



NRC·CMRC

Examen technique des cas d'utilisation, avantages et vulnérabilités en matière de sécurité associés aux technologies des véhicules connectés

Préparé pour
Direction générale de la sécurité des véhicules automobiles
Transports Canada

Préparé par
Taufiq Rahman, Ph. D.
Andrew Liu, M. Sc. A.
Abdul Jabbar Siddiqui, M. Sc. A.
Abdelhamid Mammeri, Ph. D.

Centre de recherche sur l'automobile et les transports de surface
Conseil national de recherches Canada

Mise à jour : mai 2021



© 2021 Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le Conseil national de recherches du Canada.

N° de cat. NR16-354/2021F-PDF

ISBN 978-0-660-38803-8

Table des matières

Résumé	14
1 Introduction	16
1.1 Contexte	16
1.2 Modes de communications	17
1.3 But et objectifs	17
1.4 Méthodologie et portée de l'étude	18
1.5 Limites	19
1.6 Structure du rapport.....	19
2 Aperçu des technologies de connectivité.....	20
2.1 Réseaux des véhicules connectés	20
2.1.1 Caractéristiques du réseau	21
2.1.2 Technologies d'accès	22
2.1.3 Types de messages	27
2.2 Exigences relatives aux performances du réseau	28
2.3 Principaux intervenants	30
3 Cas d'utilisation essentiels à la sécurité	32
3.1 Mesure de la sécurité	32
3.2 Alerte et évitement de collision.....	33
3.2.1 Aperçu.....	33
3.2.2 Mises en œuvre recensées.....	34
3.3 Surveillance des angles morts.....	35
3.3.1 Aperçu.....	35
3.3.2 Mises en œuvre recensées.....	35
3.4 Changement de voie coopératif.....	36
3.4.1 Aperçu.....	36
3.4.2 Mises en œuvre recensées.....	36
3.5 Freinage d'urgence coopératif.....	40
3.5.1 Aperçu.....	40
3.5.2 Mises en œuvre recensées.....	41
3.6 Gestion des intersections	42
3.6.1 Aperçu.....	42
3.6.2 Mises en œuvre recensées.....	42
3.7 Convergence coopérative pour accéder à une autoroute	44
3.7.1 Aperçu.....	44
3.7.2 Mises en œuvre recensées.....	45
3.8 Feux électroniques de freinage d'urgence	48
3.8.1 Aperçu.....	48
3.8.2 Mises en œuvre recensées.....	49
3.9 Protection des usagers vulnérables de la route	49
3.9.1 Aperçu.....	49
3.9.2 Mises en œuvre recensées.....	50

3.10	Signallement et alerte de zones de travaux routiers	52
3.10.1	Aperçu	52
3.10.2	Mises en œuvre recensées	52
3.11	Alerte de convergence	54
3.11.1	Aperçu	54
3.11.2	Mises en œuvre types	55
3.12	Alerte de non-respect de panneaux d'arrêt	55
3.12.1	Aperçu	55
3.12.2	Mises en œuvre recensées	55
3.13	Assistant de distance aux panneaux d'arrêt	55
3.13.1	Aperçu	55
3.13.2	Mises en œuvre recensées	56
3.14	Alerte de non-respect de feux de circulation	56
3.14.1	Aperçu	56
3.14.2	Mises en œuvre recensées	56
3.15	Signalisation prioritaire pour le transport en commun CV	56
3.15.1	Aperçu	56
3.15.2	Mises en œuvre recensées	57
3.16	Passage à niveau de chemin de fer	57
3.16.1	Aperçu	57
3.16.2	Mises en œuvre recensées	57
3.17	Régulation et harmonisation de la vitesse des CV	58
3.17.1	Aperçu	58
3.17.2	Mises en œuvre recensées	59
3.18	Priorité accordée aux véhicules d'urgence constituant des CV	59
3.18.1	Aperçu	59
3.18.2	Mises en œuvre recensées	59
4	Applications non liées à la sécurité	61
4.1	Alerte de congestion de la circulation	61
4.1.1	Aperçu	61
4.1.2	Mises en œuvre recensées	61
4.2	Régulateur de vitesse adaptatif coopératif	62
4.2.1	Aperçu	62
4.2.2	Mises en œuvre recensées	62
4.3	Gestion des éco-voies	62
4.3.1	Aperçu	62
4.4	Éco-acheminement dynamique	63
4.4.1	Aperçu	63
4.4.2	Mises en œuvre recensées	63
4.5	Gestion des stationnements intelligents	64
4.5.1	Aperçu	64
4.5.2	Mises en œuvre recensées	64
4.6	Infodivertissement à bord	65
4.6.1	Aperçu	65
4.6.2	Mises en œuvre recensées	66

4.7 Perception électronique des péages	66
4.7.1 Aperçu	66
4.7.2 Mises en œuvre recensées.....	67
4.8 Mises à jour en direct	70
4.8.1 Aperçu	70
4.8.2 Mises en œuvre recensées.....	71
4.9 Avis sur la météo routière.....	72
4.9.1 Aperçu.....	72
4.9.2 Mises en œuvre recensées.....	72
5 Résumé des constatations et conclusion.....	73
5.1 Questions de la recherche et réponses.....	73
5.2 Conclusions	Error! Bookmark not defined.
5.2.1 Aspects technologiques	75
5.2.2 Aspects liés au déploiement et à la réglementation	76
5.3 Mot de la fin	77
Remerciements	78
Références.....	79

Liste des tableaux

Tableau 1 : Différences principales entre les technologies d'accès IEEE 802.11p, LTE-V2X et NR-V2X [31], [33], [35] et [36].	27
Tableau 2 : Technologies LPWAN des véhicules connectés [44].	27
Tableau 3 : Messages divers des technologies des véhicules connectés [46] et [47].	28
Tableau 4 : Résumé des exigences relatives à la QS dans les applications V2X d'après [38], [50], [51] et [52].	30
Tableau 5 : Exigences établies concernant le cas d'utilisation de la convergence de voies coopérative [102].	46
Tableau 6 : Analyse comparative des performances de la convergence coopérative par rapport à la convergence effectuée par un être humain [109].	48
Tableau 7 : Rendement et niveau d'exactitude de différentes technologies de perception des péages [178] et [179].	67
Tableau 8 : Échelle de cotation et d'évaluation de l'incidence sur la confidentialité [178].	69
Tableau 9 : Niveaux de confidentialité assurés aux usagers de la route par divers systèmes de paiement [178].	69

Liste des figures

Figure 1 : Avantages de la mise en œuvre des fonctionnalités d’automatisation de la conduite C-V2X [5]. 17

Figure 2 : Scénarios des communications VANET : communications V2V directes et assistées par les infrastructures [9]. 21

Figure 3 : Attribution du spectre des fréquences pour les applications DSRC au sein de diverses administrations [26]. 23

Figure 4 : Exemple d’évitement d’une collision au moyen de la technologie C-V2X et DSRC [34]. Le véhicule équipé de la technologie C-V2X dispose d’une distance d’arrêt plus grande en raison d’une portée de communications plus grande. 24

Figure 5 : Modes de communications V2X [37]. 25

Figure 6 : Modes de communications C-V2X différents [38]. 25

Figure 7 : Principaux intervenants des applications V2X [53]. 31

Figure 8 : Pile technologique et flux de données dans la plateforme d’essai documentée dans la référence [84]. 38

Figure 9 : Scénario d’essai dans la référence [84] concernant le changement de voie coopératif et la manœuvre de convergence afin de rejoindre un peloton automatisé. 39

Figure 10 : Illustration du réseau routier simulé utilisé dans la référence [83]. 40

Figure 11 : Scénario type de convergence coopérative pour accéder à une autoroute [100]. 45

Figure 12 : Trois types de configurations de voies en convergence pour accéder à une autoroute aux États-Unis [100]. 45

Figure 13 : Convergence coopérative proposée dans la référence [109]. 47

Figure 14 : Scénario d’essai sur le terrain de la convergence coopérative de véhicules connectés pour accéder à une autoroute [110]. 47

Figure 15 : Application EEBL activée par la perception collaborative, de la manière décrite dans la référence [115]. 49

Figure 16 : UVR à une traverse masqué par la présence d’un véhicule stationné, tel que décrit dans la référence [122]. 50

Figure 17 : Protection des UVR rendue possible grâce à la connectivité V2P de la société Important Safety Technologies (© Important Technologies Inc.). 51

Figure 18 : Schéma de l’architecture du système RWW dans la référence [133]. 53

Figure 19 : Alerte de zones de travaux routiers au tableau de bord du SUV Q8 d’Audi [134]. 54

Figure 20 : Essai sur le terrain d’un passage à niveau fondé DSRC, par l’Université La Trobe [150]. 58

Figure 21 : Infrastructure type de la AETC à circulation libre (autoroute express à péage 407 au Canada [180]). 68

Figure 22 : Procédure de mise à jour locale d’un logiciel [182]. 70

Figure 23 : Procédure de mise à jour à distance d’un logiciel [182]. 70

Liste des abréviations

Abréviation	Définition
2D	Bidimensionnel
3D	Tridimensionnel
3GPP	Projet de partenariat de troisième génération
5G	Télécommunications sans fil de cinquième génération
ACC	Régulateur de vitesse adaptatif
ADAS	Système avancé d'aide à la conduite
AEB	Freinage d'urgence automatisé/automatique/autonome
AERIS	Applications for the Environment: Real-Time Information Synthesis
ARIB	Association of Radio Industries and Businesses
BCDECD	Base canadienne de données de l'état civil – Décès
BSM	Message de sécurité de base
C2C-CC	CAR 2 CAR Communication Consortium
CACC	Régulateur de vitesse adaptatif coopératif
CAM	Message de connaissance coopérative
CAN	Réseau de contrôleurs
CCA	Évitement de collision coopératif
CCATM	Conseil canadien des administrateurs en transport motorisé
CCW	Alerte de collision coopérative
DSRC	Communications dédiées sur courte distance
CIB	Freinage imminent en cas d'accident
CICAS	Systèmes d'évitement de collision coopératif aux intersections
CO2	Dioxyde de carbone
CPM	Message de perception collective
CSM	Message de détection coopérative
C-V2X	Cellulaire entre véhicules et autre chose

Abréviation	Définition
CVRIA	Architecture de mise en œuvre de référence des véhicules connectés
D2D	Entre appareils
DBS	Assistance dynamique au freinage
DEL	Diode électroluminescente
DENM	Message de notification d'environnement décentralisé
DL	Liaison descendante
DQN	Deep Q-Network
É.-U.	États-Unis
EEBL	Feu électronique de freinage d'urgence
eNB	Nœud E-UTRAN B ou nœud évolué B
ETR	Autoroute express à péage
ETSI	Institut européen des normes de télécommunication
EU	Équipement de l'utilisateur
EVP	Priorité accordée aux véhicules d'urgence
FCC	Federal Communications Commission
FCD	Données de voiture flottante
FEO	Fabricant d'équipement d'origine
FHWA	Federal Highway Administration de la USDOT
GDM	Carte dynamique globale
GHz	Gigahertz (mesure de la fréquence)
GNSS	Système mondial de navigation par satellite
GPRS	Service général de paquets radio
GPS	Système mondial de localisation
GSM	Système mondial de communications avec les mobiles
GTI	Gestion des technologies de l'information
HD	Haute définition
Hz	Hertz (mesure de la fréquence)
I2I	Communication entre infrastructures

Abréviation	Définition
I2V	Communication entre infrastructures et véhicules
IA	Intelligence artificielle
IdO	Internet des objets
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IHM	Interface homme-machine
IRF	Identification par radiofréquence
ISO	Organisation internationale de normalisation
ITS	Système de transport intelligent
ITS-G5	Norme européenne relative aux communications ponctuelles à courte portée entre véhicules (V2V) et entre véhicules et stations routières de STI (V2I). Fait référence à la modification approuvée de la norme IEEE 802.11 (norme IEEE 802.11p).
ITS-G5A	ITS-G5 dans des plages de fréquences concernant des applications relatives à la sécurité
IVI	Information/infodivertissement à bord
kHz	Kilohertz (mesure de la fréquence)
km²	Kilomètre carré (mesure de la superficie)
LA	Los Angeles
LiDAR	Détection et télémétrie par ondes lumineuses
LIN	Réseau d'interconnexion local
LOS	Visibilité directe
LPWAN	Réseau étendu de faible puissance
LTE	Évolution à long terme
LTE-V2X	LTE-entre véhicules et autre chose
m	Mètre (mesure de la longueur)
M2M	Entre machines
MaaS	Mobilité en tant que service
MAB	dSpace MicroAutoBox
MANET	Réseaux spéciaux mobiles
MB	Manitoba

Abréviation	Définition
Mbit/s	Mégabit par seconde (mesure de la vitesse)
MCM	Message de coordination de manœuvres
MHz	Mégahertz (mesure de la fréquence)
ms	Milliseconde (mesure du temps)
ms⁻²	Mètre par seconde carré (mesure de l'accélération)
N1	Véhicules automatisés de niveau SAE 1
N2	Véhicules automatisés de niveau SAE 2
N3	Véhicules automatisés de niveau SAE 3
N4	Véhicules automatisés de niveau SAE 4
N5	Véhicules automatisés de niveau SAE 5
N-IMC	Coordonnateur de gestion des intersections non signalisées
NLOS	Sans visibilité directe
NMT	Niveau de maturité technologique
NR-V2X	Norme portant sur les communications entre les véhicules et autre chose et fondée sur l'interface hertzienne 5G NR (nouvelle radio)
OBU	Unité intégrée
ON	Ontario
OT	Orchestracteur du trafic
OTA	En direct
PCM	Message de régulation de la conduite en peloton
PD	Photodétecteur
AETC	Perception entièrement électronique des péages
ETC	Perception électronique des péages
PLR	Rapport de perte de paquets
PTC	Commande intégrale des trains
QS	Qualité du service
RAN	Radio Access Network
RAPI	Reconnaissance automatique de plaques d'immatriculation

Abréviation	Définition
RC	Réseau central
RDS	Radio Data System
RSA	Rivest-Shamir-Adleman (chiffrement)
RSU	Unité en bord de route
RV	Réseaux de véhicules
RWW	Alerte de zones de travaux routiers
SAE	Society of Automotive Engineers
SCA	Système de conduite automatisée
SL	Liaison latérale
SPaT	Signalisation et synchronisation
SPTC	Signalisation prioritaire pour le transport en commun
STD	Norme
SUV	Véhicule utilitaire sport
TC	Transports Canada
THEA	Tampa Hillsborough Expressway Authority
TMC	Canal de messages sur la circulation
TMI	Message de renseignements aux voyageurs
UCE	Unités de commande électronique
UCT	Unité de commande télématique
UE	Union européenne
UIT-R	Secteur des radiocommunications de l'Union internationale des télécommunications
UL	Liaison montante
UMTS	Système de télécommunications mobiles universelles
URLLC	Communications ultra-fiables à faible latence
USDOT	Département des transports des États-Unis
UVR	Usager vulnérable de la route
V2B	Communication entre véhicules et largeur de bande
V2I	Communication entre véhicules et infrastructures

Abréviation	Définition
V2N	Communication entre véhicules et réseaux
V2P	Communication entre véhicules et piétons
V2V	Communication entre véhicules
V2X	Communication entre véhicules et autre chose
VAC	Véhicule autonome connecté
VANET	Réseau de véhicule spécial
CV	Véhicule connecté
VCT	Voie de covoiturage tarifée
VDOT	Virginia Department of Transportation
VLC	Communication à la lumière visible
VMO	Véhicule multioccupants
VSC-A	Applications de communications de sécurité des véhicules
VTTI	Virginia Tech Transportation Institute
WiMAX	Interopérabilité mondiale des accès d'hyperfréquences
WLAN	Réseau étendu sans fil
WYDOT	Wyoming Department of Transportation

Résumé

Les technologies des véhicules connectés (CV) utilisent les communications sans fil pour échanger de l'information sur la connaissance de la situation et sur le mouvement entre les véhicules, l'infrastructure, Internet et les autres usagers de la route qui sont équipés de dispositifs connectés (par exemple, les piétons et les cyclistes). V2X est un terme générique qui fait référence aux divers modes de communications d'un réseau de CV, y compris les communications entre les véhicules (V2V), les véhicules et l'infrastructure (V2I), les véhicules et les réseaux (V2N) et entre les véhicules et les piétons (V2P). Les technologies d'accès sans fil telles que le DSRC basé sur IEEE 802.11p et le C-V2X basé sur LTE et 5G permettent le partage de données extra-véhiculaire dans un réseau ad-hoc véhiculaire (VANET). Le partage de données dans des réseaux VANET offre un certain nombre de fonctions principales qui pourraient procurer potentiellement des avantages en matière de sécurité accrue et sur le plan environnemental. Ces fonctions sont les suivantes : (a) détection coopérative et connaissance de la situation rendues possibles par le partage de données des capteurs embarqués et des données GNSS (système mondial de navigation par satellite) fournies par le réseau aux fins de localisation précise; (b) manœuvres coopératives rendues possibles par le partage de l'information relative à l'intention et à la trajectoire des véhicules avoisinants, de façon à ce que leur mouvement puisse être coordonné dans le but d'accomplir des manœuvres complexes, comme la convergence de voies, le dépassement et la formation d'un peloton; (c) gestion de la circulation coopérative où les communications sans fil sont utilisées pour accroître la sécurité et le débit du système de réseaux routiers. Ces fonctions principales pourraient améliorer la sécurité de tous les usages de la route.

En conséquence, les applications des CV qui font intervenir ces fonctions principales ont été regroupées en tant qu'applications essentielles à la sécurité dans le présent rapport. L'alerte et l'évitement de collision coopératifs, le changement de voie coopératif, la surveillance des angles morts, la gestion des intersections et la protection des usagers vulnérables de la route (UVR) en sont des exemples. Il existe une autre catégorie d'applications des CV qui sont développées en premier lieu aux fins de commodité et d'efficacité des systèmes de circulation. Dans le présent rapport, ces applications sont regroupées comme étant des applications non liées à la sécurité. La commodité et l'efficacité des systèmes de circulation sont les deux buts de ces applications des CV, mais des avantages en matière de sécurité accrue et sur le plan environnemental, comme la réduction des émissions des gaz à effet de serre (GES), peuvent également découler de celles-ci. À titre d'exemples de ces applications, mentionnons l'alerte de congestion de la circulation, la régulation de vitesse adaptative coopérative, la gestion des éco-voies et la perception électronique des péages.

Un certain nombre de projets pilotes impliquant des universités, des constructeurs de réseaux sans fil, des constructeurs automobiles, des organismes publics ainsi que des fournisseurs de logiciels et de matériel de connectivité sans fil ont été lancés au cours des dernières années, afin de faciliter la collaboration, ainsi que de mettre en œuvre les formidables technologies des CV et d'en faire la démonstration physique. Il s'est avéré que l'accent principal de ces technologies a été mis sur le développement de fonctions et sur d'autres questions opérationnelles, comme la caractérisation des performances minimales des réseaux afin de permettre un déploiement efficace des applications. Des mesures de sécurité classiques, comme celles liées à l'évitement de collisions, à la possibilité de réduire le nombre de blessures et au recensement du nombre d'accidents mortels par million de milles parcourus, ont été utilisées dans une partie de la

littérature afin de valider les allégations de sécurité affirmées d'après les données obtenues d'études de simulation et d'essais sur le terrain. En raison du défi inhérent au déroulement d'essais sur le terrain pour recueillir un jeu de données assez volumineux pour obtenir des déductions statistiquement significatives, il a été constaté que la simulation a été l'outil de validation de la sécurité le plus couramment utilisé dans la littérature connexe.

Les vulnérabilités en matière de sécurité associées aux applications des CV sont dues à deux sources principales : (a) les limites opérationnelles du réseau; (b) la sécurité du réseau. Les limites opérationnelles peuvent survenir lorsque la hausse de la demande en ressources, la portée limitée d'un réseau ou le brouillage des signaux occasionnent une réduction de la disponibilité du réseau, une perte de paquets, un accroissement du taux de latence des paquets, etc., à tel point que l'application de CV sous-jacente ne peut pas fonctionner efficacement. Une hausse de la demande en ressources peut se produire lorsqu'un grand nombre de nœuds participent au réseau (par exemple, une rue bondée avec un grand nombre de nœuds de véhicules) ou lorsque la largeur de bande de réseau disponible ne peut pas prendre en charge le trafic du réseau. L'absence d'une visibilité directe (LOS) entre deux nœuds de communications contribue à l'augmentation du brouillage des signaux et à la perte possible de paquets. En raison des limites opérationnelles susmentionnées, une application de CV pourrait ne plus fonctionner efficacement dans le but d'assurer une sécurité accrue des usagers de la route. De plus, en cas de compromission de la sécurité du réseau de CV par des cybercriminels, même en l'absence des limites opérationnelles, l'application pourrait ne plus maintenir son but lié à la sécurité. Une cyberattaque pourrait inonder le réseau de messages non pertinents afin de refuser l'accès aux autres nœuds ou elle pourrait transmettre de l'information inexacte en matière de détection et de mouvement afin de perturber le fonctionnement normal de l'application de CV. Bien qu'il s'agisse d'un enjeu de sécurité, et puisque les applications des CV sont souvent jumelées aux technologies d'automatisation des véhicules, un événement de sécurité peut conduire à un événement de sûreté. Par exemple, un ennemi peut nuire à l'écoulement de la circulation sur une autoroute en diffusant une fausse situation de collision.

Les technologies des CV peuvent accroître la sécurité routière. Puisque les technologies des CV peuvent fournir de l'information permettant une connaissance de la situation au-delà de la LOS et qu'elles peuvent également transmettre des données de précision concernant la localisation des véhicules sur une voie, on peut soutenir que les véhicules hautement automatisés intégreront de façon native des fonctions de CV aux fins de fiabilité et de redondance. Le développement des technologies des CV rassemble un groupe d'intervenants hétérogènes, comme les organismes publics, les FEO du marché de l'automobile et l'industrie des télécommunications. Il est absolument nécessaire de surmonter les défis logistiques liés à l'établissement d'une collaboration efficace pour procéder à un développement rapide et au déploiement bien dirigé des technologies des CV.

1 Introduction

1.1 Contexte

Les technologies des véhicules connectés (CV) utilisent les communications sans fil pour permettre le partage d'information entre les véhicules et l'infrastructure connectée. Au cours des dernières décennies, des recherches ont été menées au sujet de l'infrastructure et des véhicules connectés, mais ces technologies, à quelques exceptions près, restent à être déployées à grande échelle. Dès 1926 [1], il a été proposé dans la littérature de recourir aux communications sans fil faisant appel à un système d'alerte radio entre les véhicules, mais ce n'est qu'en 2015 que le grand constructeur automobile Toyota a annoncé des plans visant la production de véhicules dotés de fonctions connectées et destinés au marché japonais [2]. Toutefois, des reportages publiés ultérieurement en 2019 indiquent que des plans comparables concernant le marché américain ne se sont pas concrétisés [3].

On peut soutenir que les technologies habilitantes à l'appui des applications des CV performantes, comme l'accès sans fil mobile, l'informatique intégrée, le réseau fédérateur et les algorithmes de contrôle et d'ordonnancement, sont déjà arrivées au niveau de maturité nécessaire. L'absence d'une adoption massive des technologies des CV peut être attribuable à un grand ensemble de défis liés ou non aux technologies. Ceux qui ne sont pas propres aux technologies ont trait notamment à la perception humaine et au comportement correspondant, aux questions juridiques, à la nécessité d'une collaboration entre les intervenants dont la composition est hétérogène (par exemple, les organismes gouvernementaux et de réglementation, les développeurs de technologies, les propriétaires et les exploitants routiers, les propriétaires et les exploitants du spectre réseau, les distributeurs et les fournisseurs de matériel et de logiciels de connectivité de même que les organismes d'homologation) ainsi qu'à l'harmonisation des lignes directrices et normes, globalement et au plan régional. Les défis relatifs aux technologies concernent, quant à eux, la nécessité d'élaborer des normes en matière d'interopérabilité entre les diverses industries (par exemple, le secteur de l'automobile, de l'infrastructure et des télécommunications) et de tirer parti de technologies de réseau sûres et résilientes, capables de respecter les exigences liées aux performances particulières aux applications.

Malgré ces défis technologiques, logistiques, juridiques et sociétaux, les technologies des CV peuvent donner lieu à une transformation sans précédent dans le secteur des transports. Par exemple, le Département des transports des États-Unis (USDOT) a estimé que les systèmes arrivés à maturité permettant le partage d'information entre les véhicules pourraient réduire d'environ 80 p. cent l'ensemble des accidents de la route aux États-Unis [4]. Outre les avantages en matière de sécurité, les technologies des CV en offriront d'autres sur les plans de la mobilité (par exemple, durée de déplacement réduite) et de l'environnement (par exemple, réduction des émissions). En comparaison des technologies embarquées d'automatisation de la conduite, comme les systèmes avancés d'aide à la conduite (ADAS) ou les systèmes de conduite automatisée (SCA), lesquels dépendent principalement de capteurs en visibilité directe (LOS) montés sur le véhicule pour obtenir une connaissance de la situation, les technologies des véhicules connectés permettent d'accroître cette dernière (voir la Figure 1). De plus, les technologies des CV permettent aux systèmes d'automatisation des véhicules de coordonner leurs mouvements pour exécuter en collaboration des manœuvres complexes, comme la convergence de voies.

1.2 Modes de communications

Le partage d'information dans une application de CV peut s'effectuer entre de nombreux types de nœuds différents. Certaines de ces combinaisons sont présentées ci-dessous, en avant-propos de la discussion subséquente :

- La communication entre les véhicules (V2V) fait intervenir deux nœuds de véhicules.
- La communication entre les véhicules et les infrastructures (V2I/I2V) fait référence à l'échange d'information entre les infrastructures routières et les nœuds de véhicules.
- Les communications entre les véhicules et les réseaux (V2N) concernent l'échange de données entre un véhicule et Internet, comme des serveurs infonuagiques.
- Les communications entre les véhicules et les piétons (V2P) font participer des véhicules et des dispositifs connectés portés ou transportés par des piétons.
- Les communications entre les véhicules et autres objets (V2X) est un terme générique visant à inclure tous les types de communications effectuées dans un réseau de CV.

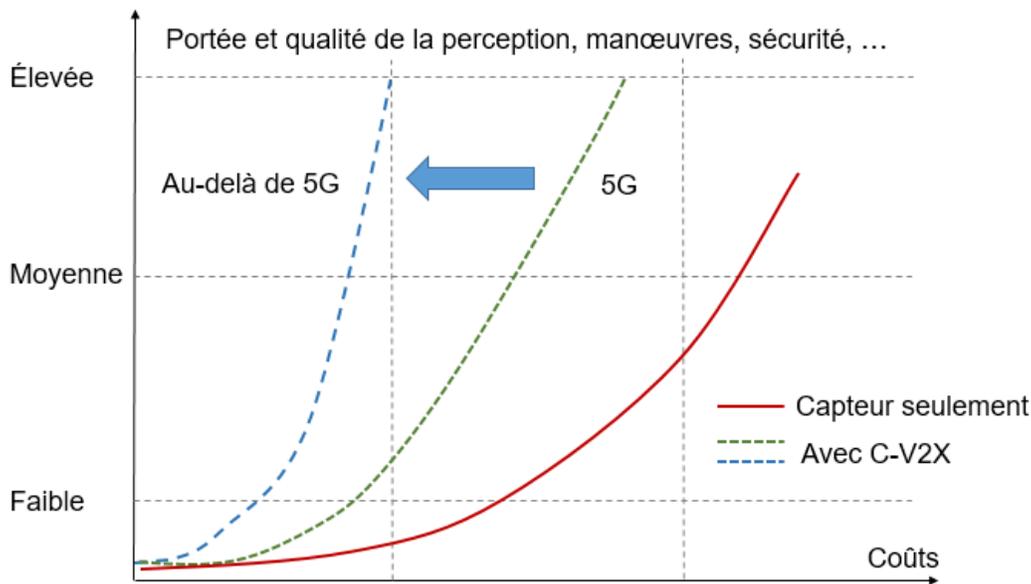


Figure 1 : Avantages de la mise en œuvre des fonctionnalités d'automatisation de la conduite C-V2X¹ [5].

1.3 But et objectifs

Un certain nombre de types différents de technologies des CV permettant d'assurer la connectivité sont en cours de développement (par exemple, DSRC et C-V2X). Le présent revue technologique systématique des technologies ne vise pas à déterminer quelle technologie des CV offre les performances optimales, mais plutôt à explorer les avantages possibles en matière de sécurité et les limites que les technologies

¹ Cette figure montre comment la capacité de perception (c'est-à-dire la capacité de caractériser rapidement l'environnement de conduite à partir de données brutes et non structurées) des capteurs embarqués peut être améliorée grâce aux technologies C-V2X. Les technologies 5G permettront d'accroître grandement la qualité de la perception et on s'attend à ce que les technologies futures (c'est-à-dire celles au-delà de 5G) comportent d'autres améliorations.

des véhicules connectés pourraient comporter dans leur ensemble pour les Canadiens, peu importe les technologies utilisées pour mettre en œuvre l'application. À ce titre, cette revue technologique est neutre sur le plan des technologies et est axé sur la compréhension des cas d'utilisation et des avantages généraux en matière de sécurité, et sur les défis en matière de sécurité associés aux technologies des CV qu'il faudrait devoir relever afin de veiller à ce que ces dernières puissent être utilisées de manière sécuritaire sur les routes au Canada. Par conséquent, l'objectif global de ce projet est de fournir à Transports Canada (TC) une revue technique systématique des cas d'utilisation en matière de sécurité des technologies des CV, y compris des travaux de recherche menés à ce jour concernant les avantages possibles en matière de sécurité et les limites techniques pouvant donner lieu à des vulnérabilités en matière de sécurité.

Le présent rapport cherche à répondre aux questions de recherche précises suivantes :

- Quels sont les avantages concrets (mesurables) en matière de sécurité des technologies des CV?
- Quels cas d'utilisation sont envisagés pour les technologies des CV afin d'accroître précisément la sécurité, peu importe les modes de communications (par exemple, V2V, V2I, V2P et V2X)?
- Quels travaux de recherche ont été menés à ce jour afin de démontrer les avantages possibles en matière de sécurité de ces cas d'utilisation?
- Quel niveau de déploiement doit être atteint avant que ces avantages importants en matière de sécurité puissent être obtenus?
- Ces avantages en matière de sécurité sont-ils exclusifs aux technologies des CV ou peuvent-ils être obtenus au moyen d'autres technologies ou de capteurs sur le marché ou en cours de développement (par exemple, automatisation des véhicules, haute définition et cartographie en temps réel)?
- Quelles sont les limites ou vulnérabilités en matière de sécurité associées aux technologies des véhicules connectés (par exemple, latence, perte du signal, encombrement et interférence, exigences en matière d'infrastructure et interopérabilité, et limites relatives aux conditions météorologiques)?
- Ces limites ou vulnérabilités en matière de sécurité sont-elles propres aux opérations dans les diverses conditions de conduite au Canada (par exemple, régions rurales et éloignées, variations géographiques et conditions hivernales)?

Les réponses à ces questions sont résumées à la section 5.1 d'après la littérature examinée.

1.4 Méthodologie et portée de l'étude

La présente revue technique a été menée d'après une analyse par des experts de la littérature connexe, laquelle regroupe ceci :

- Lignes directrices et rapports publiés par des organismes de réglementation et d'homologation, de même que du consortium de l'industrie.
- Matériel de promotion des technologies fourni par des propriétaires de spectre et des fabricants d'équipement.
- Rapports de projets pilotes sur les CV effectués par des exploitants routiers.
- Livres/papiers blancs publiés par des intervenants de l'industrie.
- Revues à comité de lecture et documents de conférence publiés par des organismes de recherche, y compris des universités.

Un grand ensemble de ces documents a fait l'objet d'un examen; et des concepts, des données et des renseignements provenant d'un sous-ensemble d'entre eux (environ 200 références) ont été jugés pertinents au présent examen technique. Des concepts opérationnels et des cas de mise en œuvre ont été décrits pour un total de 26 cas d'utilisation. Les publications des organismes de réglementation décrivent un grand nombre d'idées concernant des cas d'utilisation des CV. Toutefois, seulement un sous-ensemble de ces dernières a été décrit dans la littérature connexe, avec des cas de mise en œuvre dans un environnement de simulation ou dans le cadre d'essais pilotes. Parmi les 26 cas d'utilisation examinés, 17 ont été classés comme étant des applications essentielles à la sécurité.

1.5 Limites

Bien que tous les efforts aient été déployés afin d'inclure l'information la plus à jour qui soit accessible dans la littérature du domaine public, il n'est pas possible de garantir que toute l'information pertinente a été passée en revue. Afin de réduire le plus possible la possibilité de telles omissions involontaires, le rapport a été soumis à de multiples évaluations internes et externes. De plus, du contenu et des données provenant de sources fiables et, dans la mesure du possible, à comité de lecture ont servi au présent rapport. L'intégrité des références a été considérée comme implicite.

1.6 Structure du rapport

Le rapport est structuré de la manière qui suit, afin de favoriser une discussion ciblée. La section 2 donne un aperçu des technologies de connectivité. Les cas d'utilisation essentiels à la sécurité des technologies des CV sont examinés à la section 3. Un certain nombre d'applications non liées à la sécurité font l'objet d'une discussion à la section 4. Enfin, les constatations sont résumées à la section 5.

2 Aperçu des technologies de connectivité

Les capteurs de perception, les actionneurs, les unités de commande électronique (ECU) et les composants logiciels intégrés offrent aux véhicules modernes de l'information sans précédent sur la connaissance de la situation, laquelle leur permet d'appliquer des manœuvres de conduite correctives et préventives en cas de détection de conditions non sécuritaires. La prétention des ceintures de sécurité et le freinage automatique en cas de collisions imminentes, le centrage automatisé dans la voie et la régulation de vitesse adaptative en sont des exemples. D'après la portée opérationnelle et les exigences en matière de supervision humaine, ces capacités sont appelées collectivement des systèmes avancés d'aide à la conduite (ADAS) et des systèmes de conduite automatisée (SCA) dans la littérature connexe. La portée des fonctions ADAS et SCA peut être encore plus grande si les véhicules peuvent échanger de l'information avec d'autres entités (par exemple, d'autres véhicules, des piétons, des cyclistes et des infrastructures). La connaissance et le contrôle de la situation que permet le partage de données extravéhiculaire pourrait accroître la sécurité routière, aider les véhicules à éviter les collisions et en réduire le plus possible les effets, diminuer la consommation de carburant et l'empreinte carbone, et réduire les coûts d'exploitation, grâce à l'instauration de la détection distribuée, du calcul à distance et de l'actionnement coordonné à des échelles plus grandes que celles que pourrait procurer un simple véhicule [6] et [7]. En outre, il est possible, en tirant parti des avantages éventuels des technologies connectées, de régler les questions concernant les limites en matière de performances des systèmes d'automatisation de la conduite non connectés (en particulier en ce qui a trait aux cas d'utilisation en matière de sécurité), en raison de la portée limitée de la détection intégrée (par exemple, qui n'est pas disponible au-delà de la visibilité directe), et celles liées au manque de coordination ou de connaissances propres au mouvement et aux intentions d'autres acteurs dans un scénario sur les routes.

Un certain nombre de technologies de base permettent d'assurer le partage de données extravéhiculaire et d'agir en fonction de l'information reçue, si nécessaire. Au niveau des véhicules, ces technologies sont les capteurs, les actionneurs, les ECU et les réseaux de données intravéhiculaires, comme le bus CAN (réseau de contrôleurs) et le LIN (réseau d'interconnexion local), qui constituent un moyen d'échange de l'information dans le véhicule. Bien que ces composants intégrés soient des éléments constitutifs essentiels pour favoriser la connaissance de la situation et faciliter la prise de mesures fondées sur des données, le présent rapport met l'accent sur les technologies de base qui sont externes par rapport aux véhicules. En conséquence, les réseaux de communications des CV font l'objet de la section qui suit.

2.1 Réseaux des véhicules connectés

Les réseaux de communications des véhicules peuvent être considérés comme un sous-ensemble du concept classique de réseaux de communications entre machines (M2M) ou appareils (D2D) [8]. Dans la littérature, divers termes sont utilisés pour faire référence aux réseaux de CV afin de décrire leur topologie, les modes d'exploitation, les types de nœuds membres et leurs fonctions.

Les réseaux de véhicules ad-hoc (VANET) constituent l'un des concepts fondamentaux dans la littérature des réseaux de communications des CV. Un VANET est un réseau de CV à organisation libre composé de nœuds mobiles (par exemple, un véhicule) et fixes déployés dans les infrastructures et interconnectés

grâce à des liaisons sans fil [9]. Il s'agit d'un sous-ensemble d'un concept plus vaste de réseaux spéciaux mobiles (MANET) [10]. Les nœuds dans un VANET peuvent être de deux types : (a) unités intégrées (OBU) aux véhicules afin de représenter les nœuds de véhicules; (b) unités en bord de route (RSU) afin de fournir aux infrastructures l'appui nécessaire aux communications entre les véhicules (V2V) et entre les véhicules et les infrastructures (V2I) [9] et [11]. Selon la topologie de réseau et la situation présente, chaque nœud d'un VANET pourrait jouer le rôle d'émetteur, de récepteur et de routeur à des degrés divers. Dans certains cas, un nœud doit jouer les trois rôles. L'OBU de chaque nœud de véhicule traite l'information recueillie de capteurs intégrés et d'UCE et peut échanger celle-ci directement avec l'OBU d'un autre véhicule situé à proximité (communications V2V) ou par l'entremise d'une RSU afin de communiquer avec un autre véhicule qui pourrait ne pas se trouver assez près pour permettre une communication directe. Dans le dernier cas, la RSU sert de routeur. Celle-ci peut également être connectée à Internet afin de permettre des communications entre infrastructures (I2I) [12]. Dans certains documents, les communications V2I sont aussi appelées des communications entre les véhicules et les RSU (V2R) (par exemple, [13]).

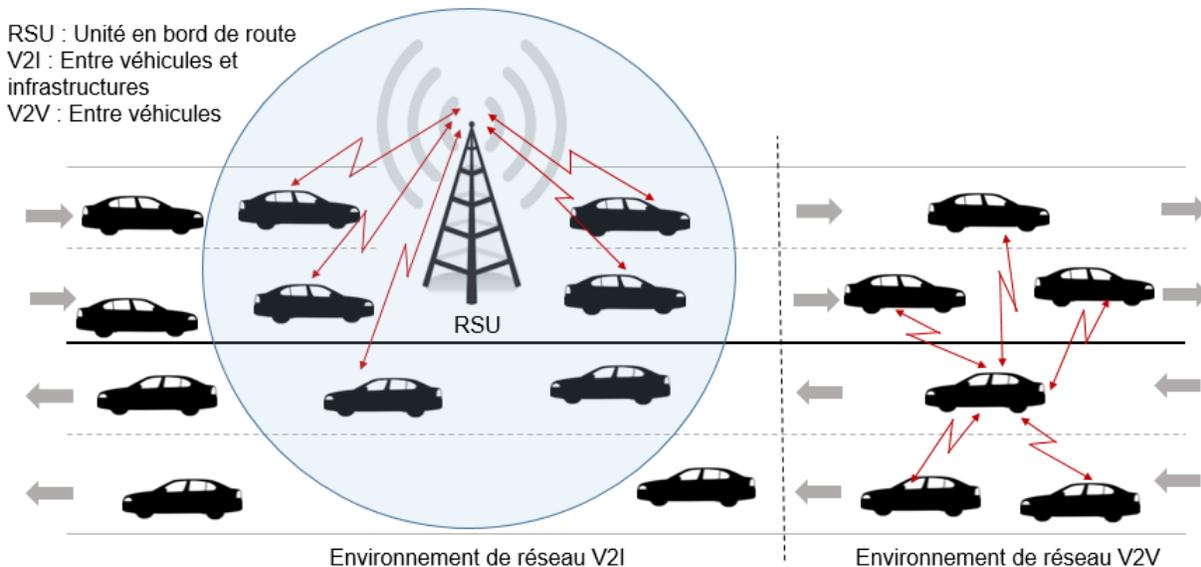


Figure 2 : Scénarios des communications VANET : communications V2V directes et assistées par les infrastructures [9].

2.1.1 Caractéristiques du réseau

Les caractéristiques et exigences suivantes sont mentionnées dans les documents [14], [15] et [16] comme préalables à un réseau VANET performant :

- **Topologie dynamique** : selon la densité et la proximité du trafic, une collection aléatoire de véhicules peut former un VANET pour les communications V2V et V2I. Les nœuds mobiles représentés par ces véhicules peuvent entrer dans le réseau ou en sortir à des vitesses élevées. Par conséquent, un VANET doit être assez robuste pour fonctionner en dépit de la topologie dynamiquement changeante.
- **Taille du réseau** : un VANET doit permettre des scénarios dans lesquels il doit héberger un certain nombre de nœuds (par exemple, lors d'une congestion du trafic ou dans des zones urbaines densément peuplées) représentés par une forte densité de véhicules sur une route. Le défi devient plus grand pour satisfaire à cette exigence alors que s'accroît la dynamique de la topologie de réseau sous-jacente.

- **Performances en temps réel** : les applications de sécurité qui dépendent d'un VANET requièrent des performances en temps réel pour des scénarios dont l'horizon est à court terme, comme des manœuvres d'évitement de collisions ou d'atténuation coopérative des collisions. Le temps maximum permis pour l'échange de messages essentiels à la sécurité doit être suffisant pour que les véhicules puissent déterminer, lancer et terminer la manœuvre de sécurité requise.
- **Sécurité et confidentialité** : la sécurité et la confidentialité peuvent être considérées comme deux exigences concurrentes d'un VANET. Un réseau sûr exige que tous les nœuds aient été authentifiés afin d'empêcher des acteurs malveillants de perturber les opérations de réseau. Puisque l'authentification des nœuds signifie fondamentalement qu'il faut distinguer les véhicules autorisés des acteurs ennemis, les nouveaux nœuds qui arrivent doivent partager une certaine forme de justificatifs d'identité ou de certificats de sécurité afin de faciliter l'authentification, ce qui pourrait ne pas être propice à la confidentialité. En conséquence, les méthodes d'authentification permettant une telle protection ont été un sujet de recherche ces dernières années (par exemple, [17], [18] et [19]). La nature hautement dynamique d'un VANET fait en sorte que les défis en matière de sécurité et de confidentialité y sont encore plus compliqués.

2.1.2 Technologies d'accès

Les nœuds d'un VANET peuvent utiliser de multiples technologies de réseautage, comme les normes relatives à l'accès sans fil dans des environnements de véhicules (WAVE) IEEE² P1609, IEEE802.11p, les réseaux radio cellulaires (GSM, GPRS, UMTS, WiMAX, LTE et 5G), Bluetooth IEEE 802.15.1 et les liaisons à infrarouge, afin de faciliter les communications spéciales [20] et [21]. Cependant, les normes de communications fondées sur la norme IEEE 802.11p et les communications tributaires de la technologie V2X (C-V2X) cellulaire sont mentionnées le plus fréquemment dans la littérature [22] et [23].

2.1.2.1 Réseaux maillés

Les communications dédiées à courte distance (DSRC) et la technologie ITS-G5 sont deux normes relatives aux réseaux maillés qui sont fondées sur la technologie IEEE 802.11p. Aux États-Unis, la *Federal Communications Commission* (FCC) a attribué, en 1999, 75 MHz de largeur de bande du spectre de 5,9 GHz aux applications des systèmes de transport intelligents (STI) à base DSRC [24]. L'Institut européen des normes de télécommunication (ETSI) a attribué 30 MHz du spectre de la bande de 5,9 GHz aux applications des STI en 2008 en vertu de la norme ITS-G5 [25]. L'une des différences principales entre les normes DSRC et ITS-G5 est la façon dont la bande passante est allouée. La norme DSRC ne réserve aucune partie de sa largeur de bande à des applications à délais critiques, tandis que la norme ITS-G5 est subdivisée en deux segments : (a) un spectre de 30 MHz pour les applications essentielles à la sécurité (ITS-G5A); (b) un spectre de 20 MHz pour les autres applications [6].

² L'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) est une organisation professionnelle qui produit et publie une variété de normes d'ingénierie relatives au génie informatique, électrique et électronique. Il facilite également le partage de connaissances entre experts en publiant des revues et en organisant des conférences qui mettent l'accent sur l'ingénierie.

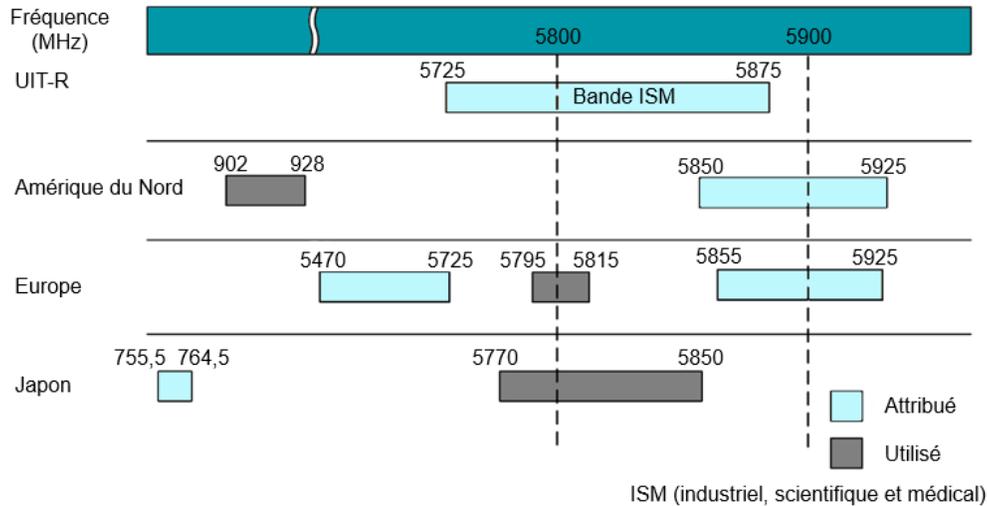


Figure 3 : Attribution du spectre des fréquences pour les applications DSRC au sein de diverses administrations [26].

2.1.2.2 Réseaux cellulaires

Invoquant un taux d'adoption insuffisant, la FCC a choisi de réattribuer à d'autres fins en 2020 le spectre réservé aux applications DSRC [27]. Plus précisément, il a été proposé d'attribuer la largeur de bande inférieure de 45 MHz du spectre de 5,9 GHz à des utilisations exemptées de licences, comme le Wi-Fi et la sécurité automobile améliorée, et la largeur de bande supérieure de 30 MHz du même spectre à la sécurité automobile accrue à l'aide de la technologie V2X cellulaire (C-V2X) [27]. Toutefois, le USDOT s'est opposé à cette proposition, faisant valoir le niveau de maturité de la technologie DSRC et le fait que des investissements y ont déjà été effectués dans des travaux de développement depuis des décennies³.

Selon la norme cellulaire sous-jacente, la technologie C-V2X a également été appelée technologie LTE-V2X [23] et 5G-V2X [28]. En raison de problème de couverture, en particulier dans des environnements sans visibilité directe (NLOS) et les canyons urbains, la technologie C-V2X est privilégiée par rapport aux réseaux maillés [29] et [30]. Dans le même ordre d'idées, une plus longue portée de la technologie C-V2X dans des scénarios LOS et NLOS a été démontrée expérimentalement dans un rapport de test produit par le consortium industriel 5GAA en 2018 [31]. Une zone de couverture accrue, la sécurité par approche déterministe⁴ et des garanties de qualité du service (QS) sont au nombre des autres avantages possibles [32] et [33]. Les caractéristiques qui définissent la QoS sont définies dans la section 2.2. Une étude de simulation dans des conditions de la vie réelle a démontré les avantages de la technologie C-V2X par rapport à la technologie DSRC [34]. Dans l'un des cas d'utilisation étudiés (voir la Figure 4) et menés par le fournisseur de C-V2X Qualcomm, on fait valoir la possibilité d'utilisation supérieure de la technologie C-V2X dans des conditions routières normales et de chaussée glacée à des vitesses élevées, aux fins d'arrêt sûr d'un véhicule en mouvement et d'évitement de collision avec un véhicule immobilisé obstruant la voie. En raison de la portée plus grande de la technologie C-V2X, un véhicule qui en est équipé pourrait recevoir le message d'alerte de danger concernant le véhicule immobilisé plus tôt que celui doté de la technologie DSRC. Il a ainsi été démontré que le véhicule exploitant la technologie C-V2X disposait d'une distance d'arrêt plus grande. À noter qu'on ne peut pas prétendre que les performances supérieures de la

³ [Lettre du USDOT envoyée à la FCC le 6 novembre 2020.](#)

technologie C-V2X existent universellement dans l'état de développement actuel de celle-ci. La topologie du réseau, le volume du trafic réseau et les caractéristiques environnementales (par exemple, les routes libres de toute obstruction et les canyons urbains) sont tous des facteurs qui peuvent influencer sur les performances des communications DSRC ou C-V2X. À ce titre, compte tenu de l'état actuel des deux technologies, il faudrait être aveugle pour prétendre qu'une technologie d'accès est universellement plus performante qu'une autre. Étant donné l'immensité des efforts nécessaires pour effectuer une analyse comparative détaillée des performances, la littérature connexe ne comprend que des scénarios d'essai dont la portée est limitée (par exemple, [31] et [34]).

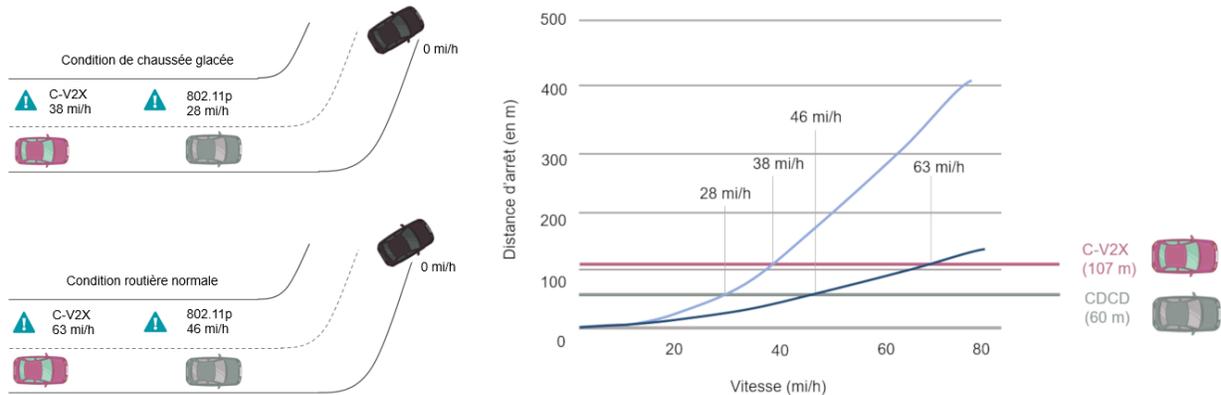


Figure 4 : Exemple d'évitement d'une collision au moyen de la technologie C-V2X et DSRC [34]. Le véhicule équipé de la technologie C-V2X dispose d'une distance d'arrêt plus grande en raison d'une portée de communications plus grande.

Outre les réseaux LTE, les réseaux 5G émergents peuvent également être utilisés pour la communication C-V2X. Les termes V2X nouvelle radio ou NR-V2X sont utilisés en référence aux réseaux V2X basés 5G [35]. On s'attend à ce que la technologie 5G respecte les exigences contraignantes des applications V2X à délais critiques et essentielles à la sécurité sur les plans de la latence ultra-faible, de la fiabilité élevée, de la couverture supérieure, etc. [35] et [36]. L'organisme de normalisation 3GPP (Projet de partenariat de 3^e génération) a couvert la technologie LTE-V2X dans les versions 14 et 15, et NR-V2X l'a été dans les versions 16 et 17 [35]. À noter que les normes publiées par 3GPP sont structurées comme des « versions ».

Les systèmes de communications C-V2X peuvent avoir trois modes d'exploitation : (a) en liaison latérale (SL); (b) en liaison montante (UL)/liaison descendante (DL); (c) en relais (voir la Figure 6). Les véhicules s'échangent directement de l'information selon une transmission à un bond dans des communications C-V2X SL. Deux bonds de transmission sont effectués dans des communications UL/DL, c'est-à-dire qu'un véhicule transmet d'abord l'information à un nœud évolué (ou à une station de base) B (eNB) dans une communication UL (premier bond), puis l'information reçue à eNB est acheminée au véhicule auquel elle est destinée dans une communication DL (deuxième bond). Les transmissions qui requièrent plus de deux bonds pour parvenir à la destination font appel au mode C-V2X en relais. Les divers nœuds qui participent à cette chaîne de communication peuvent être des unités en bord de route (RSU) et des réseaux cellulaires. La couche d'application du modèle C-V2X peut inclure des communications entre les véhicules (V2V), entre les véhicules et les réseaux (V2N), entre les véhicules et les infrastructures (V2I), entre les véhicules et les piétons (V2P), entre les véhicules et la largeur de bande (V2B), etc. [6] et [32]. Le Tableau 1 fait ressortir les différences principales entre les technologies IEEE 802.11p, LTE-V2X et 5G/NR-V2X.

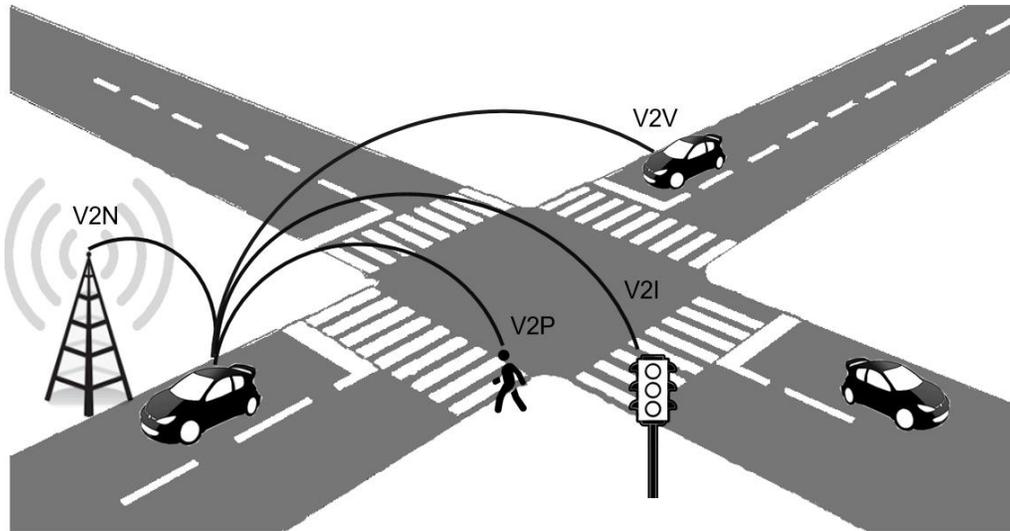


Figure 5 : Modes de communications V2X [37].

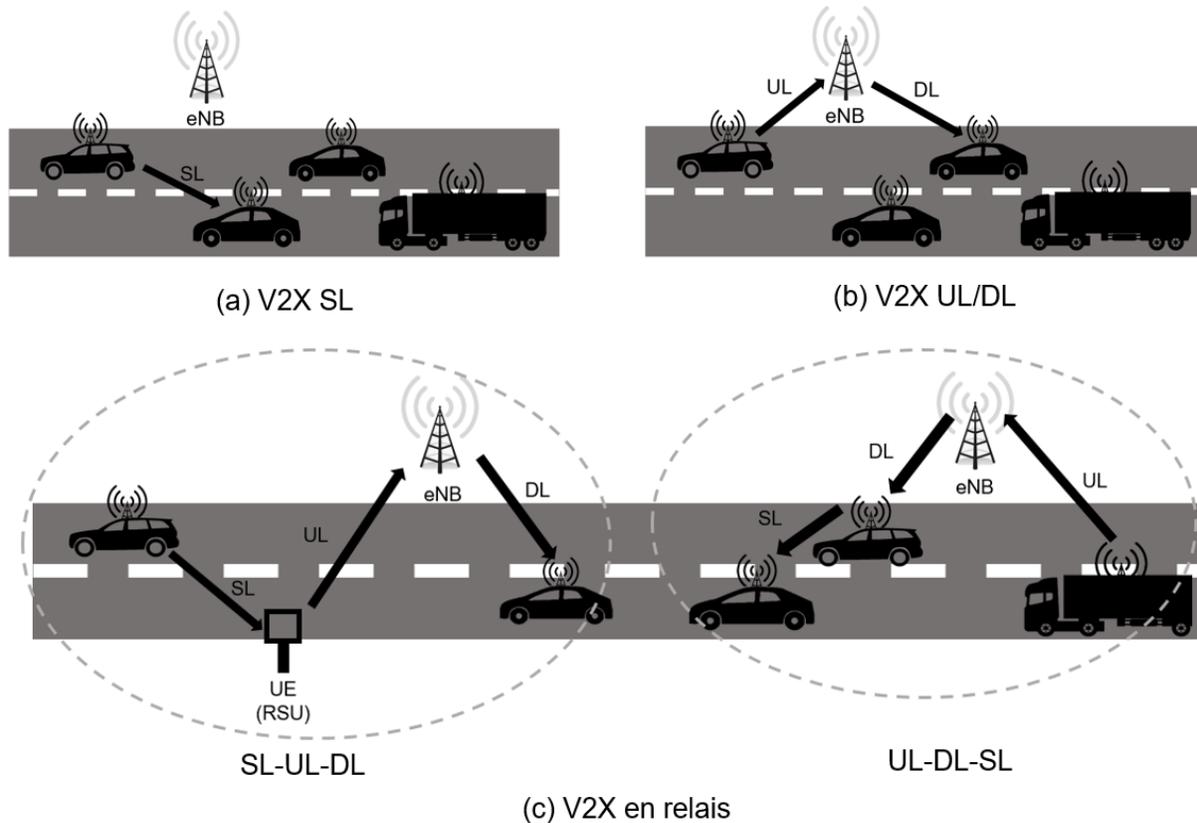


Figure 6 : Modes de communications C-V2X différents [38].

2.1.2.3 Autres technologies d'accès

Outre les technologies d'accès basées sur C-V2X et IEEE 802.11p, un certain nombre d'autres technologies sans fil ont été répertoriées dans la littérature concernant la connectivité extravéhiculaire. À titre d'exemples, le réseau étendu de faible puissance (LPWAN), comme ZigBee [39], Bluetooth [40] et l'identification par radiofréquence (RFID) [41]. Les ondes radio forment la liaison physique pour toutes les

technologies de connectivité mentionnées jusqu'à maintenant; les communications à la lumière visible (VLC) sont une technologie de communications fondée sur la lumière qui a également été utilisée pour les communications V2V [42]. Elles nécessitent un trajet LOS entre une diode électroluminescente (DEL) et un photodétecteur (PD) servant, respectivement, d'émetteur et de récepteur [43]. Les VLC comportent plusieurs avantages comparativement aux communications radio, y compris une largeur de bande élevée robuste en duplex intégral même dans des espaces routiers achalandés. Par contre, leurs principaux inconvénients sont la susceptibilité aux interférences de la lumière ambiante et des conditions météorologiques.

Bien que les technologies d'accès dont il a été question dans la présente section se trouvent dans la littérature, C-V2X et IEEE 802.11p sont les deux normes principales pour lesquelles les intervenants déploient des efforts de développement majeurs. Une comparaison de certaines caractéristiques de ces normes, telles qu'elles sont décrites dans la littérature connexe, est présentée au Tableau 1. De plus, les caractéristiques des technologies d'accès LPWAN sont résumées au Tableau 2.

Caractéristiques	IEEE 802.11p	LTE-V2X (3GPP versions 14 et 15)	5G/NR-V2X (3GPP versions 16 et 17)
État de la normalisation	Achevée en mars 2012	Version 14 : mars 2017 Version 15 : juin 2018	Version 16 : déc. 2019 Version 17 : juin 2021
Évolution	Compatible avant avec IEEE 802.11bd	Compatible avant avec NR-V2X	Rétrocompatible avec LTE-V2X
Couverture réseau	Limitée	1.3 à 2.9x des DSRC (LOS, NLOS et cas d'essai des interférences) [31]	
Latence	Non déterministe	Version 14 : 20 ms Version 15 : 10 ms	3 ms ou moins [35] <1 ms [36]
Fiabilité	Non garantie	Version 14 : > 90 % Version 15 : > 95 %	99,999 %
Débit de données	6 Mbit/s	30 Mbit/s	Non déterminé

Tableau 1 : Différences principales entre les technologies d'accès IEEE 802.11p, LTE-V2X et NR-V2X [31], [33], [35] et [36].

Technologie	Type	Portée	Spectre	Cas d'utilisation
IRF	Simplex	~10 m	135 kHz, 13,56 MHz, 433 MHz, 860-960 MHz, 5,8 GHz	Identification de véhicules pour la perception des péages et le stationnement
Bluetooth	Simplex	~10 m	2,4-2,45 GHz	V2I, calcul de la densité de la circulation
ZigBee	Duplex	~20 m	2,4 GHz	-

Tableau 2 : Technologies LPWAN des véhicules connectés [44].

2.1.3 Types de messages

Selon les cas d'utilisation, les technologies des véhicules connectés ont des exigences diverses en matière de latence, de protection des données et de portée du réseau. En conséquence, les messages échangés dans un réseau V2X sont classés selon les cas d'utilisation correspondants. La norme SAE J2735 [45] précise un certain nombre de messages pour les systèmes de communications DSRC. Toutefois, étant donné la réattribution à d'autres fins que la FCC a proposée au sujet de la largeur de bande des communications DSRC, sa pertinence dans le développement de CV futurs est obscure. Le *Car 2 Car Communication Consortium* (C2C-CC) a décrit divers types de messages énoncés par des organismes de normalisation, comme SAE et l'ETSI dans la référence [46]. Voir le Tableau 3 pour une liste compilée des différents messages utilisés dans la littérature.

Types de messages	Exigences et exemples
CAM – Message de connaissance coopérative DENM – Message de notification d’environnement décentralisé BSM – Message de sécurité de base SPaT – Signalisation et synchronisation MAP – Message de cartographie IVI – Information à bord	Fréquence de mise à jour moyenne (~10 Hz). Amélioration de la connaissance de la situation : <ul style="list-style-type: none"> - Alerte de collision aux intersections - Alerte de véhicule d’urgence - Alerte de situation dangereuse - Alerte d’embouteillage - Alerte avant et après un accident - Activation des communications I2V
CPM – Message de perception collective	Fréquence de mise à jour élevée (~100 Hz). Perception au-delà de la LOS : <ul style="list-style-type: none"> - Alerte de dépassement - Alerte prolongée de collision aux intersections - Alerte d’UVR - Régulation de vitesse adaptative coopérative - Alerte de zones de travaux routiers à long terme - Priorité accordée aux véhicules spéciaux
MCM – Message de coordination de manœuvres PCM – Message de régulation de la conduite en peloton	Fréquence de mise à jour élevée (~100 Hz) et latence ultra-faible. Automatisation de la conduite coopérative : <ul style="list-style-type: none"> - Coordination de la conduite en peloton - Convergence coopérative - Changement de voie coopératif - Dépassement coopératif
TMI – Message de renseignements aux voyageurs	Faible fréquence de mise à jour (~1 Hz). Connaissance des conditions de trafic : <ul style="list-style-type: none"> - Renseignements sur les incidents de la route - Opérations de construction planifiées

Tableau 3 : Messages divers des technologies des véhicules connectés [46] et [47].

2.2 Exigences relatives aux performances du réseau

Une catégorie du concept plus large des applications Internet des objets (IoT) est la communication ultra-fiable à faible latence (URLLC). L’automatisation des usines, les réseaux électriques intelligents et les communications V2X constituent des exemples d’applications URLLC en raison de la nature essentielle à la mission de celles-ci. Le terme QoS, ou qualité du service, est mentionné dans la littérature connexe pour décrire ou mesurer les performances globales d’un service de communication. Les paramètres génériques de la QoS concernent le débit, le rapport de perte de paquets, la gigue, la latence, le débit binaire et la disponibilité [48]. Des définitions officielles de ces paramètres se trouvent dans un document

de référence que l'organisme de l'industrie constituant l'association GSM a fait paraître en 2018 [49]⁵. À noter que cette dernière représente l'industrie mondiale de la téléphonie mobile. Bien que ces paramètres décrivent de nombreux aspects différents et importants des performances propres aux communications d'un réseau, il est souvent fait mention de la portée des communications, de la disponibilité et de la fiabilité sur les plans du rapport de perte de paquets et de la latence comme paramètres de la QoS dans la littérature sur les CV. Par exemple, une étude publiée en 2017 par un groupe de chercheurs universitaires de la Corée du Sud, laquelle portait sur les performances en matière de latence des applications C-V2X, faisait appel aux paramètres susmentionnés de la QS dans la référence [38]. Une autre recherche universitaire binationale de l'Allemagne et de la France publiée en 2018 concernait l'étude des exigences propres aux applications V2X à faible latence et l'utilisation de ces paramètres de la QoS dans le cadre d'une analyse comparative sur les performances dans la référence [50]. Deux autres travaux de recherche semblables du milieu universitaire [51] et [52] (publiés respectivement en 2019 et 2020) employaient également ces paramètres pour caractériser les performances. Le choix de ces paramètres de la QoS peut être attribuable aux limites de l'état actuel des technologies. Afin de faciliter la discussion dans le présent rapport, des interprétations qualitatives des définitions des paramètres de la QoS souvent mentionnés sont fournies dans le paragraphe qui suit.

Le *rapport de perte de paquets (PLR)* mesure le taux de réussite de livraison des paquets sous la forme d'un rapport entre le nombre de paquets n'étant pas parvenus à leur destination et le nombre total de paquets envoyés. La *disponibilité* est la durée, en pourcentage, de pleine utilisabilité d'un système pour une période donnée. La *latence* correspond au temps que met un paquet de communications de données pour parcourir la distance entre sa source et sa destination. S'appuyant pour la plupart sur des études de simulation, la littérature connexe, comme [38], [50], [51] et [52] a pu déterminer les performances nécessaires d'un réseau pour bon nombre d'applications V2X. Les exigences décrites sont résumées au Tableau 4.

Catégorie d'application	Sécurité routière et efficacité	Automatisation de la conduite	Infodivertissement et services médias
Mode	V2V, V2I et V2P	V2V, V2I et V2N	V2N
Latence maximale (millisecondes – ms)	10 ms pour la sécurité 100 ms pour l'efficacité	De 10 à 100	Non critique
Fiabilité	~ 99 %	99,999 %	Sans objet
Débit de données⁶	1 Mbit/s	10 Mbit/s	De 0,5 à 15 Mbit/s selon le type de média
Portée (m)	2000	Zone urbaine – 500 Autoroute – 2000	Zone urbaine – 500 Autoroute – 2000

⁵ <https://www.gsm.com/newsroom/wp-content/uploads//IR.42-v9.0.pdf>

⁶ Estimation pour des scénarios types sans égard explicite à la congestion du réseau. Voir [51] pour plus de détails.

Catégorie d'application	Sécurité routière et efficacité	Automatisation de la conduite	Infodivertissement et services médias
Densité des nœuds (/km ²)	3000	Zone urbaine – 3000 Autoroute – 500	Zone urbaine – 3000 Autoroute – 500
Type de trafic	Périodique	Déclenché par l'événement	Périodique
Exemples	Alerte de collision avant, alerte de perte de contrôle, alerte d'urgence, arrêt d'urgence et alerte de détection avant un accident	Dépassement automatisé, évitement de collision coopératif, conduite en peloton à forte densité et perception coopérative	Vidéo/audio en continu et navigation Web

Tableau 4 : Résumé des exigences relatives à la QoS dans les applications V2X d'après [38], [50], [51] et [52].

2.3 Principaux intervenants

Le développement et le déploiement réussis des applications des CV requièrent l'apport de divers intervenants. Ceux-ci ont été classés avec des exemples dans la référence [53] (voir la Figure 7). Les organismes du secteur public, comme le USDOT ou Transports Canada, facilitent et favorisent souvent l'engagement des intervenants dans le cadre de conférences et d'ateliers. Les programmes de démonstration d'essais pilotes sur les CV parrainés par des organismes du secteur public permettent également aux intervenants de travailler ensemble afin de satisfaire de manière collaborative aux exigences fonctionnelles visant le déploiement réussi d'applications de CV.

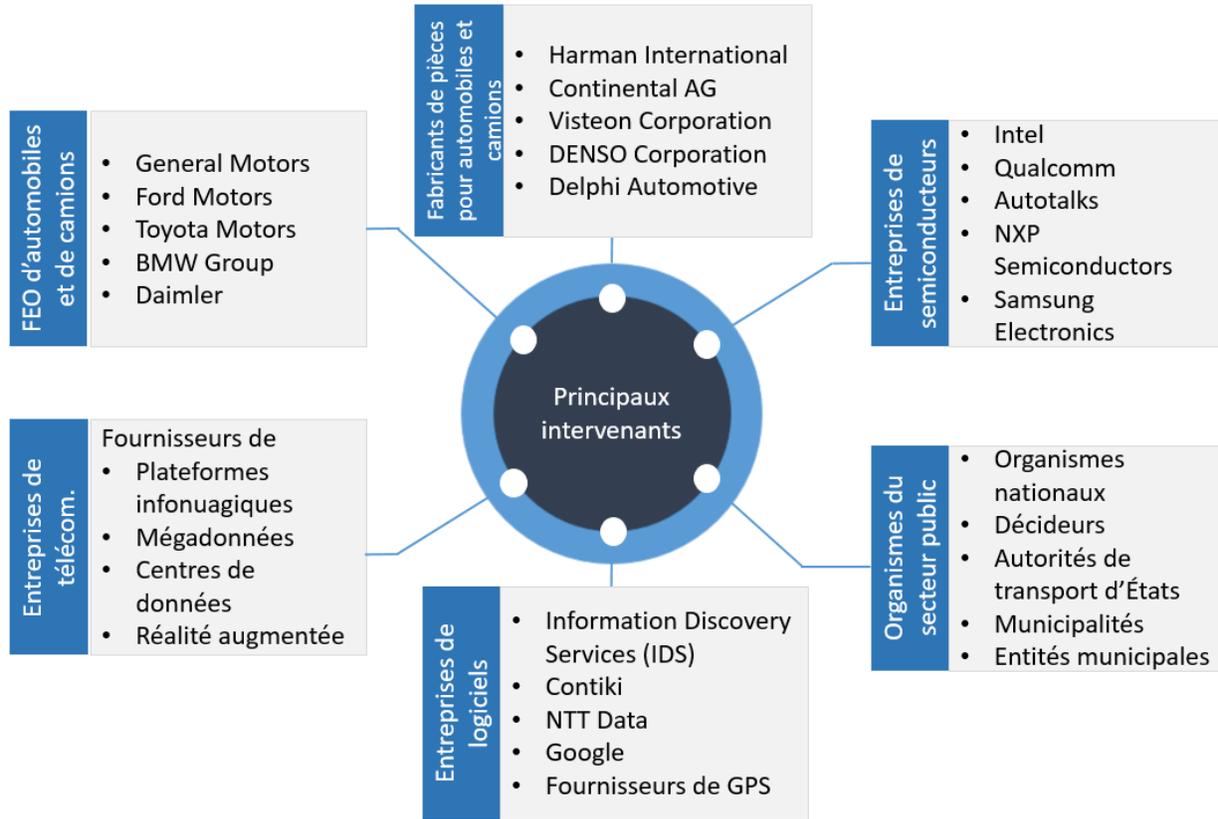


Figure 7 : Principaux intervenants des applications V2X [53].

3 Cas d'utilisation essentiels à la sécurité

3.1 Mesure de la sécurité

Les cas d'utilisation des technologies des CV peuvent inclure ou non des fonctions d'automatisation de la conduite. En l'absence de tels composants, un mécanisme d'assistance reposant sur un CV peut encore être avantageux pour les conducteurs humains. Cependant, puisque les technologies d'automatisation de la conduite ont un temps de réponse beaucoup plus court et interagissent mieux avec un véhicule en comparaison d'une conduite manuelle, les avantages complets possibles des CV sur les plans de la sécurité et de l'environnement ne peuvent être obtenus que s'ils sont appuyés par des systèmes d'automatisation de la conduite. Par ailleurs, des compétences comme l'accroissement de la capacité d'acquérir une connaissance de la situation au-delà de la LOS grâce au partage de données de capteurs, la coordination des manœuvres de conduite avec d'autres véhicules par l'échange de mesures de contrôle actuelles et futures, de même que la détection de situations dangereuses et l'intervention en collaboration sont nécessaires à l'autonomie des véhicules sur les plans des performances et de la fiabilité. Ainsi, le service cellulaire de localisation à hyperprécision (HPL) fondé sur un réseau, dont Verizon a récemment fait l'annonce [54] pour les marchés américains, peut, semble-t-il, fournir avec précision de l'information sur le positionnement au niveau de la voie avec l'aide de données de correction transmises en direct par GNSS (système mondial de navigation par satellite). Cette caractéristique peut accroître la capacité de détection des voies à l'aide de capteurs et agir de manière redondante à l'intention de ceux-ci en cas d'intempéries, cette capacité étant nécessaire pour assurer le contrôle latéral d'un véhicule automatisé. On peut soutenir qu'alors que les CV et les ADS atteindront un niveau de maturité plus grand, les développeurs intégreront plus étroitement ces deux technologies afin d'atteindre les buts liés à la fiabilité et aux performances. Dans le même ordre d'idées, on peut observer cette notion concernant l'atténuation de la distinction entre les CV et les ADS dans la littérature mettant l'accent sur les aspects liés à la sécurité de ces technologies, où la sécurité des systèmes de CV est examinée comme un sous-ensemble du sujet plus vaste des systèmes d'automatisation de la conduite. Toutefois, les aspects liés à la sécurité des systèmes de CV (par exemple, l'authentification des nœuds et les attaques ennemies) occupent une place plus importante dans la discussion que les aspects liés à la sécurité générale dans les articles universitaires connexes.

La sécurité, en ce qui concerne les technologies d'automatisation de la conduite, a été définie dans un rapport de recherche [55] publié par RAND Corporation comme étant « [Traduction] *l'élimination, la réduction ou la gestion du préjudice à l'intérêt public* ». L'une des conclusions principales de ce rapport est qu'il n'existe « *aucune définition standard de la sécurité relativement aux VA* ». Un document de recherche produit par Philip Koopman de l'Université Carnegie Mellon et par Michael Wagner de Edge Case Research LLC, et publié par SAE en 2018, fait également écho à cette notion [56]. Les auteurs affirment qu'il n'y a « [Traduction] *aucune stratégie technique généralement admise pour valider la sécurité des aspects logiciels non classiques de ces véhicules* ». Bien que les résultats de l'étude de simulation décrits dans un rapport de 2014 du USDOT [4] faisaient appel à des concepts issus des Federal Motor Vehicle Safety Standards (FMVSS), comme l'évitement d'accidents et la prévention des blessures, pour quantifier les niveaux de sécurité de deux cas d'utilisation de la technologie V2V (c'est-à-dire la gestion des intersections et l'assistance pour les virages à gauche), un rapport ultérieur préparé par le Volpe Center à l'intention de la NHTSA en 2016 [57] résumait que les FMVSS ne traitent pas explicitement de la technologie des véhicules automatisés. Des publications plus récentes de la NHTSA, comme celle indiquée dans la

référence [58] (des travaux d'adoption et de conversion des FMVSS pour les systèmes de conduite automatisée publiés en 2019), indiquent que cette lacune est en train d'être comblée. En l'absence d'un cadre détaillé de mesure de la sécurité dans les systèmes d'automatisation de la conduite, un point de référence de 1,09 accident mortel par 100 millions de milles a été choisi dans la référence [59] (un rapport de l'organisation de recherche RAND Corporation publié en 2016), afin de documenter une approche statistique dans le but de déterminer les exigences d'essai des technologies d'automatisation de la conduite. Le choix de ce point de référence n'était pas arbitraire, car il correspond au nombre d'accidents mortels causés par les conducteurs américains en 2013. En termes simples, les auteurs dans la référence [59] ont tenté de définir les performances minimales en matière de sécurité des systèmes de VA, qui fait référence sur le plan qualitatif à une norme au moins aussi sécuritaire que celle des conducteurs humains sur le plan des performances.

Bon nombre de cas d'utilisation des technologies des CV se trouvent dans la littérature et un certain nombre d'entre eux sont résumés dans les sections qui suivent. Étant donné le niveau de maturité actuel des technologies connexes, il s'est avéré que ces documents mettaient l'accent sur les fonctionnalités des applications des CV. L'argument relatif à la sécurité, lorsqu'il a été abordé, a été exploré principalement dans un environnement de simulation à portée limitée.

3.2 Alerte et évitement de collision

3.2.1 Aperçu

L'incapacité de détecter une collision possible en temps opportun, combinée à une réponse lente de la part des conducteurs humains, peut occasionner des collisions. Il est possible de s'appuyer sur les technologies des CV pour compenser de telles lacunes dans les véhicules conduits manuellement. La portée de cette caractéristique de sécurité peut être étendue encore davantage dans le cas de véhicules dotés d'actionneurs de freinage où ceux-ci peuvent être serrés automatiquement dès que des conditions dangereuses sont détectées. L'article de recherche [60], publié par des chercheurs universitaires des États-Unis et de l'Allemagne en 2006, utilisait l'expression « *cooperative collision avoidance (CCA)* » (évitement de collision coopératif) pour communiquer la prémisse de cette application de sécurité. D'autres travaux menés en 2005 par des chercheurs de l'Université de la Californie, Berkeley, et le centre de recherche et de développement de General Motors situé au Michigan [61] utilisaient l'expression « *cooperative collision warning (CCW)* » (alerte de collision coopérative) à la même fin. Bien que la portée opérationnelle, dans les premières mises en œuvre/démonstrations, fût limitée uniquement au mouvement longitudinal du véhicule (par exemple, [60] et [61]), des exemples plus récents incluaient également le mouvement latéral, donnant lieu à des scénarios plus complexes. Par exemple, une validation de principe démontrée en 2019 dans un environnement de simulation et présentée par des chercheurs de l'Université de Pékin, en Chine [62], portait sur le CCA comme technologie habilitante des applications de dépassement et de changement de voie coopératifs. Il a également été fait mention du CCA dans le contexte de la gestion des intersections dans la référence [63], qui constitue un document portant sur la mise en œuvre de la technologie V2V publié par des chercheurs allemands en 2017 et où la norme IEEE 802.11p est utilisée pour étudier les effets de l'interférence radio provenant de caractéristiques de l'environnement urbain, comme des édifices. Une analyse comparative des performances menée en 2020 par une équipe de chercheurs universitaires et de l'industrie de la Chine dans la référence [64] portait sur une simulation visant à évaluer la technologie C-V2X dans des cas d'utilisation du CCA. Une thèse de maîtrise de l'Université Purdue publiée

en 2019 [65] proposait le CCA pour éviter les collisions aux intersections. Le CCA a aussi fait l'objet de discussions comme technologie habilitante de la sécurité des VRU dans la référence [66], qui est une étude de simulation publiée par des chercheurs universitaires de l'Allemagne en 2020 et qui examine les effets des retards de communications pour un CCA faisant intervenir des VRU.

3.2.2 Mises en œuvre recensées

Les fonctions d'évitement de collision dans les véhicules en production dotés de fonctions ADAS ont recours à des capteurs embarqués pour détecter une collision possible; les applications de sécurité de CCA dépendent de la connectivité pour la même fin. Par conséquent, on peut soutenir que la différence principale entre les deux technologies réside dans la manière dont la connaissance de la situation est obtenue (à l'aide de capteurs ou par connectivité). Néanmoins, les applications de CCA peuvent accroître la portée opérationnelle des fonctions d'évitement de collision à capteurs au-delà de la visibilité directe (LOS) que requièrent les fonctions ADAS mises en marché actuellement.

Dans une application CCA typique, chaque véhicule doit être en mesure de mesurer son état (par exemple, le cap, la vitesse actuelle, la vitesse d'accélération et de décélération, de même que la position générale) à haute fréquence, de sorte que cette information puisse être communiquée aux véhicules situés à proximité. Les données de chaque nœud de véhicules fournissent collectivement la condition instantanée de la circulation des véhicules réseautés. Puisque les systèmes ADAS possèdent déjà cette capacité de mesurer l'état des véhicules à haute fréquence, le défi principal de la mise en œuvre du CCA implique une communication avec une faible latence afin que chaque véhicule dispose d'une fenêtre de temps suffisamment longue pour traiter les informations reçues et évaluer le potentiel d'une collision et ensuite, si nécessaire, d'amorcer une manœuvre de sécurité. Diverses technologies V2V ont été utilisées au fil des ans pour ce cas d'utilisation en matière de sécurité. Par exemple, les technologies d'accès fondées sur la norme IEEE 802.11p ont été utilisées dans les références [60] et [63], et la connectivité 5G a servi dans la référence [67] (un essai sur le terrain du CCA effectué en 2017 par des chercheurs du Centre aérospatial allemand et Huawei Technologies en Allemagne). De plus, une application fondée sur la technologie V2N est présentée dans la référence [68] (une étude de chercheurs espagnols dans laquelle une architecture fondée sur la technologie V2N a été proposée comme CCA en 2019). Peu importe le mode de communications sous-jacent, une mise en œuvre, pour être efficace, doit fournir des performances à faible latence. En conséquence, la littérature, depuis les premiers jours où cette idée a germé (par exemple, [69] et [70]) jusqu'à la parution de publications plus récentes (par exemple, [71] et [72]), a mis l'accent sur les protocoles de communications sans fil avec l'intention d'obtenir des performances à faible latence en présence d'une disponibilité élevée des réseaux.

Bien que le corps de la littérature du milieu universitaire mettant l'accent sur le CCA soit plus exhaustif que celle portant sur les autres applications de sécurité fondées sur la connectivité, les cas de déploiement commercial se sont avérés peu nombreux. On a également observé que la plupart de la littérature examinée mettait l'accent sur les aspects à délais critiques de la couche de communications. Dans la majorité des recherches mentionnées, on a constaté que la simulation a été utilisée aux fins d'essais de la fonctionnalité (par exemple, [64], [62] et [73]). Une démonstration physique limitée est présente dans les premiers jours du développement dans la référence [61] et, plus récemment, dans une étude menée par des chercheurs espagnols, laquelle proposait en 2019 une architecture fondée sur la technologie V2N aux fins de CCA [68], de même que dans le cadre d'une démonstration sur une piste d'essai effectuée par l'entreprise de génie automobile Applus+ IDIADA et publiée en 2020 [74]. Tel qu'attendu d'une technologie

en développement, ces études de simulation et démonstrations physiques mettent l'accent principalement sur la preuve de fonctionnalité et sur la caractérisation des performances dans des environnements contrôlés. Les discussions sur la tolérance aux défaillances et sur un fonctionnement à sécurité intégrée se sont avérées rares.

3.3 Surveillance des angles morts

3.3.1 Aperçu

Les systèmes de surveillance des angles morts servent à alerter les conducteurs ou véhicules de la présence réelle ou possible d'un autre objet dans leur angle mort, lors d'une tentative de changement de voie ou de virage [75]. Les systèmes embarqués de surveillance des angles morts qui dépendent de capteurs de perception (par exemple, des caméras, un sonar ou un radar) pour surveiller les angles morts et alerter les conducteurs ont fait leur apparition il y a plus d'une décennie. Ces systèmes, lors de leur première mise en œuvre, n'exigeaient aucune connectivité extravéhiculaire. L'efficacité des systèmes embarqués de surveillance des angles morts est démontrée dans un rapport produit par le Insurance Institute of Highway Safety [76], où une diminution de 14 p. cent des accidents liés à un changement de voie et une diminution de 23 p. cent des accidents liés à un changement de voie avec blessures sont attribuables à l'utilisation de systèmes de détection des angles morts pour éviter des accidents.

3.3.2 Mises en œuvre recensées

Traditionnellement, la connectivité V2X est perçue comme un outil habilitant pour informer sur les obstacles présents aux angles morts [77] (un article d'enquête publié en 2020 par des chercheurs de la Chine et de Hong Kong), [78] (un document technique de SAE paru en 2020 dans lequel l'optimisation des applications V2X par l'informatique en périphérie était proposée); cependant, la littérature sur la surveillance des angles morts au moyen de la connectivité reste rare. Barmounakis *et. coll.* dans la référence [79] ont présenté des solutions en 2020 pour détecter les objets « [Traduction] connectés » qui pourraient être présents dans les angles morts, d'après l'hypothèse que ces objets sont capables de se connecter et de communiquer leur état physique (par exemple, leurs position globale, cap et vitesse actuelle) à d'autres véhicules ou aux infrastructures, de façon à permettre une reconstruction de la condition de trafic dynamique à partir des messages reçus. Considérant la possibilité que des objets ou utilisateurs ne soient pas équipés de technologies de connectivité, certains travaux, comme dans la référence [80] (un document de recherche du CNRC publié en 2020), ont proposé de recourir à des systèmes faisant appel à la vision pour détecter des usagers vulnérables de la route (VRU) aux intersections, de même qu'à la connectivité V2X pour partager les données de situation concernant les VRU avec les véhicules situés aux intersections ou près de celles-ci. Un cas d'utilisation connexe concerne la perception à la vue perçante coopérative dans laquelle les communications V2X sont utilisées par des véhicules précédents afin de partager les données vidéo ou de détection d'objets avec les véhicules qui suivent, aidant de manière efficace ces derniers à « voir à travers » les véhicules ou « autour » de ceux se trouvant devant eux [28]. En ce sens, le projet AutoNet2030 [81] a fait appel à une grille d'occupation décrivant les objets détectés au moyen d'un algorithme de grille d'occupation. Il y est proposé un CAM étendu, auquel il est fait référence comme étant un message de détection coopérative (CSM), dans le but de partager les données de la grille d'occupation. L'étude sur les applications de communications de sécurité des véhicules (VSC-A) de la NHTSA [82] décrivait le développement, au moyen des DSRC, d'une application de sécurité concernant une alerte sur les angles morts et une alerte sur le changement de voie. Dans la technologie C-V2X, un

mode de transmission complémentaire est défini, lequel fonctionne dans les bandes des STI (par exemple, 5,9 GHz), aux fins de communication directe en matière de sécurité sans dépendance à l'égard du réseau cellulaire. Ce mode de transmission, semble-t-il, se prête bien aux communications V2V, V2I et V2P à faible latence dans la référence [34].

3.4 Changement de voie coopératif

3.4.1 Aperçu

Les manœuvres de changement de voie sont plus complexes que les autres manœuvres de conduite, car elles requièrent une connaissance de la situation au sujet de plusieurs voies tout en contrôlant les mouvements longitudinaux et latéraux du véhicule. Dans les véhicules conduits par des êtres humains, une manœuvre de changement de voie est habituellement amorcée en déclenchant le clignotant afin de communiquer l'intention aux véhicules avoisinants. Une trajectoire de changement de voie faisant appel au mouvement longitudinal et latéral du véhicule est exécutée lors d'une étape subséquente pour effectuer la manœuvre. L'idée de changement de voie coopératif concerne les véhicules automatisés dans la mesure où les véhicules avoisinants coordonnent leurs mouvements afin d'exécuter de manière sécuritaire une manœuvre de changement de voie. Bien que cette application relève de la planification des chemins sous contraintes de changement dynamiquement, les communications V2V et V2I servent de catalyseurs clés. Une intention imminente de changement/convergence de voie peut être diffusée aux véhicules avoisinants qui exploitent ces canaux de communications et, par la suite, leurs mouvements peuvent être coordonnés afin d'exécuter une manœuvre sécuritaire de changement de voie. Puisque les systèmes de conduite automatisée permettent d'améliorer le contrôle du mouvement des véhicules, le changement de voie coopératif peut être effectué dans des marges réduites afin d'utiliser plus efficacement la chaussée disponible. Les avantages possibles de l'application de changement de voie coopératif ont été examinés dans la référence [83] (une étude de simulation publiée en 2020 par une équipe de chercheurs universitaires et de l'industrie). Les auteurs ont présenté une étude microscopique fondée sur une simulation afin d'examiner l'efficacité de trois applications de VAC regroupées (c'est-à-dire régulation de vitesse adaptative coopérative – CACC, convergence coopérative et harmonisation de la vitesse) dans le contexte des voies gérées d'autoroutes selon divers taux de pénétration du marché des VAC. Les résultats ont fait ressortir des avantages tangibles sur le plan de l'amélioration du débit du système et de la réduction des délais, même avec de faibles taux de pénétration.

3.4.2 Mises en œuvre recensées

Contrairement aux autres cas d'utilisation des CV, la littérature connexe fournit un assez grand nombre d'exemples d'expériences sur le terrain et d'études de simulation qui se concentrent sur l'application de changement de voie coopératif. Une expérience sur le terrain à propos du changement de voie coopératif, menée à la FHWA en 2020 [84], faisait appel aux communications V2V fondées sur les DSRC. La plateforme d'essai composée d'un véhicule constituant la validation de principe a été équipée de systèmes radar et de régulation automatisée de la vitesse longitudinale. Le format de BSM a été utilisé pour l'échange d'information. Certaines modifications ont été apportées aux BSM de la norme SAE J2735 afin d'augmenter les données connexes au changement de voie (par exemple, données de capteurs radar et d'activation de clignotants). Chacun des systèmes régulateurs de vitesse adaptatifs (ACC) des véhicules participants a été intégré à un contrôleur longitudinal exclusif afin de permettre une pleine automatisation de l'accélération et du freinage. Le contrôleur longitudinal a été mis en œuvre sur une plateforme informatique spécialisée

en temps réel, c'est-à-dire dSPACE MicroAutoBox II (MAB). La MAB a été intégrée à son tour à un ordinateur Linux secondaire de bord responsable de la collecte des données du véhicule, de l'évaluation de l'algorithme et des communications avec l'interface homme-machine (IHM). L'IHM, une tablette numérique, a été configurée afin de permettre la sélection d'un rôle pour le véhicule (« véhicule de tête », véhicule suiveur » ou « véhicule en convergence ») et l'affichage des messages propres à l'algorithme et fondés sur les DSRC, transmis ou reçus pendant les essais. Pour les données de localisation, le système PinPoint™ a été utilisé afin de fournir à l'ordinateur de bord les données GPS à haute précision en temps réel. Les données BSM des autres véhicules et de RSU recueillies par le contrôleur de DSRC ont été envoyées à la MAB à l'aide de l'ordinateur Linux, de pair avec les données radar. La MAB a émis des commandes de contrôle sous la forme de recommandations relatives à la vitesse à injecter dans le bus CAN de chaque véhicule. Ces recommandations ont été générées par l'algorithme de contrôle fondé Simulink. On a supposé que les RSU, ou d'autres entités dans les zones de convergence, étaient disponibles pour jouer le rôle de centres locaux dans la référence [83]. L'algorithme de convergence coopérative dans la référence [83] comprenait les quatre étapes suivantes : détection, diffusion, régulation de la vitesse et régulation de l'écart.

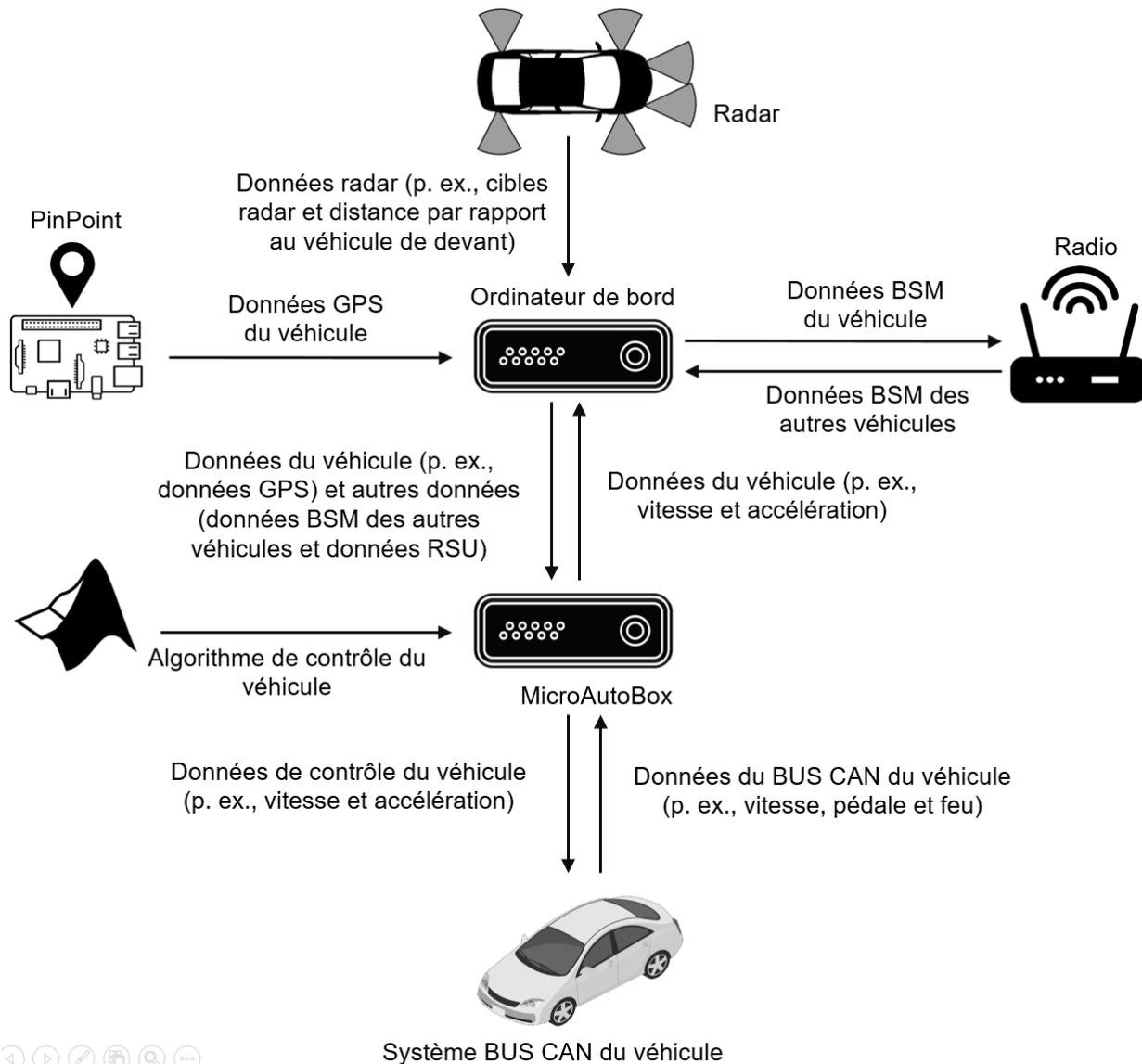


Figure 8 : Pile technologique et flux de données dans la plateforme d'essai documentée dans la référence [84].

Dans les essais menés par la FHWA [84], trois véhicules ont été examinés. Deux d'entre eux forment un peloton de CAV initial où le véhicule de tête est contrôlé manuellement (en maintenant une vitesse d'environ 40 km/h), tandis que le véhicule suiveur est un CAV doté d'un mécanisme de régulation automatisée de la vitesse longitudinale. Le troisième véhicule est un CAV ayant pour tâche de converger dans le peloton à partir d'une voie adjacente. Lorsqu'ils reçoivent du troisième véhicule (c'est-à-dire le véhicule qui converge) une demande (diffusé comme message des DSRC déclenché par le clignotant) pour rejoindre le peloton, les membres de celui-ci forment un espace à l'aide du mécanisme de régulation automatisée de la vitesse longitudinale. Une fois cet espace formé, la vitesse du troisième véhicule est ajustée automatiquement, permettant ainsi au conducteur du CAV de s'y diriger afin de rejoindre le peloton. Ces expériences dans la référence [84] faisaient appel à un régulateur de la vitesse longitudinale, et la manœuvre de direction a été exercée manuellement. Une fois la manœuvre de convergence accomplie, le

véhicule ayant convergé et le véhicule suiveur ont continué de maintenir l'espace sécuritaire minimal, d'après les calculs effectués par leur radar. L'algorithme de contrôle facilite uniquement la manœuvre de changement de voie en contrôlant la distance (par exemple, l'espace sécuritaire minimal) et la vitesse.

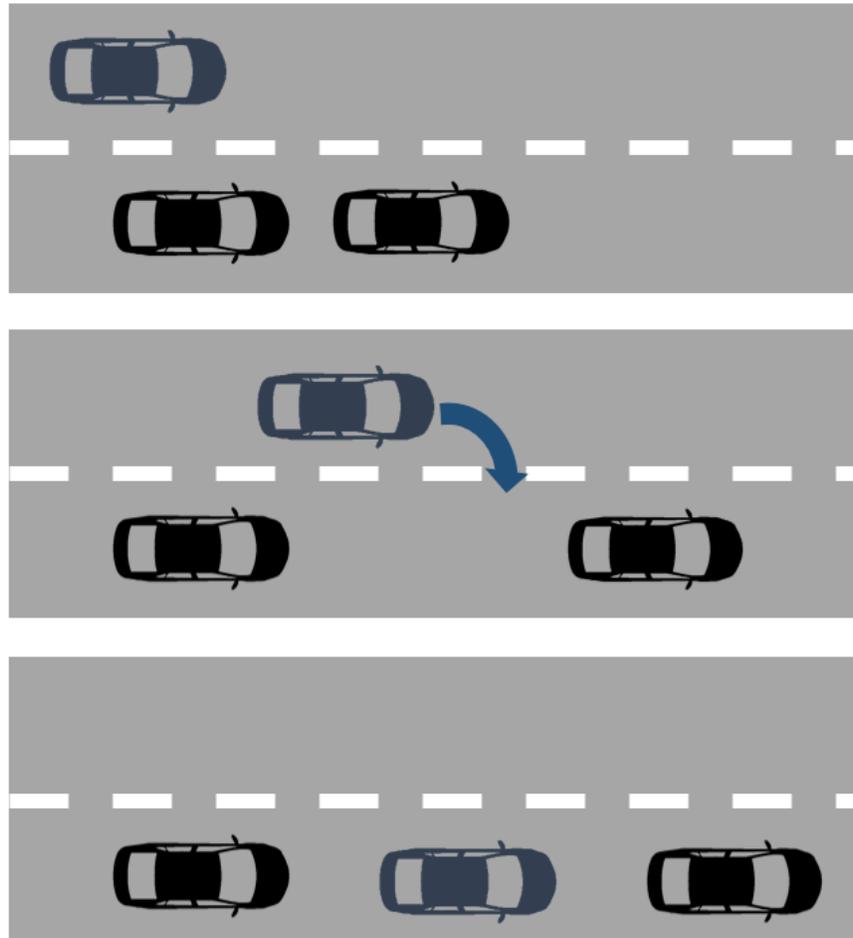


Figure 9 : Scénario d'essai dans la référence [84] concernant le changement de voie coopératif et la manœuvre de convergence afin de rejoindre un peloton automatisé.

3.4.2.1 Résultats de simulations

Les performances ont été mesurées sur le plan du débit du système et des délais dans la référence [83] à l'aide du logiciel de simulation VISSIM⁷. D'après les résultats de la simulation, il a été mis de l'avant que, même en présence de faibles taux de pénétration de 30 p. cent des CAV, l'application regroupée a permis de réduire les délais et d'améliorer le débit du système. L'étude a exclu les scénarios complexes dans lesquels des véhicules purement conduits par des êtres humains sont dépourvus de technologies de connectivité. Les simulations portaient essentiellement sur une installation gérée d'une route à voie unique avec des bretelles réservées exclusivement sur la gauche aux opérations de CVCV/CAV. Les auteurs soutiennent que l'intégration en collaboration de la convergence et de l'harmonisation de la vitesse coopératives pourrait accroître les performances en matière de convergence. L'étude de simulation dans la référence [83] suppose que les véhicules de la voie gérée sont équipés de dispositifs de connaissance

⁷ <https://www.ptvgroup.com/fr/solutions/produits/ptv-vissim/>

de la situation des véhicules. De plus, on suppose que les véhicules qui convergent (le trafic des bretelles) sont des CAV seulement. Le modèle de CACC choisi dans cette étude a été validé dans le cadre d'essais sur le terrain, de la manière décrite dans la référence [85]. Les trois scénarios analysés dans ces travaux étaient les suivants : opérations de CACC, pelotons de CACC et convergence coopérative du trafic, et intégration de l'harmonisation de la vitesse. Le réseau routier simulé était composé d'un segment à trois voies, d'une bretelle d'accès et d'une bretelle de sortie (voir la Figure 10); cependant, lors de l'étude, l'accent a été mis sur la voie gérée (la plus à gauche) et sur les bretelles d'accès et de sortie connexes. Dans la référence [83], l'« harmonisation de la vitesse » a été définie comme englobant généralement la réduction de la « [Traduction] vitesse en amont d'une zone très congestionnée afin de réduire la circulation en accordéon qui augmente la frustration et les accidents ». L'harmonisation de la vitesse dynamique coopérative est envisagée en vue d'aider à la convergence efficace, sécuritaire et en douceur des voies tout en maintenant au minimum l'incidence sur le trafic de la voie principale [83].

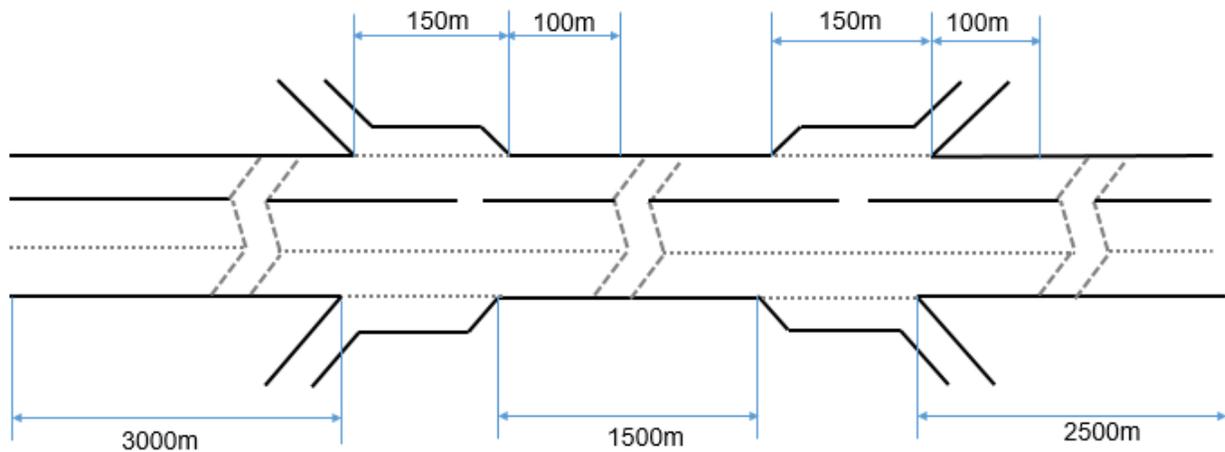


Figure 10 : Illustration du réseau routier simulé utilisé dans la référence [83].

3.4.2.2 Résultats expérimentaux

Huit essais expérimentaux ont été menés dans la référence [84] en présence de conditions légèrement différentes, comme le temps d'activation des clignotants et les positions initiales du véhicule. Les résultats de deux passes expérimentales ont été présentés. Dans ces expériences, l'erreur dans le contrôle de l'espace maintenu par le véhicule en convergence (après l'envoi d'une demande de convergence) était inférieure à 3 mètres. L'erreur d'écart correspond à la différence entre l'espace souhaité et l'espace réel. L'erreur de contrôle de l'écart maintenue par le véhicule suiveur après que l'achèvement de la convergence a été signalé dans 2 et 5 mètres dans les deux passages expérimentaux respectivement.

3.5 Freinage d'urgence coopératif

3.5.1 Aperçu

Le freinage d'urgence coopératif est étroitement lié à la fonction embarquée de freinage d'urgence automatisé (AEB). Les systèmes AEB conventionnels peuvent être considérés comme une technologie embarquée avec des contraintes inhérentes en raison de la portée de détection limitée des capteurs du véhicule, comme les caméras, le radar et le LiDAR. De plus, la détection et la segmentation des objets par les capteurs de bord modernes deviennent extrêmement difficiles dans des conditions météorologiques

défavorables et en présence d'éléments de la route qui font obstacle aux capteurs, comme la circulation automobile. Puisque l'AEB est une application embarquée autonome qui est exempte de toute fonction connectée, les manœuvres de freinage d'urgence sont effectuées sans coordination et pourraient engendrer des conditions dangereuses pour les véhicules suivants. Comme la technologie V2X pourrait éventuellement s'appuyer sur les BSM ou CAM pour fournir une connaissance de la situation dans un scénario NLOS, le freinage d'urgence coopératif peut accroître de manière importante les avantages en matière de sécurité des applications AEB embarquées. Un système AEB comporte une fonction d'assistance dynamique au freinage (DBS) ou de freinage imminent en cas d'accident (CIB) qui est conçue essentiellement pour aider les conducteurs à éviter les collisions par l'arrière. Dans un scénario type de freinage d'urgence coopératif, chaque véhicule du réseau (par exemple, un peloton) est présumé être équipé d'un système ADAS et d'un module de communications V2X. La connaissance de la situation obtenue du système ADAS de bord est communiquée au réseau et, à partir des données recueillies, une image complète est produite. La portée efficace des capteurs de perception de bord s'accroît au-delà de celle relative à la NLOS, y compris des objets de la route qui leur font obstacle.

3.5.2 Mises en œuvre recensées

Dans la littérature connexe, certains travaux ont été menés en matière de coordination des CAV avec les systèmes de freinage d'urgence coopératif. Deux grandes catégories d'approches concernant la coordination ont été étudiées dans la littérature :

- Circulation en peloton fondée sur la technologie V2V
 - Exemples : une étude de simulation présentée en 2019 [86] par des chercheurs universitaires de la Suède, de même qu'un rapport publié en 2018 et un système prototype V2V développé par des chercheurs universitaires et de l'industrie pour l'application de freinage d'urgence coopératif décrit dans la référence [87].
- Communications V2V-V2P
 - Exemples : un système prototype de freinage d'urgence qui a été mis en œuvre sur le terrain par une équipe de recherche de la France en 2018 dans la référence [88], une étude de simulation par des chercheurs universitaires de la Suède et publiée en 2018 [89], un exercice de prototypage d'un contrôleur à bas niveau par des chercheurs universitaires de l'Iran et publié en 2019 [90], de même qu'un article de recherche produit par des chercheurs universitaires des États-Unis en 2017 [91] et décrivant un certain nombre de techniques afin de réduire le retard de communications dans les réseaux V2V.

Par exemple, les auteurs dans la référence [88] proposent une plateforme expérimentale de CACC V2X à basse vitesse avec freinage d'urgence faisant appel à des capacités V2V et V2P. Le modèle de communications V2V est proposé afin de réduire au minimum les distances entre les véhicules du peloton, et les communications V2P sont fusionnées aux données LiDAR afin de détecter les piétons cachés et de prédire leurs trajectoire et interaction.

Dans d'autres travaux menés dans la référence [91], l'AEB est examiné en présence d'une connectivité V2V et V2P afin de réduire éventuellement les retards de communications et de traitement des messages. La méthode proposée dans la référence [91] empêche l'envoi de messages concernant les piétons pour lesquels il n'existe pas de risque de collision. Une application de circulation en peloton fondée V2V est présentée dans la référence [86], où le but est d'éviter les collisions par l'arrière en

proposant une stratégie de freinage d'urgence. Dans cette application, le véhicule de tête communique au moyen des messages CAM et DENM son intention avant de freiner. À noter que les messages CAM comportent des détails importants au sujet de l'expéditeur, comme l'emplacement global, la vitesse et l'accélération, alors que les messages DENM sont produits par le véhicule de tête du peloton à l'intention des véhicules suivants afin de procéder à un freinage d'urgence synchronisé.

Il a également été observé dans la littérature qu'il existe certaines mises en œuvre matérielles concernant le freinage d'urgence coopératif. Par exemple, dans la référence [87], les auteurs ont proposé un système de freinage d'urgence matériel à faible coût. Le système a été conçu de façon à interagir comme RSU et comme OBU. La plateforme est équipée de deux émetteurs-récepteurs exploitant la bande 5,9 GHz conformément aux spécifications 802.11p et ETSI ITS-G5 et d'un émetteur-récepteur de 760 MHz répondant à la norme ARIB STD T-109.

3.6 Gestion des intersections

3.6.1 Aperçu

Les statistiques sur les accidents de l'Union européenne (UE) et des É.-U. montrent que plus de 20 p. cent des accidents de la route mortels sont liés aux intersections [92]. Le cas de solutions de gestion des intersections non signalisées activées par les technologies V2X, et de l'intelligence artificielle (IA), fait l'objet d'une discussion dans la référence [93]. En comparaison de l'utilisation de feux de circulation pour planifier le franchissement de véhicules aux intersections, le concept de gestion des intersections non signalisées cherche à élaborer, au moyen de modèles, une façon de faire personnalisée et affinée tout en tenant compte des buts concernant l'amélioration du débit et l'évitement des collisions. Selon un rapport publié conjointement en 2020 par des chercheurs de l'Université de Waterloo (Canada) et de l'Université de Nanjing (Chine) [93], certains des défis principaux en matière de gestion des intersections non signalisées appuyée par la technologie V2X pourraient être les suivants : (a) élaboration de méthodes efficaces visant à assurer la planification de systèmes coopératifs efficaces; (b) mécanismes précis et en temps réel de détection des défaillances et de contrôle afin d'assurer le déroulement des opérations normales tout en évitant les interruptions de systèmes; (c) communications V2X ultra-fiables et à ultra-faible latence; (d) calculs rapides et à faible complexité pour la planification croisée, en particulier en cas de congestion routière. Des approches fondées sur l'IA, comme l'apprentissage par renforcement, les réseaux neuronaux artificiels et les systèmes multi-agents, ont été explorées aux fins de gestion des intersections dans la référence [93].

3.6.2 Mises en œuvre recensées

Selon une étude de simulation menée par des chercheurs universitaires de l'Espagne et publiée en 2018 [94], dans des conditions de forte densité de la circulation (congestions) aux intersections, la réception de paquets pourrait devenir imprévisible, ce qui pourrait produire de l'information non fiable au niveau de l'application. Pour corriger ces problèmes, plusieurs propositions ont été formulées dans la littérature au sujet du thème « [Traduction] balisage Beaconing » (signallement adaptatif); voir à ce sujet les références [95] (un sondage mené par des chercheurs universitaires de divers pays et publié en 2013) et [96] (un autre sondage publié en 2018 par des chercheurs universitaires de la Malaisie, du Pakistan et de la Chine). Le concept de balisage adaptatif traite de l'adaptation des paramètres de balisage de conscience coopérative tels que la fréquence de transmission, la vitesse et la puissance en tenant compte de divers facteurs tels

que la charge du canal, la dynamique des véhicules, la densité du trafic, les exigences d'application ou des situations spécifiques [94]. Deux grands types de protocoles de balisage adaptatif sont : (a) le contrôle de la congestion des voies; (b) le contrôle de la connaissance de la situation [97]. Les deux protocoles sont conçus de manière à assurer l'équité sur le plan de tous les nœuds du réseau, afin que ceux-ci puissent utiliser efficacement le canal de communications. Le modèle de contrôle de la congestion des voies vise à établir l'équité sur le plan de la charge de voies et des paramètres de transmission. Par ailleurs, les modèles de contrôle de la connaissance cherchent à atteindre l'équité au niveau des applications, de sorte que toutes les applications participantes puissent fonctionner efficacement. Une mesure importante, pourtant ignorée la plupart du temps en matière d'analyse des performances de tels protocoles, est l'*erreur de position* (c'est-à-dire une erreur entre la position physique véritable d'un véhicule et sa dernière position enregistrée), comme en fait foi la RSU [94]. L'erreur de position peut découler d'une inexactitude concernant le positionnement ou la localisation d'un véhicule ainsi que d'une latence propre au protocole de communications ou de signalement.

Dans les systèmes de gestion des intersections non signalisées fondées sur des agents multiples, les véhicules et les intersections sont perçus comme des agents intelligents qui collaborent entre eux. Trois approches possibles ont été présentées dans la référence [93] en ce qui concerne la mise en œuvre de la gestion des intersections non signalisées : (a) intersection isolée centralisée; (b) intersection isolée distribuée; (c) intersections non signalisées multiples. L'approche de gestion faisant appel à une intersection isolée centralisée exige un contrôleur central, auquel il est fait référence comme étant un [Traduction] *coordonnateur de gestion des intersections non signalisées (N-IMC)* dans la référence [93], afin de faciliter la communication entre les véhicules (c'est-à-dire V2X) et les calculs (c'est-à-dire la stratégie de franchissement). L'approche de gestion faisant appel à une intersection isolée distribuée, quant à elle, conçoit les véhicules comme des agents intelligents d'un système multi-agents. Chaque véhicule interagit avec les véhicules avoisinants afin d'obtenir de l'information partielle au sujet de l'environnement de circulation et prend des décisions indépendantes tout en considérant la rétroaction de l'environnement propre à cette dernière. Toutefois, un inconvénient possible de cette approche pourrait inclure des problèmes de communications liés, par exemple, à des véhicules hors de portée et des frais généraux de communications supérieurs. Afin d'atténuer ces problèmes, il a été suggéré dans la référence [93] que le N-IMC soit intégré de manière à agir comme médiateur. L'approche de gestion faisant appel à des intersections non signalisées multiples diffère des approches de gestion des intersections non signalisées isolées du fait qu'elle prend en compte des intersections multiples plutôt qu'une seule intersection isolée. Certains des objectifs qui doivent être atteints conjointement en matière de gestion des intersections non signalisées comprennent l'évitement des collisions, la réduction des temps d'attente et la diminution de la longueur des files d'attente [93].

La plupart de la littérature s'est avérée mettre l'accent sur l'architecture des systèmes, mais les flux de données, les algorithmes et le fonctionnement sécuritaire et sans défaillance ont fait l'objet de discussions dans quelques cas. Par exemple, des chercheurs de l'Université technique de Dresde, en Allemagne, proposent dans la référence [98] une intersection non signalisée, isolée et sécuritaire grâce à l'adoption de règles de franchissement selon un ordre prioritaire que l'on dit intrinsèquement sûres. L'approche proposée a été vérifiée dans une simulation. Toutefois, la littérature fait peu état de la vérification sur le terrain d'un fonctionnement sécuritaire et sans défaillance de la gestion des intersections fondée sur la technologie V2X.

3.6.2.1 Résultats de simulations

Des expériences de simulations utilisées dans la référence [93] ont révélé que dans des conditions de circulation élevée (c'est-à-dire un « [Traduction] temps d'arrivée moyen entre véhicules inférieur à 5 secondes »), tant un feu de circulation à synchronisateur fixe qu'un contrôleur de feu de signalisation attentif à la signalisation en temps réel permettaient un écoulement beaucoup plus faible aux intersections en comparaison d'une approche de gestion des intersections non signalisées. De plus, on a constaté qu'une approche coopérative, où de multiples intersections se coordonnent afin de déterminer une solution optimale pour le franchissement des véhicules, permettait en moyenne un écoulement plus élevé de la circulation à chacune de ces dernières que si chaque intersection fonctionnait de manière indépendante sans interagir avec les intersections adjacentes [93].

Une autre expérience de simulation publiée dans la référence [94] portait sur l'évaluation des performances de plusieurs protocoles de signalement adaptatif sur le plan de l'exactitude de la position dans des scénarios d'intersections fortement congestionnées. On y a conclu que les protocoles qui prennent en compte tant la dynamique du véhicule que la charge des voies occasionnent moins d'erreurs de position tout en permettant des rapports de livraison de paquets plus élevés et une charge de voies plus faible.

3.7 Convergence coopérative pour accéder à une autoroute

3.7.1 Aperçu

Les manœuvres de convergence coopérative concernent fondamentalement le problème de planification de mouvement multivéhicule [99]. Dans un scénario type de convergence routière coopérative, les véhicules sur les bretelles ou les voies locales adjacentes à l'autoroute tentent de s'insérer dans le trafic de celle-ci, de la manière décrite à la Figure 11. Afin de faciliter une convergence en douceur et sécuritaire, un espace suffisant entre deux véhicules (un véhicule de tête et un véhicule suiveur) est nécessaire. Un espace entre véhicules dans un scénario de convergence peut être considéré comme sécuritaire si le véhicule suiveur peut s'immobiliser sans collision dans l'éventualité d'un freinage soudain du véhicule de tête. Par conséquent, un espace entre véhicules sécuritaire est une fonction de la distance de freinage du véhicule suiveur à la vitesse du peloton. Un espace peut être déterminé et obtenu grâce à un contrôleur centralisé (par exemple, une RSU) ou à une coopération décentralisée entre les véhicules ou l'infrastructure routière. La manœuvre de convergence peut également varier selon le type de configuration de la convergence de la voie avec l'autoroute. Par exemple, la Figure 12 illustre trois types de configurations aux États-Unis; il s'agit nommément de la voie d'accélération parallèle, de la voie d'accélération oblique et de la voie d'entrecroisement auxiliaire [100].

Dans la littérature connexe, on signale que plusieurs efforts ont été déployés pour la coordination des CAV aux fins de convergence coopérative sur les autoroutes. Les convergences centralisées et décentralisées sont deux grandes catégories d'approches de coordination qui ont été étudiées, d'après un sondage [101] publié en 2017. Ces deux catégories se distinguent principalement entre elles par l'utilisation d'un contrôleur central (par exemple, une RSU) qui prend en compte le scénario de circulation instantané fourni par les véhicules avoisinants, afin de prendre des décisions applicables globalement sur le plan des manœuvres que devront effectuer les véhicules dans le but d'effectuer une convergence sécuritaire. Par ailleurs, dans l'approche décentralisée, tous les véhicules agissent comme agents automatisés qui coopèrent stratégiquement afin d'orchestrer une manœuvre de convergence sécuritaire.

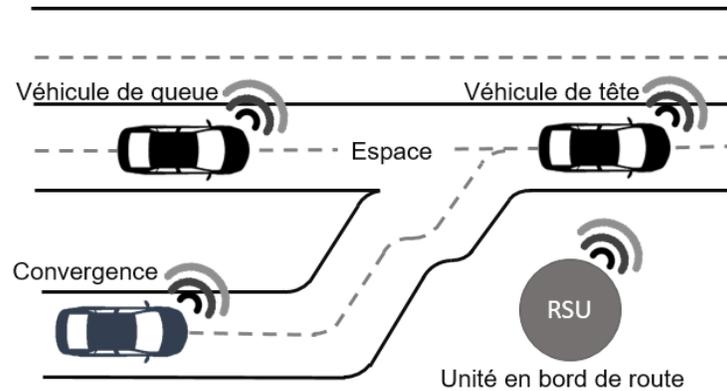


Figure 11 : Scénario type de convergence coopérative pour accéder à une autoroute [100].

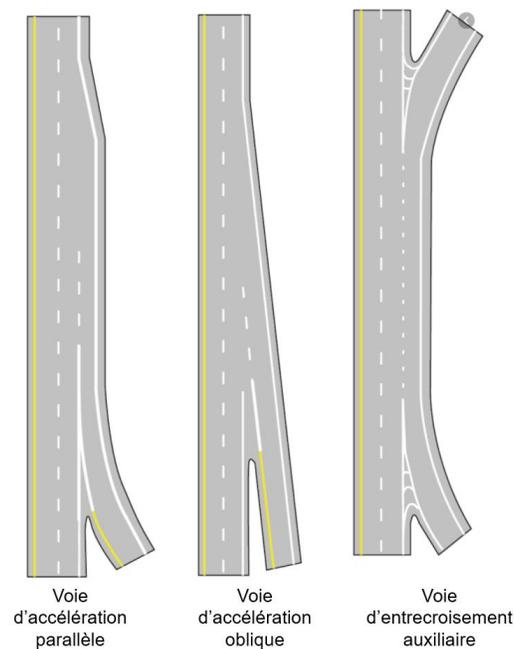


Figure 12 : Trois types de configurations de voies en convergence pour accéder à une autoroute aux États-Unis [100].

3.7.2 Mises en œuvre recensées

Ce cas d'utilisation peut être considéré comme un sous-ensemble spécial de manœuvre de changement de voie coopératif dont il a été question à la section 3.4 sans les considérations supplémentaires en matière de sécurité. Les exigences relatives à la convergence de voies coopérative et présentées dans la référence [102] (publiée par 5G-CARMEN, un consortium de l'industrie basé à l'UE) sont résumées au Tableau 5. Des exemples de l'approche centralisée sont présentés dans les références [103] et [104] (deux documents de recherche du Oak Ridge National Laboratory, TN, É.-U., publiés respectivement en 2015 et 2017), et dans la voie de convergence planifiée qui a été résolue aux fins d'optimisation du profil d'accélération de chaque véhicule par rapport aux contraintes en matière d'économie de carburant et d'évitement des collisions. Des expériences de simulation ont indiqué qu'il est possible de réduire jusqu'à 50 p. cent la consommation de carburant dans les scénarios de convergence. Parmi les approches décentralisées, des méthodes heuristiques et fondées sur l'optimisation ont été proposées. Par exemple, le document [105] a

proposé un algorithme de contrôle de la convergence coopérative, basé sur des créneaux que les véhicules occupent en se coordonnant entre eux. De plus, une RSU a été suggérée afin d’agir comme mandataire entre les véhicules sur la bretelle et ceux sur l’autoroute. D’après les résultats de ces simulations, le document [105] a prétendu à une amélioration du débit de la circulation et du délai moyen en raison de l’utilisation de l’algorithme de conduite proposé, basé sur des créneaux, en comparaison de la convergence en émulation de la conduite humaine. VISSIM est l’outil de simulation employé dans cette étude.

Exigence	Valeur
Technologies	GNSS, V2V, V2I et V2N
Précision de la localisation	4 m
Disponibilité du réseau	V2I/V2N – 99 % V2V – 99,9 %
Fiabilité du réseau	99,9 %

Tableau 5 : Exigences établies concernant le cas d’utilisation de la convergence de voies coopérative [102].

On peut prétendre que l’émulation de la conduite humaine ne peut pas représenter fidèlement le comportement réel de la conduite humaine dans les scénarios de convergence. Par exemple, l’émulation ne tient compte ni du comportement de convergence agressif, ni de la coopération manuelle entre les conducteurs, ni des conducteurs ou véhicules qui attendent patiemment qu’une fente se libère pour s’insérer sur l’autoroute. De plus, le document [105] suppose un taux de pénétration du marché de 100 p. cent, c’est-à-dire que tous les véhicules du scénario de convergence sont capables de procéder à une convergence coopérative par connectivité.

Une méthode d’optimisation fondée sur un contrôle prévisionnel du modèle non linéaire coopératif a été appliquée par un groupe de chercheurs de Caterpillar Inc. et de l’Université de l’Illinois. Cette étude publiée en 2020 [100] mettait l’accent sur la convergence de voies sur l’autoroute dans le cas de deux CAV. Les travaux de simulation portaient sur le développement et l’évaluation d’un algorithme de contrôle et supposaient que les communications V2V et V2I étaient disponibles et utilisées pour échanger des données sur l’état des véhicules. Plusieurs rapports supposaient également la possibilité de communications V2X fiables pour le développement et l’évaluation d’algorithmes de contrôle aux fins de convergence coopérative (par exemple, [106], [107] et [108]). Notons que la connectivité V2X fiable et à faible latence est une caractéristique attendue des réseaux 5G et qu’elle n’est pas disponible actuellement à grande échelle.

La présence de véhicules pourvus ou non de fonctions de connectivité a été prise en compte dans la référence [109] (un projet de partenariat entre l’université et l’industrie, soit entre le King’s College de Londres, au R.-U., et Orange Labs Services, en France, en 2020) afin de formuler des recommandations en matière de trajectoire, dans le but d’assister les manœuvres de convergence de voies coopérative. Une approche de coordination centralisée a été adoptée afin de constituer un cadre fondé sur les données regroupant deux composants : *Traffic Orchestrator* (orchestrateur du trafic) et *Data Fusion* (fusion de données). Le premier prédit les trajectoires sécuritaires afin d’aider les véhicules connectés à effectuer la manœuvre de convergence de voies et le dernier utilise les données de détection par caméra du véhicule pour définir la carte des véhicules connectés et non. Pour formuler les recommandations en matière de trajectoire, des algorithmes d’apprentissage par renforcement profond, comme Dueling Deep Q-Network

(Dueling DQN) et Deep Q-Network (DQN), ont été employés. D'autres composants de l'architecture proposée dans la référence [109] comprenaient V2X Gateway (passerelle V2X) et *Global Dynamic Map (GDM)* (carte dynamique globale). La passerelle V2X, comme son nom le suggère, servait de passerelle entre les véhicules connectés participant à la manœuvre de convergence et les interfaces et applications de l'architecture (par exemple, l'orchestrateur du trafic), suivant un paradigme de messagerie par publication et abonnement. La GDM a été utilisée pour recueillir de l'information à jour (c'est-à-dire sur la localisation et la trajectoire) des véhicules connectés et non connectés dans la zone d'intérêt. La position et la trajectoire des véhicules non connectés étaient extraites par le système de reconnaissance d'images et sont recueillies par la GDM au moyen de la passerelle V2X. Le composant de fusion de données était responsable de fusionner et de synchroniser l'information provenant du système de reconnaissance d'images et des véhicules connectés, afin de mettre à jour la GDM. L'architecture était fondée sur les communications micro-service entre ses composants. La Figure 13 décrit le scénario de convergence examiné et les composants architecturaux proposés.

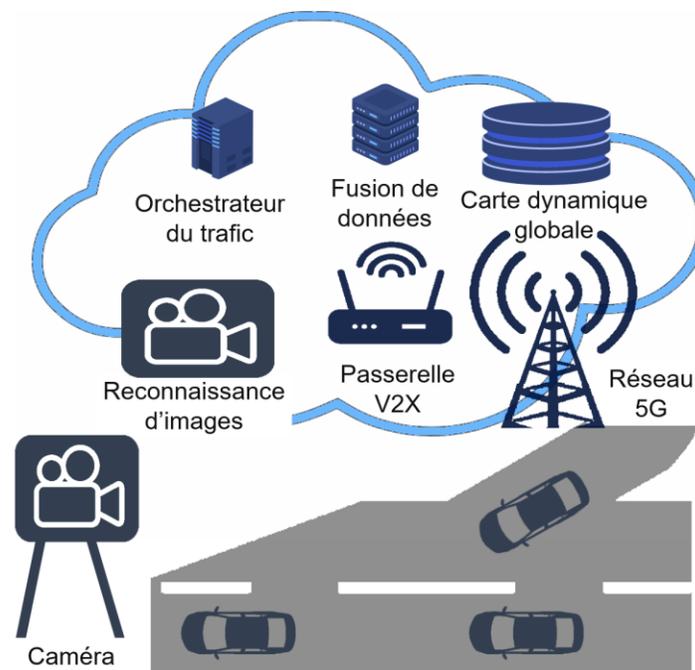


Figure 13 : Convergence coopérative proposée dans la référence [109].



Figure 14 : Scénario d'essai sur le terrain de la convergence coopérative de véhicules connectés pour accéder à une autoroute [110].

3.7.2.1 Résultats expérimentaux

Des essais dans le monde réel ont été menés dans la référence [109] sur une piste d'essai (voir la Figure 14) à l'aide de quatre véhicules. Trois d'entre eux étaient connectés et occupaient le rôle de véhicules de devant, suiveur ou en convergence. Un quatrième véhicule représentait un agent non connecté dans le scénario. Les tests portaient d'abord sur des convergences effectuées par un être humain sans l'OT (orchestrateur du trafic) afin d'établir les trajectoires de la conduite humaine comme référence. Les performances étaient évaluées d'après les indices suivants : écart par rapport aux trajectoires de convergences effectuées par un être humain, distance entre les véhicules lors de la convergence, accélération lors de la convergence, longueur de la manœuvre de convergence et durée de la trajectoire. On a constaté que certaines différences de position entre les trajectoires pour la convergence effectuée par un être humain et au moyen de l'OT étaient attribuables aux retards auxquels contribuaient les latences de communications entre les divers composants. Certains des indices de performance relevés sont résumés dans le Tableau 6. Pour la convergence de voies coopérative, le projet 5G-CARMEN a établi que le « [Traduction] soutien d'une densité de connexion élevée pour la congestion sur les routes » est une condition « obligatoire » [111].

Indice de performance	Convergence coopérative	Convergence humaine
Distance entre les véhicules (~90 % des cas)	De 48 à 60 m	De 5 à 70 m
Accélération lors de la convergence	De 0 à 2 ms ⁻²	De 0 à 2 ms ⁻²
Longueurs de réalisation complète de la manœuvre	~154 m	De 81 à 91 m

Tableau 6 : Analyse comparative des performances de la convergence coopérative par rapport à la convergence effectuée par un être humain [109].

3.8 Feux électroniques de freinage d'urgence

3.8.1 Aperçu

L'initiative CVRIA (architecture de mise en œuvre de référence des véhicules connectés) du USDOT classe les feux électroniques de freinage d'urgence (EEBL) comme cas d'utilisation en matière de sécurité de la technologie V2V [112]. Ces feux permettent à un véhicule connecté d'informer les véhicules avoisinants d'un événement de freinage d'urgence autogénéré. Par la suite, le véhicule récepteur peut évaluer le danger possible sur le plan de la probabilité d'une collision et engager, si nécessaire, les actionneurs de freinage afin d'éviter une collision. Si le véhicule n'est pas équipé d'une telle fonction de sécurité, une alerte peut être transmise au conducteur pour que celui-ci intervienne de la manière appropriée. Un essai sur le terrain mettant l'accent sur les services de soutien à la sécurité à l'aide de la technologie V2X en zones urbaines a été décrit dans la référence [113]; cet essai a été effectué par des chercheurs coréens et a été publié en 2020. Les procédures d'essai de la technologie EEBL élaborées dans ce projet ont été adoptées par l'ISO comme norme de rendement de cette technologie dans la référence [114]. La technologie EEBL offre de multiples avantages en comparaison des feux de freinage classiques :

- Elle demeure fonctionnelle même en cas d'obstruction du champ de vision d'un conducteur en raison de mauvaises conditions météorologiques ou de la présence d'un autre véhicule.
- La redondance est plus robuste et fiable dans le cas de la fonction embarquée de freinage d'urgence automatisé.

- Sur le plan du calcul informatique, elle est plus efficace, en comparaison de méthodes faisant appel à des capteurs, afin de maintenir une connaissance de la situation à l'aide de communications sans fil pour assurer la sécurité contre les collisions par l'avant.

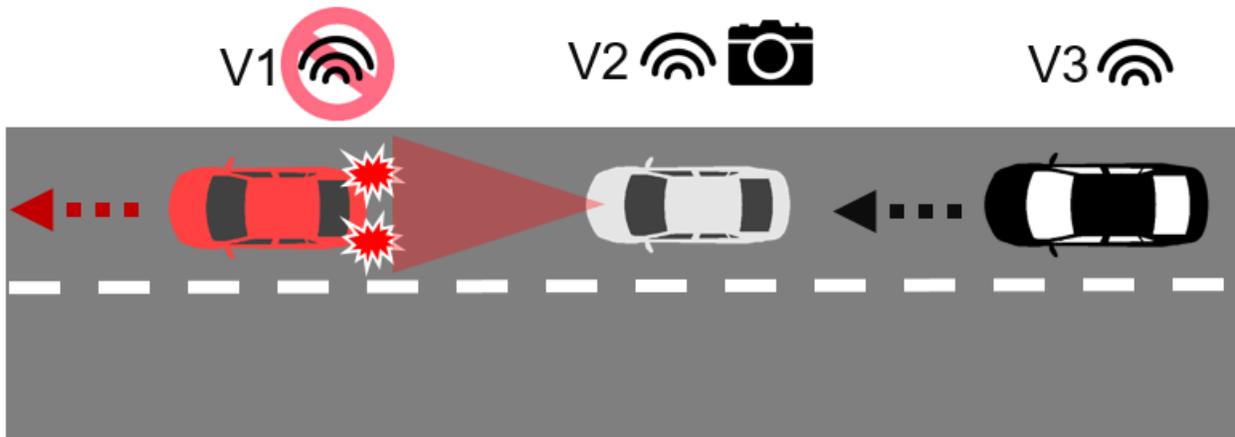


Figure 15 : Application EEBL activée par la perception collaborative, de la manière décrite dans la référence [115].

3.8.2 Mises en œuvre recensées

Un système EEBL mis en œuvre à l'aide de DENM diffusés sur un réseau C-V2X a été simulé dans la référence [116], afin d'examiner les exigences de ce cas d'utilisation. Deux exigences ont été décelées en matière de communication de DENM : taux de fiabilité élevé et faible latence. Les auteurs ont remarqué que les réseaux 5G permettront de répondre à ces exigences. Un réseau DSRC a été examiné par un groupe de chercheurs de l'industrie du Changan US R&D Center dans la référence [115], dans le but de procéder à un essai sur terrain d'un certain nombre d'applications, dont la technologie EEBL. Cet essai faisait appel à une caméra pour détecter un véhicule immobilisé (voir la Figure 15), et le retard lié à l'estimation de la décélération par la caméra a été jugé comme un facteur contribuant au retard moyen observé de 0,93 seconde dans les essais des EEBL.

3.9 Protection des usagers de la route vulnérables

3.9.1 Aperçu

La définition d'usager de la route vulnérable (UVR) fournie par le Conseil canadien des administrateurs en transport motorisé (CCATM) englobe les piétons, tout dispositif utilisé par un piéton, les véhicules récréatifs sur une autoroute, les cyclistes, les motocyclistes et les opérateurs de tout autre véhicule à deux ou à trois roues [117]. La Directive sur les systèmes de transport intelligents (STI) de la Commission européenne définit comme UVR les usagers de moyens de transport non motorisés, comme les piétons, les cyclistes, les motocyclistes et les personnes handicapées ou à mobilité ou à capacité d'orientation réduite [118]. En outre, la définition d'UVR fournie dans la référence [119] comprend les animaux de compagnie et les autres groupes mentionnés dans les deux définitions précédentes. La sécurité des UVR est un thème actif de la recherche sur la sécurité des véhicules motorisés en raison de sa forte prévalence dans les statistiques sur les accidents de la route. Par exemple, dans un rapport de Statistique Canada, d'après la Base canadienne de données de l'état civil – Décès (BCDECD) [120], 74 cyclistes ont été tués en moyenne entre 2006 et 2017. Les collisions impliquant un véhicule motorisé ont compté pour 73 p. cent de ces accidents mortels avec des cyclistes [121].

Les UVR ont d'habitude une visibilité réduite sur les routes et les conducteurs distraits peuvent parfois ne pas les voir ou remarquer leur présence, ce qui risque d'occasionner un partage non sécuritaire de la route par ces derniers. Certains véhicules équipés d'ADAS sur le marché utilisent des capteurs de perception comme fonction de sécurité afin d'aider à détecter les UVR. Ces solutions sont embarquées et les cas de NLOS ne sont pas gérés de manière adéquate (voir la Figure 16). Des capteurs déployés dans les infrastructures ou des dispositifs de connectivité transportés par les UVR peuvent contribuer à construire une carte dynamique de la position des UVR sur les routes. Si cette carte est mise à la disposition des véhicules faisant appel aux technologies V2X, cela permettra d'accroître la visibilité des UVR. Une fois qu'un véhicule connaît la position des UVR, il peut déterminer le risque de collision et déployer les manœuvres de sécurité appropriées, si nécessaire. Cela pourrait se traduire par l'émission d'une alerte au conducteur dans le cas d'un véhicule dirigé manuellement, mais un véhicule automatisé pourrait effectuer automatiquement les manœuvres de sécurité appropriée.

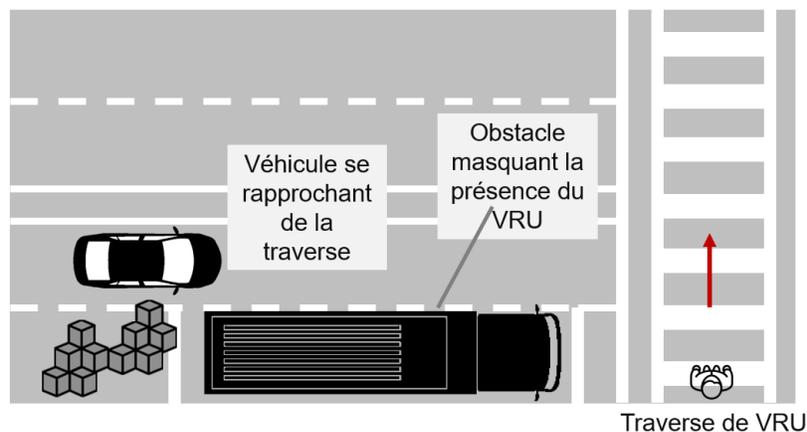


Figure 16 : UVR à une traverse masqué par la présence d'un véhicule stationné, tel que décrit dans la référence [122].

3.9.2 Mises en œuvre recensées

Afin de mettre en œuvre la protection des UVR à l'aide des technologies des CV, un certain nombre de fonctionnalités doivent interagir entre elles. Celles-ci concernent la détection des UVR, la localisation du trafic et des UVR, la prédiction du mouvement et de la trajectoire, la détermination de la possibilité de collision (centralisée ou décentralisée), la communication et, enfin, l'intervention. Dans la littérature, trois grands types d'approches peuvent être repérées en matière de détection, de localisation et de prédiction du mouvement des véhicules et des UVR : fondées sur la connectivité ou la perception ou encore une version hybride des deux [123]. Les approches fondées sur la connectivité dans les références [124] et [125] exigent des véhicules et piétons qu'ils soient équipés des outils ou dispositifs pouvant communiquer entre eux ou avec l'infrastructure. Dans les approches de systèmes fondées sur la perception [126], [127] et [128], les données (par exemple, les images 2D et 3D) de dispositifs, comme des caméras, des LiDAR ou des radars, peuvent être utilisées pour détecter et localiser les objets d'intérêt. Les capteurs de perception pourraient être déployés sur des véhicules, l'infrastructure, les piétons et les UVR. Les approches hybrides combinent les avantages des systèmes fondés sur la connectivité et la détection visuelle. Un exemple est fourni dans la référence [129], qui constitue une analyse comparative des performances de différentes approches en comparaison d'une approche hybride. Il a été signalé que l'approche hybride donnait de meilleurs résultats, car elle occasionnait moins d'erreurs de localisation comparativement à une approche fondée sur la connectivité. De plus, l'approche hybride a démontré qu'elle

permettait de mieux détecter les piétons, en comparaison d'une approche fondée sur la perception, en particulier dans les cas où un piéton pourrait ne pas être visible pour un conducteur ou un véhicule [129]. Une autre mise en œuvre de la protection des UVR fondée sur la connectivité a trait aux *passages pour piétons intelligents* activés par les technologies V2X. Les véhicules et les UVR connectés sont alertés de la présence de traverses et informés les uns les autres de cette situation de manière connectée et collaborative [130] et [131]. Sur le plan des communications (c'est-à-dire l'échange d'information entre les véhicules, l'infrastructure et les piétons), les technologies V2V et V2I ont fait l'objet de recherches exhaustives. Le concept des technologies V2P et I2P a aussi attiré une certaine attention.

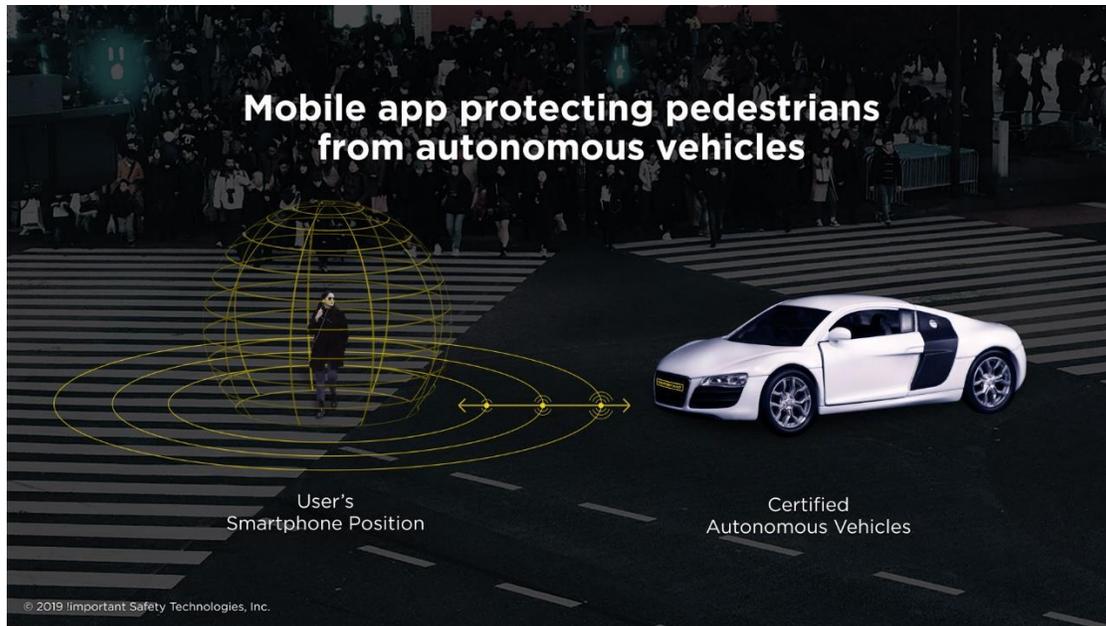


Figure 17 : Protection des UVR rendue possible grâce à la connectivité V2P de la société Important Safety Technologies (© Important Technologies Inc.).

Les applications de protection des UVR activées par connectivité ont été divisées en trois catégories dans la référence [122] :

- Zones à risque élevé d'UVR – Exemples : piétons sur passages pour piétons, piétons sur passages pour piétons aux intersections et avertissements de zone scolaire.
- UVR communiquant directement avec les véhicules (V2P) – Exemples : ouverture de portières sur la voie d'un cycliste et traverse interactive d'UVR.
- Messages de sécurité des UVR et IA – Exemples : alertes de collision (piéton et automobiliste, cycliste et automobiliste, cycliste et piéton, etc.) et passages pour piétons à forte densité.

En plus de la recherche universitaire mentionnée ci-dessus, certaines entreprises s'appuient sur les réseaux cellulaires pour assurer la sécurité des UVR. Par exemple, les entreprises AVO (<https://www.avo-inc.ca/>) et Important Safety Technologies (<https://www.important.com/>) utilisent des services de localisation de dispositifs mobiles transportés par des UVR aux fins de détection et de localisation. Les données de localisation sont envoyées directement au réseau ou au véhicule afin de veiller à la sécurité des UVR (voir la Figure 17).

Dans les approches fondées sur la connectivité, sans un taux de pénétration des marchés de 100 p. cent, la détection et la localisation des UVR non connectés posent un défi. Les limites des technologies de perception (par exemple, les conditions de visibilité et météorologiques, et les obstacles) pourraient entraver la réalisation des activités de détection et de localisation entièrement fiables et robustes d'UVR. Par conséquent, les approches hybrides qui combinent les capteurs de perception et les approches fondées sur la connectivité aux fins de détection et de localisation sont considérées comme une solution robuste possible. Toutefois, notons que l'exigence concernant les URLLC constitue un impératif à l'obtention d'une application de protection des UVR à la fois fiable et performante.

3.10 Signalement et alerte de zones de travaux routiers

3.10.1 Aperçu

Les zones de travaux routiers peuvent être définies comme des secteurs temporairement inutilisables des routes afin de permettre des activités comme des travaux de construction, d'entretien ou de services publics. Selon le type des travaux effectués, ces zones peuvent être à court ou à long terme. Normalement, le propriétaire ou les exploitants routiers doivent mettre en œuvre toute mesure de sécurité nécessaire (par exemple, [132]) afin de régler les questions et d'éviter les dangers en matière de sécurité propres aux travaux routiers. Ces questions concernent les fermetures et les changements de voies, de même que la réduction de la vitesse. Les zones de travaux routiers occasionnent une charge cognitive accrue lors de la tâche de conduite par des êtres humains et posent des défis liés au traitement des données par les VAC. Les technologies V2X peuvent aider les conducteurs et les VAC à franchir en toute sécurité des zones de travaux routiers. De plus, les UVR et le personnel des travaux routiers peuvent recevoir des alertes lorsqu'un véhicule s'approche de ceux-ci. Bien que les applications d'alerte de zones de travaux routiers comportent certains éléments de l'application d'alerte de convergence (voir la section 3.11), la portée des zones de travaux concerne les UVR et les travailleurs responsables de l'entretien plutôt qu'uniquement les véhicules.

3.10.2 Mises en œuvre recensées

Dans le cadre de l'initiative sur les systèmes de transport intelligents coopératifs (STI-C) menée à l'échelle européenne, une démonstration sur le terrain de l'alerte de zones de travaux routiers (RWW) a été effectuée en 2019 [133]. Le système a été conçu pour alerter les usagers de la route qui sont aux abords de travaux routiers à court terme, et ce, au moyen de systèmes embarqués affichant la position exacte des travaux routiers. À l'alerte fondée sur la connectivité s'ajoutait la signalisation statique habituelle installée sur l'arrière d'une remorque d'alerte. De plus, le centre de contrôle de la circulation restait informé en communiquant l'emplacement des travaux grâce à la technologie de connectivité V2X. L'échange de données entre les véhicules et l'infrastructure était fondée sur le protocole ITS-G5 ou (IEEE 802.11p) dans les formats de DENM et CAM. L'architecture générale est décrite à la Figure 18. L'essai a démontré que la portée des communications sans fil était adéquate : moyenne – 672 m, maximale – 1900 m et moyenne – 641 m. Dans 19 p. cent de tous les essais, il s'est avéré que la portée était inférieure de 300 m en raison de la présence de travaux sur une bretelle d'autoroute qui empêchait un accès LOS aux véhicules. À noter que les communications sans fil ne sont pas performantes lorsque le récepteur et l'émetteur sont dans un angle de visibilité directe très nette. Il a été établi que la mobilisation hâtive des intervenants constituait la procédure convenable pour l'introduction du nouveau système.

Audi America, le Virginia Department of Transportation (VDOT) et Qualcomm ont collaboré avec le propriétaire et exploitant d'infrastructures de communications sans fil American Tower Corporation, le fournisseur de solutions technologiques C-V2X Commsignia et l'institut de recherche Virginia Tech Transportation Institute (VTTI) afin de faire la démonstration d'applications C-V2X sur les routes de la Virginie en 2020 [134]. Cette démonstration portait sur une alerte embarquée de zones de travaux routiers, prise en charge par le FEO et activée au moyen de connectivité C-V2X (voir la Figure 19). En plus des véhicules utilisés lors de la démonstration, il y avait des vestes équipées de la technologie C-V2X et destinées aux UVR et au personnel des travaux routiers pour permettre une solution d'alerte connectée. Les résultats de cette démonstration sur le terrain ne sont pas encore publiés.

Une autre étude pilote portant sur les CV menée par le Wyoming Department of Transport (WYDOT) mettait l'accent sur la sécurité des camions de transport dans les zones de travaux routiers [135], laquelle dépendait de la technologie DSRC lors des étapes précoces. On ne sait pas exactement comment le projet pilote traite de la décision proposée par la FCC de réattribuer le spectre DSRC pour l'application C-V2X. Toutefois, les premières études de simulation (par exemple, [136]) ont démontré qu'il est possible d'améliorer la sécurité des zones de travaux routiers au moyen d'alertes précoces.

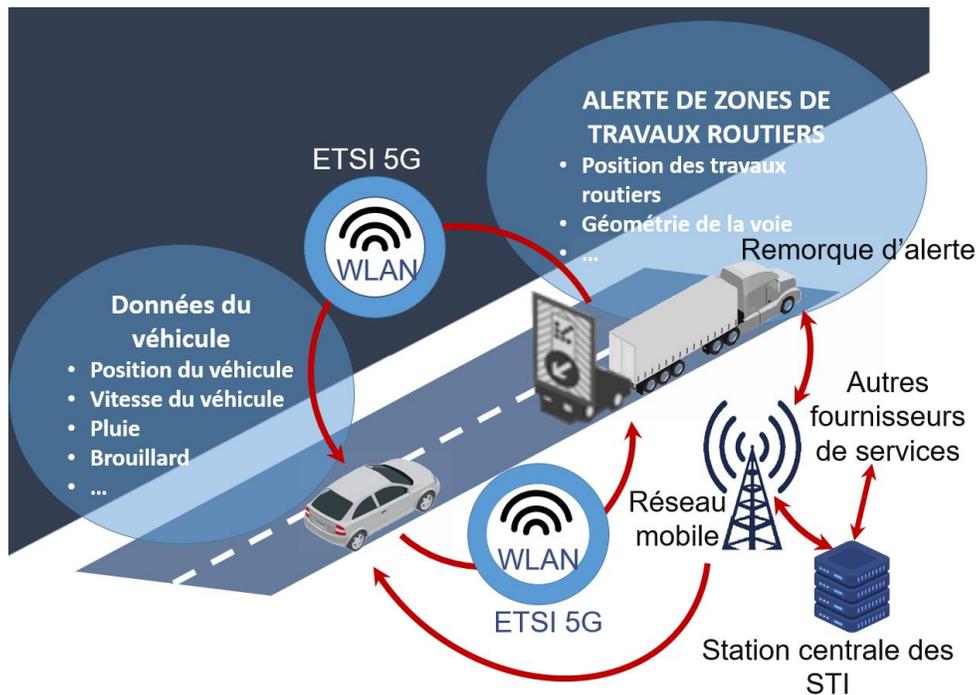


Figure 18 : Schéma de l'architecture du système RWW dans la référence [133].



Figure 19 : Alerte de zones de travaux routiers au tableau de bord du SUV Q8 d'Audi [134].

3.11 Alerte de convergence

3.11.1 Aperçu

Lorsque deux voies ou plus d'une route convergent pour n'en faire qu'une, des indicateurs comme des signaleurs, des mécanismes clignotants, des panneaux de messages modifiables et des afficheurs de surveillance de la vitesse aident à alerter les conducteurs afin qu'ils ralentissent et effectuent une manœuvre de convergence de manière sécuritaire et au moment opportun. De telles situations se produisent souvent dans des zones de travaux routiers où des voies sont fermées et où des changements de voie doivent être effectués afin de faciliter les travaux en cours. Toutefois, la convergence occasionnée par la réduction du nombre de voies n'est pas une caractéristique unique aux zones de travaux routiers. En effet, la conception de certaines autoroutes fait en sorte qu'il y a une réduction du nombre de voies et les conducteurs doivent ainsi effectuer les manœuvres de convergence à ce sujet. Des manœuvres tardives et forcées de convergence à proximité de zones de travaux routiers risquent d'engendrer des conditions non sécuritaires donnant lieu à des accidents. Bien que les mesures de sécurité classiques utilisées dans les situations d'alerte de convergence comportent d'importants avantages en matière de sécurité, les technologies des CV permettent de rehausser encore davantage la sécurité en procurant une connaissance de la situation au sujet des dangers à venir [136]. Afin d'informer de manière adéquate les conducteurs et les véhicules concernant les situations d'alerte de convergence, des mesures de sécurité doivent être déployées à plusieurs kilomètres de distance du danger, afin que les conducteurs disposent d'assez de temps pour traiter l'information et exécuter par la suite une manœuvre de convergence en harmonisant la vitesse de leur véhicule à celle de la circulation à proximité. Puisque les systèmes embarqués de détection des dangers dépendent de capteurs LOS dont la portée est d'au plus quelques centaines de mètres, l'application d'alerte de convergence peut être considérée comme un cas d'utilisation en matière de sécurité à NLOS, considérant l'exigence de fournir ou de communiquer l'alerte de danger plusieurs kilomètres d'avance. En conséquence, les technologies V2I répondent mieux à ces exigences.

3.11.2 Mises en œuvre types

Dans la littérature, les documents mettant l'accent sur les systèmes d'alerte de convergence fondés sur la technologie V2X sont peu nombreux. Toutefois, le programme pilote de déploiement de véhicules connectés, lequel est parrainé par le USDOT au Wyoming, a permis de déployer 75 RSU le long de divers tronçons d'une autoroute [135], afin de démontrer un certain nombre d'applications, dont l'alerte de convergence dans des zones de travaux routiers. Une étude faisant appel à un simulateur de conduite et menée dans le cadre de ce programme pilote dans la référence [136] faisait appel à une interface homme-machine (IHM), laquelle exploitait des communications V2I pour alerter les conducteurs concernant des fermetures de voies et les manœuvres de convergence nécessaires. Cette étude a conclu que les alertes de convergence avancées et appuyées par la connectivité V2I permettaient d'éviter les comportements liés à une convergence tardive et forcée dans les zones de travaux routiers.

3.12 Alerte de non-respect de panneaux d'arrêt

3.12.1 Aperçu

L'alerte de non-respect de panneaux d'arrêt concerne les intersections non signalisées où les véhicules doivent s'immobiliser complètement avant de franchir celles-ci [137]. À ce sujet, l'application diffère du cas d'utilisation relatif à l'alerte de non-respect de feux de circulation où l'accent porte sur les intersections signalisées (voir 3.14). Lorsqu'un véhicule se trouve aux abords d'une intersection non signalisée pourvue d'un panneau d'arrêt, sa vitesse peut être acquise à l'aide de BSM/DENM que ses capteurs ou ceux de l'infrastructure diffusent, afin de déterminer la probabilité que le véhicule s'immobilise avant de franchir l'intersection. Une fois qu'il a été établi que le véhicule risque de ne pas respecter le panneau d'arrêt se trouvant devant, un message d'alerte peut être transmis afin d'informer le conducteur du non-respect imminent. Il s'agit d'une application V2I, car l'échange de données s'effectue entre un véhicule et l'infrastructure (par exemple, une RSU).

3.12.2 Mises en œuvre recensées

Bien que cette application V2I ait été reconnue par les organismes de réglementation et de normalisation (par exemple, [137] et [138]), il existe dans la littérature un faible nombre de rapports concernant des essais sur le terrain ou des études de simulation à ce sujet.

3.13 Assistant de distance aux panneaux d'arrêt

3.13.1 Aperçu

Dans un rapport publié en 2015 [139], le USDOT a défini l'assistant de distance aux panneaux d'arrêt (SSGA) comme une application de sécurité conçue pour aider les conducteurs à franchir des intersections contrôlées par panneaux d'arrêt sur des routes secondaires. Des capteurs montés sur l'infrastructure ou le véhicule sont utilisés pour obtenir l'état instantané de la circulation aux environs de l'intersection sur les plans de la position et de la vitesse de tous les véhicules. Compte tenu de cet état, le système pourrait fournir au conducteur des messages d'avis, d'alerte ou d'avertissement de l'application, au moyen d'une interface déployée à bord, afin que le conducteur ait le temps d'effectuer la manœuvre appropriée dans le but de franchir de manière sécuritaire l'intersection.

3.13.2 Mises en œuvre recensées

Une étude de simulation faisant l'objet de la référence [140] supposait une intersection d'un « centre-ville » avec quatre panneaux d'arrêt, caractérisée par des véhicules lents avec une densité élevée de véhicules. Au total, quatre RSU représentaient l'infrastructure connectée. Cette application simulée prescrivait des taux de décélération aux conducteurs approchant l'intersection grâce à la connectivité V2I. Les auteurs ont fait valoir que l'application proposée améliorerait la sécurité en comparaison du comportement émulé de conduite par un être humain sans accès à la technologie V2I.

3.14 Alerte de non-respect de feux de circulation

3.14.1 Aperçu

Dans cette application de sécurité V2I, les informations de position et de vitesse signalées par les véhicules équipés et les mesures transmises par l'infrastructure pour les véhicules non équipés à proximité d'une intersection à feux, sont utilisées pour fournir des messages d'avertissement aux conducteurs avant qu'ils ne violent un feu de circulation. Bien que ce cas d'utilisation soit étroitement lié à la gestion des intersections, les deux applications ont une portée différente. En effet, alors que l'application de gestion des intersections pourrait inclure des groupes d'intersections afin d'améliorer le débit d'un grand réseau routier, le domaine opérationnel concernant le non-respect de feux de circulation se limite à une seule intersection. Cette application de sécurité est l'un des premiers cas d'utilisation conceptualisés de la technologie V2X. Avant 2010, les É.-U. ont mené l'initiative portant sur les systèmes d'évitement de collision coopératif aux intersections (CICAS), laquelle incluait un système d'alerte de non-respect de feux de signalisation [141].

3.14.2 Mises en œuvre recensées

Puisque les domaines opérationnels des applications V2X les plus récentes concernant la sécurité aux intersections se sont avérés particuliers à certaines activités selon les observations faites (par exemple, non-respect de panneaux d'arrêt, assistance pour les virages à gauche et assistant de distance aux panneaux d'arrêt), le cas d'utilisation générique relatif à l'alerte de non-respect de feux de signalisation est mis en œuvre sous la forme d'un ensemble de cas d'utilisation dans la littérature récente. Par conséquent, bien que la conception de cette technologie ait pu faire l'objet de discussions dans la littérature datant d'un certain temps, on recense peu de publications plus récentes sur cette application dans la pratique.

3.15 Signalisation prioritaire pour le transport en commun CV

3.15.1 Aperçu

La signalisation prioritaire pour le transport en commun (SPTC) fait référence aux techniques et stratégies visant l'amélioration du fonctionnement des services de transport en commun aux intersections signalisées, en manipulant dynamiquement la durée des signaux (par exemple, en prolongeant la durée du feu vert ou en réduisant la durée du feu rouge), afin d'accorder la priorité à la traversée et au départ des véhicules de transport en commun. Une nette distinction a été faite entre les systèmes SPTC classiques et fondés CV dans une étude effectuée par le Virginia Tech Transportation Institute (VTTI) et parrainée par le USDOT en 2020 [142]. Alors que les systèmes classiques faisaient appel à des horaires définis ou à des mécanismes de détection déployés dans l'infrastructure pour détecter l'arrivée d'un véhicule de transport en commun à une intersection signalisée, la SPTC VC s'appuie sur les données haute-fidélité des véhicules

de transport en commun au moyen des communications V2I, afin de mettre en œuvre un système plus adaptatif capable de réagir aux situations de la circulation en temps réel qui connaissent des changements dynamiques. Ainsi, les applications SPTC CV permettent de surmonter les limites des systèmes classiques. Les avantages possibles sont notamment une durée de déplacement plus rapide des usagers du transport en commun, un accroissement de la sécurité et une diminution de l’empreinte environnementale découlant de la durée de déplacement réduite.

3.15.2 Mises en œuvre recensées

L’un des premiers essais sur le terrain d’un système SPTC avec une connectivité sans fil a été mené en 2011 par la ville de Minneapolis. Pendant une période d’essai de deux semaines, la connectivité sans fil a permis, selon les observations, de réduire de 3 à 6 p. cent la durée de déplacement [143]. Un autre essai sur le terrain effectué au banc d’essai de Smart Road à VITTI (Blacksburg, Virginie) a démontré que le système SPTC CV mis en œuvre a permis de réduire de 32 à 75 p. cent les retards des autobus du transport en commun dans tous les essais [144]. L’exploitant de chemins Tampa Hillsborough Expressway Authority (THEA) a participé à un projet de déploiement pilote de CV en partenariat avec le USDOT où le plan consistait à mettre en œuvre un système SPTC dans une artère urbaine, avec l’objectif d’accorder la priorité aux autobus du transport en commun aux intersections signalisées et d’aider ceux-ci à maintenir un calendrier prévisible [145]. Toutefois, il est indiqué dans la référence [146] qu’aucune information sur les performances n’est disponible, le déploiement ayant échoué lors de la période d’évaluation.

3.16 Traversée de passage à niveau

3.16.1 Aperçu

Les accidents mortels et les blessures graves découlant de collisions à des passages à niveau et la sécurité de ces derniers préoccupent fortement les autorités ferroviaires [147]. Bien qu’un mécanisme embarqué d’alerte à l’approche d’un passage à niveau ait été proposé dès 1975 [148], des dispositifs de sécurité classiques, comme des signaux actifs et passifs, sont habituellement utilisés pour prévenir les collisions aux passages à niveau. Les systèmes d’alerte de passages à niveau fondés sur la connectivité peuvent gérer les cas de NLOS afin d’améliorer la sécurité.

3.16.2 Mises en œuvre recensées

Une application fondée sur la connectivité et concernant la sécurité des passages à niveau a été conceptualisée dans la référence [149], laquelle visait à s’appuyer sur les communications entre systèmes, soit entre les VANET formés par véhicules aux environs du passage à niveau et les systèmes de commande intégrale des trains (PTC), dans le but de réduire les collisions. Une mise en œuvre fondée sur les DSRC a fait l’objet d’essais sur le terrain par l’Université La Trobe en Australie [150]. Un essai sur le terrain effectué en 2018 par des chercheurs de l’Université Shandong, en Chine, et de l’Université de l’Alberta, au Canada [147], concernait le déploiement d’OBU sur le véhicule sur rail et sur le véhicule d’essai. Les communications DSRC ont été mises en œuvre afin d’échanger de l’information entre les OBU à un taux de 1 Hz. À l’aide de l’information en temps réel recueillie des OBU, le risque de collision a été évalué de manière décentralisée par l’OBU déployée dans le véhicule. Le conducteur était alerté en cas de probabilité élevée, laquelle était évaluée d’après l’information recueillie.

Trainfo (<https://trainfo.ca/>), le fournisseur canadien de solutions de STI, propose de l'équipement, comme des capteurs, de la technologie de connectivité, des RSU et un accès à des serveurs infonuagiques, dans le but d'instrumenter les passages à niveau afin qu'une surveillance active puisse en être effectuée pour réduire tout risque de collision. Ce fournisseur a, semble-t-il, présenté un certain nombre d'exposés à la Federal Railroad Administration (FRA) des États-Unis et a collaboré avec les villes de London, en Ontario, et de Winnipeg, au Manitoba.

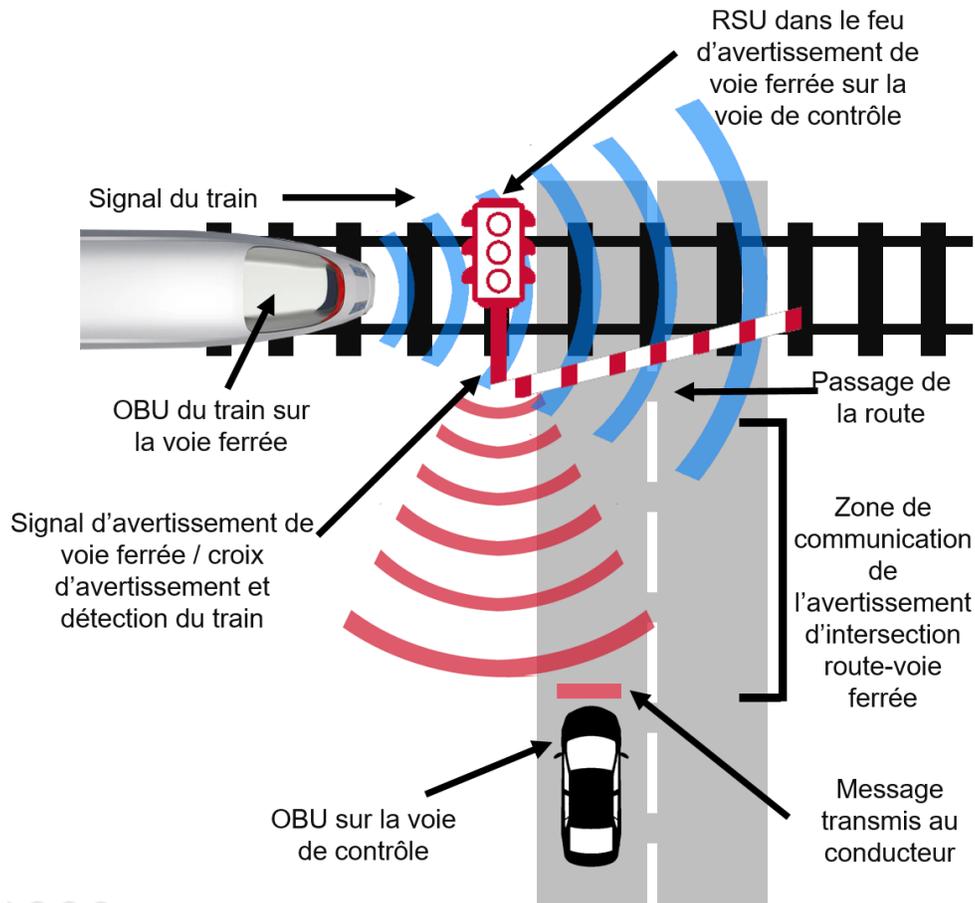


Figure 20 : Essai sur le terrain d'un passage à niveau basé sur DSRC, par l'Université La Trobe [150].

3.17 Régulation et harmonisation de la vitesse des CV

3.17.1 Aperçu

Le principe central de la régulation de la vitesse des CV consiste à employer des technologies des CV afin de réguler et prescrire les vitesses des véhicules selon les conditions de la circulation et l'information concernant les conditions météorologiques, afin que ces derniers puissent fonctionner en toute sécurité tout en gérant dynamiquement les circonstances affectant la circulation. Réduire le plus possible les risques en matière de sécurité et diminuer les inefficacités en raison des conditions de la circulation (par exemple, la congestion, les embouteillages et les incidents) et des conditions météorologiques (par exemple, du brouillard ou des averses de pluie ou de neige) constituent les deux buts principaux des applications des CV. Un cas d'utilisation étroitement lié de l'harmonisation de la vitesse CV vise à minimiser les oscillations

du trafic dans le domaine spatial et temporel. Puisque les oscillations de la circulation ont été associées à des risques accrus en matière de sécurité et à une inefficacité en matière d'économie de carburant, l'harmonisation de la vitesse des VC peut être avantageuse dans les deux cas.

3.17.2 Mises en œuvre recensées

La littérature connexe compte quelques rapports traitant des concepts, des études de simulation et des démonstrations sur le terrain de ces applications. Puisqu'il s'agit d'applications des CV relativement nouvelles, la littérature connexe varie grandement sur les plans des objectifs des applications, de la méthodologie de mise en œuvre et des résultats ciblés. Les études de simulation présentées dans la référence [151] portaient sur la mise en œuvre de systèmes d'avis sur la vitesse des véhicules, qui recommandaient aux conducteurs des vitesses optimales, au moyen d'OBU connectées, en réponse à une visibilité réduite occasionnée par des conditions de brouillard. Dans une autre étude faisant appel à un simulateur de conduite et présentée dans la référence [152], il a été démontré que les conducteurs de camion professionnels sont moins enclins à avoir un accident lorsqu'ils reçoivent des messages d'avis sur la vitesse au moyen d'OBU embarquées en présence de conditions météorologiques défavorables. Les études de simulation et les expériences sur le terrain où une application d'harmonisation de la vitesse de CV a été mise en œuvre sont présentées dans la référence [153] et ont indiqué que la connectivité V2I peut être utilisée pour réduire au minimum les oscillations de la circulation sur les plans spatial et temporel sur une autoroute.

3.18 Priorité accordée aux véhicules d'urgence constituant des CV

3.18.1 Aperçu

Les systèmes de priorité accordée aux véhicules d'urgence (EVP) visent à donner le droit de passage aux véhicules d'urgence, comme des camions de pompiers, des ambulances et des véhicules de police, se dirigeant vers le lieu d'un incident, au moyen d'un réseau d'intersections signalisées afin de réduire le plus possible le temps de déplacement⁸. L'information relative à l'itinéraire, à la position, à la vitesse et aux caps prévus du véhicule d'urgence peut être transmise au moyen de mécanismes de communications V2V et V2I afin de libérer l'itinéraire complet ou la voie d'approche [154]. Les systèmes EVP enrichis des technologies des CV pour recevoir en temps réel l'information sur la circulation peuvent diminuer le risque accru en matière de sécurité associé aux véhicules d'urgence tout en réduisant le temps de déplacement.

3.18.2 Mises en œuvre recensées

La littérature connexe sur les systèmes EVP fondés sur les CV est relativement plus riche que celle concernant les autres cas d'utilisation. Toutefois, la plupart des recherches universitaires mettent l'accent sur des études de simulation traitant de l'analyse des retards, de la sécurité du trafic, du comportement des véhicules d'urgence, etc. [155] et [156].

Quelques fournisseurs de solutions de STI offrent des systèmes EVP prêts à être déployés et fondés sur les CV. Le système EVP développé par EMTRAC (<https://www.emtracsystems.com/>) est déployé dans trois villes (Sunnyvale et Novato, en Californie, et Coquitlam, en Colombie-Britannique) et peut être intégré

⁸ La commande prioritaire diffère de la TSP, laquelle ne demande que la priorité alors que la commande prioritaire interrompt les cycles réguliers de l'intersection signalisée pour accorder la priorité la plus élevée aux véhicules d'urgence.

aux systèmes existants. Il se caractérise par une OBU qui transmet une demande de priorité aux intersections équipées d'un module de détecteur de priorité installé dans l'armoire du contrôleur du feu de signalisation au moyen d'une communication radio de 900 MHz. On prétend que des réductions de temps de réponse variant entre 20 et 45 p. cent ont été obtenues grâce à ce système. Un autre système EVP commercial d'Orange Traffic (<https://www.orangetraffic.com/>) s'appuie sur le positionnement GPS et la connectivité cellulaire pour permettre une réduction aussi élevée que 20 p. cent des temps de réponse tout en améliorant la sécurité des véhicules d'urgence.

4 Applications non liées à la sécurité

4.1 Alerte de congestion de la circulation

4.1.1 Aperçu

La connaissance des embouteillages ou de la densité du trafic peut être utilisée dans des applications telles que le réacheminement, les premiers secours et la planification urbaine. Le réacheminement des véhicules vers des zones moins congestionnées peut aider à réduire le temps de déplacement, entraînant une réduction des impacts environnementaux, comme les émissions de carbone et la pollution par le bruit, et à améliorer la santé mentale des conducteurs et des passagers. Puisque les embouteillages sont souvent une conséquence indirecte d'événements inhabituels ou imprévus, comme des accidents de la circulation, cette information peut aider à améliorer l'intervention des premiers secours. La détermination des zones de congestion élevée peut aider les urbanistes à améliorer l'écoulement global de la circulation en indiquant les routes qui requièrent des réparations, en créant des itinéraires de rechange ou en instaurant de nouvelles règles routières.

Les technologies des CV peuvent être utilisées pour déterminer avec précision la congestion de la circulation à l'échelon local en temps réel avec un niveau de détail élevé, comme l'activité à une intersection ou de la circulation sur une voie en particulier. Une mise en œuvre possible pour évaluer le niveau de congestion de la circulation consiste à installer des microphones le long d'une route afin de mesurer les signaux de bruit acoustique, comme des klaxons ou encore des bruits de moteur ou de pneus [157]. Une autre mise en œuvre évalue les caractéristiques relatives aux images de texture ou de rebord saisies à l'aide de caméras disposées le long de la route [158]. Un dernier exemple de mise en œuvre consiste à utiliser des algorithmes qui réunissent les grappes dans des cadres de VANET [159].

4.1.2 Mises en œuvre recensées

Le défi principal en matière de mise en œuvre est le taux d'adoption de la technologie des CV, que ce soit pour l'infrastructure ou dans les véhicules. Dans des solutions fondées sur la technologie V2I et qui dépendent de capteurs, comme des caméras ou des microphones, on peut évaluer le taux de congestion de la circulation seulement aux intersections ou dans les zones où ces capteurs sont déployés. Il en coûterait cher pour utiliser ces méthodes afin d'étudier les situations de congestion de la circulation dans un grand secteur, comme une ville, et il faudrait effectuer à cette fin des investissements importants dans l'infrastructure. De même, pour les solutions basées sur le V2V, y compris celles des VANET, les estimations de congestion du trafic nécessiteraient qu'un nombre important de véhicules soient équipés d'une technologie CV capable de partager leurs informations.

Un autre défi est la charge de calcul, qui peut souvent être supérieure à ce qu'un RSU ou un véhicule peut gérer. Cela est particulièrement évident dans le cas d'estimations de la congestion de la circulation sur de grandes zones ou pour l'application de cette information en vue de requêtes, comme le réacheminement ou l'optimisation des voies. Une solution possible à ce défi, laquelle est présentée dans la littérature, est la méthode FCD (données de voiture flottante) où toute l'information provenant de véhicules et de RSU est transmise au moyen d'un protocole, comme celui des réseaux cellulaires, à des centres de commande responsables d'effectuer les calculs et à relayer les résultats obtenus (par exemple, [160], [161] et [162]).

4.2 Régulateur de vitesse adaptatif coopératif

4.2.1 Aperçu

En intégrant les communications V2V aux systèmes régulateurs de vitesse adaptatifs (ACC), l'application de régulateur de vitesse adaptatif coopératif (CACC) coordonne la vitesse et la position des véhicules avoisinants afin de former un peloton. Le véhicule à la tête du peloton définit la vitesse voulue de manière adaptative en fonction de la situation de la circulation de devant, et les véhicules suivants ajustent leur vitesse afin de maintenir un espace fixe entre eux. Puisque le CACC utilise l'automatisation pour contrôler la vitesse sur le plan longitudinal, les limites de la conduite par l'être humain n'affectent pas nécessairement les performances du CACC. De plus, comme les communications V2V permettent la diffusion immédiate de situations d'accélération et de décélération de tout véhicule du peloton, le système peut fonctionner en toute sécurité, même lorsque l'espace entre les véhicules est relativement court. En conséquence, il est possible de former un peloton plus serré afin d'accroître l'utilisation des routes et le débit général sur celles-ci. De plus, les systèmes CACC réduisent les oscillations de la circulation sur les plans spatiaux et temporels, ce qui améliore la sécurité et réduit la consommation de carburant. Ainsi, les systèmes CACC peuvent accroître les performances du réseau routier, en particulier sur les autoroutes à forte densité de véhicules, ce que l'on observe en général dans de grands milieux urbains [163].

4.2.2 Mises en œuvre recensées

Une étude de simulation effectuée par une équipe composée de Nokia Networks, en Pologne et aux É.-U., de l'Université Poznan of Technology, en Pologne, et de Vodafone Group R&D, au R.-U., portait sur une analyse comparative des performances des communications V2V respectant les normes IEEE 802.11p (DSRC) et 3GPP C-V2X dans une application de CACC visant des camions dans la référence [164]. Même dans des pelotons à forte densité et selon le niveau d'achalandage correspondant dans le spectre du sans-fil en raison de la présence d'un grand nombre de nœuds, la technologie C-V2X a offert des performances fiables et robustes, permettant ainsi la formation de pelotons plus serrés. Un projet collaboratif entre l'Université de la Californie, Berkley, et le constructeur automobile Nissan visait l'essai sur le terrain d'un système CACC prototype fondé sur les communications DSRC dans la référence [165]. Le système était assez adaptatif pour accommoder les véhicules non équipés perturbant la formation du peloton. De plus, le système CACC comportait des niveaux d'oscillation réduits de la circulation sur le plan de la variabilité des espaces entre les véhicules, en comparaison du système ACC installé par le FEO sur les véhicules d'essai. Un algorithme de contrôle du CACC soumis à des contraintes relatives au confort des passagers (c'est-à-dire des profils d'accélération et de décélération en douceur), à la sécurité et à une limite de vitesse prescrite a été élaboré dans la référence [166], laquelle a été publiée en 2020 et décrit un exercice de prototypage de la loi sur le contrôle en vue de réguler la vitesse par CACC. Le contrôleur prototypé, en régulant la vitesse d'un véhicule dans les deux dimensions (c'est-à-dire sur les plans latéral et longitudinal), a démontré la fiabilité des performances du CACC dans les études de simulation.

4.3 Gestion des éco-voies

4.3.1 Aperçu

Les éco-voies sont des voies réservées qui s'apparentent à des voies gérées, y compris celles réservées aux véhicules multioccupants (HOV) ou celles qui sont à covoiturage tarifées (HOT), et qui sont optimisées à des fins d'utilisation par des véhicules respectueux de l'environnement [167]. L'initiative dirigée par le

USDOT, AERIS⁹, a fait appel à cette étude fondée sur des modèles de cette application et a fait état d'économies de carburant pouvant aller jusqu'à 22 p. cent sur un corridor routier du monde réel [168]. Le concept a été élaboré dans la National ITS Reference Architecture du USDOT dans la référence [169], qui concevait les éco-voies comme des voies définies et gérées dynamiquement afin d'en tirer des avantages sur le plan environnemental. De plus, les éco-voies peuvent être créées ou mises hors service sur une route d'après les données de circulation en temps réel et environnementales qui sont recueillies de multiples sources, dont les véhicules, l'infrastructure et d'autres systèmes utilisant les technologies des CV. Les données pertinentes peuvent inclure les types de véhicules autorisés à circuler sur les éco-voies, la spécification des clôtures géographiques de celles-ci et les paramètres d'émission pour leur accès.

La gestion des éco-voies est étroitement liée à d'autres applications des CV, comme l'harmonisation de la vitesse et l'éco-acheminement dynamique, qui procurent également des avantages sur le plan environnemental. Des descriptions générales de cette application sont présentées dans plusieurs documents publiés par des organismes de réglementation ou des organismes de recherche (par exemple, [167], [168] et [169]); toutefois, peu d'entre eux en décrivent la mise en œuvre.

4.4 Éco-acheminement dynamique

4.4.1 Aperçu

De manière semblable aux systèmes de navigation classiques qui proposent des itinéraires fondés sur la distance ou la durée la plus courte possible, l'éco-acheminement suggère des itinéraires d'après des taux d'émission ou une consommation de carburant minimaux. Pour l'éco-acheminement dynamique, des changements sont apportés dans l'éco-acheminement proposé, d'habitude en temps réel, à la suite de toute nouvelle information, comme la fermeture de routes et des données sur la circulation. Une mise en œuvre de cette application avait trait à l'élaboration d'une stratégie d'éco-acheminement qui faisait usage de données sur la consommation de carburant par les conducteurs dans un véhicule de catégorie semblable et par d'autres conducteurs [170]. Dans une autre mise en œuvre, on a fait appel à des données historiques et à de l'information sur la circulation en temps réel, à des facteurs d'émission pour une variété de types de véhicules dans diverses conditions routières et de la circulation, de même qu'à des calculs de l'itinéraire optimal en fonction de la distance la plus courte pour déterminer l'itinéraire le plus respectueux de l'environnement sur le plan de la consommation de carburant [171]. Une troisième mise en œuvre portait sur la prédiction de variables de la circulation, comme la vitesse des véhicules, l'écoulement par densité, le temps de déplacement, la réduction des émissions et l'économie de carburant, pour concevoir une stratégie d'éco-acheminement optimale [172].

4.4.2 Mises en œuvre recensées

À l'instar d'autres cas d'utilisation en matière de connectivité, la majorité des travaux accomplis sur cette question n'ont fait l'objet d'un essai que dans un contexte de simulation. Il y a également des exigences et des défis semblables, allant de l'infrastructure nécessaire pour effectuer les calculs et de la propagation de l'information entre les véhicules au taux d'adoption qui limiterait la quantité d'information disponible pour mettre à jour les politiques en matière d'éco-acheminement dynamique.

⁹ https://www.its.dot.gov/research_archives/aeris/index.htm

La complexité constitue un défi propre à l'éco-acheminement. Le coût en carburant selon l'itinéraire dépend de nombreux facteurs en comparaison du problème lié à l'itinéraire le plus court. Il s'agit notamment des caractéristiques de l'itinéraire, des caractéristiques du véhicule et du comportement de conduite. La consommation moyenne de carburant tend à être plus élevée dans les zones très passantes, un niveau de congestion plus élevé occasionnant davantage d'arrêts, ce qui accroît le temps de déplacement, de même qu'une accélération et un freinage fréquents. Un autre facteur a trait à la conception du système de communications qui s'est avéré avoir une incidence importante sur la consommation de carburant à l'échelle du réseau [173]. Les zones très passantes imposent une charge plus élevée au réseau en raison du grand nombre de nœuds de véhicules, ce qui cause une détérioration de ses performances (par exemple, perte de paquets et augmentation des retards de communications).

4.5 Gestion intelligentes des stationnements

4.5.1 Aperçu

La gestion intelligente des stationnements consiste à surveiller en temps réel les places inoccupées dans des stationnements et à relayer cette information à des technologies V2X en attente. Cela permet aux usagers, aux exploitants et aux propriétaires de stationnements d'obtenir en temps réel de l'information sur les taux d'occupation et de disponibilité de ceux-ci. Parmi les avantages de la gestion des stationnements intelligents, mentionnons la réduction des émissions et de la charge de trafic en raison de la diminution des temps de ralenti et de circulation, la réduction des coûts grâce au recours à l'identification automatique des véhicules et au paiement en ligne, de même que l'amélioration de l'application des règlements en matière de stationnement. La méthode de gestion des stationnements intelligents pourrait aussi être appliquée aux services de voiturier automatisés. Une autre application possible concerne le stationnement assisté automatisé pour se garer et quitter une place de stationnement à proximité.

4.5.2 Mises en œuvre recensées

Une mise en œuvre du stationnement intelligent concerne le stationnement communautaire, comme la solution élaborée par Bosch Mobility Solutions¹⁰, où les places de stationnement disponibles sont déterminées au moyen de capteurs ultrasoniques dont sont équipés les véhicules qui passent. Ces données sont rendues anonymes, envoyées au nuage et compilées, de sorte qu'une carte des places de stationnement inoccupées puisse être produite et transmise à la communauté en temps réel. Parmi les défis, il faut avoir un taux d'adoption suffisant pour compiler l'information et tenir à jour la carte du réseau des places de stationnement, de même que disposer de l'infrastructure et des applications nécessaires pour gérer et analyser ces données.

Une autre mise en œuvre de la gestion des stationnements intelligents concerne la tarification des places de stationnement adaptée à la demande. Des exemples de cette mise en œuvre comprennent le projet pilote SFpark¹¹ à San Francisco et LA Express Park¹² à Los Angeles. Au moyen de capteurs pour déterminer le taux d'occupation et de parcomètres intelligents, les villes ont pu charger le tarif le plus bas

¹⁰ <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/products-and-services/mobility-services/connected-parking/community-based-parking/>

¹¹ <https://www.sfmta.com/projects/sfpark-pilot-program>

¹² <https://www.laexpresspark.org/>

possible sans créer une pénurie de places de stationnement, à l'aide d'une politique de tarification transparente et fondée sur des données. Au cours des deux années du projet pilote SFpark [174], le tarif horaire moyen des parcomètres de rues a été réduit de 4 p. cent et celui des garages, de 12 p. cent, alors que les recettes totales, découlant en partie d'une augmentation de la durée opérationnelle, ont augmenté chaque année de 1,9 million de dollars américains. De plus, le temps passé à chercher une place de stationnement a diminué de 43 p. cent selon ce qui a été rapporté. Par ailleurs, en raison d'une expérience davantage connectée et rationalisée pour s'acquitter des frais de stationnement, il y a eu 23 p. cent moins de constats d'infraction par parcomètre. Une réduction du croisement et de la congestion de véhicules ainsi que des accidents de la circulation occasionnés par une conduite distraite, de même qu'une diminution des émissions de gaz à effet de serre et de la pollution de l'air figuraient au nombre des autres avantages.

Parmi les exigences relatives à l'instauration de la tarification des places de stationnement adaptée à la demande, mentionnons l'équipement du garage de stationnement, les capteurs pour assurer le suivi du nombre de véhicules qui entrent dans le garage et en sortent, les capteurs de stationnement pour détecter la présence ou l'absence d'un véhicule dans une place, les parcomètres resautés intelligents, les capteurs de route, les données en temps réel et les applications mobiles, de même que la gestion des données et les outils de production de rapports. Les défis incluent la durée de vie des piles des parcomètres intelligents et des capteurs, la disposition des capteurs et la détermination des facteurs ayant une incidence sur la disponibilité des places de stationnement afin de mieux optimiser la tarification.

4.6 Infodivertissement à bord

4.6.1 Aperçu

L'infodivertissement à bord (IVI) est une combinaison de systèmes pour véhicules qui informent et divertissent le conducteur, les passagers et le milieu environnant au moyen de matériel et de logiciels. Depuis les radios et lecteurs de cassettes et de CD pour véhicules jusqu'aux systèmes de navigation et de divertissement à la demande, l'IVI continue d'évoluer pour améliorer l'expérience à bord. En matière de connectivité, les technologies 3G, 4G-LTE et 5G offrent aux constructeurs automobiles, aux fournisseurs de matériel électronique et aux développeurs de logiciels davantage de possibilités pour créer une expérience immersive, sécuritaire et connectée.

Avec la technologie 3G, l'IVI, comme OnStar de General Motors¹³, a permis de fournir des services tels l'avis automatique de collision, le sauvetage d'urgence et les diagnostics à la demande. Elle a également permis aux véhicules d'accéder à Internet et d'interagir avec des téléphones cellulaires, de même qu'exploiter des applications, comme les appels mains-libres.

Les technologies 4G et LTE ont amélioré ces services et ont permis l'ajout d'autres applications pour accroître l'expérience générale des utilisateurs. Un ajout principal concerne les services audio en ligne, comme la radio par Internet SiriusXM et Spotify (qui offre des listes de lecture personnalisée de même qu'un accès à des stations et aux nouvelles). Un deuxième ajout a trait aux assistants vocaux embarqués actionnés par l'IA, qu'il s'agisse de ceux provenant de constructeurs automobiles, comme l'assistant personnel intelligent de BMW et l'assistant vocal Hey Mercedes de Mercedes-Benz, ou d'entreprises

¹³ <https://www.onstar.com/ca/fr/home/>

technologiques, comme Android Auto de Google et CarPlay d'Apple. Cela inclut les applications de mobilité en tant que service (MaaS) telles que les services de commande de commerce électronique et les prises de rendez-vous. Un troisième ajout est l'intégration aux appareils résidentiels intelligents, comme Google Nest et HomeKit d'Apple. Cet écosystème domicile-véhicule permet à l'utilisateur de contrôler des fonctions de son véhicule depuis son domicile et inversement. Depuis son domicile, l'utilisateur peut ainsi préchauffer son véhicule ou vérifier si les portières sont verrouillées. De la même façon, depuis son véhicule, l'utilisateur peut vérifier et modifier l'état de commodités de son domicile, comme l'éclairage, la température ou la porte du garage. Un quatrième et dernier ajout est la transformation de la cabine en bureau mobile. En raison de l'interaction entre des écrans multiples, de l'affichage frontal sur le pare-brise et de la vision panoramique, les exigences en matière de connectivité et l'infrastructure correspondante ont davantage d'importance.

Les applications de l'IVI utilisent la technologie 5G, qui est encore aux premières étapes de son développement. Une proposition est d'étendre l'IVI à l'extérieur du véhicule. Une telle méthode d'exploitation de la technologie 5G serait l'utilisation de grands écrans dynamiques à la surface d'un véhicule [175]. Les applications à ce sujet visent le marketing, lequel secteur pourrait afficher des annonces personnalisées dynamiques, et cela pourrait constituer une solution de rechange numérique respectueuse de l'environnement pour changer l'apparence esthétique du véhicule. Une autre proposition concerne le partage de la charge de calcul dans le cas de tâches courantes qui requièrent beaucoup de ressources, à l'aide d'un réseau de véhicules ou d'une infrastructure environnante, comme des VANET [176]. Ces tâches pourraient inclure la vidéo en continu, le traitement d'images, la réalité augmentée et la visualisation 3D.

4.6.2 Mises en œuvre recensées

L'un des défis de l'IVI est le problème d'interopérabilité. En effet, chaque OEM a son propre écosystème propriétaire. Cela complexifie le développement d'applications et l'élaboration de solutions d'IVI qui fonctionnent dans diverses marques de véhicules ou dans l'infrastructure. Un autre défi concerne la limite d'espace et du calcul du matériel à l'intérieur du véhicule pour l'IVI. On peut l'atténuer au moyen des solutions mentionnées ci-dessus, comme le calcul partagé ou le partage de contenu par cache dans un réseau de véhicules et avec l'infrastructure. Cependant, ces solutions requièrent une infrastructure comme la technologie 5G, qui permet des flux de données élevés et synchrones [177]. Un troisième défi est l'absence d'IVI sur l'extérieur des véhicules, afin de communiquer l'information au milieu environnant.

4.7 Système de péage électronique (télépéage)

4.7.1 Aperçu

Le système de péage électronique (télépéage) (ETC) est un système visant à percevoir, par voie électronique, les péages des véhicules qui traversent une infrastructure, comme les routes, les tunnels ou les ponts à péage. Le ETC s'ajoute aux postes de péage classiques ou sert à les remplacer, offrant ainsi des avantages sur les plans de l'économie et de l'environnement. Parmi les avantages économiques, le ETC permet d'améliorer l'écoulement du trafic en réduisant les temps de transaction et d'attente et, donc, la congestion. Le débit général du système est ainsi amélioré. Le Tableau 7 présente le volume d'écoulement du trafic selon les différentes technologies de péages électroniques et le niveau d'exactitude correspondant. Le péage manuel permet de traiter de 250 à 350 véhicules à l'heure et celui automatisé, de 450 à 500 véhicules à l'heure. Des voies réservées à la ETC avec une barrière permettent, quant à eux, de traiter de 900 à 1100 véhicules à l'heure; si la barrière est retirée, on peut alors traiter de 1800 à 2400

véhicules à l'heure. En plus de l'augmentation du volume de traitement de véhicules, il peut y avoir une réduction du coût d'utilisation du fait que le niveau d'exactitude et que les mesures d'application s'accroissent, de pair avec la réduction ou la suppression du nombre de préposés de postes de péage. De plus, dans le cas de solutions de péage entièrement électronique sur des routes à circulation libre, comme l'autoroute 407 ETR en Ontario, il y a d'autres avantages en matière de sécurité, car les véhicules s'y déplacent à une vitesse normale, sans que les chauffeurs soient distraits du fait qu'ils doivent faire la file aux postes de péage et préparer la méthode de paiement. Sur le plan des avantages environnementaux, la réduction des temps d'attente et de la congestion permet de réduire la consommation de carburant et la pollution de l'air.

Technologie de systèmes de péages	Volume de péages (Véhicules à l'heure)	Exactitude
Péage manuelle	250 – 350	98,00 %
Machine automatique à pièces de monnaie avec barrière	450 – 550	98,50 %
Machine automatique à pièces de monnaie sans barrière	500 – 700	95,00 %
Tickets à bande magnétique	500 – 900	98,50 %
Reconnaissance automatique de plaques d'immatriculation(RAPI)	600 – 1000	85,00 %
Carte à puce avec barrière	700 – 900	99,50 %
Système de télépéage électronique– Voie réservée avec barrière	900 – 1100	99,96 %
Tous les télépéage – À circulation libre	1800 – 2400	99,25 %

Tableau 7 : Rendement et niveau d'exactitude de différentes technologies de perception des péages [178] et [179].

4.7.2 Mises en œuvre recensées

L'identification et la reconnaissance des véhicules sont les deux défis principaux des applications ETC . La Figure 21 présente les détails de l'infrastructure type nécessaire pour mettre en œuvre la AETC. L'identification des véhicules s'effectue par une OBU, d'habitude un transpondeur, ou par une série d'appareils qui prennent des photos de la plaque d'immatriculation. La reconnaissance des véhicules est ensuite assurée en appariant l'information obtenue de l'OBU ou d'une base de données de plaques d'immatriculation. Dans le cas de péages de véhicules sans OBU, des capteurs à boucle d'induction et des caméras suspendues figurent au nombre des technologies utilisées pour la classification des véhicules. Des études récentes ont également démontré la possibilité de remplacer les transpondeurs par la téléphonie cellulaire ou par des solutions de véhicules intégrées, comme les appareils ITM¹⁴ (module de péage intégré) de certains modèles Audi.

¹⁴ <https://www.itmsignup.com/audi>

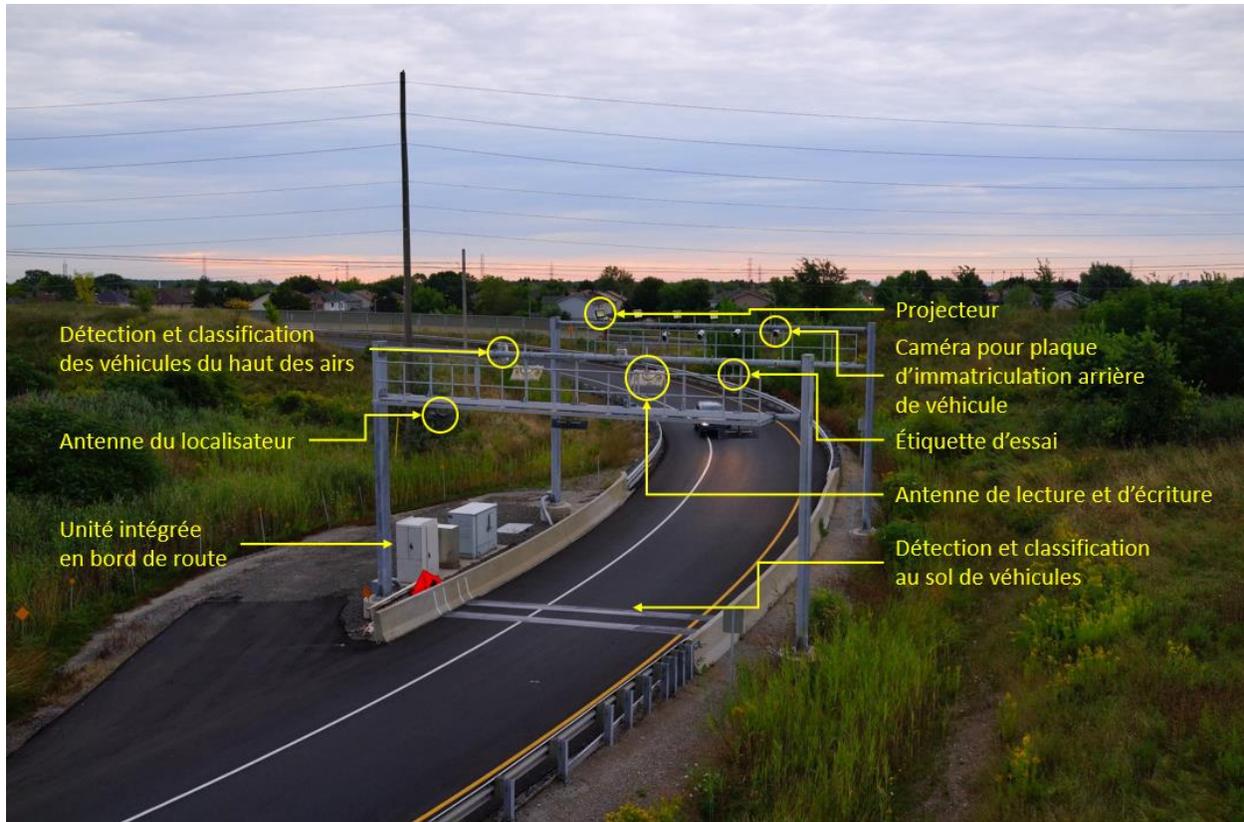


Figure 21 : Infrastructure type de la AETC à circulation libre (autoroute express à péage 407 au Canada [180]).

À l’instar des autres cas d’utilisation en matière de connectivité, les défis liés à la mise en œuvre de la ETC sont les coûts, la confidentialité et la sécurité. Les coûts englobent ceux propres à l’infrastructure (comme l’installation et l’entretien des capteurs), à l’exploitation (comme les frais de transaction et le nombre de personnes nécessaire pour exploiter la ETC) et à la mise en œuvre (comme le coût de l’usager pour l’achat ou la location de l’OBU). Le Tableau 8 et le Tableau 9 décrivent les préoccupations en matière de confidentialité relatives au péage à circulation libre en comparaison des méthodes de péage classiques. Afin de gérer certaines des préoccupations en matière de confidentialité, lesquelles posent un risque à la sécurité, de multiples solutions du domaine de la cybersécurité ont été adaptées à ce cas d’utilisation. Par exemple, on utilise le cadre IOTA pour les paiements et l’architecture Hyperledger Indy pour la transmission et la validation en toute sécurité de l’information au moyen d’une technologie C-V2X 5G dans le cas d’un système de péage à circulation libre [181].

Niveau de confidentialité	Brève description	Observation
A	Aucune capacité de détection ou de suivi de véhicules ou de personnes	Aucune détection
B	Faible capacité de détection ou de suivi de véhicules ou de personnes	Extraction manuelle de données à partir d’enregistrements à emplacement et à source uniques choisis (p. ex., vidéo enregistrée)
C	Capacité moyenne de détection ou de suivi de véhicules ou de personnes	Extraction automatique de données (p. ex., ALPR) à partir d’enregistrements à emplacement et à source uniques

D	Capacité élevée de détection ou de suivi de véhicules ou de personnes	Extraction automatique de données à partir d'enregistrements à emplacements multiples et à source unique
E	Capacité très élevée de détection ou de suivi de véhicules ou de personnes	Extraction automatique de données à partir d'enregistrements à emplacements et à sources multiples (p. ex., vidéo et transpondeur de péage)
F	Capacité complète de détection ou de suivi de véhicules ou de personnes à l'intérieur ou à l'extérieur du véhicule	Extraction automatique de données à partir d'enregistrements à sources multiples continus (p. ex., GPS, émetteur cellulaire, vidéo HD en direct et ALPR)

Tableau 8 : Échelle de cotation et d'évaluation de l'incidence sur la confidentialité [178].

Système de perception des péages	Technologie de perception des péages	Systèmes de paiement	Commodité pour les usagers	Coût d'exploitation	Niveau de confidentialité		
					Anonymat/pseudonymat	Non-associativité	Indétectabilité/non-observabilité
Route à péage classique	Aucune / application par vidéo	Argent comptant, jeton	Faible	Élevé	B	B	B
	Lecteur de carte à puce / application par vidéo	Carte à puce	Moyenne	Moyen	C	C	C
Péage à circulation libre	Technologie de la monnaie électronique	Monnaie électronique	Élevée	Faible	A	A	A
	Transpondeur non enregistré / application par RAPI	Argent comptant	Élevée	Faible	B	E	D
	Transpondeur enregistré / application par RAPI	Carte de crédit	Élevée	Faible	D	E	D
	RAPI	Par la poste	Moyenne – élevée	Moyen	D	E	D
Péage par kilométrage parcouru sur certaines autoroutes	GPS / GSM embarqués	Divers	Élevée	Moyen	D	E	E

Tableau 9 : Niveaux de confidentialité assurés aux usagers de la route par divers systèmes de paiement [178].

4.8 Mises à jour en direct

4.8.1 Aperçu

De façon comparable à un véhicule qui requiert un entretien mécanique et électrique régulier, il faut maintenir et mettre à jour le logiciel à bord de celui-ci. Alors qu'on irait traditionnellement chez un concessionnaire ou un mécanicien pour procéder à l'entretien de son véhicule ou le faire réparer, on mettra à jour en direct (OTA) les logiciels et les micrologiciels au moyen d'une connexion à distance ou sans fil. La Figure 22 et la Figure 23 illustrent les procédures de mise à jour locale et à distance de logiciels.

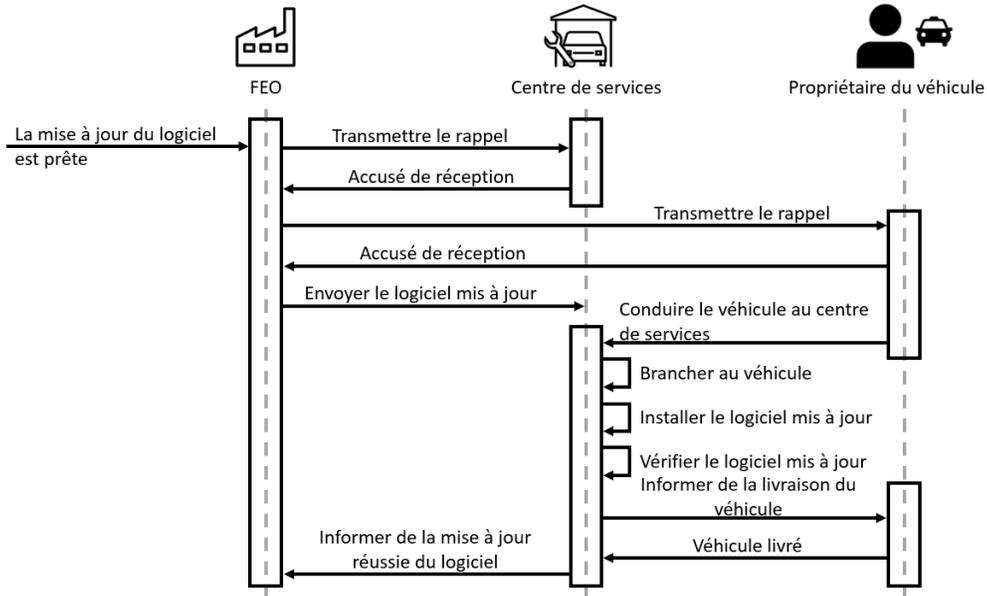


Figure 22 : Procédure de mise à jour locale d'un logiciel [182].

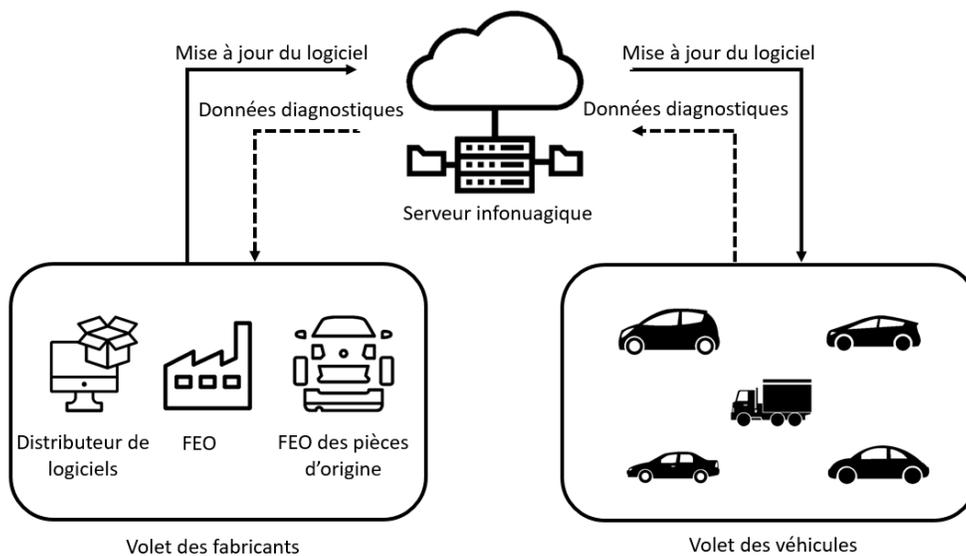


Figure 23 : Procédure de mise à jour à distance d'un logiciel [182].

Les mises à jour en direct offrent plusieurs avantages par rapport aux méthodes traditionnelles via une connexion par câble. L'un de ces avantages est la réduction des coûts de rappel, ce qui permet au consommateur, au concessionnaire et à l'OEM de réaliser des économies, car les mises à jour peuvent être exécutées à distance. Un autre avantage est la réduction de la dépréciation grâce à la mise en œuvre de nouvelles fonctions et la tenue à jour de celles existantes. Celles-ci peuvent être des mises à jour du système d'infodivertissement ou de la carte utilisée pour les applications de navigation. Le plus important peut-être, c'est que les mises à jour en direct offrent des niveaux de sûreté et de sécurité accrus des véhicules. Ces dernières pourraient concerner des systèmes essentiels à la sécurité, comme les UCE, ou viser à contrer les cybermenaces.

4.8.2 Mises en œuvre recensées

Pour permettre les mises à jour en direct d'un véhicule, il faut disposer d'une unité de commande télématique (TCU) et d'une connexion sans fil, qu'il s'agisse d'un accès Wi-Fi ou d'un réseau cellulaire. Il doit également y avoir une fonction intégrée de retour en arrière en cas de problèmes avec la mise à jour appliquée. Les mises à jour sont effectuées à intervalles prédéterminés et des correctifs sont fournis pour les mises à jour critiques. Les conducteurs peuvent être avisés d'une mise à jour selon divers moyens, en fonction de la nature et de la taille de la mise à jour. Il peut ainsi s'agir de mises à jour automatiques, d'avis affichés sur le système d'infodivertissement embarqué, de courriels ou de messages publics. Les centres de services ou les concessionnaires devraient continuer de prêter assistance pour des réparations critiques ou des problèmes liés au dépannage concernant les mises à jour en direct.

Sur le plan des défis, il y a la question de la cybersécurité, car des services connectés comme ceux en direct ouvrent la voie à des cyberattaques. Celles-ci peuvent s'en prendre aux applications mobiles ou au réseau de contrôleurs, lequel contrôle tous les composants à bord, comme la direction et les freins. Un cadre de sécurité portant sur la détermination de ces risques et points d'attaque a fait l'objet d'une étude dans la référence [183]. Des études précoces ont également été effectuées afin de détecter la présence de ces attaques dans des approches d'apprentissage machine [184], [185] et [186]. S'assurer que la mise à jour est sûre, sécuritaire et fiable pour toutes les variantes de véhicules pose aussi un défi. À cet égard, bon nombre des mécanismes de sécurité utilisés principalement pour les communications en direct des appareils mobiles ont été étendus aux véhicules, y compris les techniques de chiffrement à clé symétrique [187] et [188], de même que celles de hachage [189], de chaînes de blocs [190], RSA et de stéganographie [191], ainsi que les méthodes fondées sur des modules de sécurité matériels [192] et [193]. Un autre défi a trait à la priorité et à la sélection de ce qui doit être compris dans chaque mise à jour en direct, le type d'environnement, le comportement des conducteurs et les valeurs de ceux-ci variant grandement. D'autres défis concernent la dépendance envers une connexion sans fil stable, le mode de tarification des mises à jour et la protection de la confidentialité des utilisateurs.

Les défis mentionnés ci-dessus traitent de questions relatives à l'intégrité d'une mise à jour en direct et de la manière dont cette dernière est transmise. Si une mise à jour en direct fait intervenir l'ensemble de logiciels d'autonomie et les micrologiciels liés à l'automatisation de la conduite, cela peut avoir des répercussions importantes sur les performances en autonomie. Dans l'industrie des logiciels, les mises à jour sont soumises à des procédures d'essai établies afin de veiller à ce qu'elles améliorent la fonctionnalité d'un système sans le perturber. À ce sujet, les OEM peuvent adopter les pratiques exemplaires de la

collectivité des développeurs de logiciels, en particulier lorsqu'il s'agit du développement de logiciels essentiels à la sécurité.

4.9 Avis sur la météo routière

4.9.1 Aperçu

Les conditions météorologiques défavorables, qui comprennent la pluie, la neige, les vents forts et les limites de visibilité, peuvent affecter le comportement du conducteur, les performances du véhicule et les conditions de la chaussée. Pendant la période comprise entre 1999 et 2017, 30 % des collisions de véhicules au Canada ont été attribuées à de telles conditions, ce qui représente 33 716 collisions en 2017 [194]. La connectivité des véhicules peut réduire le nombre de collisions et d'accidents en communiquant en temps réel de l'information pertinente sur les conditions météorologiques, soit sur la nature, l'emplacement et l'intervention appropriée des conducteurs en cas d'aléas météorologiques. Les avis transmis aux conducteurs peuvent inclure des alertes, des interdictions ou des réductions de vitesse. Dans les situations de faible visibilité ou de faible traction, comme en présence de brouillard, de pluie ou de neige, la régulation de vitesse adaptative coopérative au moyen des technologies des véhicules connectés, laquelle est décrite à la section 4.2, peut être mise en œuvre pour améliorer la sécurité. Un autre exemple est la diffusion des conditions routières en temps réel, comme la fermeture de voies ou le signalement de tronçons de route dangereux recouverts de bancs de neige ou de glace noire, l'indication de mesures préventives (par exemple, si une route a été recouverte de sel) ou la mention que des panneaux routiers ou des marques sur la chaussée sont enneigés. Une telle information peut aider les véhicules connectés à fonctionner de manière plus sécuritaire [195].

4.9.2 Mises en œuvre recensées

Hormis les exigences et les défis communs qu'il partage en matière de mise en œuvre avec les autres cas d'utilisation des CV, le cas d'utilisation relatif à la météo routière pose un défi supplémentaire. Ce dernier a trait à la transition de la conduite autonome la conduite manuelle. L'incidence des conditions météorologiques défavorables sur la conduite autonome est souvent prise en compte de manière « cachée ». Si cette compensation en raison de ces conditions n'est pas communiquée au conducteur, il existe un risque que ce dernier ne compense pas de manière adéquate lorsqu'il reprend la maîtrise du véhicule [196] et [197]. Il s'est avéré que l'intégration de l'information concernant les changements météorologiques locaux à un système régulateur de vitesse adaptatif a permis de réduire les émissions de CO₂ et a fait par ailleurs l'objet d'essais à l'aide d'un véhicule prototype [195].

5 Résumé des constatations et conclusion

5.1 Questions de recherche et réponses

La présente revue technologique visait à répondre à un certain nombre de questions de recherche. Après avoir examiné la littérature connexe, les réponses suivantes sont proposées:

- **Quels sont les avantages concrets (mesurables) en matière de sécurité des technologies des CV?**

Les conducteurs humains agissent comme décideurs dans les véhicules classiques. Dans le cas des VAC, à mesure que le niveau d'automatisation s'accroît, les logiciels jouent un rôle de plus en plus actif dans toutes les prises de décisions, y compris celles faisant intervenir les fonctions essentielles à la sécurité. Par conséquent, il est attendu qu'un cadre de sécurité classique des véhicules motorisés ne puisse être directement transposé à une situation de VAC. Malgré cette lacune, les mesures de sécurité conventionnelles, comme celles visant à éviter les collisions, de même qu'à réduire le plus possible la probabilité de blessures corporelles (réduire la gravité des accidents) et d'accidents mortels par million de milles parcourus, ont été utilisées afin de mesurer les avantages des technologies des CV en matière de sécurité. Selon la nature de leur utilisation, les applications des CV peuvent améliorer la sécurité lors d'événements à faible fréquence (par exemple, collisions entre un train et un véhicule à un passage à niveau) ou à fréquence élevée (par exemple, collisions de véhicules motorisés aux intersections). Dans la littérature connexe, la sécurité des applications des CV a été évaluée principalement dans un environnement de simulation.

- **Quels cas d'utilisation sont envisagés pour les technologies des CV afin d'accroître précisément la sécurité, peu importe les modes de communications (par exemple, V2V, V2I, V2P et V2X)?**

Les cas d'utilisation dans des projets pilotes, tels que la protection des VRU, la gestion des intersections, la traversée des passages à niveau et le balisage des zones de travaux, comportent un fort potentiel en matière de sécurité. S'ils sont adoptés, même avec les technologies d'accès actuelles limitées (LTE et DSRC), ils peuvent améliorer la sécurité.

- **Quels travaux de recherche ont été menés à ce jour afin de démontrer les avantages possibles en matière de sécurité de ces cas d'utilisation?**

La recherche connexe a mis l'accent surtout sur les aspects liés à la fonctionnalité des applications des CV. Les essais opérationnels sur le terrain, pour qu'ils aient une quelconque signification statistique, requièrent qu'un grand nombre de véhicules soient dotés de fonctions de CV, car celles-ci ne sont pas encore disponibles dans les véhicules de production. Toutefois, le USDOT mène plusieurs projets pilotes à New York, de même que dans les États de la Floride et du Wisconsin, lesquels représentent des environnements respectivement urbain, urbain et suburbain, et rural. Les données de ces projets témoignent du fort potentiel en matière de sécurité des applications des CV soumises à l'examen. Il a été constaté que la recherche du milieu universitaire était axée principalement sur la fonctionnalité et les performances des applications des CV. Les avantages possibles en matière de sécurité ont été discutés sur le plan qualitatif ou ont été validés dans des environnements de simulation.

- **Quel niveau de déploiement doit être atteint avant que ces avantages importants, en matière de sécurité, puissent être obtenus?**

Il existe peu de documents dans lesquels on a étudié les avantages en matière de sécurité des applications des CV comme fonction propre au taux de pénétration des technologies. Toutefois, il s'est avéré, dans les documents trouvés, que même en présence d'un faible taux de pénétration (caractérisé comme se situant à 30 p. cent), les avantages en matière de sécurité peuvent être attrayants.

- **Ces avantages en matière de sécurité sont-ils exclusifs aux technologies des CV, ou peuvent-ils être obtenus au moyen d'autres technologies ou de capteurs sur le marché ou en cours de développement (par exemple, automatisation des véhicules, haute définition et cartographie en temps réel)?**

Les systèmes embarqués d'automatisation de la conduite dépendent entièrement des capteurs de perception de l'environnement et de la localisation. Ces deux compétences de base de l'automatisation sont fortement tributaires des conditions météorologiques. Par ailleurs, les technologies des CV peuvent fournir une connaissance de la situation au-delà de la LOS grâce au partage des données de capteurs et de l'information de localisation précise, en s'appuyant sur les données de correction GNSS fournies par le réseau dans un modèle HPL. Par conséquent, on pourrait faire valoir que l'automatisation complète des véhicules sans connectivité pourrait poser un défi trop grand pour en permettre la mise en œuvre. D'un autre point de vue, la possibilité qu'offrent les applications des CV en matière de sécurité est maximisée lorsque celles-ci interagissent avec des systèmes d'automatisation de la conduite. Par exemple, dans une mise en œuvre faisant intervenir uniquement la connectivité pour un cas d'utilisation visant la protection des VRU, l'OBU dans la cabine d'un véhicule et l'appareil mobile transporté par les VRU peuvent fournir des alertes s'ils se trouvent dans une trajectoire de collision. Dans ce cas, la responsabilité en matière de sécurité incombe au conducteur humain et, dans un degré moindre, au VRU pour prendre des mesures d'évitement. Si le conducteur humain est distrait ou réagit trop lentement, une collision pourrait s'avérer inévitable. Toutefois, si l'application des CV interagit avec le système de freinage automatisé du véhicule, l'évitement de la collision peut être possible de manière beaucoup plus fiable, ce qui accroît la sécurité des VRU. Par conséquent, on peut affirmer que les avantages en matière de sécurité sont rendus possibles grâce aux technologies des CV et que les technologies d'automatisation des véhicules permettent de les accroître.

- **Quelles sont les limitations ou les vulnérabilités en matière de sécurité associées aux technologies des véhicules connectés (par exemple, latence, perte du signal, encombrement et interférence, exigences en matière d'infrastructure et interopérabilité, et limites relatives aux conditions météorologiques)?**

Les essais d'analyse comparative des performances sur les technologies d'accès, comme celles des DSRC répondant à la norme IEEE 802.11p et celles fondées sur la technologie cellulaire LTE, indiquent que la perte de visibilité directe, la portée limitée, l'encombrement et l'interférence peuvent détériorer les performances d'un réseau, à un point où les messages essentiels à la sécurité ne peuvent pas être transmis selon les niveaux de latence et de fréquence nécessaires. Ces vulnérabilités sur le plan opérationnel peuvent mener à des conditions non sécuritaires, l'application des CV ne parvenant plus à fonctionner de manière fiable en raison de la détérioration de la qualité du service du réseau. Une autre limitation a trait à la cybersécurité du réseau. En cas d'atteinte à la sécurité du réseau, même en l'absence des limites opérationnelles susmentionnées, celui-ci peut devenir inefficace en raison d'attaques diverses, comme le déni de service et la mystification. Par conséquent, les enjeux liés à la cybersécurité et à la sécurité des applications des CV sont aussi importants. Il est nécessaire d'harmoniser les normes des CV globalement et au plan régional, afin que les développeurs de technologies puissent utiliser leurs ressources dans le but de concevoir une fonction qui puisse être déployée globalement, sans nécessiter de personnalisations en fonction d'une région. Contrairement à certaines technologies embarquées

de systèmes de perception, comme le LiDAR et la caméra, dont les modalités de détection sont grandement affectées par les conditions météorologiques, les applications des CVne sont généralement pas influencées par les événements météorologiques.

- **Y a-t-il des limitations ou des vulnérabilités de sécurité spécifiques aux opérations dans diverses conditions de conduite au Canada (par exemple, régions rurales et éloignées, variations géographiques et conditions hivernales, etc.)?**

Tant que l'infrastructure des CV demeure disponible, la densité de la population et le caractère éloigné d'un emplacement n'occasionnent aucune limite des applications des CV. Toutefois, en comparaison de milieux urbains, les besoins en matière d'infrastructure pourraient être moins grands dans les régions rurales ou éloignées puisqu'il est improbable que le réseau devienne encombré. Les particularités géographiques, comme les collines et les montagnes, pourraient empêcher un accès LOS au réseau sans fil et pourraient donner lieu à des interruptions du réseau. Les ondes radio constituant le mode de connexion des applications des CV, les conditions hivernales n'affectent pas la connectivité. Cependant, l'équipement des CV (le matériel électronique, les capteurs déployés dans l'infrastructure et les sources d'alimentation) pourrait être susceptible aux complications hivernales.

5.2 Résultats

5.2.1 Aspects technologiques

- Les technologies d'accès, comme celles des DSRC répondant à la norme IEEE 802.11p et celles des C-V2X, permettent le partage de données entre les différents nœuds d'un VANET. Par exemple, dans une application de CACC, les véhicules du peloton reçoivent l'information sur la position et la vitesse des véhicules avoisinants au moyen des technologies DSRC ou C-V2X. Le logiciel de l'OBU utilise les données reçues pour prendre connaissance de la situation et pour évaluer les tâches qui doivent être effectuées. Selon les exigences propres aux applications, le réseau sans fil doit permettre l'échange de données à un débit assez grand pour permettre une régulation très précise de la vitesse des véhicules afin de maintenir l'espace voulu entre eux.
- Les technologies d'accès propres aux applications des CV est un domaine qui évolue rapidement. La proposition récente de la FCC de réattribuer le spectre radio pourrait faire en sorte que la technologie C-V2X gagne en popularité. Il est attendu de la connectivité 5G qu'elle mette un terme aux limites actuelles des réseaux LTE, mais le développement de la technologie connexe n'est encore qu'à ses débuts.
- Il a été constaté que l'accent, dans les recherches actuelles sur les CV, porte sur le développement de nouvelles architectures et de nouveaux concepts (par exemple, la coordination centralisée et décentralisée), sur la planification de trajectoires coordonnées, sur les techniques logicielles visant à atténuer les interruptions de la connectivité, et sur la formulation de nouveaux algorithmes concernant la planification d'une trajectoire en coopération et le contrôle dynamique et coordonné de véhicules.
- L'orientation actuelle des recherches en matière de développement de technologies d'accès porte sur les protocoles d'authentification visant à préserver la confidentialité des données, sur la gestion des topologies de réseau hautement dynamiques, sur la sécurité du réseau, sur les performances déterministes du réseau et sur la résilience contre les cybermenaces.
- Un système performant et robuste d'automatisation de la conduite L4 et L5 s'appuiera très fortement sur les technologies CV pour la redondance, la connaissance de la situation résistante

aux intempéries, la coordination des mouvements pour effectuer des manœuvres de conduite complexes (par exemple, le changement de voie et dépassement) et l'obtention d'une couverture de perception au-delà de la LOS. Bien que les efforts actuels de développement de systèmes de conduite automatisée soient largement axés sur les véhicules (c'est-à-dire qu'ils dépendent peu des fonctions V2X), à mesure que les technologies des CV gagneront en maturité, on s'attend à ce qu'elles occuperont une place plus grande dans les systèmes de conduite automatisée en tant que technologies habilitantes principales.

- La sécurité possible qu'offrent les applications des CV s'est avérée être une proposition largement qualitative. Il a été constaté que les travaux de développement connexes étaient axés davantage sur la fonctionnalité et sur la résilience du fonctionnement, plutôt que sur la confirmation des avantages en matière de sécurité avec une rigueur suffisamment étayée pour être convaincante. Toutefois, certains travaux de recherche ont quantifié les avantages en matière de sécurité dans des environnements de simulation. Cela n'est pas surprenant, en raison des difficultés inhérentes à la conduite d'essais sur le terrain dans lesquels il pourrait falloir doter une flotte de véhicules d'équipement de CV.

5.2.2 Aspects liés au déploiement et à la réglementation

- Des projets pilotes financés par des fonds publics et axés sur la réalisation d'essais sur le terrain et sur la démonstration d'applications des CV favoriseront la collaboration entre les principaux intervenants, soit les organismes du secteur public, les fabricants d'équipement de réseau, les OEM du marché de l'automobile, les fabricants de pièces automobiles, les propriétaires et les exploitants de chemins de fer, les entreprises de transport de marchandises, les transporteurs routiers commerciaux et les opérateurs de télécommunications.
- Bien que le potentiel de sécurité des applications des CV puisse être pleinement réalisé lorsque celles-ci sont jumelées à l'automatisation des véhicules, la popularité des applications automobiles basées sur la téléphonie mobile (par exemple, Apple CarPlay et Android Auto) peut sous-tendre la mise en œuvre des applications des CV selon une portée limitée dans les véhicules conventionnels, afin d'accroître la sécurité routière. Dans une mise en œuvre d'une telle portée limitée, le téléphone mobile agira comme OBU qui communiquera des avis au conducteur humain.
- Puisque les réseaux routiers urbains et les flottes de véhicules de transport en commun appartiennent en général aux municipalités, il pourrait être plus facile pour celles-ci de déployer des applications des CV destinées à des cas d'utilisation dans des véhicules de transport en commun et des véhicules d'urgence. Ces cas devraient faire l'objet d'un déploiement hâtif auprès du public.
- Puisqu'il est attendu que la densité de la population croîtra continuellement au Canada, certains des défis en matière de transport peuvent être relevés en s'appuyant sur les technologies des véhicules connectés. L'éco-conduite, l'optimisation dynamique des voies et la gestion des intersections connectées sont quelques exemples principaux d'applications.
- Il faudra introduire de nouveaux modèles d'affaires rendus possibles par les technologies des CV. Des produits comme la mobilité en tant que service, le covoiturage dynamique et l'obtention d'une assurance en fonction de l'usage d'un conducteur sont déjà offerts au public.
- Les organismes nationaux peuvent bénéficier des exigences réglementaires, des normes de CV et des protocoles de transport à l'échelle mondiale et régionale, afin d'inciter les développeurs de

technologies et les fournisseurs de services à développer des applications des CV pouvant être déployées globalement.

- Les partenariats, les collaborations et les consortiums regroupant les principaux intervenants sont un ingrédient nécessaire afin de favoriser le développement rapide des applications des CV.

5.3 Mot de la fin

À l'heure actuelle, les technologies CV peuvent rendre le transport plus sécuritaire pour l'ensemble des usagers de la route, plus facilement que les technologies d'automatisation de la conduite, en raison de la maturité technologique des éléments constitutifs des CV. Même lorsque la tâche de conduite dynamique réelle est effectuée manuellement en présence d'avis transmis par des réseaux V2X, les avantages en matière de sécurité de ces applications sont évidents dans les études de simulation et d'essai sur le terrain. Malgré ces perspectives optimistes, les défis logistiques liés à l'établissement d'une collaboration efficace entre des intervenants hétérogènes (les organismes publics et de réglementation, les OEM du marché de l'automobile et l'industrie des télécommunications) demeurent présents pour assurer des déploiements réussis. L'harmonisation des normes de connectivité, de l'équipement et des interfaces, globalement et au plan régional, constitue un ingrédient nécessaire afin d'aider à la promotion d'un processus bien dirigé de développement et de déploiement des bases technologiques.

Remerciements

Les auteurs souhaitent souligner la contribution des examinateurs de Transports Canada qui ont fourni de précieux commentaires au sujet des ébauches précédentes du présent rapport. De plus, des remerciements sincères sont adressés au Dr. Barry Pekilis qui a revu la version finale.

Références

- [1] F. Harry, «Radio warning system for use on vehicles». États-Unis. Brevet US1612427A, 28 décembre 1926.
- [2] IEEE Connected Vehicles, «First Toyota cars to include V2V and V2I communication by the end of 2015,» 2015. [En ligne]. Available: <https://site.ieee.org/connected-vehicles/2015/09/30/first-toyota-cars-to-include-v2v-and-v2i-communication-by-the-end-of-2015/>. [Accès le 31 janvier 2021].
- [3] D. Shepardson, «Toyota halts plan to install U.S connected vehicle tech by 2021,» Reuters, 26 avril 2019. [En ligne]. Available: <https://www.reuters.com/article/autos-toyota-communication/toyota-halts-plan-to-install-u-s-connected-vehicle-tech-by-2021-idUKL1N22816B>. [Accès le 07 avril 2021].
- [4] J. Harding, G. Powell, R. Yoon, J. Fikentscher, C. Doyle, D. Sade, M. Lukuc, J. Simons et J. Wang, «Vehicle-to-Vehicle Communications: Readiness of V2V Technology for Application,» National Highway Traffic Safety, Washington, DC, États-Unis, 2014.
- [5] M. Fallgren, B. Cellarius, M. Dillinger, A. E. Fernandez, Z. Li et S. Allio, «5GCAR: Executive Summary,» Fifth Generation Communication Automotive Research and Innovation, 2019.
- [6] J. E. Siegel, D. C. Erb et S. E. Sarma, «A Survey of the Connected Vehicle Landscape— Architectures, Enabling Technologies, Applications, and Development Areas,» *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 19, n° 18, pp. 2391-2406, 2018.
- [7] P. K. Singh, S. K. Nandi et S. Nandi, «A tutorial survey on vehicular communication state of the art, and future research directions,» *Vehicular Communication*, vol. 18, pp. 2214-2096, 2019.
- [8] J. M. L. Domínguez et T. J. M. Sanguino, «Review on V2X, I2X, and P2X Communications and Their Applications: A Comprehensive Analysis over Time,» *Sensors*, vol. 19, n° 112, p. 2756, 2019.
- [9] D. Manivannan, S. S. Moni et S. Zeadally, «Secure authentication and privacy-preserving techniques in Vehicular Ad-hoc NETWORKS (VANETs),» *Vehicular Communications*, vol. 25, p. 100247, 2020.
- [10] B. P. Maratha, T. R. Sheltami et K. Salah, «Performance study of MANET routing protocols in VANET,» *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 42, n° 18, pp. 3115--3126, 2017.

- [11] M. R. Jabbarpour, A. Marefat, A. Jalooli et H. Zarrabi, «Cloud-based vehicular networks: a taxonomy, survey, and conceptual hybrid architecture,» *Wireless Networks*, vol. 25, n° %11, pp. 335-354, 2019.
- [12] J. Prajapati et P. Chauhan, «User-Interest Based Clustering for Efficient Vehicle Communication in VANET,» chez *2018 3rd International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT)*, Coimbatore, Inde, 2018.
- [13] H. Tan et I. Chung, «Secure Authentication and Key Management With Blockchain in VANETs,» *IEEE Access*, vol. 8, pp. 2482 - 2498, 2019.
- [14] A. K. Goyal, A. K. Tripathi et G. Agarwal, «Security Attacks, Requirements and Authentication Schemes in VANET,» chez *2019 International Conference on Issues and Challenges in Intelligent Computing Techniques (ICICT)*, GHAZIABAD, Inde, 2019.
- [15] R. Shrestha, R. Bajracharya et S. Y. Nam, «Challenges of Future VANET and Cloud-Based Approaches,» *Wireless Communications and Mobile Computing*,, 2018.
- [16] J. Prajapati et P. Chauhan, «User-Interest Based Clustering for Efficient Vehicle Communication in VANET,» chez *2018 3rd International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT)*, Coimbatore, Inde, 2018.
- [17] A. Punitha, J. Martin et L. Manickam, «Privacy preservation and authentication on secure geographical routing in VANET,» *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, vol. 29, n° %13, pp. 617-628, 2017.
- [18] M. B. Mansour, C. Salama, H. K. Mohamed et S. A. Hammad, «VANET Security and Privacy - An Overview,» *International Journal of Network Security & Its Applications (IJNSA)*, vol. 10, n° %12, 2018.
- [19] M. A. Al-Shareeda, M. Anbar, S. Manickam et A. A. Yassin, «VPPCS: VANET-Based Privacy-Preserving Communication Scheme,» *IEEE Access*, vol. 8, pp. 150914-150928, 2020.
- [20] M. S. Anwer et C. Guy, «A survey of VANET technologies,» *Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences*, vol. 5, n° %19, pp. 661-671, 2014.
- [21] W. Liang, Z. Li, H. Zhang, S. Wang et R. Bie, «Vehicular ad hoc networks: architectures, research issues, methodologies, challenges, and trends,» *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 11, n° %18, p. 745303, 2015.
- [22] V. Mannoni, V. Berg, S. Sesia et E. Perraud, «A Comparison of the V2X Communication Systems: ITS-G5 and C-V2X,» chez *2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Spring)*, Kuala Lumpur, Malaisie, 2019.

- [23] R. Molina-Masegosa, J. Gozalvez et M. Sepulcre, «Comparison of IEEE 802.11p and LTE-V2X: An Evaluation With Periodic and Aperiodic Messages of Constant and Variable Size,» *IEEE Access*, vol. 8, pp. 121526-121548, 2020.
- [24] The Federal Communications Commission, «FCC Allocates Spectrum in 5.9 GHz Range for Intelligent Transportation System,» https://transition.fcc.gov/Bureaus/Engineering_Technology/News_Releases/1999/nret9006.html, Washington, D.C., États-Unis, 1999.
- [25] The European Telecommunications Standards Institute (ETSI), «Newly published ETSI Harmonized Standard enables market placement of radio equipment for road safety and traffic management,» http://www.etsi.org/WebSite/NewsandEvents/2008_09_Harmonizedstandards_ITS.aspx, Sophia Antipolis, France, 2008.
- [26] K. Kiela, V. Barzdenas, M. Jurgo, V. Macaitis, J. Rafanavicius, A. Vasjanov, L. Kladovscikov et R. Navickas, «Review of V2X–IoT Standards and Frameworks for ITS Applications,» *MDPI Applied Sciences*, vol. 10, n° 112, p. 4314, 2020.
- [27] The Federal Communications Commission, «FCC Modernizes 5.9 GHz Band to Improve Wi-Fi and Automotive Safety,» <https://docs.fcc.gov/public/attachments/DOC-368228A1.pdf>, Washington, D.C., États-Unis, 2020.
- [28] S. A. A. Hakeem, A. A. Hady et H. Kim, «5G-V2X: standardization, architecture, use cases, network-slicing, and edge-computing,» *Wireless Networks*, 2020.
- [29] K. Z. Ghafoor, M. Guizani, L. Kong, H. S. Maghdid et K. F. Jasim, «Enabling Efficient Coexistence of DSRC and C-V2X in Vehicular Networks,» *IEEE Wireless Communications*, vol. 27, n° 12, pp. 134 - 140, 2019.
- [30] S. Mumtaz, K. M. S. Huq, M. I. Ashraf et J. Rodriguez, «Cognitive vehicular communication for 5G,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, n° 17, pp. 109 - 117, 2015.
- [31] 5GAA, «V2X Functional and Performance Test Report: Test Procedures and Results,» 2018.
- [32] Z. MacHardy, A. Khan, K. Obana et S. Iwashina, «V2X Access Technologies: Regulation, Research, and Remaining Challenges,» *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, n° 13, pp. 1858-1877, 2018.
- [33] 5G Americas, «Cellular V2X Communications Towards 5G,» 2018.
- [34] Qualcomm Technologies Inc., «Introduction to C-V2X,» [En ligne]. Available: <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/introduction-to-c-v2x.pdf>.

- [35] S. Chen, J. Hu, Y. Shi, L. Zhao et W. Li, «A vision of C-V2X: technologies, field testing, and challenges with chinese development,» *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, n° %15, pp. 3872--3881, 2020.
- [36] H. Bagheri, Z. Liu, H. Lee, D. Pesch, K. Moessner et P. Xiao, «5G NR-V2X: Towards connected and cooperative autonomous driving,» *arXiv preprint arXiv:2009.0363*, 2020.
- [37] Wevolver, «2020 Autonomous Vehicle Technology Report,» 2020. [En ligne]. [Accès le 15 janvier 2021].
- [38] K. Lee, J. Kim, Y. Park, H. Wang et D. Hong, «Latency of Cellular-Based V2X: Perspectives on TTI-Proportional Latency and TTI-Independent Latency,» *IEEE Access*, vol. 5, pp. 15800 - 15809, 2017.
- [39] Y. Lei, T. Wang et J. Wu, «Vehicles relative positioning based on ZigBee and GPS technology,» chez *6th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC)*, Beijing, Chine, 2016.
- [40] Marvell, «Marvell Introduces Industry's First Wi-Fi, Bluetooth 5 and 802.11p Combo Solutions for Vehicle-to-Everything (V2X) and In-Vehicle Infotainment (IVI),» 13 juin 2017. [En ligne]. Available: <https://www.marvell.com/company/newsroom/marvell-introduces-industrys-first-wi-fi-bluetooth-5-and-802-11p-combo-solutions-for-vehicle-to-everything-and-in-vehicle-infotainment.html>. [Accès le 13 janvier 2021].
- [41] E. B. Panganiban et J. C. D. Cruz, «RFID-based vehicle monitoring system,» chez *IEEE 9th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM)*, Manille, 2017.
- [42] G. Singh, A. Srivastava et V. A. Bohara, «Impact of Weather Conditions and Interference on the Performance of VLC based V2V Communication,» chez *21st International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Angers, France, 2019.
- [43] D. J. Cuba-Zúñiga, S. B. Mafra et J. R. Mejía-Salazar, «Cooperative Full-Duplex V2V-VLC in Rectilinear and Curved Roadway Scenarios,» *Sensors*, vol. 20, n° %113, 2020.
- [44] A. Maimaris et G. Papageorgiou, «A review of Intelligent Transportation Systems from a communications technology perspective,» chez *IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Rio de Janeiro, Brésil, 2016.
- [45] V2X Core Technical Committee, SAE, «Dedicated Short Range Communications (DSRC) Message Set Dictionary,» SAE International, États-Unis, 2009.
- [46] CAR 2 CAR Communication Consortium, «Road Safety and Road Efficiency Spectrum Needs in the 5.9 GHz for C-ITS and Cooperative Automated Driving,» 26 février 2020. [En ligne]. Available:

https://www.car-2-car.org/fileadmin/documents/General_Documents/C2CCC_TR_2050_Spectrum_Needs.pdf.
[Accès le 31 janvier 2021].

- [47] C. Jung, D. Lee, S. Lee et D. H. Shim, «V2X-Communication-Aided Autonomous Driving: System Design and Experimental Validation,» *Sensors*, vol. 20, n° 110, p. 2903, 2020.
- [48] A. Wahab, N. Ahmad et J. Schormans, «Statistical Error Propagation Affecting the Quality of Experience Evaluation in Video on Demand Applications,» *Applied Sciences*, vol. 10, n° 110, p. 3662, 2020.
- [49] GSMA Association, «Definition of Quality of Service parameters and their computation,» GSMA Association, 2017.
- [50] Z. Amjad, A. Sikora, B. Hilt et J.-P. Lauffenburger, «Low Latency V2X Applications and Network Requirements: Performance Evaluation,» chez *2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Changshu, Chine, 2018.
- [51] J. Mei, X. Wang et K. Zheng, «Intelligent Network Slicing for V2X Services Toward 5G,» *IEEE Network*, vol. 33, n° 16, pp. 196 - 204, 2019.
- [52] S. Zeadally, J. Guerrero et J. Contreras, «A tutorial survey on vehicle-to-vehicle communications,» *Telecommunication Systems*, vol. 73, n° 13, p. 469–489, 2020.
- [53] Frost & Sullivan, «Vehicle-to-Everything Technologies for Connected Cars,» TechVision Group of Frost & Sullivan, 2017.
- [54] M. Conte, «Verizon announces Hyper Precise Location now available in 100+ U.S. markets,» Verizon, 14 4 2021. [En ligne]. Available: <https://www.verizon.com/about/news/verizon-announces-hyper-precise-location-now-available-100-us-markets>. [Accès le 18 4 2021].
- [55] L. Fraade-Blanar, M. S. Blumenthal, J. M. Anderson et N. Kalra, «Measuring Automated Vehicle Safety,» RAND Corporation, 2018.
- [56] P. Koopman et M. Wagner, «Toward a framework for highly automated vehicle safety validation,» SAE Technical Paper, 2018.
- [57] A. Kim, D. Perlman, D. Bogard et R. Harrington, «Review of Federal Motor Vehicle Safety Standards (FMVSS) for Automated Vehicles,» Volpe Center, Mars 2016.
- [58] M. Blanco, M. Chaka, L. Stowe, H. C. Gabler, K. Weinstein, R. B. Gibbons, L. Neurauter, J. McNeil, K. E. Fitzgerald, W. Tatem et a. V. L. Fitchett, «. FMVSS considerations for vehicles with

automated driving systems: Volume 1 (Report No. DOT HS 812 796),» National Highway Traffic Safety Administration, 2020.

- [59] N. Kalra et S. M. Paddock, «Driving to safety: How many miles of driving would it take to demonstrate autonomous vehicle reliability?,» *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 94, pp. 182-193, 2016.
- [60] S. Biswas, R. Tachikou et F. Dion, «Vehicle-to-vehicle wireless communication protocols for enhancing highway traffic safety,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 44, n° 11, pp. 74-82, 2006.
- [61] J. A. Misener et R. Sengupta, «Cooperative Collision Warning: Enabling Crash Avoidance with Wireless Technology,» chez *12th World Congress on ITS*, San Francisco, États-Unis, 2005.
- [62] R. Deng, B. Di et L. Song, «Cooperative Collision Avoidance for Overtaking Maneuvers in Cellular V2X-Based Autonomous Driving,» *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, n° 15, pp. 4434-4446, 2019.
- [63] I. Rashdan, M. Schmidhammer, F. d. P. Muller et S. Sand, «Performance Evaluation of Vehicle-to-Vehicle Communication for Cooperative Collision Avoidance at Urban Intersections,» chez *IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, Toronto, 2017.
- [64] Q. Wu, S. Zhou, C. Pan, G. Tan, Z. Zhang et J. Zhan, «Performance Analysis of Cooperative Intersection Collision Avoidance with C-V2X Communications,» chez *2020 IEEE 20th International Conference on Communication Technology (ICCT)*, Nanning, Chine, 2020.
- [65] V. S. Shankar Kumar, *Intersection Collision Avoidance For Autonomous Vehicles Using Petri Nets*, Thèse de maîtrise, Université Purdue, 2019.
- [66] M. Morold, Q.-H. Nguyen, M. Bachmann, K. David et F. Dressler, «Requirements on Delay of VRU Context Detection for Cooperative Collision Avoidance,» chez *92nd IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2020-Fall)*, 2020.
- [67] M. Gharba et al., «5G enabled cooperative collision avoidance: System design and field test,» chez *IEEE 18th International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*, Macao, Chine, 2017.
- [68] F. Vázquez-Gallego et al., «Demo: A Mobile Edge Computing-based Collision Avoidance System for Future Vehicular Networks,» chez *IEEE Conference on Computer Communications Workshops*, Paris, France, 2019.

- [69] X. Yang, L. Liu, N. Vaidya et F. Zhao, «A vehicle-to-vehicle communication protocol for cooperative collision warning,» chez *The First Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services*, Boston, États-Unis, 2004.
- [70] Q. Xu, T. Mak, J. Ko et R. Sengupta, «Messages, Medium Access Control Protocol Design for Vehicle–Vehicle Safety,» *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 56, n° 12, pp. 499-518, 2007.
- [71] M.-F. Tsai, Y.-C. Chao, L.-W. Chen, N. Chilamkurti et S. Rho, «Cooperative emergency braking warning system in vehicular networks,» *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 32, 2015.
- [72] S. Haider, Z. Abbas, G. Abbas, M. Waqas, S. Tu et W. Zhao, «A Novel Cross-Layer V2V Architecture for Direction-Aware Cooperative Collision Avoidance,» *Electronics*, vol. 9, n° 17, p. 1112, 2020.
- [73] Y. Yuan, R. Tasik, S. S. Adhatarao, Y. Yuan, Z. Liu et X. Fu, «RACE: Reinforced Cooperative Autonomous Vehicle Collision Avoidance,» *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, n° 19, pp. 9273-9291, 2020.
- [74] D. Bellan et C. Wartnaby, «Decentralized Cooperative Collision Avoidance for Automated Vehicles: a Real-World Implementation,» chez *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Las Vegas, États-Unis, 2020.
- [75] U. S. Department of Transportation - National Highway Traffic Safety Administration, «Vehicle-to-Vehicle Communication Technology,» [En ligne]. Available: https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/documents/v2v_fact_sheet_101414_v2a.pdf.
- [76] Insurance Institute of Highway Safety, «Real-world benefits of crash avoidance technologies,» 2020. [En ligne]. Available: <https://www.iihs.org/media/259e5bbd-f859-42a7-bd54-3888f7a2d3ef/shuYZQ/Topics/ADVANCED%20DRIVER%20ASSISTANCE/IIHS-real-world-CA-benefits.pdf>.
- [77] H. Zhou, W. Xu, J. Chen et W. Wang, «Evolutionary V2X Technologies Toward the Internet of Vehicles: Challenges and Opportunities,» *Proceedings of the IEEE*, vol. 108, n° 12, pp. 308-323, 2020.
- [78] N. Zhong, F. Zhang, J. Zhang et L. Peng, «Edge-Enabled C-V2X Infrastructure Deployment for Promoting Advanced Driving Assistant Systems in Large-Scale Environment,» *SAE Technical Paper*, 2020.

- [79] S. Barmounakis, G. Tsiatsios, M. Papadakis, E. Mitsianis, N. Koursiumpas et N. Alonistioti, «Collision avoidance in 5G using MEC and NFV: The vulnerable road user safety use case,» *Computer Networks*, vol. 172, 2020.
- [80] A. Mammeri, A. J. Siddiqui, Y. Zhao et B. Pekilis, «Vulnerable Road Users Detection based on Convolutional Neural Networks,» chez *International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*, 2020.
- [81] L. Hobert et e. al., «Specifications for the enhancement to existing LDM and cooperative communication protocol standards,» *AutoNet2030 Deliverable D3.2*, 2015.
- [82] NHTSA, «Vehicle Safety Communications – Applications (VSC-A) Final Report,» 2011. [En ligne]. Available: <https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/811492a.pdf>.
- [83] Y. Guo, J. Ma, E. Leslie et Z. Huang, «Evaluating the Effectiveness of Integrated Connected Automated Vehicle Applications Applied to Freeway Managed Lanes,» *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, pp. 1-15, 2020.
- [84] K. Raboy, J. Ma, E. Leslie et F. Zhou, «A proof-of-concept field experiment on cooperative lane change maneuvers using a prototype connected automated vehicle testing platform,» *Journal of Intelligent Transportation Systems*, vol. 25, n° 11, 2020.
- [85] J. Ma, E. Leslie, A. Ghiasi et Z. Huang, «Empirical Analysis of a Freeway Bundled Connected-and-Automated Vehicle Application Using Experimental Data,» *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, vol. 146, n° 16, 2020.
- [86] S. Hasan, A. Balador, S. Girs et E. Uhlemann, «Towards Emergency Braking as a Fail-Safe State in Platooning: A Simulative Approach,» chez *IEEE 90th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall)*, 2019.
- [87] A. Abunei, C. Comsa, D. Mnesciuc, M. Ferent et A. Drenciu, «Open source hardware and software V2V emergency braking warning application,» chez *International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, 2018.
- [88] C. Flores, P. Merdrignac, R. d. Charette, F. Navas, V. Milanés et F. Nashashibi, «A Cooperative Car-Following/Emergency Braking System With Prediction-Based Pedestrian Avoidance Capabilities,» *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 20, n° 15, pp. 1837-1846, 2019.
- [89] A. Vinel, N. Lyamin et P. Isachenkov, «Modeling of V2V Communications for C-ITS Safety Applications: A CPS Perspective,» *IEEE Communications Letters*, vol. 22, n° 18, pp. 1600-1603, 2018.

- [90] S. Shafiei, A. M. Kamalirad et A. Taghavipour, «Robust control of connected vehicles via V2V communication,» *Asian Journal of Control*, vol. 21, n° %14, pp. 1644-1658, 2019.
- [91] S. Bhatanagar, S. Chien et Y. Chen, «Reducing Delay in V2V-AEB System by Optimizing Messages in the System,» chez *International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*, 2017.
- [92] L. Chen et C. Englund, «Cooperative Intersection Management: A Survey,» *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 17, n° %12, pp. 570-586, 2016.
- [93] Y. Xu, H. Zhou, J. Chen, B. Qian, W. Zhuang et S. X. Shen, «V2X Empowered Non-Signalized Intersection Management in the AI Era: Opportunities and Solutions,» *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 4, n° %14, pp. 18-25, 2020.
- [94] G. Boquet, I. Pisa, J. L. Vicario, A. Morell et J. Serrano, «Analysis of adaptive beaconing protocols for intersection assistance systems,» chez *14th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS)*, 2018.
- [95] K. Z. Ghafoor, J. Lloret, K. A. Bakar, A. S. Sadiq et S. A. B. Mussa, «Beaconing approaches in vehicular ad hoc networks: a survey,» *Wireless Personal Communications*, vol. 73, n° %13, pp. 885-912, 2013.
- [96] S. A. A. Shah, E. Ahmed, F. Xia, A. Karim, M. Shiraz et a. R. M. Noor, «Adaptive beaconing approaches for vehicular ad hoc networks: A Survey,» *IEEE Systems Journal*, 2016.
- [97] M. Sepulcre, J. Gozalvez, O. Altintas et H. Kremo, «Integration of congestion and awareness control in vehicular networks,» *Ad Hoc Networks*, vol. 37, pp. 29-43, 2016.
- [98] F. Hart, M. Saraoglu, A. Morozov et K. Janschek, «Fail-safe Priority-based Approach for Autonomous Intersection Management,» *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, pp. 233-238, 2019.
- [99] B. Li, Y. Zhang, Y. Feng, Y. Zhang, Y. Ge et Z. Shao, «Balancing Computation Speed and Quality: A Decentralized Motion Planning Method for Cooperative Lane Changes of Connected and Automated Vehicles,» *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, vol. 3, n° %13, pp. 340-350, 2018.
- [100] S. A. Hussain, B. S. Jahromi et S. Cetin, «Cooperative Highway Lane Merge of Connected Vehicles Using Nonlinear Model Predictive Optimal Controller,» *Vehicles*, vol. 2, pp. 249-266, 2020.
- [101] J. Rios-Torres et A. A. Malikopoulos, «A Survey on the Coordination of Connected and Automated Vehicles at Intersections and Merging at Highway On-Ramps,» *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 18, n° %15, pp. 1066-1077, 2017.

- [102] 5G CARMEN, 5G CARMEN Use Cases and Requirements, F. Visintainer, Éd., 2018.
- [103] J. Rios-Torres, A. A. Malikopoulos et P. Pisu, «Online optimal control of connected vehicles for efficient traffic flow at merging roads,» chez *IEEE 18th Int. Conf. Intell. Transp. Syst.*, 2015.
- [104] J. Rios-Torres et A. A. Malikopoulos, «Automated and cooperative vehicle merging at highway on-ramps,» *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, pp. 900-906, 2016.
- [105] D. Marinescu, J. Curn, M. Bouroche et V. Cahill, «On-ramp traffic merging using cooperative intelligent vehicles: A slot-based approach,» chez *IEEE ITSC*, 2012.
- [106] E. Beheshtitabar et E. M. Alipour, «A Rule Based Control Algorithm for On-Ramp Merge with Connected and Automated Vehicles,» chez *International Conference on Transportation and Development*, 2020.
- [107] C. Letter et L. Elefteriadou, «Efficient control of fully automated connected vehicles at freeway merge segments,» *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 80, pp. 190-205, 2017.
- [108] N. Chen, B. v. Arem, T. Alkim et M. Wang, «A Hierarchical Model-Based Optimization Control Approach for Cooperative Merging by Connected Automated Vehicles,» *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, pp. 1-14, 2020.
- [109] O. Nassef, L. Sequeira, E. Salam et T. Mahmoodi, «Building a Lane Merge Coordination for Connected Vehicles Using Deep Reinforcement Learning,» *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, n° 14, pp. 2540 - 2557, 2020.
- [110] 5GCAR, «5G Communication Automotive Research and Innovation,» [En ligne]. Available: <https://5gcar.eu>.
- [111] 5GCARMEN, «5GCARMEN D2.1,» [En ligne]. Available: https://5gcarmen.eu/wp-content/uploads/2020/03/5G_CARMEN_D2.1_FINAL.pdf.
- [112] CVRIA - US DOT, «Emergency EElectronic Brake Light,» [En ligne]. Available: <https://local.iteris.com/cvria/html/applications/app23.html>. [Accès le 05 12 2020].
- [113] S.-b. Yu, D.-H. Jeong, J.-H. Park, K.-s. Park et J.-T. Park, «Test Procedure and Logic Development for V2X Based Safety Support Services for Urban Area in Korea,» *International Journal of Automotive Technology*, vol. 22, pp. 89-95, 2021.
- [114] International Standardization Organization, «ISO 20901:2020 - Intelligent transport systems — Emergency electronic brake light systems (EEBL) — Performance requirements and test procedures,» [En ligne]. Available: <https://www.iso.org/standard/69407.html>. [Accès le 07 12 202].

- [115] R. Miucic, A. Sheikh, Z. Medenica et R. Kunde, «V2X Applications Using Collaborative Perception,» chez *2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, Chicago, IL, États-Unis, 2018.
- [116] C. Campolo, A. Molinaro, A. O. Berthet et A. Vinel, «On Latency and Reliability of Road Hazard Warnings Over the Cellular V2X Sidelink Interface,» *On Latency and Reliability of Road Hazard Warnings Over the Cellular V2X Sidelink Interface*, vol. 23, n° 111, pp. 2135-2138, 2019.
- [117] Conseil canadien des administrateurs en transport motorisé, «Stratégie relative aux usagers vulnérables de la route,» Ottawa, Canada, 2009.
- [118] Commission européenne, «Mobility & Transport: ITS & Vulnerable Road Users,» [En ligne]. Available: https://ec.europa.eu/transport/themes/its/road/action_plan/its_and_vulnerable_road_users_en. [Accès le 07 11 2020].
- [119] Road Network Operations and Intelligent Transport Systems - PIARC (World Road Association), «Safety of Vulnerable Road Users,» [En ligne]. Available: <https://rno-its.piarc.org/en/network-operations-its-road-safety/vulnerable-road-users>. [Accès le 29 01 2021].
- [120] Statistique Canada, «Base canadienne de données de l'état civil - Décès (BCDECD),» [En ligne]. Available: https://www23.statcan.gc.ca/imdb/p2SV_f.pl?Function=getSurvey&SDDS=3233. [Accès le 01 11 2020].
- [121] Statistique Canada, «Les circonstances entourant les décès liés au cyclisme au Canada, 2006 à 2017,» July 2019. [En ligne]. Available: <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/82-625-x/2019001/article/00009-fra.htm>. [Accès le 29 01 2021].
- [122] 5GAA Automotive Association, «Vulnerable Road User Protection,» 2020.
- [123] A. Mammeri, A. J. Siddiqui, Y. Zhao et B. Pekilis, «Vulnerable Road Users Detection based on Convolutional Neural Networks,» chez *International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*, 2020.
- [124] R. Zadeh, M. Ghatee et H. Eftekhari, «Three-Phases Smartphone-Based Warning System to Protect Vulnerable,» *IEEE Trans. Intell. Trans. Syst.*, vol. 19, pp. 2086-2098, 2018.
- [125] H. Artail, K. Khalifeh et M. Yahfoufi, «Avoiding Car-Pedestrian Collisions Using a VANET to Cellular,» chez *International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*, 2017.
- [126] Z. Zhang, J. Gao, J. Mao, Y. Liu, D. Anguelov et C. Li, «STINet: Spatio-Temporal-Interactive Network for Pedestrian Detection and Trajectory Prediction,» chez *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2020.

- [127] I. Kotseruba, A. Rasouli et J. K. Tsotsos, «Benchmark for Evaluating Pedestrian Action Prediction,» chez *IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*, 2021.
- [128] Y. Luo, C. Zhang, M. Zhao, H. Zhou et J. Sun, «Where, What, Whether: Multi-Modal Learning Meets Pedestrian Detection,» chez *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2020.
- [129] P. Merdrignac, O. Shagdar et F. Nashashibi, «Fusion of Perception and V2P Communication Systems for Safety of Vulnerable Road Users,» *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 18, pp. 1740-1751, 2017.
- [130] P. Sewalkar et J. Seitz, «Vehicle-to-Pedestrian Communication for Vulnerable Road Users: Survey, Design Considerations, and Challenges,» *Sensors (Basel)*, vol. 19, n° 12, p. 358, 2019.
- [131] M. Ghafarianzadeh et L. M. Hansen, «Pedestrian prediction based on attributes». États-Unis. Brevet US20200307562A1, 1 octobre 2020.
- [132] Association des transports du Canada, «Notions élémentaires : Sécurité des zones de travaux au Canada,» 2016.
- [133] C-ITS Corridor Project, «Workzone V2X Trial,» *Intertraffic World*, pp. 50-56, 2019.
- [134] Audi America, «Audi collaborates to deploy C-V2X communication technology on Virginia roadways,» 29 09 2020. [En ligne]. Available: <https://media.audiusa.com/en-us/releases/437>. [Accès le 05 11 2020].
- [135] Wyoming Department of Transportation, «Connected Vehicle Pilot Deployment Program: Wyoming,» [En ligne]. Available: https://www.its.dot.gov/factsheets/pdf/WyomingCVPilot_Factsheet_020817.pdf.
- [136] O. Raddaoui, M. M. Ahmed et S. M. Gaweesh, «Assessment of the effectiveness of connected vehicle weather and work zone warnings in improving truck driver safety,» *IATSS Research*, vol. 44, n° 13, pp. 230-237, 2020.
- [137] CVRIA - US DOT, «Stop Sign Violation Warning,» [En ligne]. Available: <https://local.iteris.com/cvria/html/applications/app71.html>. [Accès le 15 12 2020].
- [138] ETSI, «Intersection Collision Risk Warning (ICRW) Application Requirements Specifications,» 2018.
- [139] US DOT, «Vehicle-to-Infrastructure (V2I) Safety Applications: Performance Requirements, Vol. 7, Stop Sign Gap Assist (SSGA),» 2015.

- [140] M. B. Younes et A. Boukerche, «Safe Driving Protocol at Special Stop Sign Intersections (D-SSS),» chez *2020 IEEE Global Communications Conference*, Taïpei, Taïwan, 2020.
- [141] L. Le, A. Festag, R. Baldessari et W. Zhang, «V2X Communication and Intersection Safety,» chez *13th International Forum on Advanced Microsystems for Automotive Applications*, Berlin, Allemagne, 2009.
- [142] H. Abdelghaffar, K. Ahn et H. A. Rakha, «Developing a Connected Vehicle Transit Signal Priority System,» Baltimore, MD, États-Unis, 2020.
- [143] C.-F. Liao et G. A. Davis, «Field Testing and Evaluation of a Wireless-Based Transit Signal Priority System,» University du Minnesota, Minneapolis, États-Unis, 2011.
- [144] Y.-J. Lee, S. Dadvar, J. Hu et B. B. Park, «Transit Signal Priority Experiment in a Connected Vehicle Technology Environment,» *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, vol. 143, n° 18, 2017.
- [145] G. Krueger, S. Johnson, S. R. et B. Frey, «Connected Vehicle Pilot Deployment Program Phase 1, Partnership Status Summary – Tampa (THEA),» Tampa, Floride, États-Unis, 2019.
- [146] S. Concas et A. Kourtellis, «Tampa (THEA) CV Pilot Deployment Results and Transition Plan,» 2021.
- [147] X. Wang, J. Li, C. Zhang et T. Z. Qiu, «Active Warning System for Highway-Rail Grade Crossings Using Connected Vehicle Technologies,» *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2019, 2019.
- [148] D. Peterson et D. S. Boyer, «Feasibility Study of In-Vehicle Warning Systems,» US DOT, 1975.
- [149] M. Hartong, R. Goel, C. Farkas et D. Wijesekera, «PTC-VANET Interactions to Prevent Highway Rail Intersection Crossing Accidents,» chez *2007 IEEE 65th Vehicular Technology Conference - VTC2007-Spring*, Dublin, Irlande, 2007.
- [150] Université La Trobe, «Improving Safety at Level Crossings,» 2013. [En ligne]. Available: <https://www.latrobe.edu.au/technology-infusion/innovation/transport/improving-safety-at-level-crossings>.
- [151] X. Zhao, W. Xu, J. Ma, H. Li, Y. Chen et J. Rong, «Effects of connected vehicle-based variable speed limit under different foggy conditions based on simulated driving,» *Accident Analytics & Prevention*, pp. 206-216, 2019.
- [152] A. I. o. G. Yang, M. Ahmed, S. Gaweesh et E. Adomah, «Connected vehicle real-time traveler information messages for freeway speed harmonization under adverse weather conditions:

Trajectory level analysis using driving simulator,» *Accident Analysis and Prevention*, vol. 146, p. 105707, 2020.

- [153] J. Ma, X. Li, S. Shladover, H. A. Rakha, X.-Y. Lu et R. Jagan, «Freeway Speed Harmonization,» *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, vol. 1, n° 11, pp. 78 - 89, 2016.
- [154] K. Shaaban, M. A. Khan, R. Hamila et M. Ghanim, «A Strategy for Emergency Vehicle Preemption and Route Selection,» *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 44, p. pages 8905–8913, 2019.
- [155] F. Weinert, M. Düring et K. Bogenberger, «Influence of Emergency Vehicle Preemption on Travelling Time and Traffic Safety in Urban Environments enabled by Innovative Behavioral Models and V2X Communication – Simulation and Case Study,» chez *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, Auckland, Nouvelle-Zélande, 2019.
- [156] J. Li, C. Qiu, L. Peng et T. Z. Qiu, «Signal Priority Request Delay Modeling and Mitigation for Emergency Vehicles in Connected Vehicle Environment,» *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2672, n° 118, pp. 45-57, 2018.
- [157] V. Tyagi, S. Kalyanaraman et R. Krishnapuram, «Vehicular Traffic Density State Estimation Based on Cumulative Road Acoustics,» *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 13, n° 13, pp. 1156-1166, 2012.
- [158] E. Tan et J. Chen, «Vehicular Traffic Density Estimation via Statistical Methods with Automated State Learning,» chez *2007 IEEE Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance*, Londres, Royaume-Uni, 2007.
- [159] N. Maslekar, M. Bousedjra, J. Mouzna et H. Labiod, «A stable clustering algorithm for efficiency applications in VANETs,» chez *2011 7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*, Istanbul, Turquie, 2011.
- [160] S. Ancona, R. Stanica et M. Fiore, «Performance boundaries of massive Floating Car Data offloading,» chez *2014 11th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS)*, Obergurgl, Autriche, 2014.
- [161] C. d. Fabritiis, R. Ragona et G. Valenti, «Traffic Estimation And Prediction Based On Real Time Floating Car Data,» chez *2008 11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, Beijing, Chine, 2008.
- [162] M. Rashidi, I. Batros, T. K. Madsen, M. T. Riaz et T. Paulin, «Placement of Road Side Units for floating car data collection in highway scenario,» chez *2012 IV International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems*, Saint-Pétersbourg, Russie, 2012.

- [163] S. Jones, «Cooperative Adaptive Cruise Control: Human Factors Analysis,» Federal Highway Administration, US DOT, 2013.
- [164] V. Vukadinovic, K. Bakowski, P. Marsch, I. D. Garcia, H. Xu, M. Sybis, P. Sroka, K. Wesolowski, D. Lister et I. Thibault, «3GPP C-V2X and IEEE 802.11 p for Vehicle-to-Vehicle communications in highway platooning scenarios,» *Ad Hoc Networks*, vol. 74, pp. 17-29, 2018.
- [165] V. Milanés, S. E. Shladover, J. Spring, C. Nowakowski, H. Kawazoe et M. Nakamura, «Cooperative Adaptive Cruise Control in Real Traffic Situations,» *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 15, n° 11, pp. 296-305, 2014.
- [166] Y. Sun, P. Wang et F. Liu, «Design and Implementation of Cooperative Adaptive Cruise Control based on V2X,» chez *2020 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS)*, Shanghai, Chine, 2020.
- [167] E. Charoniti, G. Klunder, P.-P. Schackmann, M. Schreuder, R. d. S. Schwartz, D. Spruijtenburg, U. Stelwagen et I. Wilmink, «Environmental Benefits of C-V2X for 5GAA - 5G Automotive Association E.V.,» TNO, 2020.
- [168] US DOT, «Applications for the Environment: Real-Time Information Synthesis (AERIS),» Intelligent Transportation System Joint Program Office, US DOT, 2016.
- [169] The National ITS Reference Architecture, US DOT, «Eco-Lanes Management,» [En ligne]. Available: <https://local.iteris.com/arc-it/html/servicepackages/sp18.html#tab-3>. [Accès le 23 11 2020].
- [170] H. Rakha, K. Ahn et K. Moran, «INTEGRATION Framework for Modeling Eco-routing Strategies: Logic and Preliminary Results,» *International Journal of Transportation Science and Technology*, vol. 1, n° 13, pp. 259 - 274, 2012.
- [171] K. Boriboonsomsin, M. J. Barth, W. Zhu et A. Vu, «Eco-Routing Navigation System Based on Multisource Historical and Real-Time Traffic Information,» *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 13, n° 14, pp. 1694 - 1704, 2012.
- [172] L. Luo, Y.-E. Ge, F. Zhang et X. (. Ban, «Real-time route diversion control in a model predictive control framework with multiple objectives: Traffic efficiency, emission reduction and fuel economy,» *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 48, pp. 332 - 356, 2016.
- [173] A. Elbery et H. A. Rakha, «VANET Communication Impact on a Dynamic Eco-Routing System Performance: Preliminary Results,» chez *2018 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, Kansas City, MO, États-Unis, 2018.

- [174] S. F. M. T. A. (SFMTA), «SFpark Pilot Project Evaluation,» San Francisco, États-Unis, 2014.
- [175] Z. Yu, D. Jin, X. Song, C. Zhai et D. Wang, «Internet of Vehicle Empowered Mobile Media Scenarios: In-Vehicle Infotainment Solutions for the Mobility as a Service (MaaS),» *Sustainability*, vol. 12, n° 118, p. 7448, 2020.
- [176] H. T. Cheng, H. Shan et W. Zhuang, «Infotainment and road safety service support in vehicular networking: From a communication perspective,» *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 25, n° 16, pp. 2020 - 2038, 2011.
- [177] F. Pervez, A. Adinoyi et H. Yanikomeroglu, «Efficient resource allocation for video streaming for 5G network-to-vehicle communications,» chez *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Montréal, QC, Canada, 2017.
- [178] M. Plotnikov, «Evaluating Alternative Transportation Financing Approaches: A Conceptual Framework and Analytical Methods,» Open Access Dissertations, 2012.
- [179] J. Opiola, «Toll Collection Systems - Technology Trend Impact on PPP's & Highways' Transport,» chez *World Bank*, Washington, États-Unis, 2006.
- [180] «407 ETR,» [En ligne]. Available: <https://www.407etr.com/fr/index.html/>.
- [181] P. C. Bartolomeu, E. Vieira et J. Ferreira, «Pay as You Go: A Generic Crypto Tolling Architecture,» *IEEE Access*, vol. 8, pp. 196212 - 196222, 2020.
- [182] S. Halder, A. Ghosal et M. Conti, «Secure OTA Software Updates in Connected Vehicles: A survey,» *Computer Networks*, vol. 178, 2020.
- [183] M. Khurram, H. Kumar, A. Chandak, V. Sarwade, N. Arora et T. Quach, «Enhancing connected car adoption: Security and over the air update framework,» chez *2016 IEEE 3rd World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, Reston, États-Unis, 2016.
- [184] A. Qayyum, M. Usama, J. Qadir et A. Al-Fuqaha, «Securing Connected & Autonomous Vehicles: Challenges Posed by Adversarial Machine Learning and The Way Forward,» *IEEE Communications Surveys and Tutorials 2020*, vol. 22, n° 12, pp. 998 - 1026, 2020.
- [185] S. Kumar, K. Singh, S. Kumar, O. Kaiwartya, Y. Cao et H. Zhou, «Delimitated Anti Jammer Scheme for Internet of Vehicle: Machine Learning Based Security Approach,» *IEEE Access*, vol. 7, pp. 113311 - 113323, 2019.
- [186] Q. He, X. Meng, R. Qu et R. Xi, «Machine Learning-Based Detection for Cyber Security Attacks on Connected and Autonomous Vehicles,» *Mathematics*, vol. 8, n° 18, 2020.

- [187] S. M. Mahmud, S. Shanker et I. Hossain, «Secure software upload in an intelligent vehicle via wireless communication links,» chez *2005 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings*, Las Vegas, États-Unis, 2005.
- [188] K. Mansour, W. Farag et M. ElHelw, «AiroDiag: A sophisticated tool that diagnoses and updates vehicles software over air,» chez *2012 IEEE International Electric Vehicle Conference*, Greenville, États-Unis, 2012.
- [189] D. K. Nilsson et U. E. Larson, «Secure Firmware Updates over the Air in Intelligent Vehicles,» chez *ICC Workshops - 2008 IEEE International Conference on Communications Workshops*, Beijing, Chine, 2008.
- [190] M. Steger, A. Dorri, S. S. Kanhere, K. Römer, R. Jurdak et M. Karner, «Secure Wireless Automotive Software Updates Using Blockchains: A Proof of Concept,» chez *21th International Forum on Advanced Microsystems for Automotive Applications (AMAA 2017)*, Berlin, Allemagne, 2017.
- [191] K. Mayilsamy, N. Ramachandran et V. S. Raj, «An integrated approach for data security in vehicle diagnostics over internet protocol and software update over the air,» *Computers & Electrical Engineering*, vol. 71, pp. 579-593, 2018.
- [192] M. S. Idrees, H. Schweppe, Y. Roudier, M. Wolf, D. Scheuermann et O. Henniger, «Secure automotive on-board protocols: a case of over-the-air firmware updates,» chez *3rd International Workshop on Communications Technologies for Vehicles*, Oberpfaffenhofen, Allemagne, 2011.
- [193] R. Petri, M. Springer, D. Zelle, I. McDonald, A. Fuchs et C. Krauß, «Evaluation of Lightweight TPMs for Automotive Software Updates over the Air,» chez *4th International Conference on Embedded Security in Car USA*, Detroit, États-Unis, 2016.
- [194] T. Canada, «Base nationale de données sur les collisions (BNDC),» 2019. [En ligne]. Available: <https://www.wapps2.tc.gc.ca/Saf-Sec-Sur/7/NCDB-BNDC/p.aspx?l=fr>.
- [195] C. Dannheim, M. Mader, C. Icking, J. Loewenau et K. Massow, «A novel approach for the enhancement of cooperative ACC by deriving real time weather information,» chez *16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013)*, La Haye, Pays-Bas, 2013.
- [196] S. Hergeth, L. Lorenz et J. F. Krems, «Prior Familiarization With Takeover Requests Affects Drivers' Takeover Performance and Automation Trust,» *Human Factors The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, vol. 59, n° 13, pp. 457-470, 2017.

- [197] C. Schwarz, T. L. Brown, C. Keum et J. G. Gaspar, «Transfer from Highly Automated to Manual Control: Performance and Trust,» chez *25th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*, Michigan, États-Unis, 2017.
- [198] Indiana Department of Transportation, «Statewide Interstate Tolling Strategic Plan - APPENDIX A: CONCEPT OF OPERATIONS,» INDOT, Indianapolis, US, 2018.

