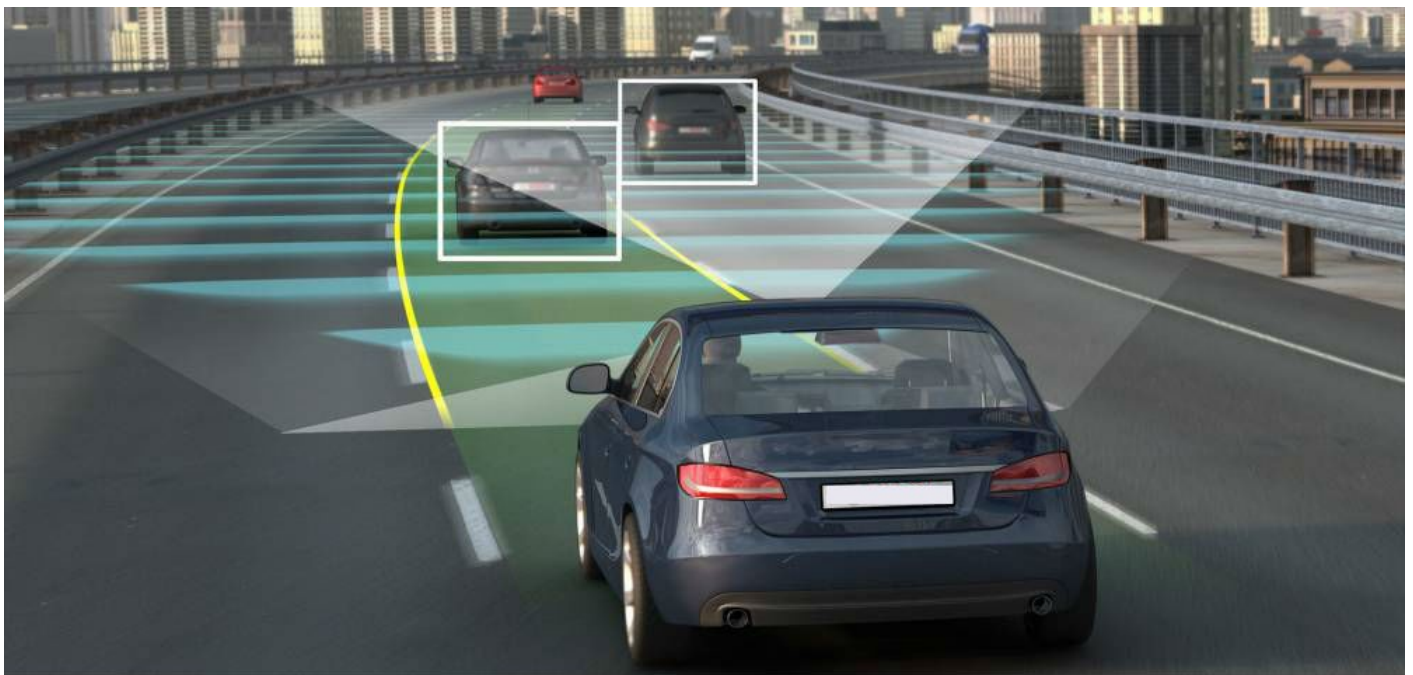


Véhicule autonome et connecté : communication V2X



Étudiants :

Noé CURÉ
Manon DENEYCY
Zelin XIONG

Driss BENGHAZA
Enzo HACALA
Roxane LEDUC

Enseignant-responsable du projet :

Abdelaziz BENSRAIR

Date de remise du rapport : 11/06/2021

Référence du projet : STPI/P6/2021 – 003

Intitulé du projet : Véhicule autonome et connecté : communication V2X

Type de projet : Bibliographie et état de l'art

Objectifs du projet :

Dans le cadre de notre étude du véhicule autonome, nous avons étudié :

- La technologie V2X et de ses différentes déclinaisons
- L'utilisation des protocoles DSRC et C-V2X pour les communications V2X dans la bande ITS de 5,9 GHz.
- Les différents enjeux de la V2X et du véhicule autonome.

Mots-clefs du projet : Communication, Enjeux, Protocoles, V2X

Table des matières

Notations	4
Introduction	5
1 Méthodologie, organisation du travail	6
2 Présentation du véhicule autonome et de la V2X	7
2.1 Concept du véhicule autonome	7
2.2 Historique	7
2.3 Objectifs de la V2X	8
2.4 Fonctionnement général	9
3 Différentes déclinaisons de la V2X	10
3.1 Définition de la V2X	10
3.2 La technologie V2V	10
3.3 La technologie V2I	11
3.4 La technologie V2G	12
3.5 La technologie V2P	13
4 Protocoles, normes et réseaux	14
4.1 Réseau du véhicule ad hoc	14
4.2 Protocole de communication DSRC	15
4.3 Protocole de communication C-V2X	16
4.3.1 Caractéristiques de la technologie C-V2X	16
4.3.2 Evolution technique de la technologie C-V2X	16
4.3.3 Etat actuel du développement de la technologie C-V2X	16
4.3.4 Perspectives de la technologie C-V2X	17
4.3.5 Une confrontation?	17
5 Enjeux	18
5.1 Enjeux sécuritaires	18
5.2 Enjeux éthiques	18
5.3 Enjeux économiques et avancement de la recherche	19
5.3.1 Enjeux techniques	21
Conclusion et perspectives	22
Bibliographie	23

Notations et Acronymes

- 3GPP : 3rd Generation Partnership Project
- C-V2X : Cellular Vehicule to Everything
- CNIL : Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés
- DSRC : Dedicated Short Range Communications
- ERTICO : European Road Transport Telematics Implementation Coordination Organization
- ETSI : European Telecommunications Standards Institute
- FCC : Federal Communications Commission
- FCD : Floating Car Data
- GPRS : General Packet Radio Service
- GPS : Global Positioning System
- GSMA : Global System for Mobile Communications
- IA : Intelligence Artificielle
- ISO : International Organization for Standardization
- IVHS : Intelligent Vehicle-Highway Society
- LTE : Long Term Evolution
- MANET : Mobile Ad hoc NETWORK
- NHTSA : National Highway Traffic Safety Administration
- OBU : On Board Units
- RSU : Road-Side Units
- STI : Système de Transport Intelligent
- VANET : Vehicular Ad-hoc Network
- V2G : Vehicule to Grid
- V2I : Vehicule to Infrastructure
- V2P : Vehicule to Pedestrian
- V2V : Vehicule to Vehicule
- V2X : Vehicule to Everything
- xG : génération des standards pour la téléphonie mobile avec $x \in [1,5]$

Introduction

On assiste en 1864 au début du moteur à explosion. Depuis, les principes de la voiture sont restés les mêmes mais les technologies autour de celle-ci n'ont cessé de s'améliorer. Ces dernières apportent confort et sécurité au conducteur, tout en restant financièrement abordables.

Cependant, malgré ces avancées technologiques, un constat persiste : 1,25 millions de morts et jusqu'à 50 millions de blessés dans le monde par an sur la route. Cela entraîne un coût de 25 milliards d'euros pour l'économie française. De plus, on sait que 90% des accidents mortels sur la route sont liés à l'utilisateur. La volonté de développer un véhicule autonome sécuritaire est ainsi devenu un enjeu pour la plupart des constructeurs automobiles. Cela prend forme pour la première fois en 1977 avec la première voiture autonome réalisée. En 2017 on qualifiait de partielle l'autonomie acquise par ces véhicules puis en 2018 d'autonomie avec certaines conditions. En 2019-2020 l'autonomie était quasi-totale avec des exceptions et il est prévu qu'entre 2021 et 2025 cette autonomie devienne totale.

S'ajoutent aussi à l'enjeu de sécurité deux autres enjeux motivant le développement du véhicule autonome : la réduction du nombre de véhicules en circulation et la réduction du quart de la consommation mondiale d'énergie et de CO₂.

Les avancées dans le domaine du véhicule autonome nécessitent de nouvelles technologies qui lui permettent de communiquer avec son entourage et avec les autres véhicules sur la route. Lors de ce projet, nous nous sommes concentrés sur cet aspect de communication entre véhicules autonomes qui est permis par une technologie nommée V2X (Vehicule to Everything).

Dans un premier temps nous allons faire une présentation du véhicule autonome et de la V2X. Ensuite nous allons aborder les différentes déclinaisons de la V2X. De plus, nous allons présenter les protocoles, les normes et les réseaux. Enfin nous allons parler des différents enjeux autour du véhicule autonome.

Chapitre 1

Méthodologie, organisation du travail

Chaque lundi matin, notre groupe s'est réuni avec le professeur responsable de notre projet M.BENSRHAIR. Nous avons décidé d'un chef de groupe, Noé CURE, afin qu'il transmette les informations générales du professeur au groupe lorsque cela est nécessaire. Au cours des deux premières séances, nous avons découvert notre sujet, fait quelques recherches et nous nous sommes organisés. Un plan du rapport a donc pu être créé. Après sa validation par notre professeur, nous avons réparti les différentes sous-parties. Chaque élève effectuait ses recherches de son côté et rédigeait sa partie du dossier. Nous avons créé un groupe Messenger pour bien communiquer et un dossier Google Drive pour que chacun puisse travailler et mettre en commun avec les autres efficacement.

La Table 1.1 résume la répartition des tâches parmi les membres du groupe.

Noé	Driss	Roxanne	Zelin	Manon	Enzo
Concept du véhicule autonome	Différentes technologies V2X, V2V, V2I	Fonctionnement général	Historique V2X	Objectifs V2X	Introduction
Enjeux économiques/ Avancement		Protocoles, normes, réseaux	Protocoles, normes, réseaux	Enjeux sécuritaires	V2P, V2G
Enjeux techniques	Conclusion			Enjeux éthiques	

TABLE 1.1 – Répartition des tâches

Malheureusement, les circonstances exceptionnelles dues au Covid-19 ne nous ont pas permis de nous voir avant la fin du semestre. Ainsi, lors de chaque cours, nous étions connectés sur un salon vocal avec l'ensemble du groupe et notre professeur référent. De cette manière, ce dernier pouvait répondre à nos interrogations et nous pouvions communiquer tous ensemble efficacement.

Lors de la séance du 19 avril 2021, nous avons rendu une première version de notre rapport afin que M. BENSRHAIR nous donne des pistes d'amélioration.

Chapitre 2

Présentation du véhicule autonome et de la V2X

2.1 Concept du véhicule autonome

Un véhicule autonome peut être défini comme un véhicule capable de circuler sans l'intervention d'un humain pour le commander. Il serait donc capable de communiquer avec son environnement et de prendre des décisions seul en fonction des informations récoltées. Ce concept est né dans les années 90 et ne cesse d'être en vogue depuis son invention. Les grandes puissances se sont lancées dans la course au développement d'une voiture complètement autonome.

Aboutir à la création de tels véhicules apporterait un confort supplémentaire aux usagers et réduirait considérablement le nombre d'accidents de la route.

Pour quantifier le développement d'un véhicule autonome, plusieurs paliers appelés niveaux d'autonomie ont été créés. La Figure 2.1 résume ceux-ci.

Le niveau d'autonomie 5 est donc l'objectif final des chercheurs. Aujourd'hui, en 2021, les derniers véhicules commercialisés peuvent être considérés comme étant du niveau 2 d'autonomie. Cette "autonomie" se résume à une assistance à la conduite, au stationnement du véhicule et à son freinage.

Afin qu'un véhicule soit complètement autonome, un des défis à résoudre est celui de sa communication avec son environnement, les autres véhicules, etc. On regroupe toutes ces communications sous l'écriture "Vehicule to X" soit V2X en version plus abrégée. C'est sur cet aspect du véhicule autonome que nous allons nous concentrer.

2.2 Historique

En raison de la densité de population urbaine toujours croissante et de la croissance économique rapide, le Japon a pris la tête de la recherche sur les renseignements sur les transports dans les années 1970. Le RACS, lancé en 1984, était un système d'information embarqué pour la navigation et le guidage routier.

En 1991, le Congrès des États-Unis a adopté la 'Land Integrated Transportation Efficiency Act', qui vise à utiliser une technologie de pointe et une répartition raisonnable du trafic pour améliorer l'efficacité de l'ensemble du réseau routier.

Les États-Unis ont créé l'IVHS (Intelligent Vehicle-Highway Society) of America en 1990, et l'Europe a créé ERTICO (European Road Transport Telematics Implementation Coordination Organization) en 1993. Cela indique que ces pays accordent de plus en plus d'attention à la V2X.

VERS LE **VÉHICULE SANS CONDUCTEUR**

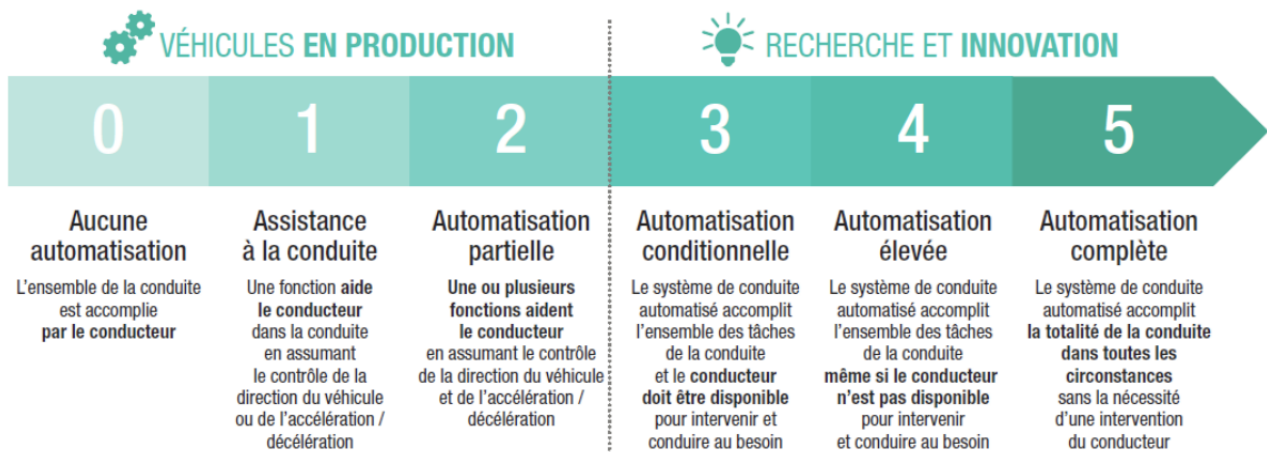


FIGURE 2.1 – Vers le véhicule autonome, source : Institut Région Paris, mai 2019, disponible sur <https://bit.ly/3c3qWKY>

Depuis que les États-Unis ont commencé la recherche et la vérification à grande échelle de la technologie STI (Système de Transport Intelligent) en 1991, certaines technologies ont progressivement mûri en 1998. Dans ce contexte, le gouvernement américain a promulgué «TEA-21, Transportation Equity Act For The 21st Century» en 1998. Il a annoncé le développement de la V2X d'un point de vue législatif. En 2007, six constructeurs automobiles européens (Volkswagen, Renault, Volvo, etc.) ont formé l'alliance de communication Car2car. La première ITS (Intelligent Transport Systems) world congress qui s'est tenue à Paris en 1994 a signifié que les pays ont commencé à travailler ensemble pour développer la technologie V2X.

Ces dernières années, la Chine et les États-Unis ont pris l'initiative dans ce domaine. Grâce au développement de la technologie 5G, V2X a franchi une nouvelle étape sur le plan technique. La 5G permet à la technologie C-V2X de communiquer beaucoup plus efficacement et de transmettre davantage de contenu. De plus, le marché du V2X se développe à une vitesse phénoménale, passant de 3 millions de dollars en 2010 à 16 millions de dollars en 2020. Avec l'expansion de la technologie cellulaire, on s'attend à ce qu'un nombre croissant de personnes puissent profiter de la commodité de cette technologie.

2.3 Objectifs de la V2X

Même si le nombre d'accidents est en légère baisse par rapport à l'année 2019, celle-ci s'explique en grande partie par la crise sanitaire qui a réduit drastiquement les déplacements en voiture.

On constate alors que le nombre d'accidents chaque année représente un véritable fléau sur les routes que ce soit en France ou dans le monde entier (44 997, dont au moins 2000 d'entre eux mortels, en France en 2020).

La voiture autonome et son système de communication V2X en plus de représenter et d'aller vers une grande avancée technologique, a pour but principal d'augmenter la sécurité et de prévenir les éventuels accidents. Il faut donc que la voiture équipée de la V2X puisse détecter chaque obstacle, piétons ou voitures qui pourraient potentiellement représenter un danger, mais également communiquer avec les éléments alentours. Elle permettra alors de fluidifier le trafic routier (diminuer les embouteillages) et de préserver l'environnement grâce à l'économie de l'énergie.

Le véhicule autonome doit être nécessairement équipé de la communication V2X afin de répondre à deux principaux objectifs. D'une part, il doit être en mesure de percevoir au mieux son environnement et ce qui l'entoure. A la manière de l'homme, le véhicule doit être capable de voir, d'entendre et de comprendre son environnement pour un trajet donné. Le deuxième enjeu relevant de la V2X est de pouvoir communiquer de la manière la plus optimale possible avec les éléments qui entourent la voiture. Cette communication sans fil doit s'effectuer de manière sécurisée et fiable.

Lorsque l'on parle d'environnement, on peut distinguer plusieurs éléments. C'est pourquoi la communication V2X est constituée de plusieurs concepts [14] :

- la communication entre véhicules autonomes (V2V) qui permet d'échanger un certain nombre de messages (par exemple, leurs emplacements, vitesses ou encore états),
- la communication avec les infrastructures (V2I), avec les piétons (V2P) et avec le réseau électrique (V2G).

L'ensemble de ces concepts sera expliqué et détaillé dans la suite de notre rapport.

A l'avenir, cette technologie devrait réduire d'environ 72 % le taux d'accidents sur les routes dans le monde [4].

2.4 Fonctionnement général

L'objectif premier des véhicules autonomes est de pouvoir détecter des obstacles et de s'arrêter si nécessaire. Ils sont capables de reconnaître les feux ainsi que les panneaux de signalisation et d'agir en conséquence. Cette technologie sophistiquée, embarquée à bord du véhicule, permet la compréhension du contexte routier. On compte de nombreux capteurs disposés à l'avant, à l'arrière et sur le toit de la voiture, tels que les caméras, les capteurs Lidar, à ultra-sons et radars. La position exacte du véhicule est déterminée par GPS (Global Positioning System) et des cartes numériques très précises. Toutes les données perçues par les capteurs sont ensuite combinées et traitées dans des processeurs.

La V2X a pour objectif de permettre aux véhicules de "communiquer" avec leur environnement (autres véhicules, piétons, obstacles divers, etc.). Les infrastructures types Wifi, réseaux cellulaires sont les canaux de communication privilégiés des véhicules autonomes. Les systèmes de transport intelligents sont donc les applications des nouvelles technologies de l'information et de la communication au domaine des transports et de sa logistique. Leur développement repose sur des fonctions associées à "l'intelligence" telles que la mémoire, la communication, le traitement de l'information et les comportements adaptatifs et autonomes. On les trouve dans plusieurs champs d'activité : dans l'optimisation de l'utilisation des infrastructures de transport, dans l'amélioration de la sécurité ainsi que dans le développement des services. Avec la progression rapide des moyens de communication cellulaire-V2X, l'industrie automobile est confrontée à de nouvelles opportunités pour une connectivité des véhicules à latence faible et fiable, ce qui permettra la mise en place de véhicules entièrement autonomes. Il est important de remarquer le fait que ces diverses solutions de communication mobile pour la connectivité automobile doivent répondre à des normes mondiales, et ce, dans différents environnements.

Chapitre 3

Différentes déclinaisons de la V2X

3.1 Définition de la V2X

Les systèmes V2X correspondent à l'ensemble des systèmes existants ou futurs qui permettent aux véhicules de communiquer avec des entités extérieures. Pour être autonome, un véhicule doit pouvoir communiquer avec tous les éléments extérieurs qui l'entourent et qui sont susceptibles de changer son comportement sur la route.

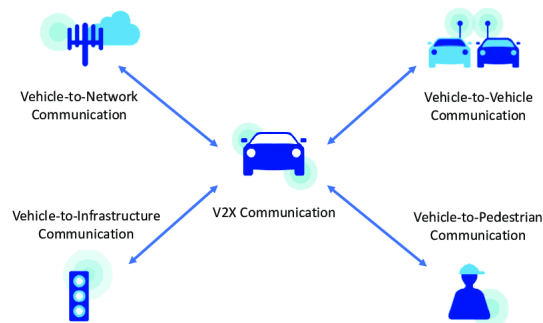


FIGURE 3.1 – La communication V2X (source [3])

La National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) estime que la mise en œuvre de la technologie V2X réduira les accidents de la route aux États-Unis.

Parmi les composants clés de la V2X, il y a la V2V (véhicule à véhicule), la V2I (véhicule à infrastructure)[8], la V2G (véhicule à réseaux) et la V2P (véhicule à piétons), Figure 3.1. V2V permet aux véhicules de communiquer avec d'autres véhicules sur la route, tandis que V2I permet aux véhicules de communiquer avec des entités externes (tels que les feux de signalisation, les places de stationnement, les cyclistes et les piétons). La V2G permet de communiquer sur les besoins énergétiques et le V2P permet de communiquer avec les piétons. La technologie V2X contribue à améliorer la sécurité routière, à réduire la consommation de carburant et à améliorer l'expérience entre les conducteurs et les autres usagers de la route, tels que les cyclistes et les piétons.

3.2 La technologie V2V

Lorsque les véhicules communiquent entre eux on parle alors de V2V. La V2V permet à un véhicule d'alerter d'autres véhicules d'un danger, d'un problème ou simplement d'échanger des informations afin que la circulation soit la plus fluide possible, cf. Figure 3.2. Avec les informations échangées comme la vitesse, l'emplacement, le sens de direction, le

freinage ou encore la perte de stabilité, les véhicules peuvent agir et prendre des mesures afin d'éviter un problème lors d'un changement soudain de trajectoire ou d'un freinage d'urgence par exemple.

La technologie V2V est en réalité un réseau maillé qu'on appelle VANET (Vehicular Ad-hoc Network) dans lequel chaque véhicule correspond à un nœud et est susceptible d'émettre, de recevoir et de retransmettre des informations provenant d'autres nœuds [2]. Pour cela, il faut une infrastructure d'antennes relais qui est nécessaire à la communication à courte distance (300 mètres) dans un milieu urbain dense et saturé d'ondes. C'est pour cette raison que la commission fédérale des communications américaine (FCC) a attribué une bande de fréquence à large spectre de 75 MHz à 5,9 GHz. Pour que cette technologie fonctionne sur tous les véhicules, il est essentiel qu'elle fonctionne sur les réseaux sans fil utilisant la norme IEEE 802.11p. C'est une variante du Wifi qui utilise une bande de fréquences se situant entre 5.85 GHz et 5.925 GHz. Ce système de communication entre véhicules utilise un récepteur GPS, une radio/antenne et un ordinateur pour pouvoir partager les informations. Tous ces systèmes servent à collecter et à analyser des données envoyées directement par d'autres véhicules. Ces données sont fréquemment mises à jour, c'est-à-dire au moins toutes les 100 milli-secondes, pour avoir des données en "temps réel" et ainsi être le plus efficace possible.

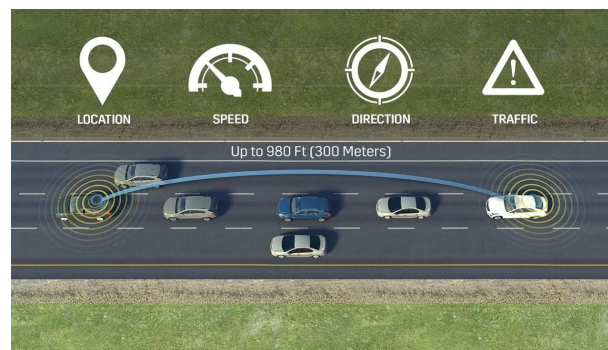


FIGURE 3.2 – Exemple de communication entre deux véhicules

3.3 La technologie V2I

La technologie V2I[5] est une technologie permettant la communication entre les véhicules et les infrastructures routières qui les entourent, cf Figure 3.3. Ces infrastructures peuvent être des feux de signalisation, des marqueurs de voie, des lampadaires ou des parcmètres. Cette communication se fait sans fil et est bidirectionnelle. Les informations peuvent être transmises aux véhicules via un réseau ad hoc et inversement. Un réseau ad hoc est un type de réseau sans fil décentralisé. Ce type de réseau ne s'appuie pas sur une infrastructure déjà existante comme des routeurs dans les réseaux filaires ou des points d'accès. Au lieu de cela, chaque nœud, donc chaque véhicule, participe au routage en retransmettant des données aux autres nœuds. La V2I est semblable à la V2V car elle utilise également des fréquences de communication à courte distance (DSRC) conçues spécialement pour les systèmes de transport intelligent (STI). Elle utilise aussi une autre technologie, la FCD (Floating Car Data), que nous expliciterons par la suite.

Dans un système de transport intelligent, la V2I permet de récolter et d'échanger des données avec des infrastructures routières afin de fournir aux voyageurs et aux véhicules des informations en temps réel sur des éléments tels que les conditions de circulation, la fluidité du trafic, les accidents, les zones de travaux et les disponibilités de places dans les

parkings.

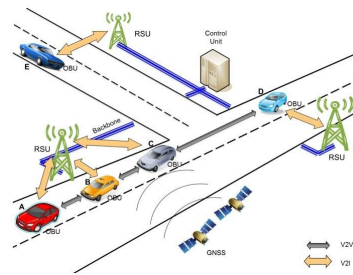


FIGURE 3.3 – Principe du fonctionnement de la V2V et de la V2I

La technologie FCD, ou données de véhicules flottants, est un ensemble de données qui provient de véhicules connectés. Ces données sont issues principalement de terminaux ou applications sur les smartphones connectés à internet, les applications GPS et les unités de gestion de flotte en temps réel des poids lourds. Grâce à ces dispositifs, chaque véhicule équipé devient un capteur de trafic. Par conséquent, les données FCD permettent de mieux comprendre et d’analyser les conditions de circulation et l’état du trafic. Cette technologie est une alternative aux capteurs physiques comme les boucles de comptages électromagnétiques et permet ainsi d’avoir des données quasiment en temps réel des conditions de circulation.

Les données sont collectées à l’aide de plusieurs réseaux comme le GPS et le réseau cellulaire GPRS (General Packet Radio Service) par exemple. Ces données sont transférées vers des serveurs de manière anonyme afin de respecter la réglementation de la CNIL. Ensuite, grâce à des algorithmes de calcul performants, les données sont exploitées pour permettre d’établir des indicateurs de trafic fiable. Ces données sont ensuite transposées sur des interfaces graphiques permettant ainsi leur interprétation.

Les DSRC (Dedicated Short-Range Communications) sont des radiocommunications, à sens unique ou à double sens, à courte ou moyenne portée, spécialement conçues pour les systèmes de transport intelligent (STI ou ITS) c’est-à-dire pour les communications entre un véhicule et l’infrastructure routière ou entre deux véhicules.

3.4 La technologie V2G

Le réseau électrique doit toujours rester en équilibre, sinon il y a des difficultés pour approvisionner tous les consommateurs. Avec le développement des énergies renouvelables comme le solaire ou l’éolien, la production devient très variable et par conséquent la gestion de cet équilibre devient complexe.

Les technologies V2G sont donc une des solutions pour maintenir cet équilibre¹. La recharge du véhicule devient bidirectionnelle c’est-à-dire que le réseau achemine de l’électricité vers la batterie, cf Figure 3.4. Cependant il considère également cette dernière comme une source d’alimentation qui peut être utilisée pour répondre à divers besoins de consommation énergétique. Cette solution est économique car on peut recharger les batteries de sa voiture pendant les heures où l’énergie est moins chère. On peut également utiliser l’énergie stockée du véhicule pour les besoins énergétiques de son domicile. La société EDF (Electricité de France) propose notamment des bornes compatibles avec les véhicules équipés des technologies V2G.

1. <https://bit.ly/3ix6wht>

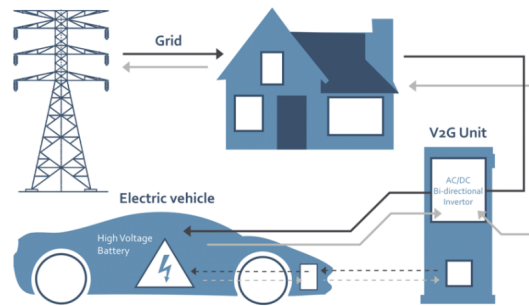


FIGURE 3.4 – Exemple du fonctionnement de la V2G

3.5 La technologie V2P

La dernière déclinaison de la V2X que nous allons présenter dans ce rapport est la technologie V2P². Les initiales V2P signifient « vehicle to pedestrian ». Elle désigne l'ensemble des technologies permettant la communication entre le véhicule et le piéton [11]. Elle permet d'alerter le piéton et les conducteurs de véhicule autonome des potentiels dangers dans la rue. Ils se retrouvent au niveau des passages piétons, des intersections, d'obstacles qui rendent le piéton moins visible. etc. Les blessures et les décès causés par des collisions avec des véhicules automobiles sont une préoccupation majeure en matière de sécurité publique [13]. Si l'on prend l'exemple des Etats-Unis, en 2015 seulement, il y a eu 5376 piétons tués et 70000 piétons blessés dans des collisions de véhicules automobiles (National Center for Statistics and Analysis, 2017).

Cette technologie se différencie des trois autres présentées par le fait qu'elle établit un lien entre un être vivant (le piéton) et un objet (le véhicule). En effet la V2V, V2I et V2G font le lien entre deux objets grâce à des systèmes informatiques. L'alternative trouvée est d'utiliser le smartphone du piéton, cela est pertinent car de nos jours la plupart des personnes ont un smartphone sur eux. Plus tard, d'autres supports sont attendus comme les lumières ou les GPS de vélo. De plus, cette technologie prend tout son sens quand on sait que la plupart des accidents sont dus à une perte d'attention des piétons lorsqu'ils utilisent leur téléphone.

Un des types de réseau permettant la communication entre le véhicule et le smartphone du piéton auquel nous allons nous intéresser est le DSRC qui ne fonctionne qu'à courte portée. Lorsque le piéton se déplace, le smartphone émet et reçoit des ondes DSRC. Le véhicule passant à proximité de celui-ci reçoit un message l'avertissant et lui demandant de ralentir. De même, le piéton réceptionne un message de prévention l'alertant de la présence d'un véhicule. Ce système est une solution au problème posé par les obstacles cachant les piétons et empêchant le conducteur de les voir.

Cependant, ce système possède deux désavantages : le premier concerne la batterie du smartphone qui est très vite consommée par un réseau comme le DSRC. De plus, ce dernier n'est efficace qu'à courte portée. On peut aussi penser à d'autres types de réseaux que les systèmes V2P peuvent utiliser, telles que la technologie IEEE 802.11p mentionnée précédemment et les technologies cellulaires comme la 3G, 4G voire même la 5G.

2. <https://bit.ly/35836db>

Chapitre 4

Protocoles, normes et réseaux

4.1 Réseau du véhicule ad hoc

D'après le Livre Blanc de l'INRIA [9], quatre questions stratégiques se posent pour garantir le succès du véhicule autonome et connecté.

La première d'entre elles consiste à garantir d'une part la sécurité des systèmes et d'autre part la fiabilité des communications.

Les véhicules s'échangeant des informations forment ensemble un réseau de véhicules ad hoc (VANET). Il s'agit d'une catégorie spécifique des réseaux ad hoc mobiles « Mobile Ad hoc NETWORKS (MANETs) ». Les VANETs sont des éléments centraux des futurs systèmes de transports intelligents (STI). Dans un VANET, les véhicules peuvent communiquer entre eux (les communications sont alors catégorisées V2V ou avec les éléments de contexte via l'infrastructure de communication du réseau routier (les communications sont alors catégorisées V2I). Cette technologie prometteuse a pour objectif de permettre dans un futur proche, par exemple, d'améliorer la sécurité routière ou encore de rendre les déplacements des usagers de la route plus confortables.

Tout VANET est confronté à une double injonction. En effet, d'une part, plus les véhicules et l'infrastructure du réseau routier échangent d'informations pertinentes et meilleure est la compréhension du trafic par le conducteur (humain ou non). D'autre part, comme les véhicules et l'infrastructure du réseau routier utilisent le même canal de communication, il importe de se prémunir des problèmes de tempête de diffusion ou « broadcast storm problem » (saturation du canal de communication). Pour satisfaire cette double injonction, il faut trouver un compromis entre fiabilité (quantité d'information) et délai d'acheminement (réduction du taux de perte de paquets). Les VANETs rencontrent de nombreux défis dont la dissémination rapide de l'information tout en faisant un usage raisonnable des ressources, ainsi que la sécurité des données qui transitent via des liaisons sans fils. On peut noter qu'un VANET se compose principalement de deux types d'unités de communication : les OBU (« Onboard Units », unités à bord des véhicules) et RSU (« Road-side Units », unités sur les bords de voies). La Figure 4.1 met en évidence les interactions d'un véhicule avec certaines de ces unités de communication.

Afin d'assurer le développement et le succès de cette technologie, les divers constructeurs automobiles doivent mener un travail de standardisation, devenu un aspect clé pour son déploiement mondial. De nombreux travaux de recherches ont été lancés ces dernières années et ont abouti à une série de standards.

Le choix entre différentes technologies et le type de communication à utiliser (V2V, V2I, etc.) dépend des exigences des applications considérées. La normalisation des systèmes V2X basée sur le réseau local sans fil (technologie DSRC) remplace celle des systèmes V2X basée sur la téléphonie cellulaire (technologie C-V2X). Nous détaillerons, dans cette partie, ces

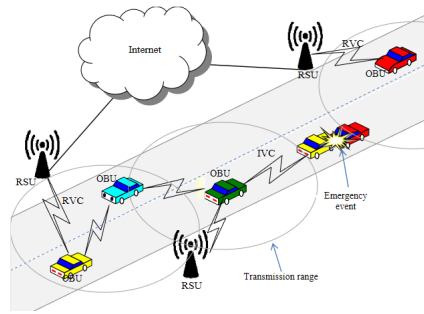


FIGURE 4.1 – Interactions véhicule avec OBU, RSU

deux technologies.

4.2 Protocole de communication DSRC

Les Communications Dédiées à Courtes Portée sont des radiocommunications, unidirectionnelle ou bidirectionnelle, conçues pour les systèmes de transport intelligent. Le principal intérêt de cette technologie est d'éviter de perturber les autres systèmes de communication et de permettre une communication très localisée. Elle vise à répondre aux exigences des applications qui dépendent du transfert d'informations entre les véhicules et les dispositifs routiers ainsi qu'entre les véhicules eux-mêmes. En général, ce type de communication se produit entre des véhicules en mouvement entrant dans une zone de communication et des équipements de communication fixes en bord de route ou directement entre des véhicules en mouvement. Aux États-Unis, en 1999, la Commission Fédérale des Communications (FCC) a accordé 75 MHz de spectre dans la bande des 5,9 GHz pour le DSRC. Ce spectre est divisé en 7 canaux de 10 MHz chacun, dont un canal de contrôle (CCH) et 6 canaux de service (SCH). Le canal 172 est dédié aux applications de sécurité routière.

Chaque véhicule envoie sa position et sa vitesse en toute sécurité et de manière anonyme 10 fois par seconde. Tous les véhicules environnants reçoivent ce message, et chaque véhicule évalue le risque posé par le véhicule de l'expéditeur. Le DSRC est optimisé pour une grande mobilité, même en présence d'obstructions et dans des environnements en évolution rapide. Cette technologie peut garantir une norme de sécurité commune aux véhicules, afin d'éviter les accidents et d'optimiser le trafic.

Les DSRC utilisent la communication radio fournie par le protocole de connectivité de réseau local sans fil 802.11p (architecture de réseau local installée dans les véhicules, de type Wifi ou Wireless LAN). Ce protocole a donné lieu à une norme ETSI (European Telecommunications Standards Institute) connue en Europe sous le nom ITS-G5 (Intelligent Transport System - G5 (pour 5,9GHz)) [12]. Il contrôle l'authenticité des messages et garantit l'anonymisation des données traitées. Il opère en quasi temps réel, du fait d'une très faible latence. Sa diffusion radio est circulaire, de type 'broadcast', avec une portée de plusieurs centaines de mètres, voire de 1 kilomètre.

De son côté, C-V2X est une technologie plus récente. Elle peut utiliser la bande 5,9 GHz pour des communications directes et est aussi compatible avec les réseaux des opérateurs, qui peuvent utiliser des fréquences basses (700, 800 MHz) afin d'augmenter considérablement la portée, ce qui n'est pas possible avec l'ITS-G5. C'est à cette technologie que nous allons maintenant nous intéresser.

4.3 Protocole de communication C-V2X

4.3.1 Caractéristiques de la technologie C-V2X

C-V2X est une technologie basée sur les données cellulaires et définie par la norme 3GPP (3rd Generation Partnership Project). Il s'agit d'une version optimisée de la norme IEEE 802.11p. La technologie C-V2X est conçue pour permettre aux dispositifs de communication basés sur cette norme de répondre aux exigences de faible latence, de haute fiabilité et d'adaptabilité aux scénarios LTE (Long Term Evolution) et 5G [1], cf Figure 4.2.

Cependant, cette technologie n'est pas parfaite. La charge de l'équipement est considérable en raison de la grande quantité de données à utiliser. L'augmentation du nombre de nœuds entraîne également des retards de transmission. Le passage de la LTE à la 5G rend les choses encore plus compliquées.

4.3.2 Evolution technique de la technologie C-V2X

Depuis 2015, une association de développement de normes de télécommunications composée de l'Europe, du Japon, de la Chine et de l'Amérique du Nord, a lancé une étude sur les exigences et la normalisation du C-V2X. L'achèvement du protocole de normalisation inclus dans la version 14 a été annoncé lors de la réunion 3GPP RAN à la Nouvelle-Orléans, aux États-Unis, en 2016.

Lors de la 49e réunion de l'ISO (International Organisation for Standardization) TC 204 (Terminology and other language and content resources) qui s'est tenue à Paris en avril 2017, la norme C-V2X proposée par la Chine a été adoptée, ce qui fait de cette technologie une candidate pour le système ISO ITS.

4.3.3 Etat actuel du développement de la technologie C-V2X

La communication C-V2X est basée soit sur une seule bande utilisant le PC5, soit sur une communication inter-bande simultanée utilisant les interfaces PC5 et Uu. Grâce à ce développement, l'interface Uu a été étendue à dix bandes de fréquences avec des largeurs de bande comprises entre 10 MHz et 20 MHz. Dans la version 16 du 3GPP, C-V2X est étendue à la 5G. TS 38.101.1 définit des plages de fréquences appelées FR1 et FR2, qui permettent aux fabricants de puces et de voitures concernés de communiquer sur cette base pour la 5G.

C-V2X Operating Band	Uplink, MHz	Downlink, MHz	Interface	Maximum Bandwidth, MHz
47		5855-5925	PC5	30 ¹
3	1710-1785	1805-1880	Uu	20
5	824-849	869-894	Uu	20
7	2500-2570	2620-2690	Uu	20
8	880-915	925-960	Uu	10
20	832-862	791-821	Uu	20
28	703-748	758-803	Uu	20
34		2010-2025	Uu	15
39		1880-1920	Uu	20
41		2496-2690	Uu	20
71	663-688	617-652	Uu	20

¹ Using carrier aggregation format 10 + 20 MHz or 10 + 10 + 10 MHz.

FIGURE 4.2 – Bandes opératoires basées sur LTE de C-V2X

4.3.4 Perspectives de la technologie C-V2X

Aux États-Unis, la Cadillac CTS¹, qui a été commercialisée en 2017, a été le premier véhicule à mettre en œuvre ce protocole. Selon les estimations de General Motors (constructeur automobile américain), cette technologie ne sera efficace que lorsque 25% des voitures en circulation seront équipées du système.

En Chine, la 5G Automotive Association (organisation mondiale et intersectorielle de sociétés des secteurs de l'automobile et des communications) a discuté des essais routiers basés sur ce protocole lors du Mobile World Congress 2021 de la GSMA à Shanghai. Étant donné le déploiement rapide de la 5G en Chine, le développement de la technologie C-V2X se concentrera sur la manière dont cette dernière peut être intégrée à la 5G. « La progression mondiale de C-V2X montre que la Chine a ouvert la voie et que la 5GAA joue un rôle en soutenant sa mise en œuvre dans le monde entier », a déclaré Johannes Springer, directeur général de la 5G Automotive Association (5GAA).

4.3.5 Une confrontation ?

Ainsi, si la technologie C-V2X semble être une révolution pour l'industrie automobile, ce n'est pourtant pas la première tentative de pousser une norme de communication entre véhicules puisque en 1999, le DSRC avait vu le jour. Si la norme C-V2X est basée sur la connexion LTE et 5G, le DSRC est basé sur la connexion Wifi et il est bien implanté.

En effet, après une longue période de multiples tests sur le terrain à grande échelle, le DSRC est entré en vigueur au Japon en 2015 et aux États-Unis en 2017 sur certains modèles automobiles. Cependant, les véhicules aux États-Unis et au Japon, étant relativement différents, ne sont pas compatibles. La Chine, quant à elle, privilégie le déploiement du C-V2X. Ford, Samsung, Huawei et LG ont testé et validé des unités de communication basées sur C-V2X sur l'EuroSpeedway Lausitz (un complexe réservé aux sports motorisés situé en Allemagne) avec un taux de réussite de 96%.

La technologie C-V2X, plus récente, a donc le même objectif de lien de communication direct entre les véhicules que la technologie DSRC. Cette technologie de communication cellulaire est plus attractive car elle suit les changements, convient à des scénarios plus complexes et est compatible avec la 5G à venir. Certaines études et analyses de 2017 et 2018, toutes réalisées par la 5GAA, indiquent que la technologie C-V2X basée sur le cellulaire en mode de communication directe est supérieure à la norme 802.11p sous de multiples aspects, tels que la performance, la portée de communication et la fiabilité.

Les deux technologies n'étant pas compatibles, il est nécessaire qu'un standard soit adopté par l'ensemble de l'industrie automobile et des gouvernements pour que les véhicules puissent communiquer entre eux.

1. <https://bit.ly/2ThgzN6>

Chapitre 5

Enjeux

5.1 Enjeux sécuritaires

L'objectif principal de concevoir une voiture autonome incluant la communication V2X est avant tout d'améliorer la sécurité sur les routes .

C'est pourquoi les enjeux sécuritaires sont véritablement importants à prendre en compte. Toutes les causes d'accidents en temps normal comme l'état d'ébriété, le manque de concentration ou encore le temps de réaction ne poseront plus de problème si c'est une voiture autonome qui pilote. Elle représente alors un gros atout et une véritable solution pour réduire drastiquement les risques d'avoir un accident autant entre voiture qu'avec les piétons et les infrastructures environnantes . Bien que le risque zéro n'existe pas, l'utilisation de voitures autonomes dans le futur pourrait bien nous en faire croire l'existence. D'après Mike Parris , on pourrait même faire l'analogie de la conduite autonome avec le pilote automatique d'un avion.

Cependant, en 2017 un sondage d'OpinionWay montrait que 57%, soit plus de la moitié des français, avaient peur d'utiliser une voiture autonome par crainte d'accident. On peut noter une nette augmentation de cette peur suite à l'accident d'un VTC (Véhicule de Tourisme avec Chauffeur) Uber autonome en Arizona en 2018. Malgré tout, cette opinion ne semble pas légitime puisque le principal avantage de la voiture autonome est d'éviter l'accident. Cette crainte semble également provenir du fait qu'une voiture autonome soit dite « connectée ». En effet , plus les années passent, plus l'aspect « connecté » est présent tout autour de nous. Les failles que cette connectivité peut comporter en effraient certains. En effet, la majorité des personnes ont peur qu'on leur vole des données ou encore qu'on puisse dérouter la voiture de sa réelle destination.

Pour prendre un exemple , certaines compagnies font appel à des chercheurs en cybersécurité mais également à des hackers dits éthiques afin de détecter toute faille dans le système . En effet, un hacker a réussi en 2017 à prendre le contrôle d'une Tesla à l'issue de sa dernière mise à jour. Ceci a permis à Tesla d'améliorer et de renforcer sa technologie.

5.2 Enjeux éthiques

Une grande question éthique¹ se pose quant à l'utilisation de voitures autonomes sans conducteur et à l'inclusion d'une intelligence artificielle [6]. En effet, l'intelligence artificielle est-elle programmée pour prioriser la vie du piéton ou bien la vie de ses occupants? Le problème est connu sous le nom de "trolley dilemma" [7].

1. <https://bit.ly/3xco4DI>

Si l'on regarde de plus près, le principe de fonctionnement de la voiture autonome est similaire à celui du corps humain. Tandis que l'homme dispose de plusieurs sens, la voiture quant à elle est équipée de radars et de caméras. Cependant, l'atout majeur de l'homme est qu'il dispose d'un cerveau apte à prendre des décisions même s'il ne dispose pas de toutes les informations sur l'environnement. Énormément de situations sur les routes peuvent avoir lieu où il est nécessaire de faire des choix. Cependant, il est impossible de confronter l'intelligence artificielle à la multitude de situations probables. Ce sont principalement les voitures connectées de dernier niveau, c'est-à-dire celles qui ne disposent pas de volant et où l'homme ne peut pas intervenir, qui posent problèmes. En effet, si la voiture est confrontée à une situation où l'accident est inévitable, le passager ne sera pas en mesure d'agir comme il se doit.

C'est pourquoi aujourd'hui, il est difficile voire quasiment impossible de se projeter dans un futur où il n'y aurait que des voitures connectées de niveau 5, que ce soit sur le plan juridique ou sur l'acceptation de cette technologie vis-à-vis de la population. Cependant, les voitures autonomes de niveau inférieur suscitent déjà plus d'engouement. Sans le savoir, une multitude de voitures autonomes circulent déjà sur les routes. Alors qu'en France par exemple ces technologies font encore l'objet de tests; en Chine, il en est tout autrement. En effet, à Canton, 60000 passagers ont déjà utilisé ces véhicules appelés "robots-taxis" de niveau 3. Le pays compte même remplacer des véhicules de particuliers par ces robot-taxis à l'horizon 2040.

5.3 Enjeux économiques et avancement de la recherche

L'apparition des véhicules connectés entraîne un bouleversement de l'économie. Elle change la vision des constructeurs, des équipementiers, des industriels mais aussi des consommateurs.

L'avancée de la recherche sur les véhicules autonomes crée aussi de nombreux emplois. Tous les domaines sont concernés : de la recherche et du développement des modèles par des ingénieurs à la fabrication par des techniciens par exemple. Un marché nouveau apparaît donc et va se développer avec une demande croissante. Néanmoins, cette information est à relativiser car avec l'automatisation des tâches, de nombreux emplois sont amenés à disparaître.

L'apparition de véhicules autonomes modifiera également le système de transport actuel. Si ces véhicules permettent d'accueillir plusieurs personnes à la fois, le véhicule individuel pourrait disparaître dans le monde urbain. Le succès d'entreprise d'auto-partage comme Uber n'est qu'un aperçu du phénomène de véhicules partagés qui prendra place avec l'apparition de voitures connectées. Cela engendrera un gain de temps pour les usagers (stationnement, embouteillages, etc.) et une meilleure optimisation de l'espace. L'environnement sera également impacté positivement (réduction de la consommation de carburant et des émissions de gaz).

Grâce à une conduite plus souple et automatisée efficacement, le nombre d'accidents sera considérablement réduit. Le prix des assurances et des réparations sera ainsi amoindri. L'usure des voitures sera réduite et la longévité d'un véhicule plus grande. Néanmoins, avec l'avancement constant des technologies, certains véhicules connectés pourraient devenir obsolètes. Des révisions ou « mises à jour » des systèmes embarqués seront nécessaires pour garder le véhicule efficace. Il faudra donc que les nouveaux véhicules soient en mesure d'interagir et de « cohabiter » avec les anciens modèles de manière sécurisée.

Tous ces facteurs à prendre en compte rendent le véhicule de plus en plus complexe ce qui justifie un prix plus élevé pour les consommateurs.

La recherche sur la V2X et le véhicule connecté se développe de plus en plus chez les grandes puissances mondiales (Etats-Unis, Asie (Chine), Europe). Chaque puissance essaie de devenir la référence et le leader du marché de ce domaine prometteur, notamment avec les avancées dans le secteur de l'intelligence artificielle. Faisons un état des lieux de chacune de ces puissances dans le domaine de la V2X.

Les Etats-Unis sont, avec la Chine, l'un des leaders du marché dans le domaine de la V2X. Des entreprises comme Tesla investissent énormément dans la recherche et commercialisent des modèles de véhicules proposant un système de conduite plus ou moins automatisée. Google, Microsoft et Apple se lancent également dans la course du véhicule connecté. Ces géants du numériques collaborent avec les industriels du monde de l'automobile et rachètent des start-ups innovantes dans le domaine de la V2X. C'est dans une optique de devenir leader du marché qu'a été lancé le projet de la Google Car par exemple. Chaque entreprise veut prendre sa part du marché. Certaines se spécialisent sur un aspect du véhicule autonome tels que le logiciel, l'intelligence artificielle, les puces, la logistique, le design ou encore le réseau de voitures connectées pour Uber. Une seule compagnie ne peut pas maîtriser parfaitement tous les aspects d'un véhicule autonome. Ainsi, les associations et partenariats sont de mise afin d'accélérer le développement dans ce domaine.

Le développement et la recherche sur les véhicules autonomes et la V2X ne se font pas uniquement dans les compagnies. C'est également le cas dans le secteur académique. Ainsi, les universités américaines telles que Stanford, Berkeley ou le MIT, travaillent ardemment sur le sujet et collaborent même avec des entreprises privées comme Google (partenariat avec Stanford). L'objectif ici est également d'accélérer la recherche en mettant toutes les chances de développement d'un véhicule complètement autonome de son côté. Néanmoins, le développement des véhicules autonomes dans ce pays est plus lent que prévu. En effet, à chaque problème ou accident causé lors d'une expérimentation, la défaillance est très médiatisée ce qui amène à une méfiance dans l'ensemble du pays. C'est assez ironique car le nombre d'accidents dûs à une erreur humaine proportionnellement au nombre de kilomètres parcourus est bien plus élevé que le nombre d'accidents dûs à une erreur d'une voiture autonome. De plus, les compagnies d'assurances profitent de ces accidents pour faire grimper leur chiffre d'affaire. Ainsi, cette méfiance naissante entrave le développement de véhicules autonomes. Pour autant, les Etats-Unis restent un des deux leaders dans le domaine des véhicules autonomes.

La Chine a énormément investi dans le domaine de la V2X afin de disputer la place de leader du marché avec les Etats-Unis. Ces investissements ont notamment grandi de manière exponentielle avec le projet Made In China 2025 mis en place en mai 2015. Ce projet consiste à promouvoir un basculement de l'industrie chinoise vers la recherche et le développement (R & D) de nouvelles technologies. On peut parler de transition industrielle. Ainsi, le gouvernement Chinois dépense énormément dans les domaines de la robotique par exemple, de l'IA, de l'apprentissage automatique, et donc indirectement dans la voiture autonome et connectée. La Chine est donc en général « en avance » sur l'implantation des nouvelles technologies [10]. La voiture électrique est déjà très répandue dans les villes chinoises car le gouvernement impose des quotas à respecter aux constructeurs automobiles. Ainsi, la Chine pourrait suivre le même schéma avec les véhicules autonomes en imposant leur mise en place progressive. D'un autre côté, avec le projet Made In China 2025, la Chine incite également différentes compagnies leaders du marché dans leurs domaines respectifs comme Alibaba ou encore Baidu à investir dans la R & D. Baidu est notamment dans la course du véhicule autonome, en concurrence avec le géant américain Google. Cette entreprise a mis en place en 2017 sa plateforme open source Apollo permettant la collaboration avec d'autres partenaires industriels. Ainsi, l'intelligence artificielle que Baidu souhaite développer pour ses véhicules a une quantité d'informations colossales à disposition. L'objectif

est clair : accélérer le développement de la recherche sur les technologies du véhicule autonome. De leurs côtés, les géants du e-commerce chinois Alibaba et Tencent investissent dans des start-ups innovantes dans le domaine.

La recherche universitaire n'est pas mise de côté pour autant. Les universités de Shanghai par exemple travaillent et avancent très vite dans le domaine de la V2X. Un centre de recherche important sur les véhicules autonomes se trouve également à Singapour. Ainsi, bien que la Chine soit le pays le plus impliqué dans ce domaine, les autres puissances asiatiques s'y intéressent également. L'Asie, et plus particulièrement la Chine, se présente donc comme un véritable pilier dans le secteur du V2X.

L'Europe est en retard derrière les deux autres grandes puissances dans le domaine du V2X. Le facteur culturel entre en jeu. La population européenne est en général moins ouverte sur le sujet des nouvelles technologies que l'Asie par exemple, ce qui explique un ralentissement de leur développement en Europe. Néanmoins, il existe de grandes universités en Europe travaillant sur des projets de véhicules autonomes. Pour en citer quelques-unes, l'université de Parme en Italie est réputée, l'université de Berlin en Allemagne l'est également, en France l'UTC, l'INRIA, l'INSA, etc. Néanmoins, ces universités ne bénéficient pas des mêmes financements que leurs concurrents américains et chinois.

Un autre facteur de ce manque de compétitivité de l'Europe concerne le déploiement du réseau 5G. Ce dernier a été élu pour la V2X car il est plus fiable que la 4G ou le Wifi par exemple. Cependant, le problème de l'Europe réside dans son retard concernant son déploiement. Ce dernier n'a pas été anticipé par rapport à la Chine et aux Etats-Unis. Les deux puissances possèdent donc une grosse longueur d'avance. Enfin, les investisseurs européens préfèrent développer leur projet à l'étranger car il est très difficile de le faire en Europe au vu de la législation. Ceci implique des pertes de temps et un manque de contexte propre au réseau routier européen.

5.3.1 Enjeux techniques

Il est primordial d'assurer la sécurité des systèmes utilisés, qu'ils soient informatiques ou physiques. Des communications erronées dues à un problème technique ou l'intrusion d'un pirate dans le logiciel peuvent être la cause d'accidents graves (par exemple, en 2018, un piéton a été percuté par un véhicule autonome de la société Uber). Ces incidents pourraient être évités par l'utilisation de moyens de télécommunications embarqués et par une plus grande fiabilité algorithmique.

Les logiciels utilisés devront nécessairement prendre en compte les incertitudes et les erreurs rencontrées, qu'elles proviennent d'une défaillance technique ou d'une cause extérieure au véhicule. Des solutions multiples pour réaliser un composant logiciel devront donc être envisagées en cas de problème afin d'assurer la sécurité du/des passager(s). Des procédures de sécurité peuvent aussi être renforcées (fonction pare-feu par exemple). Enfin, des preuves et des validations des algorithmes seront nécessaires afin d'autoriser leur usage. Sur l'aspect « Intelligence artificielle », un effort de recherche est encore nécessaire pour un véhicule complètement autonome.

La couverture réseau présente également des lacunes et devient un défi technologique important du véhicule autonome. Les technologies récentes comme la 5G ne suffisent pas à résoudre ce problème car c'est surtout un problème d'accès au réseau.

Ainsi, la qualité des logiciels dans les véhicules autonomes est une priorité, notamment pour l'industrie automobile qui encadre les systèmes utilisés par le biais de la norme ISO 26262.

Conclusion et perspectives

En conclusion, les systèmes V2X sont une avancée technologique considérable qui jouera un rôle essentiel dans le monde du transport et de l'automobile. Les technologies présentes aujourd'hui et celles qui sont en cours de développement permettront aux véhicules de communiquer et de partager différentes informations afin de percevoir leur environnement. Les objectifs des différentes technologies V2X sont d'améliorer la sécurité, de faire chuter le risque d'accidents ainsi que de rendre la circulation plus agréable et beaucoup plus écologique. Cependant, il ne faut pas oublier que les technologies V2X ne sont pas parfaites et font face à des limites et enjeux d'ordre technique, sécuritaire, économique, éthique et juridique. Ces limites sont un frein à la généralisation de ces technologies sur les routes. En effet, des questions se posent par exemple sur le choix que le véhicule, équipé de ces technologies, ferait entre deux situations d'ordre moral, sur la cohabitation avec des véhicules non autonomes et non équipés des technologies V2X ou sur les questions liées aux piratages informatiques car aucun système informatique n'est infaillible. Le défi pour les constructeurs, les équipementiers et les chercheurs est de répondre à ces problématiques pour permettre ainsi une généralisation de ces technologies et des véhicules autonomes à grande échelle. L'autre enjeu majeur est de faire accepter le concept du véhicule autonome à la population. En effet, une grande partie de la population est encore réticente et sceptique à l'idée de laisser le contrôle à une machine. Les technologies V2X doivent encore être développées et perfectionnées pour leur permettre de répondre à tous les défis et enjeux auxquels elles font face. En revanche, il est certain qu'un jour, les véhicules n'auront plus besoin d'un conducteur derrière le volant.

Enfin, nous souhaitons remercier M. Bensrhair pour son aide et son soutien pour ce projet, malgré les circonstances exceptionnelles dans lesquelles nous avons travaillé.

Bibliographie

- [1] G. Americas. Cellular v2x communications towards 5g, 2018.
- [2] A. Berradj. *Contrôle de la diffusion multi-saut pour la dissémination de messages d’alerte dans les réseaux véhiculaires*. Theses, Mathématiques, informatique, télécommunications de Toulouse (MITT), 2015.
- [3] CFI. Vehicle to everything (v2x), 2021.
- [4] D. Charitsis. Voitures autonomes : une étude sur le nombre d’accidents qu’elles pourraient éviter fait polémique, 2020.
- [5] T. Contributor. Vehicle to infrastructure (v2i or v2i), 2017.
- [6] P. Crevel. Voiture autonome : les défis pluriels de l’intelligence artificielle, 2019.
- [7] M. Cunneen, M. Mullins, F. Murphy, D. Shannon, I. Furxhi, and C. Ryan. Autonomous vehicles and avoiding the trolley (dilemma) : Vehicle perception, classification, and the challenges of framing decision ethics. *Cybern. Syst.*, 51(1) :59–80, 2020.
- [8] LeMarson. Les technologies v2i et v2v pour les véhicules intelligents, 2017.
- [9] F. Nashashibi. Véhicules autonomes et connectés. Les défis actuels et les voies de recherche. Technical report, INRIA, 2019.
- [10] L. Pizzuto, C. Thomas, A. Wang, and T. Wu. How china will help fuel the revolution in autonomous vehicles, 2019.
- [11] S. Z. Pooya Rahimian, Elizabeth E. O’Neal. Harnessing vehicle-to-pedestrian (v2p) communication technology : Sending traffic warnings to texting pedestrians, 2018.
- [12] M. Randriamasy. *Localisation et transmissions sécurisées pour la communication Véhicule à Infrastructure (V2I) : Application au service de télépéage ITS-G5*. Theses, Normandie Université, May 2019.
- [13] P. Sewalkar and J. Seitz. Vehicle-to-pedestrian communication for vulnerable road users : Survey, design considerations, and challenges. *Sensors*, 19(2), 2019.
- [14] J. Wang, Y. Shao, Y. Ge, and R. Yu. A survey of vehicle to everything (v2x) testing. *Sensors*, 19(2), 2019.