir figure 1.1.

1) Composantes

Généralement, il existe quatre entités communicantes dans un réseau de véhicules :

- **Les véhicules intelligents** : sont des véhicules traditionnels équipés d'une unité embarquée de calcul et de stockage appelée On-Board Units (OBUs), en plus de différents capteurs et radars. De plus, les véhicules intelligents sont équipés par différentes technologies de communications sans fil. Toutes ces unités permettent aux véhicules d'effectuer des calculs, de localiser leur position, collecter et enregistrer des données sur leurs environnements et communiquer avec d'autres véhicules ou équipement de bord de la route [6], [10].
- **OBU (on-board units)** : ce sont des unités embarquées installés sur les véhicules intelligents (voir la figure 1.1), elles regroupent un ensemble de composants matériels et logiciels de hautes technologies (GPS, radar, caméras, différents capteurs, etc.). Leurs rôles consistent à assurer la localisation, la réception, le calcul, le stockage et l'envoi des données sur l'interface de réseau. Les OBUs incluent aussi des émetteurs-récepteurs qui assurent la connexion du véhicule avec son environnement [7], [9].
- **RSU (Road Side Unit)** : sont des équipements externes aux véhicules installés au bord des routes, voir la figure 1.1. Ils diffusent des informations liées à l'état du trafic, l'état de la route, ainsi que des informations météorologiques. Les RSUs peuvent également jouer le rôle de stations de base relayant les informations envoyées par les véhicules. Ils sont d'ailleurs utilisés comme des relais entre les véhicules [7], [10].
- **Les équipements personnels** : sont les équipements qui peuvent être emportés par l'utilisateur à l'intérieur de son véhicule. Cela peut être un téléphone, un ordinateur portable ou encore un système de localisation GPS (Global Positioning System).

2) Mode de communication

Dans un réseau de véhicules, il y a principalement trois types de mode de communication [11] :

- **Communication de véhicule à véhicule (Vehicle to Vehicle, V2V)** : comme il est illustré

dans la figure 1.1, dans ce type de communication les véhicules communiquent directement les uns avec les autres d'une manière complètement décentralisée. La communication peut être directe en un seul saut entre les véhicules appartenant à la même zone de couverture radio, ou indirecte entre les véhicules éloignés en passant par des relais intermédiaires (véhicules) qui transmettent les messages en utilisant un protocole multi-sauts. La communication V2V est plus adaptée aux applications nécessitant des communications à courte distance et faible délai de réponse. Aussi, ce type de communication convient aux environnements fortement connectés avec une grande densité [12], [13].

- **Mode de communication de véhicule à infrastructures (Vehicle to Infrastructure, V2I)** : le mode V2I est un modèle de communication centralisé utilisé pour permettre aux véhicules de communiquer avec l'infrastructure au bord de la route (les RSUs) en un saut, voir la figure 1.1. Ce modèle repose sur le modèle client/serveur dont les véhicules sont les clients et les RSUs installées le long de la route sont les serveurs. Ces derniers sont reliés entre eux à travers une interface filaire ou sans fil. Une meilleure utilisation des ressources partagées et des services est fournie par ce mode de communication [9], [13]. En plus des RSUs, différents types d'infrastructure sont situés dans différentes structures de la route, telles que les feux de circulation, les panneaux des intersections, ou les stops. Le but est d'améliorer l'expérience de la conduite et la rendre plus sûre. L'inconvénient majeur de ce modèle réside dans le déploiement des stations le long des routes, qui est une tâche coûteuse et prend beaucoup de temps. Sans oublier les coûts relatifs à la maintenance de ces stations.
- **Mode de communication hybride (Vehicle to Everything, V2X)** : la combinaison des deux modes de communication cités ci-dessus (V2V et V2I) aboutit à un modèle hybride. Dans ce cas, les véhicules communiquent entre eux pour échanger des informations sur le trafic et avec l'infrastructure de bord de la route pour demander des données spécifiques [8].

1.2.3 Caractéristiques et défis

Les principales caractéristiques et défis des VANETs sont présentées ci-dessous :

- **Capacité de traitement et puissance de la batterie** : contrairement aux autres types de réseaux qui ont des problèmes d'énergie et de stockage, les entités de réseau de véhicules disposent d'un nombre suffisant de capteurs et de ressources informatiques, tels que les processeurs, une grande capacité de mémoire, la technique d'antenne de pointe et un système de positionnement global (GPS). Ces ressources disposent de grandes capacités énergétiques qu'elles tirent du système d'alimentation en énergie de véhicule (batterie) et augmentent la capacité de calcul et de traitement du véhicule, ce qui aide à obtenir une communication sans fil fiable et d'obtenir des informations précises concernant sa position actuelle, la vitesse et la direction [9], [14].

- **L'environnement de communication et le modèle de mobilité** : les environnements de communications dans les réseaux sans fil traditionnels se résument généralement à des espaces complètement ouverts et sans obstacles ou à des espaces clos en intérieur, les réseaux véhiculaires imposent la prise en compte d'une plus grande diversité environnementale [14]. En effet, la mobilité des véhicules est quelque peu limitée par des routes prédéfinies, ainsi que la direction et le nombre de voies. Les trajectoires peuvent être prévisible à l'avance et l'environnement peut être urbain, péri-urbain ou autoroute. Les contraintes imposées par ce type d'environnement, à savoir les obstacles, les feux de circulation et les limites de vitesse, affectent sérieusement le modèle de mobilité et la variation de la densité des véhicules [10].
- **La topologie et la connectivité** : les réseaux VANETs sont caractérisés par une connectivité sporadique, car un véhicule circule avec une vitesse très rapide et peut rejoindre ou quitter un groupe de véhicules en un temps très court, ce qui nous mène ainsi à avoir une topologie très dynamique constituée de plusieurs îlots séparés [15].
- **La taille du réseau** : compte tenu de l'importance sans cesse grandissante de la densité et du parc des véhicules, on peut s'attendre à ce que la taille des réseaux de véhicules dont le déploiement est éminent, soit d'une toute grande ampleur [14].

Les caractéristiques spécifiques des réseaux de véhicules génèrent plusieurs défis, parmi lesquels nous citons les suivants [1] :

- **La sécurité** : il s'agit d'un défi majeur ayant un grand impact sur le déploiement des réseaux de véhicules. En raison de la sensibilité des domaines d'utilisation des réseaux de véhicules, une intrusion d'un véhicule malicieux aurait des conséquences graves sur l'ensemble des véhicules interconnectés. Ainsi, des mécanismes d'authentification, confidentialité sont nécessaire pour assurer une certaine sécurité aux usagers des VANETs ainsi qu'aux données qui y circulent [11], [15].
- **La qualité de service (Quality of Service, QoS)** : la qualité de service (QoS) dans les réseaux de véhicules se dégrade avec l'augmentation du nombre de véhicules ainsi que leur forte mobilité. La principale contrainte des applications de sécurité routière est la latence. La validité des informations étant limité dans le temps, l'information doit parvenir aux véhicules destinataires dans des délais courts pour être considérée pertinente
- **Le routage** : pour que les véhicules puissent communiquer entre eux, un protocole de routage doit être défini pour répondre aux problèmes de connectivités intermittentes et du partitionnement du réseau qui empêche la propagation de l'information. En effet quand les nœuds ne sont pas à une portée de transmission radio directe, le routage est exigé pour établir la communication entre les véhicules [15].
- **L'accès au canal** : le rôle des mécanismes de gestion du canal radio est d'offrir des transmissions fiables et robustes et un partage équitable du médium de communication. Pour

atteindre cet objectif dans les réseaux de véhicules où les communications se font en environnement externe défavorable en raison de la multitude d'obstacles, il est nécessaire de concevoir des méthodes qui permettent de faire face aux problèmes d'interférences radios, problèmes de propagation à multi-trajets des ondes ainsi que les irrégularités électromagnétiques [1], [15].

- **Connexion intermittente et problème de partitionnement de réseau :** une conséquence directe de la forte mobilité et des obstacles de l'environnement est une connectivité intermittente. Un lien établi entre deux entités du réseau peut rapidement disparaître en raison soit de la mobilité qui éloigne les deux entités communicantes, soit des obstacles qui empêchent la propagation du signal. Le problème de partitionnement du réseau survient essentiellement lorsque la densité des nœuds est faible. Les véhicules se déplacent alors en groupes isolés non-connectés. Il devient dans ce cas difficile d'assurer les communications de bout-en-bout [16].

1.2.4 Applications

Les applications véhiculaires peuvent être classées en trois catégories principales :

- **Application de sécurité routière et de la prévention :** ce sont des applications qui visent à améliorer la sécurité des passagers sur les routes et surveiller l'environnement proche (l'état des autres véhicules ou des conditions routières) par des échanges de messages entre les véhicules. Ce type d'applications est en mesure d'aider les conducteurs à gérer les événements à venir ou les dangers potentiels sur la route. Ceci est réalisé par l'envoi de données collectées à partir des capteurs routiers et des OBUs de véhicules. Les VANETs permettent aussi de prévenir les collisions et les travaux sur les routes, de détecter les obstacles (fixes ou mobiles) et de distribuer les informations météorologiques par envoi de messages d'alerte. Donc, ce type d'application contribue à l'amélioration de la latence et la réduction des délais d'intervention des services d'urgence [7], [4].
- **Application de gestion du trafic :** les applications dans cette catégorie utilisent les communications véhiculaires pour partager des informations sur l'état de trafic et la circulation entre les véhicules afin d'optimiser la circulation et à améliorer l'expérience du conducteur. Plusieurs scénarios sont proposés pour cette catégorie, parmi lesquels il y a : la coopération entre les véhicules afin de faciliter le passage des véhicules d'urgence, ou de proposer d'autres itinéraires aux véhicules qui sont dans une zone de congestion dans le but d'optimiser le trafic et de le rendre plus fluide [7], [10]. Un nœud peut également être averti, par exemple en cas d'un ralentissement anormal (bouchon, embouteillage, éboulement de rochers ou travaux sur la route) [1].
- **Applications de confort et de divertissement :** cette catégorie comporte toutes les applications qui participent au confort du conducteur et des passagers. Ce confort est illustré par l'accès à internet, la messagerie, le chat inter-véhicule, etc. Les passagers dans la

voiture peuvent jouer en réseau, télécharger des fichiers multimédia, regarder des films, etc [1].

1.2.5 Technologies de communication

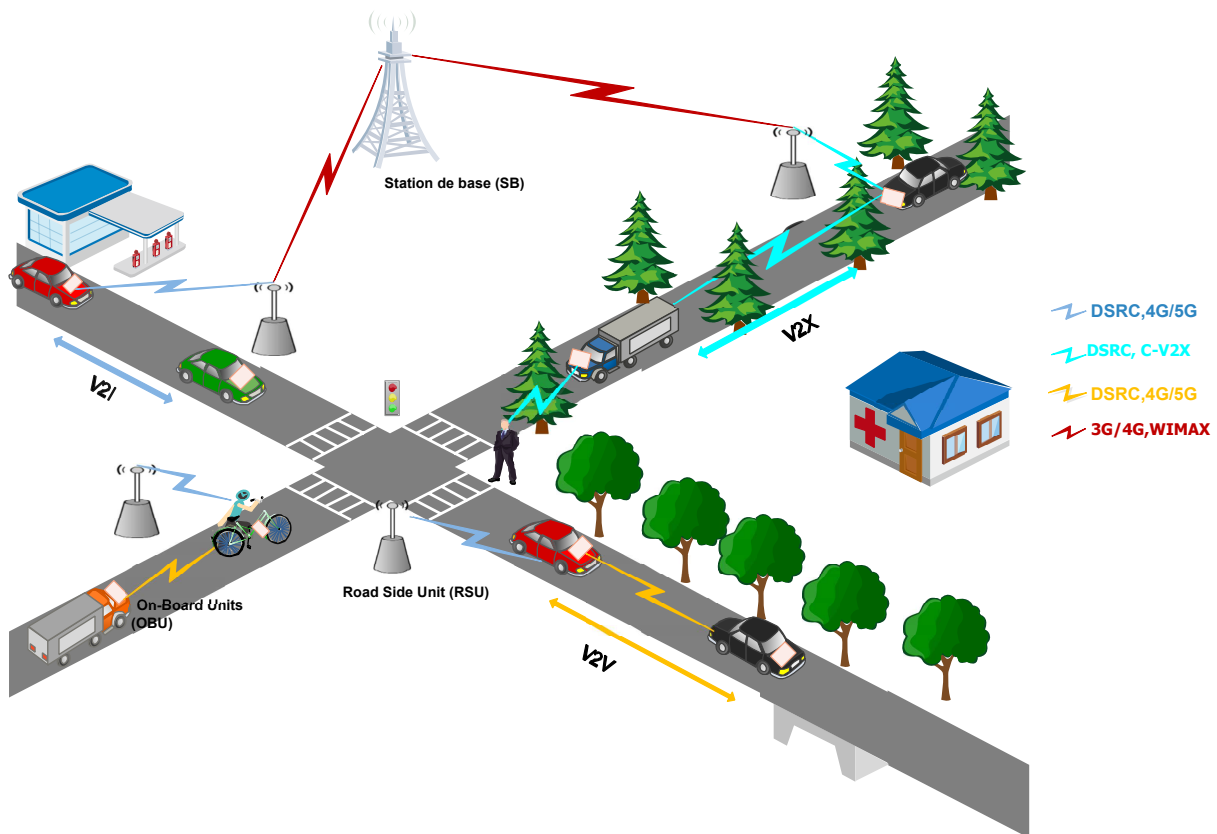


Figure 1.2: Les technologies de communication dans un réseau VANET.

Comme il est illustré dans la figure 1.2, on trouve une multitude de normes qui se rapporte à l'accès sans fil dans les environnements véhiculaires tels que le DSRC (Dedicated Short Range Communication), les réseaux cellulaires (3G/4G), WIMAX, etc [7].

DSRC (Dedicated Short-Range Communication) : est une technologie de communication sans fil définie par le protocole 802.11p qui permet une communication directe entre des véhicules (ainsi qu'entre les véhicules et l'infrastructure au bord de la route) qui se déplacent avec une haute vitesse (allant jusqu'à 200 km/h) et hautement sécurisée, sans impliquer aucune infrastructure cellulaire. IEEE 802.11p est une modification de la norme IEEE802.11a qui définit des améliorations pour soutenir les applications de systèmes de transport intelligents (STI). En effet, il offre une fiabilité de communication (un débit théorique atteignant 6 Mbps). Ainsi qu'une faible latence (ne dépassant pas 50 ms.) lors de l'établissement de la communication [7], [10].

WAVE (Wireless Access for Vehicle Environment) : l'organisation IEEE a étendu sa famille

de protocoles 802.11 en ajoutant 802.11p [12]. Ce protocole est principalement basé sur le protocole 802.11a. En effet, 802.11p modifie les couches physiques et MAC de 802.11a à adapter pour les VANETs conformément à la bande DSRC. De plus, la famille de protocoles 1609.x définie par l'IEEE, appelée WAVE (Wireless Access for Vehicle Environment) pour accéder au médium sans fil dans les VANETs, Cette famille de protocoles est structurée en quatre composantes (1609.1 à 1609.4) [17], [18] :

- IEEE 1609.1 : pour la gestion de ressources.
- IEEE 1609.2 : pour la sécurisation des messages.
- IEEE 1609.3 : pour les services de niveau réseau et transport incluant l'adressage, le routage.
- IEEE 1609.4 : pour la coordination et la gestion des sept canaux DSRC.

Les organismes de normalisation du Nord de l'Amérique et de l'Europe ont défini une famille de plusieurs protocoles spécifiant l'opération de la couche physique à la couche d'application, et comprend également des aspects intergouvernementaux comme la sécurité ou la gestion. En Amérique du Nord, la famille de protocoles s'appelle IEEE WAVE alors qu'en Europe elle s'appelle ETSI ITS-G5 [10].

Les réseaux cellulaires : certains des inconvénients liés à l'utilisation de DSRC qui sont représentés par : le déploiement coûteux et parfois difficiles et non rentables, la zone de couverture limitée des « RSUs » qui cause souvent le problème du partitionnement, la congestion des canaux causé par le grand nombre des véhicules, ont motivé les chercheurs à l'adoption de la technique cellulaire qui elle existe déjà et elle est largement déployée pour les communications véhiculaires. Les réseaux cellulaires 4G/5G offrent aux VANETs de nombreux avantages: ils garantissent l'accès des véhicules au réseau, débits de données élevés, faible latence, réduction des coûts d'installation, et une plage de communication étendue où les services peuvent être fournis aux utilisateurs à la fois quand ils sont dans la zone de couverture RSU et quand ils sortent de cette zone. Cependant, le risque de sécurité reste menaçant les réseaux cellulaires car ils ne peuvent pas toujours répondre aux besoins des services de sécurité. [19]

Aussi, une nouvelle technique cellulaire a été développée en ces dernières années pour améliorer le débit du transfert des données et la qualité de services de la communication V2X appelées Cellular V2X (C-V2X).

Cellular V2X : il utilise la connectivité cellulaire mobile 4G (LTE) ou 5G pour envoyer et recevoir des signaux d'un véhicule à d'autres véhicules. C-V2X est également conçu pour connecter directement les véhicules entre eux ainsi qu'avec l'infrastructure et d'autres utilisateurs de la route même dans les zones sans couverture de réseau mobile. Il devrait fournir des communications ultra-fiables et à faible latence (URLLC- Ultra-Reliable Low-Latency Communication), débit de données élevé pour répondre aux exigences de conduite autonome et sa portée dépasse un kilomètre [20].

1.3 Réseau d'Internet de véhicules (Internet of Vehicles)

La nouvelle ère de l'Internet des Objets (Internet of Things, IoT) a suscité l'évolution des réseaux ad hoc de véhicules classiques (VANET) vers le paradigme de l'Internet des véhicules (Internet of Vehicles ou IoV).

1.3.1 Définitions

Définition 1

L'Internet des véhicules (IoV) est un réseau distribué qui soutient l'utilisation des données créées par les voitures connectées à Internet et les réseaux de véhicules (VANETs). Un objectif important de l'IoV est de permettre aux véhicules de communiquer en temps réel avec leurs conducteurs humains, les piétons, les autres véhicules, l'infrastructure routière et les systèmes de gestion du parc automobile [21]. Aussi le véhicule peut en plus communiquer avec n'importe autre objet connecté à Internet tel que : les drones, les équipements connectés des piétons (Smartphone, Smart Watch, etc.), etc.

Définition 2

L'Internet des véhicules (IoV) est un nouveau système cyber physique qui intègre les réseaux VANETs, IoT, et le cloud computing mobile. Dans IoVs, les véhicules sont considérés comme des objets connectés, qui ont accès à l'Internet à travers des réseaux sans fil hétérogènes qui permettent aux véhicules intelligents de collaborer les uns avec les autres ainsi que par d'autres objets connectés pour la collecte/partage des données et les communications. Les véhicules intelligents interagissent également avec les unités routières et les autres usagers de la route, comme les piétons et les cyclistes, pour partager et recueillir des informations sur les routes et leur entourage [1].

1.3.2 Architecture

1) Un réseau d'IoV est un système composé de trois couches [22] : application, réseau et perception. Comme il est illustré dans la figure 1.3 :

- **La couche application** : cette couche comprend les applications de sécurité, de gestion de trafic et de confort comme ETC et PTMP (Electronic Toll collection et Public Traffic Management System), Ainsi que l'interface interactive homme-machine.
- **La couche réseau** : représente les différentes technologies de communication hétérogène telle que GSM, 5G, WiMax, WLAN, Wi-Fi et Bluetooth.

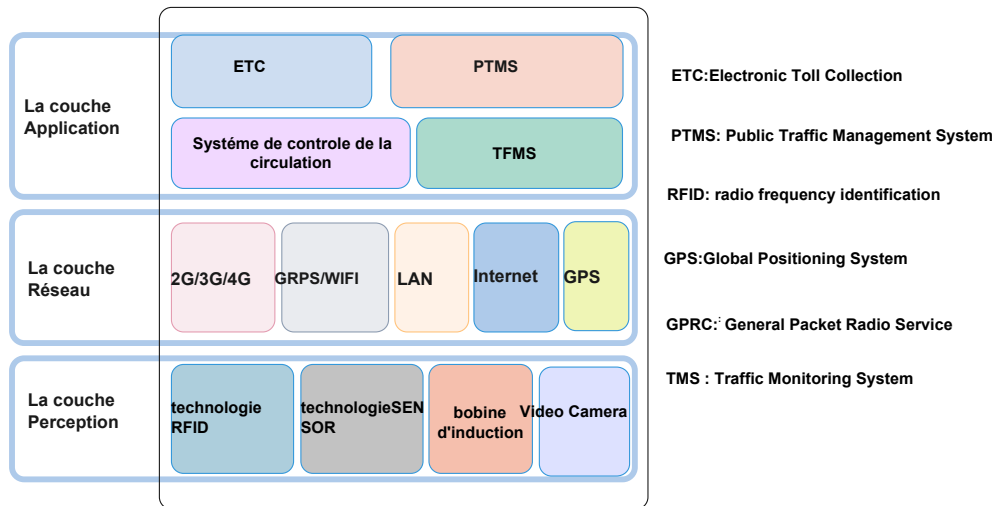


Figure 1.3: Architecture d'un réseau d'Internet de véhicules.

- **La couche perception** : elle concerne tous les types de capteurs et de moyens de collecte de données. Elle comporte également l'identification par radiofréquence (RFID), perception du positionnement par satellite, perception de l'environnement routier, perception de la position du véhicule, perception de la voiture et des objets, etc.

2) Composants

L'écosystème de l'IoV est essentiellement composé de quatre entités de base :

- **End points (terminaux)** : les véhicules, les smartphones, les capteurs ainsi que d'autres appareils connectés [23].
- **Infrastructure** : les RSUs, les points d'accès Wi-Fi, les stations de base de réseaux cellulaires (4G/5G), les serveurs cloud / Fog, etc [23].
- **Opérations et protocoles** : les terminaux (les véhicules) sont de plus en plus souvent équipés d'un grand nombre de capteurs, d'actionneurs et de dispositifs de communication (appareils mobiles, GPS, ordinateurs embarqués). En particulier, de nombreux véhicules possèdent de puissantes capacités de détection, de mise en réseau, de communication et de traitement des données et peuvent communiquer avec d'autres véhicules ou échanger des informations avec les environnements externes par le biais de divers protocoles, notamment HTTP, TCP/IP, SMTP, WAP et NGTP (Next Generation Telematics Protocol) [24].
- **Services** : tels que la météo, les applications de gestion de trafic routier, la vidéo à la demande, le streaming, etc. [23]

La figure 1.4 montre les différentes entités communicantes dans un réseau IoV ainsi que les différents modes de communication.

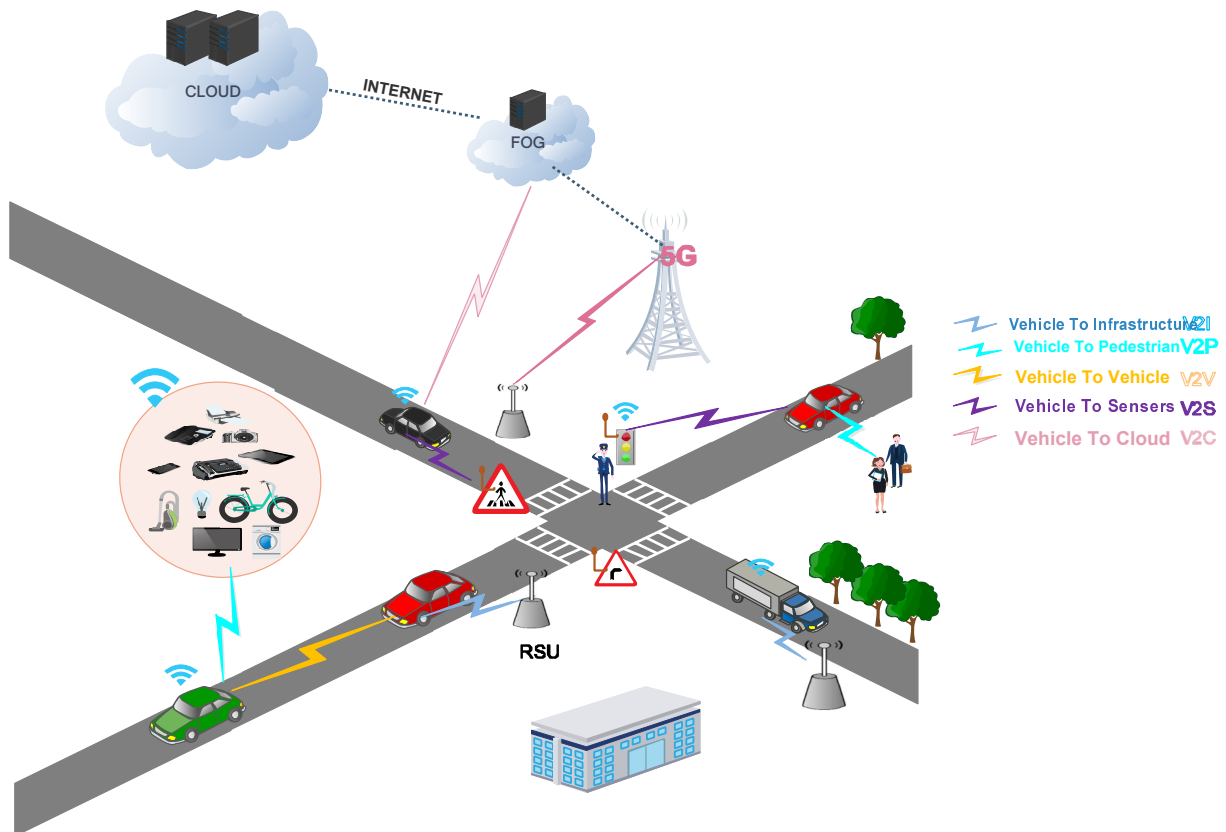


Figure 1.4: Mode de communication dans un réseau d'Internet de véhicules.

3) Mode de communication

Les interactions dans l'environnement IoV peuvent impliquer de nombreux appareils (à l'intérieur et à l'extérieur du véhicule) qui peuvent communiquer entre eux, recueillir, échanger, stocker et analyser de l'information ou prendre des décisions avec un minimum d'interventions humaines. En plus des modes de communication définis auparavant pour les VANETs traditionnels, l'émergence de l'IoV a généré de nouveaux modes de communications présentés dans les points suivants [22], [25] :

- **Les communications de véhicule au Cloud (vehicle to cloud, V2C) :** qui permettent au véhicule d'accéder à des informations supplémentaires sur des serveurs distants à partir de l'Internet. Aussi, le cloud offre de ressources puissantes aux véhicules afin d'améliorer leurs performances de calcul et de stockage.
- **Les communications de véhicule au Fog (vehicle to fog, V2F) :** ils offrent presque les mêmes services que les interactions au cloud mais avec des délai d'accès très réduit grâce à la distance non éloignée des serveurs fog.

- **Les communications entre véhicules et piétons (vehicle to pedestrian, V2P) :** dans les interactions V2P, les véhicules communiquent avec les appareils intelligents embarqués par les piétons comme les smart phones, smart watches, les ordinateurs portables, les assistants numériques personnels, etc. Le but généralement est de recueillir des informations sur l'environnement, l'amélioration de la sécurité des piétons, l'accès ou le partage de ressources, etc.
- **Les communications entre les véhicules et les capteurs (vehicle to sensors, V2S) :** dans ce type d'interaction, le véhicule communique aux différents capteurs installés un peu partout sur l'entourage de véhicule tel que les capteurs installés sur les panneaux de circulations, sur les arrêts de bus et même avec les capteurs intégrés dans les routes. Le but principal c'est de récolter un ensemble d'information pour obtenir des mises à jour sur l'état de la circulation et de la chaussée de la route.

1.3.3 Paradigme de Cloud Computing /Fog Computing

Cloud computing consiste à fournir de puissantes ressources informatiques de calcul et/ou de stockage à la demande pour des utilisateurs distants via Internet. Le Cloud computing améliore la collaboration, la souplesse, la disponibilité et offre la possibilité de réduction des coûts grâce à l'optimisation et l'efficacité informatique. Cloud computing permet l'utilisation d'un ensemble des services, des applications et des infrastructures réseaux. Ces dernières constituent un groupe de calcul [26].

Parmi les problèmes des réseaux IoV, nous constatons que le manque de ressources est un problème majeur qui a une relation principale avec la nature faible des objets (équipements) connectés. L'IoV peut être soutenue par la technologie de Cloud Computing pour résoudre ce problème. Le cloud computing peut offrir des ressources informatiques puissantes en termes de calcul et/ou de stockage à la demande grâce à des serveurs cloud distants déployés dans divers emplacements.

En raison de la mobilité des véhicules et de la bande passante limitée dans les communications sans fil, les événements générés par les véhicules envoyés à des serveurs cloud distants peuvent subir un retard ou se perdre, ce retard peut être aussi dû à la nature centralisée / distante des serveurs cloud, la chose qui cause de long délai d'accès. Par conséquent, les données d'événements générées par les véhicules sont des événements incertains en raison de la latence de la réponse ou de l'exécution incorrecte de services axés sur les événements sur le Cloud [27].

Le concept de Fog Computing a été proposé comme une solution des défis de cloud. Le Fog Computing consiste à déplacer les capacités du cloud computing (calcul, stockage) à la bordure du réseau, dans les emplacements les plus efficaces entre l'utilisateur final et le Cloud, en fournissant des fonctionnalités plus appropriées pour l'IoV que pour le Cloud Computing (i) un temps de réponse plus rapide, (ii) la réduction de la latence, (iii) plus de flexibilité dans la

distribution fonctionnelle, prise en compte du contexte, (iv) optimisation de l'utilisation des ressources et (v) réduction de la quantité de données échangées entre un centre de données cloud et un véhicule. [28]

La figure 1.5 illustre l'emplacement de cloud/ Fog par apport au l'utilisateur final (véhicules).

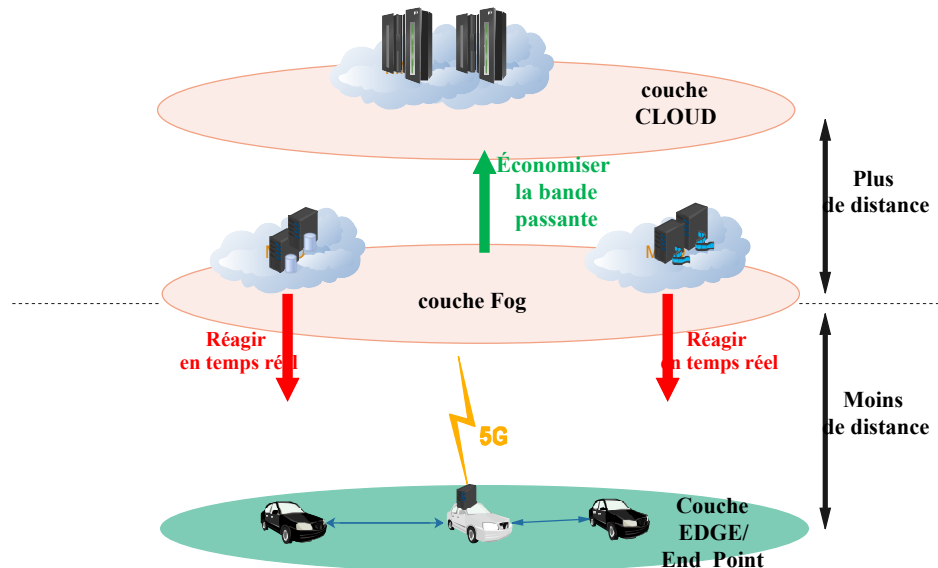


Figure 1.5: Cloud et Fog computing dans un réseau d'Internet de véhicules.

1.3.4 Caractéristiques et défis

En plus des caractéristiques et défis des VANETs traditionnelles, IoV apporte des caractéristiques spécifiques supplémentaires parmi lesquelles nous citons les plus importants dans ce qui suit [29] :

- **Hétérogénéité des technologies et des équipements communicantes** : le réseau est composé de différents type d'objets connectés (véhicules, piéton, drones, etc.) qui communiquent via des diverses technologies hétérogènes.
- **Diversités des données échangées** : comme résultat de l'hétérogénéité des objets on a divers types de données qui sont partagées dans le réseau, y compris le texte, les images, les vidéos, etc.
- **Services et applications orienté IP** : avec l'Internet comme l'un des principaux composants de l'IoV, les applications et les services offerts par le réseau sont généralement des applications connectées qui nécessitent un accès permanent à Internet tel que : la vidéo à la demande, streaming, météo, applications de gestion de trafic (Wise, Google Mapp, etc.).

Ils existent de nombreux défis à relever dans l'IoV. Parmi ces défis nous citons [30] :

- Le grand volume de données à traiter et à stocker, ce volume est engendré par la quantité de capteurs et de véhicules présents sur les routes.
- La surcharge du réseau due à la quantité des nœuds/entités communicants dans l'IoV, et la bande passante limitée.
- La variété des technologies de communication causée par l'hétérogénéité des entités qui constituent l'IoV.
- La forte mobilité des véhicules et le changement rapide de la topologie du réseau qui affecte la disponibilité, la fiabilité et la robustesse des communications entre les objets communicants de l'IoV.
- La nature de la topologie hautement dynamique de l'Internet des véhicules présente des contraintes de communications à savoir des déconnexions fréquentes susceptibles d'être un obstacle pour les exécutions d'applications à bord d'un véhicule. Cette situation nuit à la qualité de service offert par l'IoV et par conséquent à son utilité.

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté dans la première partie les concepts de base des réseaux de véhicules. Ainsi, nous avons détaillé leur architecture, mode de communication, les différentes caractéristiques et défis, leurs types d'application, et les technologies de communication existantes. Par la suite, nous avons exposé dans une seconde partie, la nouvelle technologie des réseaux d'Internet de véhicules. Nous avons également décrit leur architecture, leur mode de communications, leurs principales caractéristiques et défis et le concept de Cloud/Fog computing.

Dans le prochain chapitre, nous présentons un survol sur les mécanismes d'incitation à la mise en cache dans les réseaux d'Internet de véhicule.

Incitation à la mise en cache dans les réseaux d'internet de véhicules

2.1 Introduction

Avec l'évolution rapide des technologies de communication mobile et la prolifération des appareils intelligents (smart phones, tablettes, ordinateurs portables, etc.) et des applications (Wechat, Facebook, YouTube, Netflix, etc.), les utilisateurs mobiles souhaitent accéder à leurs contenus partout et à tous moment, plus particulièrement dans les transports que ce soit dans des véhicules personnels, ou dans des transports en commun. Une tendance qui peut générer une augmentation exponentielle de trafic de données mobiles. Ce phénomène va rapidement causer l'épuisement des ressources déjà limitées des liens sans fil et plus particulièrement la saturation des liens backhails entre le réseau d'accès et le réseau cœur. Cela est principalement dû aux accès redondants au contenu multimédia de plus en plus gourmand en bande passante. Pour faire face à ce problème, une solution innovante a été proposée en déplaçant le contenu populaire des utilisateurs finaux vers des nœuds plus proches de l'utilisateur mobile (*ex.* stations de base cellulaires, les points d'accès, les appareils mobiles des utilisateurs, les véhicules, etc.) afin de servir les requêtes des utilisateurs localement et libérer par la suite les liens backhails [31]. Cette solution est appelée la technique de mise en cache ou *caching* en anglais.

La technique de mise en cache a attiré une attention considérable par la communauté des chercheurs, car elle peut réduire efficacement la charge de trafic sur les liens de réseau cœur en éliminant la transmission des données redondantes. En réalité, il y a principalement deux acteurs qui gèrent la mise en cache de contenu qui sont : les fournisseurs de contenu (Content provider, CP), comme YouTube et Netflix, qui proposent des contenus populaires et veulent les rapprocher de leurs utilisateurs finaux afin d'améliorer la qualité d'expérience (Quality of Experience, QoE) ; et les gestionnaires des caches, tels que les opérateurs de réseau mobile

(Mobile Network Operator, MNO), qui déploient et gèrent des espaces de stockage (caches) et proposent la location de ces caches en espérant gagner des profits financiers [32], [33]. Récemment, des mécanismes d'incitation [4] [34] [35] ont été proposés pour encourager ces deux acteurs à collaborer pour assurer une mise en cache plus efficace.

Nous présentons dans ce chapitre, une vue d'ensemble sur les techniques de mise en cache dans les réseaux de véhicules. Nous commençons par donner les définitions de bases de la mise en cache et les avantages de l'incitation pour les réseaux de véhicules dans la section 2.2. Ensuite, nous présentons un survol bibliographique sur les principaux travaux sur l'incitation à la mise en cache dans la section 2.3. Nous terminons le chapitre par une conclusion dans la section 2.5.

2.2 Technique de mise en cache

La technique de mise en cache a réussi à prouver son utilité dans la plupart des systèmes et réseaux informatiques surtout avec l'augmentation du trafic de données mobiles sans fil en raison de l'augmentation sans cesse des utilisateurs mobiles et de leurs applications gourmandes en bande passante.

Dans cette section, nous allons définir la technique de la mise en cache, décrire l'incitation à la mise en cache et présenter ces apports pour les réseaux de véhicules.

2.2.1 Définition

La technique de mise en cache, ou *caching* en anglais, a été proposée comme une solution prometteuse pour le problème d'explosion de trafic de données mobiles. La mise en cache consiste à stocker les contenus populaires (*i.e.* le contenu fréquemment demandé par les utilisateurs) localement dans des caches (des espaces mémoires) déployés sur des nœuds physiquement proches de l'utilisateur final (station de base cellulaires, véhicules, etc.) pour atténuer la surcharge sur le backhaul de réseau cœur [33].

Il existe deux principaux acteurs qui interviennent lors de la mise en cache de contenu : les fournisseurs de contenu (Content Provider, CP), comme YouTube et Netflix, et les propriétaires/gestionnaires des caches (Cache Owner, CO), tels que les opérateurs de réseau mobile (Mobile Network Operator, MNO) voir la figure 2.1. Les CPs détiennent une bibliothèque de contenus populaires qui sont très fréquemment demandés par des utilisateurs proches les uns des autres. Ces derniers souhaitent déplacer et stocker leurs contenus populaires à la périphérie de réseau proche de l'utilisateur final. Les CPs visent à améliorer la qualité d'expérience (Experience Quality, QoE) de leurs utilisateurs finaux en termes de temps d'accès au contenu et temps de téléchargement. De leurs côtés, les COs détiennent un espace de stockage distribué sur des caches et visent à remplir cet espace de stockage pour rentabiliser les

cachees et gagner plus de profits en louant les caches aux CPs.

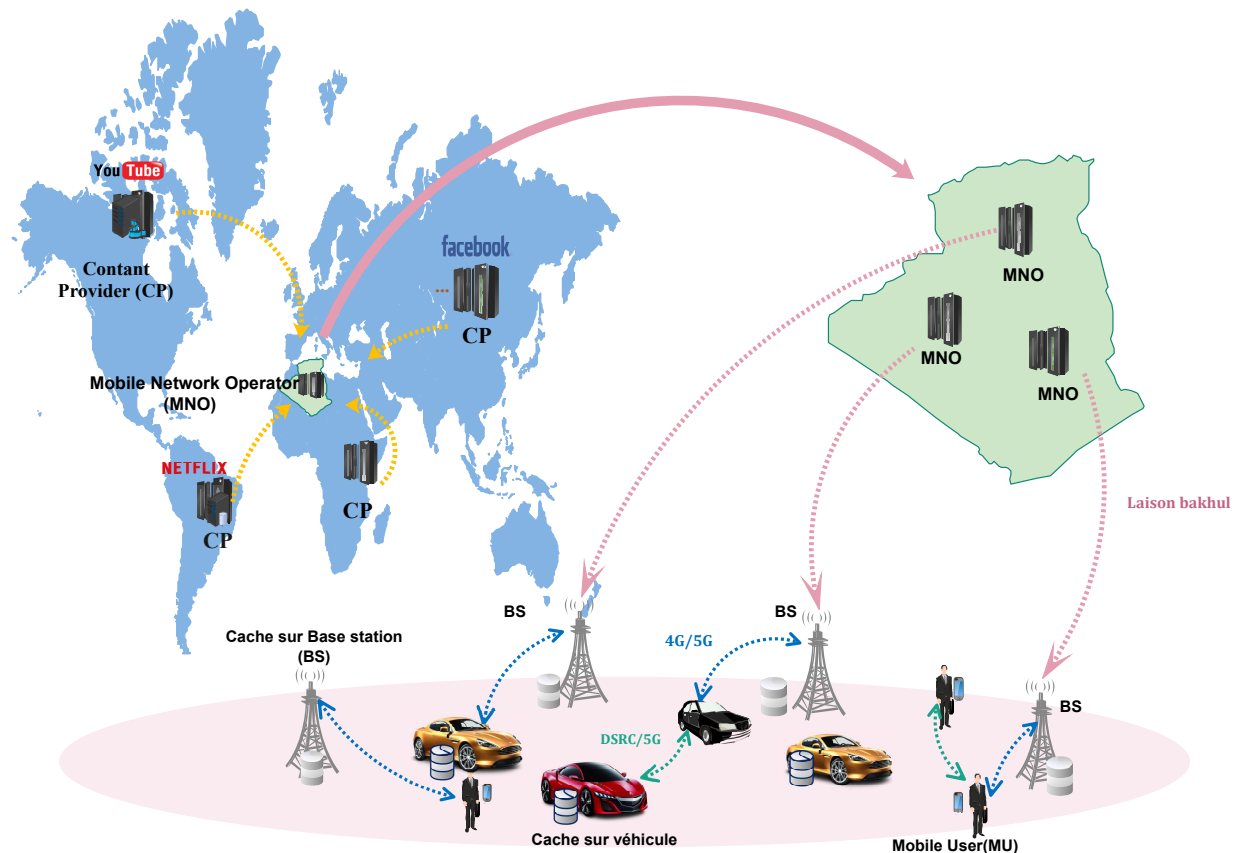


Figure 2.1: Exemple d'illustration de la technique de mise en cache de contenu (caching)

2.2.2 Incitation à la mise en cache

Une mise en cache réussite, nécessite la collaboration entre les différents acteurs, les fournisseurs de contenu (CPs) et les gestionnaires des caches (COs). Pour cela, des mécanismes de mise en cache doivent être mis en place pour mener à bien cette collaboration et assurer une mise en cache efficace. En effet, les fournisseurs de contenu (CPs) possèdent des contenus populaires et ont besoin des gestionnaires des caches, tels que les MNOs, afin de stocker leurs contenus populaires. Aussi, les COs ont besoin des CPs pour remplir et rentabiliser leurs caches ainsi que pour alléger les backhuls de réseau cœur. Les rôles de ces acteurs dans divers scénarios de mise en cache sont souvent discutés dans la littérature [2], [36], [37] d'un point de vue commercial en focalisant les études sur les gains et les pertes de ces acteurs [38].

2.2.3 Apports de la mise en cache pour les réseaux de véhicules

La mise en cache des données peut améliorer considérablement l'efficacité de l'accès à l'information dans un réseau de véhicules en réduisant la latence, le temps d'accès et l'utilisation

de la bande passante. Dans les points suivants, nous citons les principaux apports de la mise en cache dans les réseaux de véhicules [39] :

- Technologie efficace pour réduire la latence de communication tout en atténuant considérablement le flux de données redondantes.
- Sauvegarde de la bande passante : la mise en cache peut réduire les coûts globaux des transferts de données à travers le réseau cœur en stockant les contenus populaires, au niveau des véhicules par exemple, proche des utilisateurs finaux et par conséquent réduire la charge de trafic sur les liens backhails de réseau cœur.
- Avec des caches déployés près de l'utilisateur final, comme sur les véhicules mobiles, l'accès aux informations et les données sera très rapide (presque instantanée).
- Améliorer le temps de réponse à la demande de contenu ou des services des véhicules pour permettre un accès plus rapide à l'information [40].
- Utiliser les communications V2V en temps réel peut être utilisés pour partager les données de mise en cache, ce qui diminue également les frais généraux de backhaul [40].
- Améliorer les performances du réseau et la qualité d'expérience des utilisateurs.

Afin d'illustrer quelques exemples de cas d'utilisations des techniques de mise en cache dans le contexte des réseaux de véhicules. Nous donnons dans la section suivante un survol bibliographique sur les principaux travaux sur l'incitation à la mise en cache.

2.3 Survol sur les travaux de l'incitation à la mise en cache

Les techniques de mise en cache ont attiré une attention considérable car elles peuvent réduire efficacement le trafic sur les liaisons sans fil en éliminant les transmissions de données et réduire la distance entre le contenu et l'utilisateur final. Cela nécessite le développement des mécanismes incitatifs pour motiver les acteurs à participer dans la procédure de mise en cache.

Récemment, plusieurs travaux [32, 33, 38] et [41–44] ont traité le problème de mise en cache d'une perspective commerciale en se concentrant sur la façon d'encourager les différents acteurs de réseau à participer dans l'amélioration du processus de la mise en cache.

Dans cette section nous nous intéressons principalement par les travaux qui ont étudié les systèmes d'incitation à la mise en cache dans les réseaux de véhicules. Nous effectuons une classification des travaux selon le nombre de fournisseurs de contenu populaire ainsi que sur le nombre de propriétaire des caches.

2.3.1 Incitation à la mise en cache monopoliste avec un seul propriétaire des caches

Dans cette sous-section, nous discutons quelques travaux de l'incitation à la mise en cache qui considèrent des politiques de mise en cache avec un seul gestionnaire de caches qui est en interaction avec plusieurs fournisseurs de contenus.

2.3.1.1 Un seul fournisseur de contenu

Zou et al, dans [4] ont proposé un mécanisme d'incitation à une mise en cache des vidéos composé d'un fournisseur de vidéos (VP, video provider), un réseau d'opérateur mobile (MNO) avec un ensemble de stations de base équipées avec des mémoires caches, et plusieurs utilisateurs mobiles. Le VP vise à améliorer la QoE de ces utilisateurs en stockant les vidéos sur les caches déployés sur les stations de base de MNO. Tandis que le MNO en louant ces caches au VP, vise à gagner plus de profit financier et aussi décharger ces liens backhuls. Zou et al, ont modélisé la concurrence entre les acteurs de mise en cache par le biais d'un jeu de type Stackelberg dans le but d'améliorer la qualité d'expérience des utilisateurs.

2.3.1.2 Plusieurs fournisseurs de contenu

Les études dans [45] et [41] ont proposé un mécanisme d'incitation à la mise en cache proactive dans les réseaux cellulaires à petites cellules, pour motiver les CPs à participer dans le processus de mise en cache. Ce problème a été formulé comme un jeu de type Stackelberg entre un MNO et plusieurs CPs. La concurrence entre les CPs pour l'espace de mémoire cache disponible est formulée comme un sous-jeu non-coopératif dans lequel chaque CP vise à réduire les coûts de mise en cache et à maximiser la satisfaction de ses utilisateurs. Le MNO loue ses caches sur les SBSs (Small-cell Base Stations) aux CPs et définit le prix de mise en cache pour maximiser son profit financier. Les auteurs des travaux [32] et [42–44] ont aussi essayé de proposer une approche innovante pour offrir des encouragements à la mise en cache dans les réseaux cellulaires à petites cellules d'un point de vue économique en utilisant la théorie des contrats. Dans ces modèles d'études, un MNO offre aux CPs des contrats pour les motiver à mettre en cache leur contenu dans les caches sur les petites stations de base.

Les auteurs de [3] et [46] ont proposé un autre système d'incitation à la mise en cache commerciale basé sur la théorie des contrats. La politique proposée est composée d'un fournisseur de services de réseau (Network Service Provider, NSP), plusieurs fournisseurs de contenu (CP) et plusieurs utilisateurs mobiles (Mobile users, MU). Le NSP détient le monopole du réseau et gère les caches sur les SBSs. Il loue ses ressources en termes d'espace de stockage des caches aux CPs dans le but de gagner plus de bénéfices financiers. Les CPs souhaitent louer les caches sur les SBSs afin de rapprocher leurs contenus des utilisateurs et leurs fournir de meilleurs services d'accès et de téléchargement. Dans le même cadre de la théorie des contrats, Li et al. dans [47] ont aussi proposé un modèle d'incitation à la mise en cache incitatif dans les

réseaux à petites cellules, où le NSP souhaite louer ses caches sur les SBSs aux VPs dans le but de réaliser plus de bénéfices monétaires, tandis que les VPs en déplaçant les vidéos populaires vers les caches sur les SBSs, visent à fournir des délais d'accès aux vidéos locales plus rapides et par la suite améliorer la QoE des utilisateurs.

Dans [36], un autre mécanisme de mise en cache incitatif dans les réseaux cellulaires à petites cellules (Small Cell Network, SCN) a été proposé par Zhao et al. Dans le mécanisme proposé, une SBS encourage les CPs à participer au processus de mise en cache. Un jeu de type Stackelberg en deux étapes a été formulé pour modéliser l'interaction entre les deux acteurs. Dans la première étape, la SBS décide d'abord de la politique des prix pour maximiser le profit de son MNO. Dans la deuxième étape, selon le prix de revient, chaque CP détermine la quantité de contenu populaire qu'il souhaite mettre en cache. En outre, les CPs entrent en compétition pour la capacité de stockage limitée de la SBS. Cette interaction compétitive est modélisée via un sous jeu non coopératif. Dans [33], Shen et al, ont étudié un mécanisme d'incitation à la mise en cache en utilisant un jeu de type Stackelberg où un seul MNO encourage les CPs à venir stocker leurs contenus populaires sur les caches des SBSs en leur offrant un prix de mise en cache. Le but de MNO est de remplir ces caches et par la suite gagner plus de profit monétaire. Les CPs rivalisent pour déterminer le nombre des fichiers qu'ils mettent en cache dans les SBSs de MNO afin d'améliorer la QoE de leurs utilisateurs. You et al, dans [48] ont étudié un mécanisme de négociation pour l'allocation des ressources en utilisant un jeu à enchères pour un réseau cellulaire à petites cellules entre un MNO et plusieurs CPs.

2.3.2 Incitation à la mise en cache concurrentielle avec plusieurs propriétaires des caches

Dans cette sous-section, nous nous intéressons aux mécanismes d'incitation concurrentiels qui impliquent des interactions de multiples gestionnaires de caches.

2.3.2.1 Un seul fournisseur de service

Alioua et al. dans [2] ont proposé un mécanisme concurrentiel d'incitation à la mise en cache dans les réseaux d'IoV basé sur le nouveau paradigme de SDN (software defined networking). Dans ce mécanisme, un fournisseur de services qui possède un ensemble de fichiers populaires (principalement des vidéos) encourage les opérateurs mobiles cellulaires de stocker leurs fichiers populaires dans leurs caches déployés sur leurs stations de base cellulaires (SBS). Un jeu de type Stackelberg avec un seul leader et plusieurs suiveurs a été utilisé pour modéliser l'interaction entre le fournisseur de service et les opérateurs mobiles cellulaires. Le fournisseur de service vise à améliorer la QoE de ses utilisateurs, tandis que les opérateurs mobiles cellulaires entrent en compétition pour rentabiliser leurs caches et gagner plus de profit monétaire. Les auteurs de [49] et [50] ont proposé une politique d'incitation à la mise en cache pour un réseau cellulaires à petites cellules (SCN) composée de plusieurs opérateurs mobiles cel-