

Rapport du groupe de travail : technologies de communication pour les STI coopératifs

1	Introduction.....	3
2	Présentation des technologies.....	5
2.1	ITS-G5.....	5
2.1.1	La couche physique.....	5
2.1.2	Contrôle d'accès au support (MAC).....	5
2.1.3	Contrôle de congestion distribué (DCC).....	6
2.2	LTE-V2X.....	6
2.2.1	Description de l'architecture.....	7
2.2.2	Couche physique.....	9
2.2.3	Contrôle de congestion.....	10
2.2.4	Evolution des standards.....	10
2.3	5G.....	10
2.4	Synthèse technique sur le fonctionnement des trois technologies.....	13
2.5	Benchmark international.....	13
3	Performances techniques.....	15
3.1	Performances techniques attendues pour les services ITS.....	15
3.2	Performances des technologies.....	16
3.2.1	ITS-G5.....	16
3.2.2	LTE-V2X.....	25
3.2.3	5G.....	34
3.3	Enjeux de cybersécurité.....	35
3.3.1	Exigences de sécurité pour les applications V2X.....	35
3.3.2	Mécanismes de sécurité et de protection de vie privée dans les communications ITS-G5	36
3.3.3	L'infrastructure à clé publiques (PKI).....	36
3.3.4	Mécanismes de sécurité et de protection de vie privée dans les communications LTE-V2X.....	37
4	Disponibilité des technologies.....	38
4.1	ITS-G5.....	38
4.2	LTE-V2X.....	42
4.3	5G.....	44
5	Co-existence, complémentarité, évolutivité.....	45
5.1	Co-existence dans la bande 5.9 Ghz.....	45
5.1.1	Coexistence entre ITS routiers et ITS rail urbain.....	46
5.1.2	Coexistence ITS-G5 et C-V2X.....	47
5.1.3	Coexistence en bande adjacente.....	47
5.2	Conditions techniques en cours de définition pour l'utilisation de la 5G dans les différentes bandes de fréquences.....	48
5.3	Complémentarité et évolutivité des technologies.....	48
5.3.1	Hybridation de l'ITS-G5.....	48
5.3.2	Évolutivité de l'ITS-G5.....	50
5.3.3	Hybridation et évolutivité du LTE-V2X.....	52
5.3.4	Possibilité d'un double équipement ITS-G5 / LTE-V2X.....	53
6	Conditions de déploiement.....	54
6.1	Business model.....	54
6.2	Couverture du réseau routier.....	55
6.2.1	Analyse stratégique.....	55

6.2.2	Analyse des effets.....	57
6.2.3	Synthèse.....	60
7	Gouvernance.....	62
7.1	Au niveau national.....	62
7.2	Au niveau communautaire.....	63
8	Conclusions.....	63
	Références.....	70
	Annexe A. Hypothèses et paramètres de simulation pour la couverture LTE-V2X.....	73
	Annexe B. Paramètres de simulation pour la latence LTE-V2X.....	77

1 Introduction

La connexion de l'infrastructure routière aux véhicules et des véhicules entre eux peut se réaliser par un seul et même système: c'est ce qu'on appelle un Système de Transport Intelligent (STI) coopératif. On parle aussi de communication V2X.

Le principe est le suivant : à partir de leurs capteurs embarqués, les véhicules génèrent automatiquement des messages sur les situations qu'ils rencontrent (route glissante, freinage d'urgence...) et les envoient aux alentours : ils peuvent être reçus par d'autres véhicules (V2V) et par les gestionnaires routiers (V2I). Le gestionnaire routier peut aussi transmettre les informations concernant les chantiers, la viabilité hivernale, les conditions de trafic, etc. aux véhicules équipés (I2V). Le système peut viser une simple information du conducteur ou être couplé à des fonctionnalités de conduite déléguée. Par ailleurs, d'autres services peuvent se greffer au système en associant d'autres acteurs que le gestionnaire routier. Enfin, on peut aussi imaginer des échanges d'information entre véhicules et piétons (V2P ou P2V).

Les STI coopératifs doivent être bien distingués d'autres systèmes proches :

- par rapport aux systèmes existants basés sur le *crowdsourcing*, les STI coopératifs apportent une fiabilité bien plus grande : d'une part, les événements concernant des véhicules (pannes, accidents...) sont émis par le véhicule impliqué, sans action humaine; d'autre part les événements sur les chantiers et interventions du gestionnaire d'infrastructure sont émis par le gestionnaire lui-même. L'erreur d'interprétation inhérente à un système de déclaration par les véhicules passant à proximité disparaît.
- par rapport à eCall, ils permettent de prévenir non pas les forces de l'ordre, mais aussi les autres usagers et le gestionnaire routier, et n'est pas limité au cas des accidents. Ils permettent également une information descendante du gestionnaire routier à l'utilisateur (par exemple sur l'état du trafic).

La France figure parmi les pays leaders des STI coopératifs en Europe et dans le Monde, grâce au projet de déploiement pilote SCOOP@F, associant les constructeurs PSA et Renault, actuellement en phase d'évaluation. Même si SCOOP@F ne comporte pas de fonctionnalités de conduite déléguée, PSA et Renault ont pu en 2017 faire franchir les premiers péages et chantiers à des véhicules automatisés en s'appuyant sur les acquis du projet.

A l'heure actuelle, 16 Etats membres de l'Union européenne se sont lancés dans des déploiements pilotes similaires, et les STI coopératifs attirent de plus en plus d'intérêt dans le monde. Les bénéfices, notamment en termes de sécurité routière, ont été démontrés par de nombreuses études. Ceux-ci valent pour les services dits « Day 1 » de signalisation embarquée et d'information du conducteur sur les événements inopinés et dangereux, mais aussi à moyen et long terme pour des services avancés pour le véhicule automatisé, la connectivité pouvant fonctionner comme un capteur supplémentaire.

La stratégie de la Commission européenne, publiée en novembre 2016, vise à créer les conditions d'un déploiement massif à partir de 2019, en commençant par les services « Day 1 ». Un acte délégué en préparation doit apporter la sécurité juridique nécessaire aux déploiements.

Cependant, la question de la technologie de la communication à utiliser reste sujette à débats.

La technologie utilisée dans SCOOP@F est une technologie wifi, l'ITS-G5, standardisée depuis de nombreuses années, qui opère dans la bande non licenciée 5,9 GHz et s'appuie sur des unités bord de route déployées par le gestionnaire routier. L'écosystème complet est disponible et industrialisable rapidement, et Volkswagen a annoncé son déploiement dans ses véhicules de série à partir de 2019. Elle peut être hybridée avec les réseaux cellulaires existants (3G, 4G, et à l'avenir, 5G) pour compléter la couverture des services non critiques en termes de latence, en mode V2N (*vehicle-to-network*).

Une technologie alternative dérivée des réseaux cellulaires 4G, le LTE-V2X ou C-V2X (Cellular-V2X), a été standardisée par le 3GPP dans sa *release* 14 (juin 2017). Elle prévoit que les communications V2V, V2I, V2P se fassent dans la même bande 5,9 GHz. De telles communications n'ont pas besoin de l'assistance d'un opérateur. Par contre, les communications V2N, qui ne sont pas critiques s'effectueront sur les réseaux traditionnels 4G. Le développement de cette technologie s'est accéléré fortement en 2018 notamment à partir des chipsets Qualcomm.

Enfin, la 5G à venir doit permettre la communication V2X. La standardisation de cette technologie n'est pas encore achevée mais s'accélère en vue de l'ouverture des bandes de fréquence.

Dans le détail, les questions qu'on peut se poser sont nombreuses :

- Quelles performances attendues de la connectivité pour les différents cas d'usage ? Quels critères de choix d'une technologie (qualité, coût, disponibilité, évolutivité...) ?
- Quelles performances comparées des technologies ITS-G5, LTE-V2X, 5G, avec quel niveau de certitude ?
- Quels besoins de couverture et quelle hiérarchisation du réseau routier, selon les différentes technologies ?
- LTE-V2X : quel échéancier de développement ? quel impact sur les réseaux cellulaires 4G ? quelle interface avec le gestionnaire routier ?
- 5G : quel échéancier de normalisation, de développement, de déploiement ? quelle interface avec le gestionnaire routier ?
- Quelle complémentarité entre l'ITS-G5 et la 5G ? entre le LTE-V2X et la 5G ? De manière générale, quelle complémentarité entre cellulaire et communication directe ? Y a-t-il une solution avec double équipement ITS-G5/LTE-V2X côté véhicule ? Côté infrastructure ?
- Quelles possibilités de coexistence ou de partage entre l'ITS-G5 et le LTE-V2X dans la bande 5,9 GHz ?
- La cybersécurité et le respect de la vie privée sont-ils discriminants entre les technologies ?
- Quels enjeux de certification ? De responsabilité ?
- Quels enjeux de continuité de service ? Cela exclut-il les solutions de communication non directe entre véhicules ?
- Quels coûts pour chaque acteur et quel business model selon les différentes technologies ?
- Quelle gouvernance au niveau français ?
- Quelle coordination avec la stratégie européenne ? Avec la stratégie française pour le développement du véhicule autonome ?
- Quels sont les orientations des autres pays dans le monde sur ces sujets ?

Le présent rapport vise à donner des éléments de réponse à ces questions, et à qualifier ainsi les différents scénarios de déploiement possibles.

Il est le fruit du travail d'un groupe de travail constitué autour de la DGITM et de la DGE pour y répondre, avec :

- Des constructeurs automobile : Renault, PSA, CCFA, PFA,
- Des gestionnaires routiers : Etat, ASFA,
- Des opérateurs télécom : Orange, Bouygues, FFT
- Des pôles de compétitivité : SystemX, Images&Réseaux, Systematic,
- Des organismes de recherche : Institut Mines-Telecom, IFSTTAR, Vedecom, Université de Reims Champagne Ardenne
- L'UTAC CERAM, l'ANSSI, l'ANFR, l'ARCEP

Ont été conviés mais n'ont pas souhaité participer :

- les représentants des collectivités : ADF, AdCF
- les représentants des opérateurs de transports publics : RATP, Transdev
- les représentants de Free et SFR (ce dernier étant représenté néanmoins via la FFT)

Le groupe s'est réuni 7 fois entre mai et décembre 2018.

2 Présentation des technologies

2.1 ITS-G5

ITS-G5 [A1] est la technologie de la couche d'accès (la couche physique et contrôle d'accès au support) spécifiée par l'ETSI et basée sur la norme IEEE 802.11p [A2].

2.1.1 La couche physique

La couche physique d'ITS-G5 est conforme au multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM) défini dans la norme IEEE 802.11-2012 [A2].

Fourni avec un canal de 10 MHz, le standard IEEE 802.11p prend en charge les débits numériques (*transfer rates*), les types de modulation et les taux de codage indiqués dans le tableau ci-dessous. Il convient de mentionner que la prise en charge de débits numériques de 3 Mbps, 6 Mbps et 12 Mbps est obligatoire pour les stations ITS. La durée d'un symbole OFDM est de 8 μ s, ce qui correspond à la transmission de 24 bits si un débit numérique de 3 Mbps est utilisé et de 48 bits pour un débit numérique de 6 Mbps.

Transfer rate [Mbit/s]	Modulation scheme	Coding rate	Data bits per OFDM symbol	Coded bits per OFDM symbol
3	BPSK	1/2	24	48
4,5	BPSK	3/4	36	48
6	QPSK	1/2	48	96
9	QPSK	3/4	72	96
12	16-QAM	1/2	96	192
18	16-QAM	3/4	144	192
24	64-QAM	2/3	192	288
27	64-QAM	3/4	216	288

Tableau 1 Taux de transfert, schémas de modulation et taux de codage en 802.11p

2.1.2 Contrôle d'accès au support (MAC)

La fonctionnalité MAC est définie dans IEEE 802.11-2012 [A2] en définissant le paramètre MIB dot11OCBAActivated sur VRAI, ce qui permet la communication en dehors du contexte d'un ensemble de services de base (BSS). Particulièrement,

- l'authentification de la sous-couche MAC et les procédures d'association sont désactivées,

- l'économie d'énergie n'est pas autorisée et
- la sécurité 802.11 n'est pas supportée.

Les stations ITS-G5 (véhicules et unités au bord de la route) forment un réseau purement distribué fonctionnant sans coordinateur.

En tant que MAC, IEEE 802.11p adopte le protocole IEEE 802.11e protocole avec le mode EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) qui définit quatre catégories d'accès aux canaux (AC) ou priorités 1) une priorité dite « voix », 2) une priorité dite « vidéo », 3) une priorité dite "Best Effort", and 4) une priorité dite "Background".

2.1.3 Contrôle de congestion distribué (DCC)

La fonctionnalité DCC fait partie de l'architecture de référence de la station ITS (ITS-S) décrite dans la norme ETSI EN 302 665 [A3]. Une description schématique incluant les interfaces est présentée sur la Figure 1. Il comprend les composants DCC suivants:

- DCC_ACC situé dans la couche d'accès, comme spécifié dans la norme ETSI TS 102 687 [A4]
- DCC_NET situé dans la couche « le réseau et le transport », comme spécifié dans la norme ETSI TS 102 636-4-2 [A5]
- DCC_FAC situé dans la couche « facilities »
- DCC_CROSS situé dans le plan de gestion.

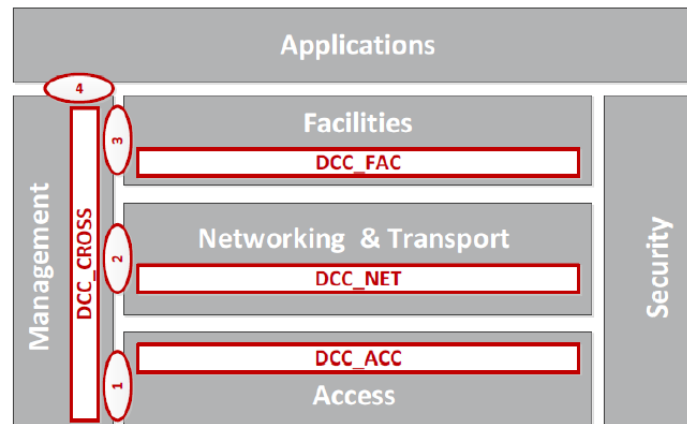


Figure 1 Architecture DCC.

En tant que paramètre d'entrée de DCC, le composant DCC_ACC fournit la valeur du taux d'occupation du canal (CBR) aux composants des différentes couches. Différentes techniques DCC peuvent exister telles que le contrôle de la puissance de transmission (TPC), le contrôle du taux de transmission (TRC), le contrôle de débit (TDC). Dans TPC, la puissance d'émission est modifiée pour ajuster la charge actuelle du canal. TRC régule le temps entre deux paquets consécutifs d'un ITS-S. Le TDC est un mécanisme de la régulation automatique du débit.

2.2 LTE-V2X

La communication véhicule-à-véhicule (V2V), et plus généralement les communications véhicule-à-tout objet communément appelé "V2X", a été très étudiée dans la technologie LTE Evolution depuis 2015 et est devenue de plus en plus un des principaux sujets de la norme 3GPP Release 14 [B1][B2][B3][B4][B5][B6][B7]. La version standard 14 est communément appelée LTE-V, LTE-V2X, or cellular V2X [B2]. La couche physique de LTE-V2X permet une meilleure utilisation de lien par rapport à la norme IEEE 802.11p [B13][B14][B15][B16].

En outre, LTE-V2X peut augmenter la fiabilité, sous certaines conditions, par l'ajout d'une transmission redondante par paquet. Afin de couvrir tous les travaux sur ce sujet à partir de la version 14 et visant à poursuivre au-delà avec les futures releases 3GPP avec les spécifications 5G, un terme global a également été récemment proposé : "C-V2X" ou Cellular V2X (communications cellulaires-V2X). Cette nouvelle technologie pourrait améliorer le développement des systèmes de transport intelligents (ITS) et compléter les différentes normes existantes de la dernière décennie proposé par Standard Development Organizations (SDOs), comme IEEE, ETSI et CEN/ISO. Les systèmes ITS sont essentiels pour accroître la sécurité et lutter contre les émissions et les embouteillages. Ils peuvent rendre les transports plus sûrs, plus efficaces et plus durables par l'application de diverses technologies de l'information et de communication à tous les modes de transport de passagers et de marchandises. Les domaines clés justifiant la nécessité de technologies des véhicules connectés sont regroupés en trois grands domaines : la sécurité routière, l'efficacité de la circulation routière et la mobilité et le confort.

Dans les sections suivantes, nous décrivons l'architecture LTE-V2X ainsi que les détails de la couche physique, des mécanismes de contrôle de congestion, et l'évolution de la technologie en termes d'évolution des normes.

2.2.1 Description de l'architecture

Le standard LTE-V2X supporte 2 interfaces radio, à savoir (1) l'interface cellulaire Uu, et (2) l'interface PC5 qui prend en charge les communications V2V ou la communication avec l'infrastructure basée sur LTE direct sidelink [B16]. L'interface LTE-V2X PC5 inclut deux modes de communication : le mode 3 et le mode 4. En mode 3, le réseau cellulaire affecte et gère les ressources radio utilisées par les véhicules pour leurs communications. Alors que, dans le mode 4, les véhicules sélectionnent de manière autonome les ressources radio avec ou sans l'aide du réseau pour leurs communications directes V2V. Le mode 4 utilise un ordonnancement contrôle de congestion distribués. Les communications V2X en mode 4 peuvent fonctionner sans couverture cellulaire. Le mode 4 est considéré comme le mode de base V2V puisque les applications de sécurité routière ne peuvent pas dépendre de la disponibilité de la couverture cellulaire.

Grâce à cette communication directe, il existe une alternative à la traditionnelle communication IEEE 802.11p, et qui permet de combiner les points forts de la connectivité cellulaire basée sur la communication V2N avec les points forts de la communication directe à travers une technologie harmonisée.

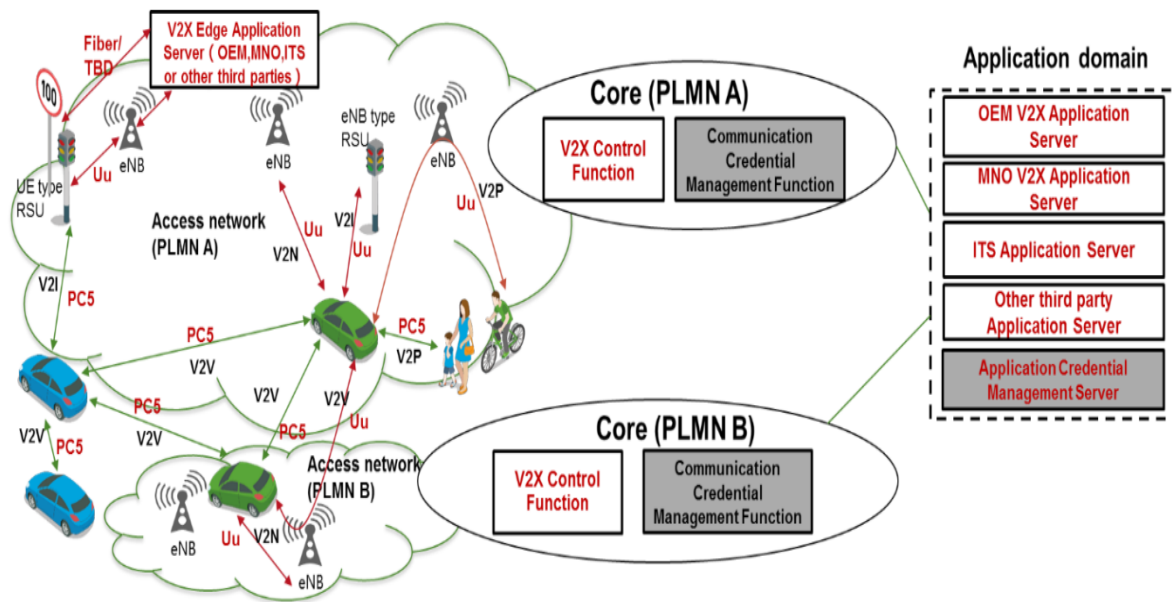


Figure 2 Architecture LTE-V2X

Comme le montre la Figure 2, un nouveau module "Fonction de contrôle V2X" est introduit pour fournir à l'équipement utilisateur UE (User Equipement) les paramètres nécessaires afin d'utiliser les communications V2X [B14]]. Ce module fournit à l'UE les paramètres de configuration spécifiques Public Land Mobile Network (PLMN) qui permettent à l'UE d'utiliser V2X au sein de ce réseau PLMN. Ce module est également utilisé pour configurer l'UE avec les paramètres nécessaires lorsque l'UE n'est pas desservi par le réseau (hors couverture). Il convient de noter, que le mode 4 fonctionne même sans abonnement valide de la part d'un réseau opéré Mobile Network Operator (MNO) pour un véhicule (par exemple si le contrat de l'abonné n'est pas prolongé). Dans ce cas, le mode 4 fonctionne avec des paramètres préconfigurés.

Concernant le domaine applicatif, un nouveau serveur appelé "V2X Application Server" est introduit pour traiter les données issues des communications V2X. Toutes les communications à travers les interfaces Uu et PC5 ont besoin d'être protégées. Il est à noter que des fonctionnalités de sécurité devraient fournir l'authentification des messages d'origine, l'intégrité, le chiffrement en option, et la protection de la vie privée dans le réseau et au niveau applicatif.

Par ailleurs, l'interface sidelink est spécifiée pour fonctionner dans la bande dédiée de 5,9 GHz. Le mode 4 PC5 assure l'ordonnancement et la gestion des interférences via des algorithmes distribués tandis que dans le mode 3 PC5 cela est réalisé via la station de base (eNB) au moyen de la signalisation du contrôle sur l'interface Uu. Les scénarios de déploiement, pris en charge par un ou plusieurs opérateurs, bénéficient des avantages supplémentaires découlant de l'utilisation de la connectivité basée sur Uu avec des services de diffusion.

Les communications V2X à travers l'interface PC5 - Mode Dans ce scénario, un équipement utilisateur UE transmet un message V2X à plusieurs UEs, sur une région, à l'aide de l'interface PC5. L'émetteur UE sélectionne de manière autonome les ressources et les mécanismes de transmission. Il y a deux cas possibles pour ce scénario :

- L'OBUE (UE) prend en charge uniquement la communication PC5 sans la disponibilité de l'interface Uu. Dans ce cas, l'UE communique avec d'autres UEs sans soutien de l'opérateur. Une pré-configuration est nécessaire.
- L'OBUE (UE) supporte les communications PC5 et Uu. Un opérateur peut envoyer et mettre à jour les paramètres de configuration si nécessaire, via l'interface Uu.

La communication V2V/V2I/V2P s'effectue sans nécessairement s'appuyer sur la participation du réseau pour l'ordonnancement et sans besoin de passer par une infrastructure réseau. Cette communication n'a pas nécessairement besoin d'un abonnement valide (carte SIM/eSIM) de l'UE, ce qui lui permet de fonctionner aussi complètement hors de contrôle d'un opérateur de réseau.

- Les communications V2X à travers l'interface PC5 - Mode 3

Dans ce scénario, l'émetteur UE envoie des messages V2X pour le récepteur UE via l'interface PC5; l'eNB envoie la signalisation de contrôle (p. ex., gestion des ressources, Modulation and Coding Scheme (MCS), etc.) à l'émetteur UE sur la liaison descendante de l'interface Uu. Le spectre des opérateurs de réseau mobile est utilisé pour la transmission de l'attribution de ressources et de la signalisation dans ce mode de fonctionnement, indépendamment du spectre PC5 utilisé pour la transmission de données. Lorsque les UEs sont dans la zone de couverture, les deux scénarios peuvent être choisis pour les communications V2X. Lorsque les UEs sont hors couverture, ces UEs peuvent uniquement choisir le premier scénario pour communiquer les uns avec les autres. Les deux scénarios sont pertinents dans la vie réelle des systèmes de communication. Il est à noter qu'il y a aussi la possibilité de supporter les communications V2X au moyen d'un Mode 4 assisté.

2.2.2 Couche physique

À l'instar de ProSe, LTE-V2X utilise un accès multiple par division de fréquence sur une seule porteuse et supporte des canaux de 10 et 20 MHz. Chaque canal est divisé en sous-porteuses de 1 ms, en blocs de ressources (RB) et en sous-canaux. Les sous-porteuses durent 1 ms [intervalle de temps de transmission (TTI)]. Un RB est la plus petite unité de ressources de fréquence pouvant être allouée à un utilisateur. Il a une fréquence de 180 kHz (12 sous-porteuses de 15 kHz). LTE-V2X définit les sous-canaux en tant que groupe de RBs dans la même sous-trame et le nombre de RBs par sous-canal peut varier. Les sous-canaux sont utilisés pour transmettre des données et des informations de contrôle. Les données sont transmises dans des blocs de transport (TB) sur des canaux sidelink partagés (PSSCH), et les messages d'information de contrôle (SCI) sont transmis sur des canaux de contrôle (PSCCH) [B16]. Un TB contient un paquet complet à transmettre, par exemple une balise ou un *cooperative awareness message* (CAM). Un nœud qui souhaite transmettre un TB doit également transmettre son SCI associé, également appelé affectation d'ordonnancement. LTE-V2X utilise le codage turbo et le préfixe cyclique normal. Les sous-porteuses ont un total de 14 symboles par sous-trame, et quatre de ces symboles sont dédiés à la transmission de signaux de référence de démodulation pour lutter contre l'effet Doppler à grande vitesse. La puissance d'émission maximale est de 23 dBm et la norme spécifie une exigence de niveau de puissance de sensibilité au récepteur de -90,4 dBm et un niveau d'entrée maximal de -22 dBm [B16]. La version 14 supporte les modulations QPSK et 16-QAM.

Mode 4: les véhicules sélectionnent leurs ressources radio de manière autonome, qu'ils soient ou non sous couverture cellulaire. Lorsque les véhicules sont sous couverture cellulaire, le réseau décide comment configurer le canal V2X et informe les véhicules via les paramètres configurables [B3]. Lorsque les véhicules ne sont pas sous couverture cellulaire, ils utilisent un jeu de paramètres préconfiguré pour remplacer les paramètres configurables. Cependant, la norme ne spécifie pas de valeur concrète pour chaque paramètre.

La norme inclut la possibilité de diviser le pool de ressources V2X en fonction de zones géographiques [B3]. Les véhicules sélectionnent leurs sous-canaux en mode 4 en utilisant le mécanisme d'ordonnancement semi-persistant (*ou semi-persistent scheduling* SPS) spécifié dans la versions 14 [B4][B7]. Les paquets peuvent être transmis toutes les 100 sous-porteuses [ie 10 paquets par seconde (10 pps)] ou par multiples de 100 sous-porteuses (jusqu'à un minimum

de 1 pps). Chaque véhicule inclut son intervalle de transmission de paquets dans le champ de réservation de ressources de son SCI. Grâce à la réservation semi-persistante de ressources et au compteur de resélection et de l'intervalle de transmission de paquets dans le SCI, les autres véhicules peuvent estimer quels sous-canaux sont libres lorsqu'ils effectuent leur propre réservation, ce qui réduit les collisions de paquets. Le processus de réservation de sous-canaux est décrit dans [B16]. Les extensions SPS du mode 4 offrent la possibilité, pour chaque paquet d'être transmis deux fois afin d'augmenter la fiabilité en utilisant une transmission de type HARQ.

Mode 3: La description est donnée par 3GPP TS 23.285 [B34]. La sélection des sous-canaux est gérée par le nœud eNB et non par chaque véhicule comme c'est le cas en mode 4. Le mode 3 est donc uniquement disponible lorsque les véhicules sont sous couverture cellulaire. L'UE doit être autorisée pour pouvoir transmettre des données. L'UE demande des ressources de transmission à l'eNB. L'eNB planifie les ressources de transmission pour la transmission des informations et des données de contrôle. SPS prend en charge l'allocation programmée des ressources. Le mode 3 utilise les mêmes dispositions de sous-canal que celles définies pour le mode 4. Contrairement au mode 4, la norme ne spécifie pas d'algorithme spécifique de gestion des ressources pour le mode 3. Chaque opérateur peut implémenter son propre algorithme qui devrait appartenir à l'une de ces deux catégories: ordonnancement dynamique ou SPS.

2.2.3 Contrôle de congestion

La version 14 prend en charge le contrôle de congestion dans le mode 4 [B2]. La norme ne spécifie pas d'algorithme de contrôle de congestion particulier mais définit les paramètres associés et des mécanismes possibles pour réduire la congestion du canal. Chaque fois qu'un véhicule doit transmettre ou retransmettre un paquet, il estime le *channel busy ratio* (CBR) et le taux d'occupation du canal ou *channel occupancy ratio* (CR). Si le paquet va être transmis au niveau de la trame n , alors les mesures sont effectuées au niveau de la trame $n-4$ [B2]. Le paramètre CBR fournit une indication du niveau de congestion de canal, et est défini comme la quantité de sous-canaux dans les 100 précédentes trames caractérisés qui ont un RSSI moyen supérieur à un seuil préconfiguré. La norme ne précise pas ce seuil. Pour ce faire, la norme définit plusieurs mécanismes possibles [B23][B24], et c'est à chaque véhicule de décider lequel à utiliser : l'abandon de paquets, nombre de transmissions par paquet, MCS, canaux réservés, puissance de transmission. Toutefois, dans [B25] les auteurs ont montré que l'abandon de paquets améliore le taux de livraison de paquets (PDR) dans le cas de canaux congestionnés. Le mode 3 ne met pas en œuvre un contrôle distribué de la congestion, le eNB gère les sous-canaux et décide de la façon de réduire l'occupation des canaux.

2.2.4 Evolution des standards

3GPP a commencé les travaux sur les nouvelles améliorations apportées au 5G V2X dans la version 15 et a achevé l'analyse des nouveaux cas d'utilisation et des nouvelles exigences qui seront pris en charge par cette version [B26]. Ces applications peuvent exiger une transmission jusqu'à 50 paquets par seconde (pps), une latence maximale comprise entre 3 et 10 ms et un niveau de fiabilité maximal de 99,99% (défini en termes de PDR). Pour prendre en charge ces exigences, certaines des améliorations LTE-V2X (appelées V2X Phase 2 ou eV2X) à l'étude dans la version 15 incluent [B27] : agrégation de porteuses, prise en charge de la modulation 64-QAM, réduction du temps maximal entre arrivée et départ de 20 ms (version 14) à moins de 10 ms, ressources partagées entre les modes 3 et 4, schémas de diversité de transmission et réduction du TTI à partir de 1 ms à 0,5 ms.

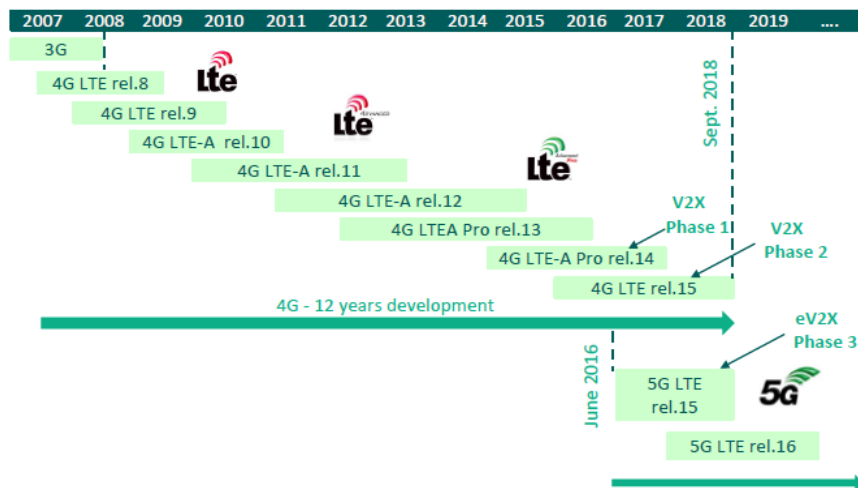


Figure 3 Evolution des standards

2.3 5G

La prochaine génération de réseau mobile, la 5G, promet un saut de performances technologiques par rapport à la 4G :

- un débit 10 fois supérieur,
- une latence (temps de réponse) divisée par 10,
- une fiabilité accrue,
- une connexion plus stable même en mobilité,
- une capacité à connecter simultanément de très nombreux objets ,et
- une meilleure efficacité énergétique.

Les apports de la 5G par rapport à la 4G sont résumés dans le schéma suivant :

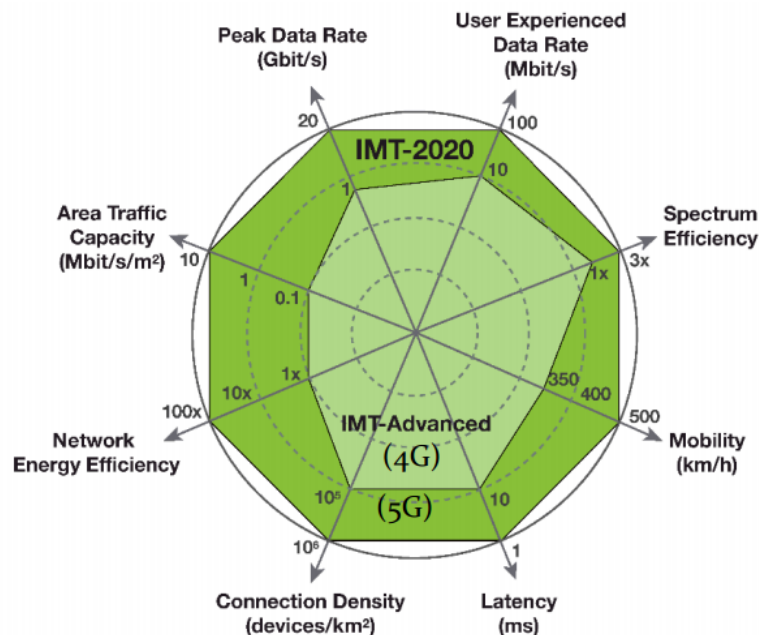


Figure 4 Apports de la 5G par rapport à la 4G (Source : UIT)

Au-delà de l'amélioration des réseaux mobiles grand public, ces performances ouvrent la voie à nombreux usages innovants dans des secteurs variés de l'économie, par exemple :

- l'automobile (communications ultra-fiables à très faible latence pour les véhicules connectés et autonomes),
- la télémédecine (opérations à distance en temps réel),
- les médias (réalité virtuelle en 3D à 360°), ou
- l'industrie (suivi logistique d'un très grand nombre de colis ou d'articles, multiplication des capteurs).

Il s'agit donc d'une rupture majeure par rapport aux générations précédentes.

Le déploiement des réseaux 5G dépend fortement des spécifications normatives définies par le 3GPP, un groupement d'industriels télécoms. Le groupe a approuvé une première sortie de standards 5G fin 2017 (Release 15), la suite étant prévue pour fin 2019 (Release 16). Ces sorties constitueront les spécifications définitives qui permettront aux opérateurs de déployer des réseaux 5G exploitant pleinement le potentiel de la technologie et uniformisés à l'échelle mondiale à partir de 2020.

Les applications visées par la 5G sont regroupées sur la figure suivante :

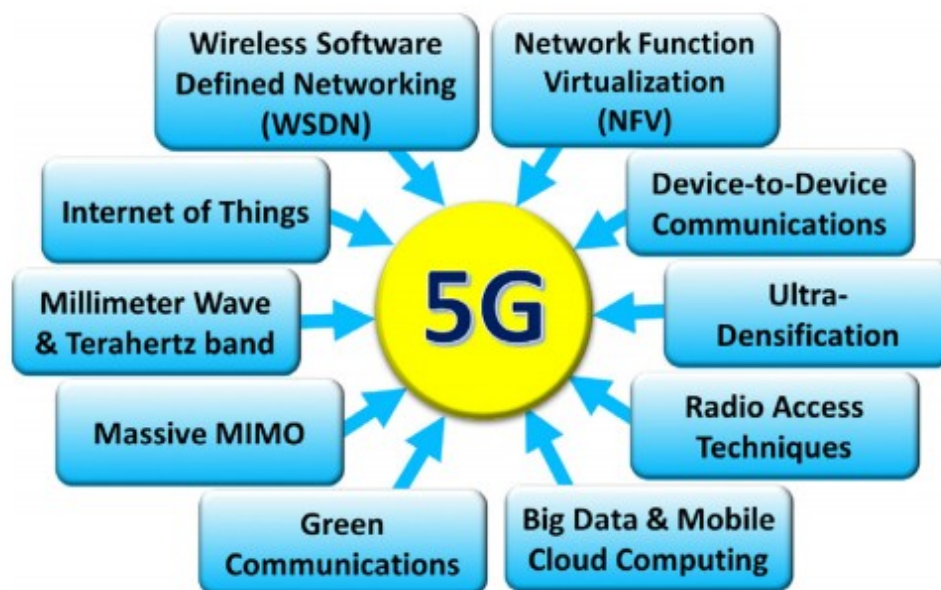


Figure 5 Applications de la 5G

La connexion véhicule se retrouve au niveau de plusieurs aspects (*device-to-device communications*, *Big data and mobile Cloud computing*, ultra densification, massive MIMO, IoT..).

La 5G apporte plusieurs plus-values en termes de prise en compte de débit, de prise en compte de missions critiques (avec une faible latence) et avec un déploiement massif d'objets connectés comme présenté dans le schéma suivant. Il est important de noter l'unification des mécanismes de communication pour le véhicule autonome.

La 5G-NR est porteuse d'autres possibilités aux communications véhiculaires comme présenté ci-dessous. L'apport des communications directes se fait indépendamment du réseau cellulaire avec un débit élevé.

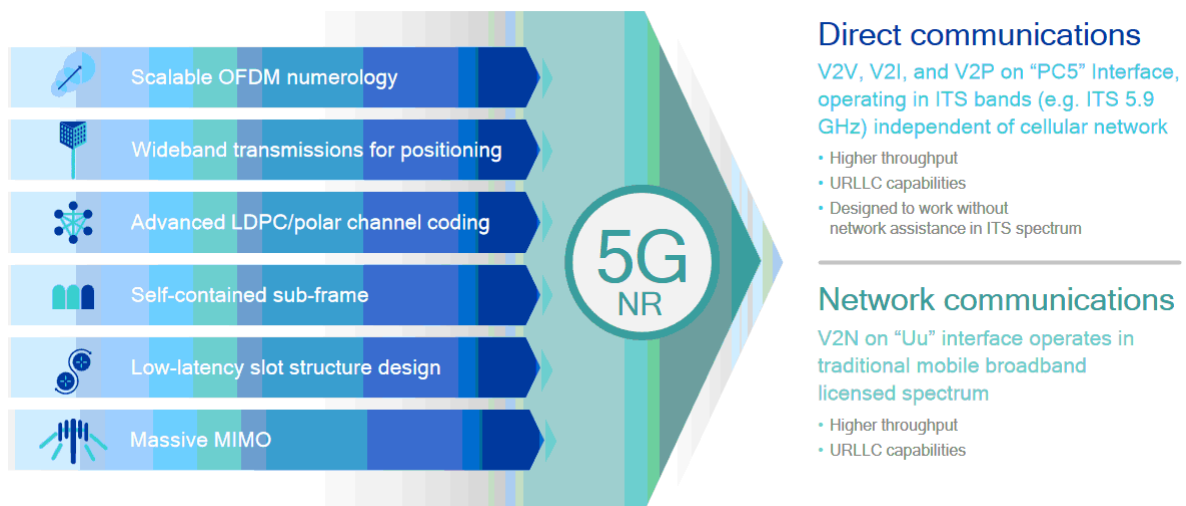


Figure 6 Possibilités de communications véhicules en 5G NR (source : Qualcomm)

Et les apports attendus pour le véhicule connecté sont un débit plus élevé, une faible latence, une localisation plus précise et une cartographie de haute définition. Ces 4 aspects sont reportés sur le schéma ci-dessous.

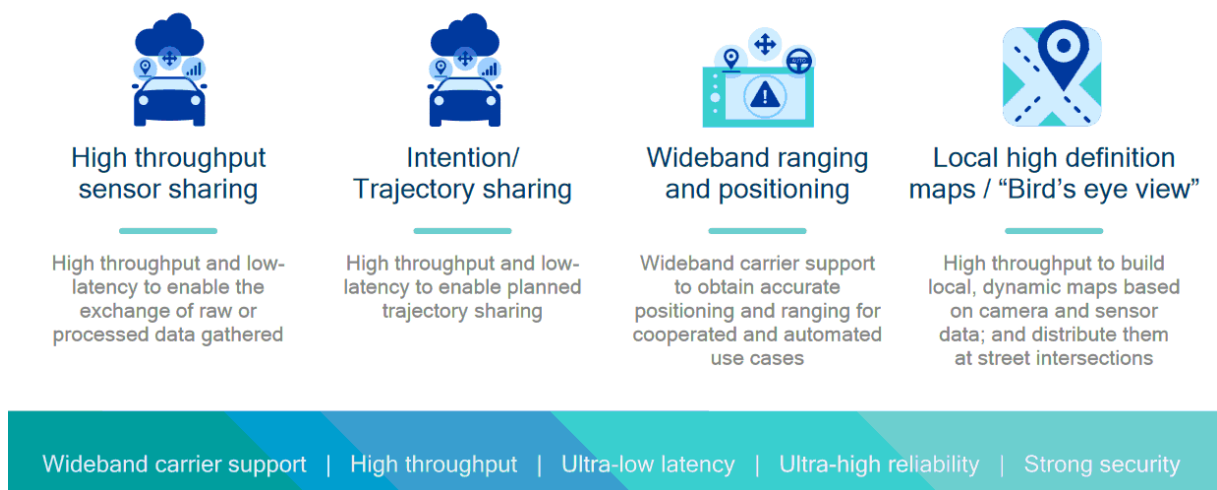


Figure 7 Apports attendus de la 5G pour le véhicule connecté (source : Qualcomm)

2.4 Synthèse technique sur le fonctionnement des trois technologies

Le fonctionnement des trois technologies est résumé dans le tableau suivant :

Radio design	802.11p	C-V2X Rel-14/15	C-V2X Rel-16(expected design)
Synchronization	Asynchronous	Synchronous	Synchronous
Channel size	10/20Mhz	Rel-14 – 10/20Mhz Rel-15 – 10/20/Nx20 MHz ¹	10/20 MHz and wideband (e.g. 40/60/80/100/...MHz)
Resource multiplexing across vehicles	TDM only	TDM and FDM	TDM and FDM possible
Data channel coding	Convolutional	Turbo	LDPC
HARQ Retransmission	No	Rel-14/15 – yes Rel-15 – ultra-reliable communication possible ²	Yes, along with ultra-reliable communication
Waveform	OFDM	SC-FDM	Likely OFDMA but many options available
Resource Selection	CSMA-CA	Semi-persistent transmission with frequency domain listen-before-talk	Many options available
MIMO support	No support standardized	Rx diversity for 2 antennas mandatory Tx diversity for 2 antennas supported	Support up to 8 tx/rx antennas Mandatory support for 2tx/rx antennas Both diversity and spatial multiplexing supported
Modulation support	Up to 64QAM	Up to 64 QAM	Up to 256QAM

Tableau 2 Fonctionnement des trois technologies

2.5 Benchmark international

Le Japon est le pays le plus avancé dans le déploiement des STI coopératifs. Le bouquet de services ETC2.0 a été lancé par le Ministère des Transports en 2011. Il s'agit d'un déploiement de masse de services I2V selon une technologie DSRC opérant dans la bande 5,8 GHz. A fin 2016, 1,2 millions d'unités embarquées ont été vendues. Ce système ne propose toutefois pas de services V2V.

Un autre système, ITS Connect, est testé dans la bande des 760 MHz. Il offre à la fois des services V2V et I2V. 120 000 unités embarquées ont été déployées à mi-2018.

La Corée du Sud a achevé fin 2017 un projet pilote (I2V, V2I et V2V) sur un tronçon autoroutier de 88 km entre Daejeon et Sejong, comptant 3000 unités embarquées. Il se base sur la technologie DSRC, opérant dans la bande 5855-5925 MHz. La compagnie autoroutière nationale KEC envisage un déploiement national pour couvrir le réseau autoroutier (4000 km) d'ici fin 2022.

En Chine, un test sur route ouverte de LTE-V2X a été réalisé en septembre 2018 par Ford à Wuxi. Depuis octobre 2018, la bande 5905-5925 MHz est réservée pour la technologie LTE-V2X. Un chantier a démarré pour compléter les spécifications internationales par des spécifications chinoises, il avance vite.

Aux Etats-Unis, la bande 5850-5925 GHz est réservée pour le DSRC. Le LTE-V2X peut y avoir accès à titre expérimental dans des zones géographiques bien définies. L'administration Obama a envisagé de rendre obligatoire le DSRC dans les nouveaux types de véhicules, un projet de législation a été mis en consultation publique mais tarde à être finalisé, faute de certitude de la part de l'administration Trump. Des déploiements volontaires d'infrastructure DSRC ont lieu dans différents Etats, côté véhicules environ 70000 sont équipés à début 2018 (notamment General Motors). Des tests de LTE-V2X ont également lieu, notamment à San Diego.

En Europe, la C-Roads Platform rassemble 16 pays (France, Allemagne, Royaume-Uni, Belgique Flandres et Wallonie, Pays-Bas, Italie, Espagne, Portugal, Autriche, République tchèque, Hongrie, Slovaquie, Suède, Finlande, Danemark, Norvège) déployant des STI coopératifs. Elle vise une couverture de 6000 km en ITS-G5 et 200000 km en cellulaire V2N d'ici fin 2019. Des déploiements en LTE-V2X ont été envisagés par la République tchèque, mais abandonnés faute de disponibilité de prototypes. La plateforme a adopté des spécifications harmonisées pour la plupart des services Day 1 en ITS-G5, et travaille sur l'équivalent en cellulaire V2N.

L'Allemagne fait face à des positions diamétralement opposées de ses constructeurs, Volkswagen ayant annoncé un déploiement massif d'ITS-G5 en 2019 alors que BMW travaille activement sur le LTE-V2X. Le Ministère de l'Economie et le Ministère des Transports ont conjointement écrit à l'association des constructeurs allemands (VDA) en juillet 2018 pour recommander l'emploi de technologies mûres pour le marché, en estimant que seul l'ITS-G5 l'est actuellement, tout en ouvrant la porte à des changements futurs de technologie si les acteurs le jugent pertinent.

L'Autriche et sa compagnie autoroutière nationale ASFINAG ont annoncé en septembre 2018 le lancement d'un appel d'offres pour l'équipement du réseau autoroutier en ITS-G5.

Les pays scandinaves concentrent leurs déploiements sur du cellulaire V2N en 3G/4G. Ils travaillent ensemble dans le cadre du projet Nordic Way.

Les Pays-Bas, le Royaume-Uni, la Belgique (Flandre) sont dans une démarche exploratoire et ne privilégient aucune technologie.

Hors d'Europe, l'Australie, la Russie et Israël sont membres associés de la C-Roads Platform et suivent de près ses travaux.

Partout dans le monde, des projets explorant les possibilités de la 5G pour les communications véhicule-véhicule et véhicule-infrastructure ont été lancés. En Europe, 3 projets transfrontaliers viennent d'être lancés :

- 5G Croco : France-Allemagne-Luxembourg, de Metz à Merzig et à Luxembourg
- 5G Carmen : Italie-Autriche-Allemagne, de Bologne à Munich
- 5G Mobix : multisites.

A l'échelle mondiale, le 5GAA regroupe des acteurs du monde de l'automobile et des télécommunications pour préparer l'apport de la 5G au secteur automobile. Il s'intéresse aussi au LTE-V2X.

3 Performances techniques

3.1 Performances techniques attendues pour les services ITS

Le groupe de travail a retenu une cible fonctionnelle constituée :

- des cas d'usage Day 1 d'information sur les événements inopinés et dangereux (véhicule d'urgence en approche, véhicule lent, véhicule arrêté, freinage d'urgence, contresens, conditions météorologiques exceptionnelles, personnes sur les voies)
- de cas d'usage Day 1,5 pour la protection des usagers vulnérables

- de cas d'usage Day 2 pour le véhicule autonome, dont la négociation d'insertion/fusion de voies, l'alerte risque de collision, le platooning. Ceux-ci peuvent être envisagés avec deux niveaux de performance selon que l'on vise un niveau d'automatisation plus ou moins élevé (assimilable à Day 2/Day 3).

Cette cible a été définie en prenant en compte les feuilles de route de l'industrie automobile et en sélectionnant les cas d'usage les plus exigeants en termes de performances.

Le groupe a retenu les indicateurs de performance suivants pour ces cas d'usage :

- Portée (en m), liée au taux de pertes de paquets
- Latence depuis interface APP-FAC en émission jusqu'à la réception (en ms).
-

D'autres indicateurs ont été envisagés mais pas retenus faute de disponibilité d'éléments :

- Débit (en Mb/s)
- Vitesse des véhicules max supportant l'application
- Taille des messages transmis
- Nombre de message transmis en 1 s
- QoS: Fiabilité (Taux d'erreur acceptable)
- Requis en termes de connectivité
- Reliability (%)
- Résilience: facteur lié à l'hybridation
- Requis en termes de sécurité des messages
- congestion (densité de noeud)
- Taux de perte à la première transmission (mesure au niveau Mac)

Il a documenté les cibles pour chaque indicateur, pour chacun des cas d'usage. Il a constaté la rareté des sources disponibles. Il s'agit essentiellement, pour les cas d'usage Day 1, des normes ETSI et notamment de la norme de services « Road Hazard Signalling », et des travaux du 3GPP.

	Services Day 1	Services Day 3		
Source	Normes ETSI	Travaux du 3GPP		
		Platooning	Fusion de voies	Alerte risque de collision
Portée (m)	300	80	80	300
Latence (ms)	300	10	10	10

Tableau 3 Performances techniques attendues pour les services ITS

Ces cibles ne sont cependant pas endossées par les constructeurs qui sont encore dans une approche exploratoire des possibilités offertes par la connectivité.

3.2 Performances des technologies

La présente partie vise à documenter les performances des technologies ITS-G5, LTE-V2X, 5G, avec leur niveau de certitude.

3.2.1 ITS-G5

- Couverture de communication

En supposant que la puissance de transmission et le niveau de bruit soient respectivement de 23 dBm et -95 dBm, les couvertures théoriques de communication en visibilité directe (LOS) V2V et V2I avec un débit numérique de 6 Mbps sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

	Hauteur de l'antenne du véhicule	Hauteur de l'antenne d'UBR	Couverture
V2V	1.5 m	-	510 m
V2I		3 m	700 m
		5 m	850 m
I2I	-	3m	900 m

Tableau 4 Couverture de communication ITS-G5

Il convient de noter que le débit numérique a un impact considérable sur la couverture de communication. En effet, les résultats expérimentaux montrent que la distance de communication V2I peut être supérieure à 800 et 700 m pour 3 Mbps et 12 Mbps, alors qu'elle n'est que de 100 m pour 27 Mbps [A14].

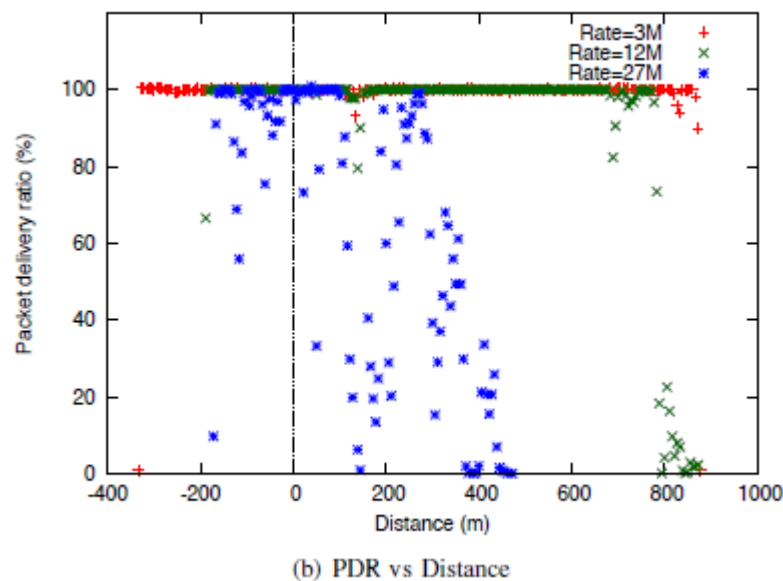


Figure 8 PDR en fonction du débit numérique [A14].

Les environnements de test, par exemple les autoroutes, les banlieues (les rues larges bordées de petits bâtiments et d'arbres) et les canyons urbains (les rues traversant des blocs denses d'immeubles de grande hauteur) peuvent avoir des impacts importants sur la distance LOS. En effet, comme le montrent la Figure 9 et la Figure 10, la distance LOS pour une communication V2V peut être divisée par deux en milieu urbain par rapport à une autoroute [A9].

Plusieurs travaux ont signalé une dégradation de la qualité du signal due à une obstruction. On peut observer en particulier une atténuation du signal supérieure à 20 + dB [A8], [A9] si le signal est bloqué, par exemple, par un camion ou un bus, divisant par deux la distance de communication en comparaison avec les conditions LOS (Figure 9 et Figure 10).

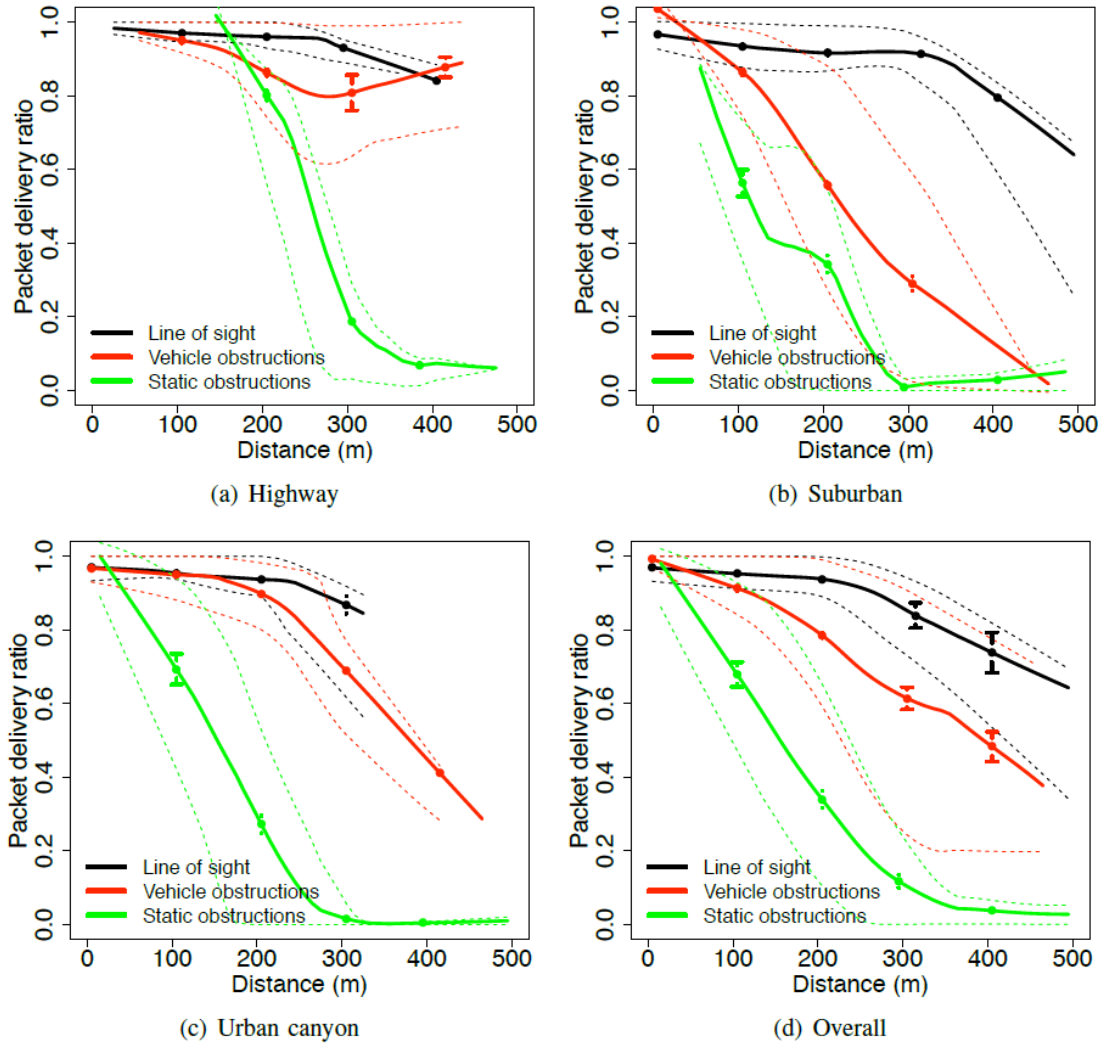


Figure 9 V2V Ratio de livraison des paquets (PDR) en fonction de la distance pour les expériences sur la route. Les lignes en pointillés représentent les quantiles 20% et 80% [A9].

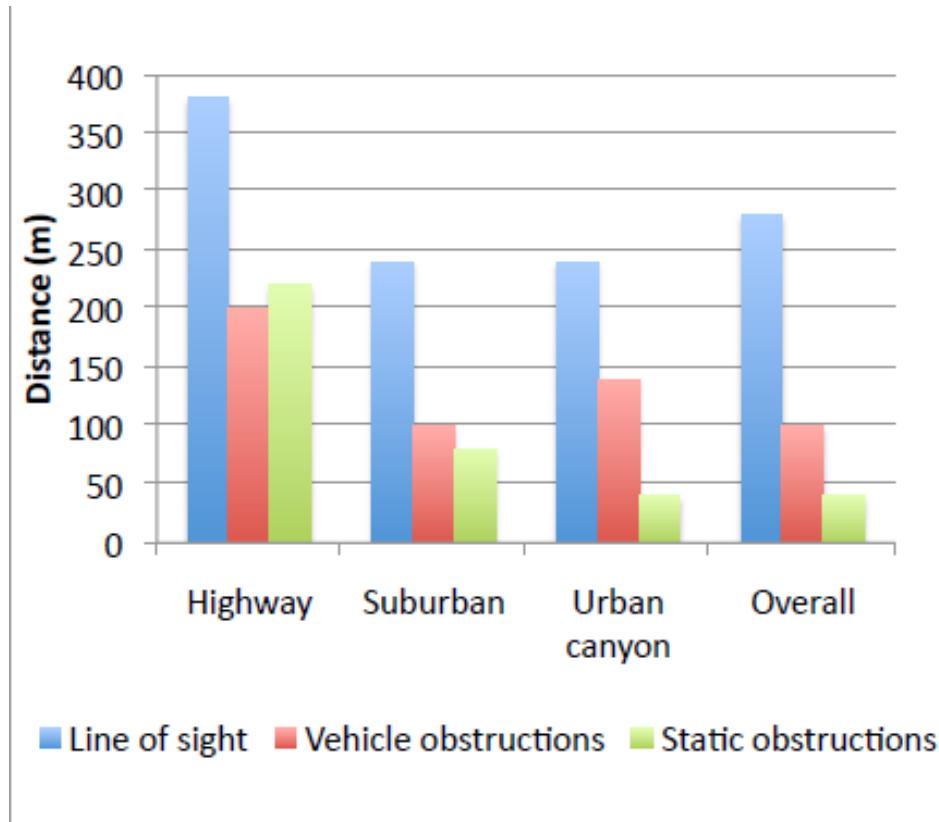


Figure 10 Portée de communication fiable calculée comme la distance maximale à laquelle le PDR était supérieur à 90% [A9]

En fonction des conditions environnementales, la couverture peut varier dans une large plage, par exemple entre 100 et 700 m pour V2I, comme indiqué dans [A6], [A7] pour les mêmes paramètres de puissance de transmission et de débit numérique [A6].

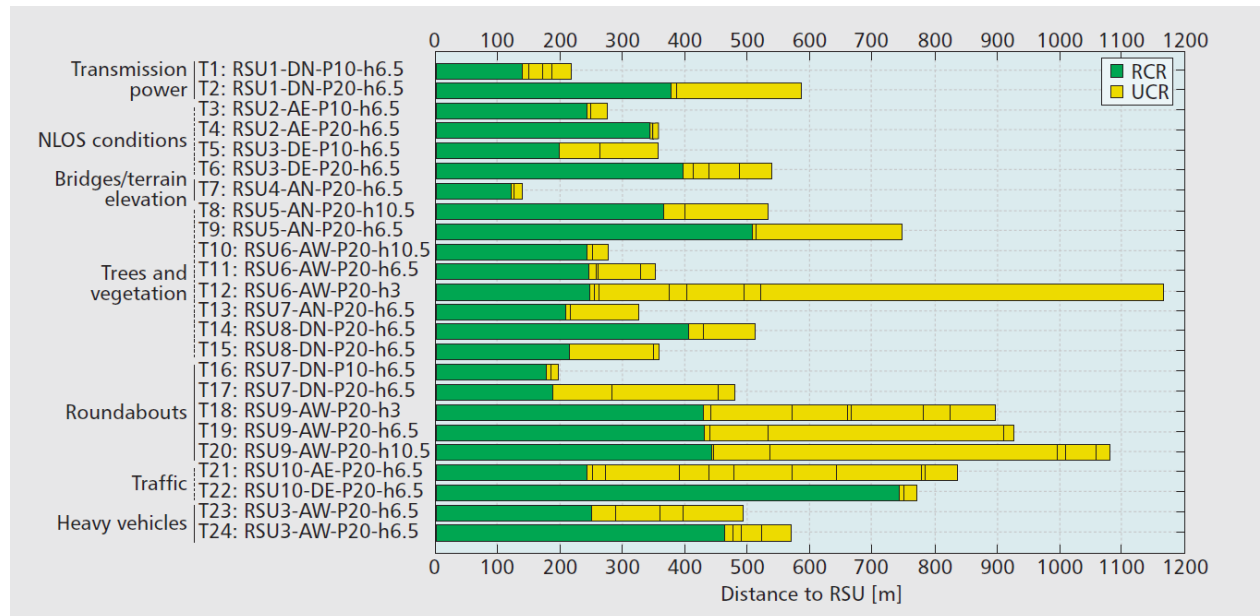


Figure 11 Distance de connectivité fiable V2I (RCR, PDR > 70%) et non fiable (UCR, PDR < 10%) pour différents environnements, puissance de transmission (P) et hauteur de l'antenne RSU (h)[A6]

La présence d'interférence inter-symboles (ISI) et inter-porteuse (ICI) qui dégradent les performances des systèmes communicants peuvent apparaître dans des environnements de véhicules mobiles et avec des effets plus importants dans des tunnels qu'en plein air. Néanmoins, il est rapporté que la technologie IEEE 802.11p ne souffrirait pas des ICI et ISI grâce à son intervalle de garde de 1,6 μ s et à l'espacement des sous-porteuses de 156,25 KHz [A10].

- Fiabilité de communication et impact du DCC

Des études de simulation sont menées pour comparer les performances du CAM avec et sans mécanisme TRC (Transmission Rate Control) pour différentes densités de trafic [A13]. Lorsque le TRC n'est pas appliqué (noDCC), chaque véhicule diffuse des CAM toutes les 100 ms, quelle que soit la densité du trafic. Le TRC réactif (DCC) contrôle l'intervalle de génération CAM en suivant le tableau suivant.

States	CBR(%)	T _{off} (CAM interval)
Relaxed	$0\% \leq \text{CBR} < 19\%$	60
Active_1	$19\% \leq \text{CBR} < 27\%$	100
Active_2	$27\% \leq \text{CBR} < 35\%$	180
Active_3	$35\% \leq \text{CBR} < 43\%$	260
Active_4	$43\% \leq \text{CBR} < 51\%$	340
Active_5	$51\% \leq \text{CBR} < 59\%$	420
Restricted	$\text{CBR} > 59\%$	460

Tableau 5 Tableau de paramètres DCC

Comme le montrent les Figure 12 et Figure 13, le PDR et PIR (le temps de réception entre deux paquets consécutifs) sont mesurés pour les CAM sur ITS-G5 avec et sans TRC pour différentes densités de trafic routier. Les paramètres de densité sont décrits dans le tableau suivant. Les résultats montrent clairement que si la congestion est bien contrôlée, les performances de communication peuvent être largement améliorées.

Class	Inter-Vehicle distance	Mobility
Sparse	100 m inter-distance (3 lanes / 2 directions)	Static/Mobile
Medium	45 m inter-distance (3 lanes / 2 directions)	Static/Mobile
Dense	20 m inter-distance (3 lanes / 2 directions)	Static/Mobile
Extreme	10 m inter-distance (3 lanes / 2 directions)	Static

Tableau 6 Scénarios de simulation

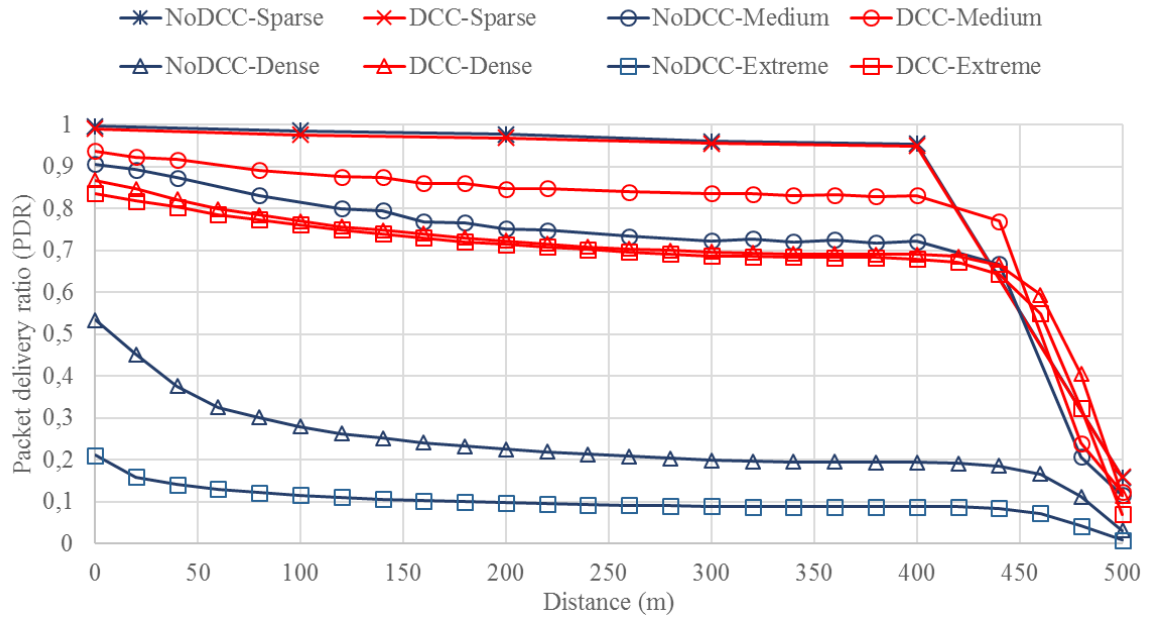


Figure 12 PDR de ITS-G5 avec et sans TRC réactif [A13]

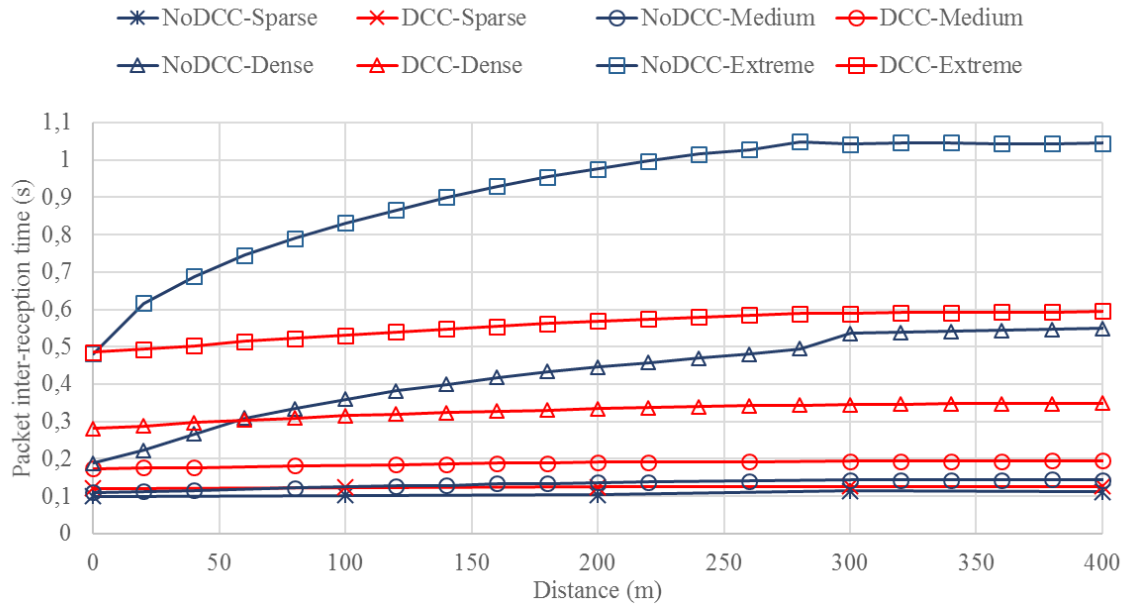


Figure 13 PIR de ITS-G5 avec et sans TRC réactif [A13]

Les performances de ITS-G5 lorsque le canal est partagé par le CAM et le DENM ont également été étudiées. Les performances de CAM et DENM sont illustrées aux figures Figure 14 et Figure 15 pour différents niveaux de densité de trafic. Ici, les DENM sont transmis avec une priorité plus élevée (AC [VO]) que les CAMs. De plus, les DENM sont transmis sur plusieurs sauts dans une zone de 1 km d'une autoroute à 6 voies (3 voies par direction), en utilisant différents algorithmes de diffusion : FloodAdv, CBFRT, CBF2Cv1 et CBF2Cv2 [A18]. Les résultats montrent que, avec l'augmentation de la densité du trafic routier, les performances se dégradent, en particulier pour les CAM qui sont envoyés avec la priorité basse AC.

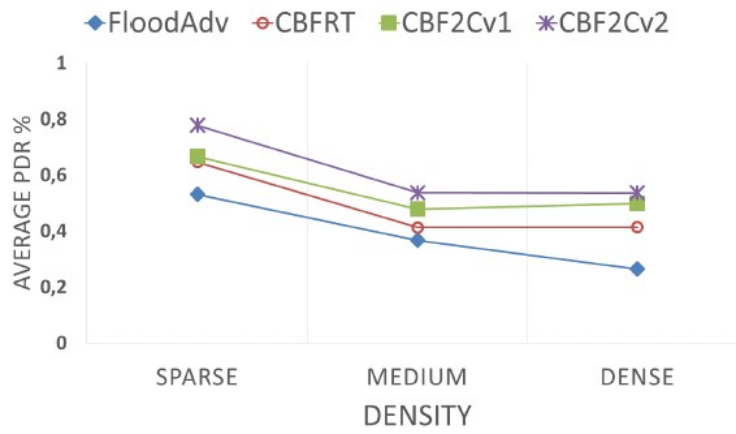


Figure 14 PDR de CAMs[A18]

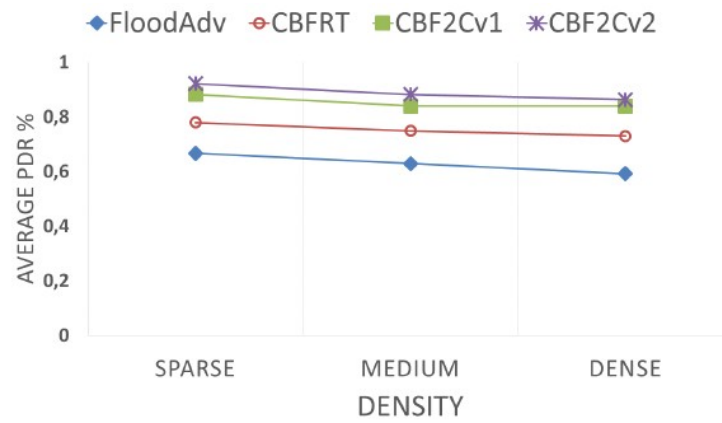


Figure 15 PDR de DENMs [A18]

Études analytiques et de simulation réalisées sur les performances de latence de la communication ITS-G5 pour une application prioritaire (émergente) et non prioritaire (courant) [A15]. Les paramètres de réseau et de trafic sont indiqués dans le tableau ci-dessous. Les résultats montrent que les trafics de données de priorité supérieure et inférieure ont un délai moyen très faible.

Parameter	Value	Parameter	Value
Highway length	2200m	PHY header	48bits
Density	0.01~0.1 vhls/m	MAC header	112bits
Average distance	100m~10m	Date rate	3Mbps
Transmission range	500m	Basic rate	1Mbps
Carrier sensing range	700m	Slot time	13 μ s
Interference range	600m	SIFS	32 μ s
Retry limit	4	Propagation delay	2 μ s

Tableau 7 Paramètres de réseau et de trafic

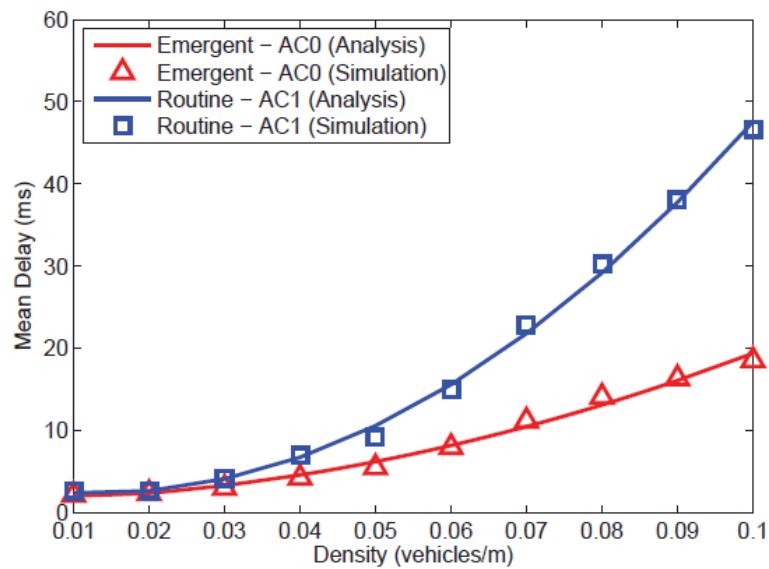


Figure 16 Délai de communication pour le trafic de données émergent et courant [A15]

- Débit

L'impact du débit numérique sur la qualité de la communication, en particulier le volume de données, a été étudié dans [A6] et [A12]. Les résultats s'accordent pour dire que le débit optimal en termes de volume de données pouvant être échangées pour V2I est compris entre 6 Mbps et 9 Mbps (Figure 17).

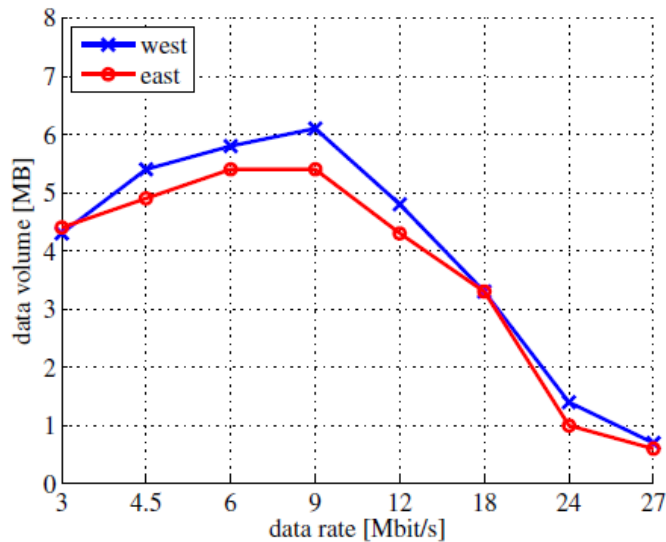


Figure 17 Impact du taux de transfert sur le volume de données.

- Performance de peloton

Le projet SARTRE a mené des expériences de peloton où ITS-G5 est utilisé pour la communication intra-peloton [A16] [A17]. Dans [A17] les auteurs ont évalué deux placements d'antenne sur le véhicule de tête : à l'avant de la cabine du conducteur et à l'arrière au sommet du conteneur. Les résultats montrent que le placement à l'arrière fournit des résultats supérieurs (voir tableau 8 : ici, la distance entre les véhicules variait entre 20 et 170 m) [A17].

Les auteurs ont aussi étudié la communication ITS-G5 pour la communication intra-peloton pour les cas LOS et NLOS. La condition NLOS a été produite lorsqu'un autre véhicule, qui n'est pas un membre du peloton, conduit entre les membres du peloton. Les tests sur le terrain sont résumés dans le tableau 9. Les tests sur les routes de banlieue S1 et S2 montrent que la communication fonctionne très bien quand aucun objet ne bloque la perte de visibilité et que le PER (taux d'erreur de paquet) est inférieur à 1%. Dans la mesure d'autoroute H1, il n'y a pas de véhicule gênant et les nœuds peuvent communiquer en LOS, mais le PER atteint 17%. Lorsqu'un véhicule indésirable roule entre deux membres du peloton, le PER peut atteindre 7,3% en banlieue et 96% en environnement autoroutier.



Figure 18 Emplacement d'antenne [A17]

Description	LV front node – FV2 car	LV rear node – FV2 car
Total number of sent messages	11373	11377
Number of successful round trip messages	9633	10955
Number of failed round trip messages	1740	422
Percent successful round trip messages	84.7%	96.3%

Tableau 8 Impact d'emplacement d'antenne pour la communication intra-peloton [A17]

Test no.	Road	Speed [km/h]	Setup	Distance Tx to Rx*		Classification	PER [%]
				[sec.]	[m]		
S1	Suburban	30-50	Tx – Rx	3	33	LOS	1
S2	Suburban	30-50	Tx – Rx	1.5	17	LOS	<0.1
S3	Suburban	30-50	Tx – Small truck – Rx	3	33	NLOS	7.3
H1	Highway	110	Tx – Rx	6	180	LOS	17
H2	Highway	110	Tx – Station wagon type car – Rx	6	180	NLOS	40
H3	Highway	110	Tx – Van – Rx	6	180	NLOS	81
H4	Highway	110	Tx – Ordinary truck – Rx	6	180	NLOS	96
H5	Highway	110	Tx – Large container truck – Rx	6	180	NLOS	96

Tableau 9 Tests et résultats [A16]

3.2.2 LTE-V2X

Dans cette section, nous présentons des résultats de simulations relatifs à la portée de communication, le taux de livraison de paquets (ou PDR), latence et discutons les problèmes de passage à l'échelle. Nous présentons ensuite les résultats de l'évaluation du Mode 4. Enfin, nous terminons par une évaluation des performances de l'application de platooning en utilisant la technologie LTE-V2X.

- Couverture de communication

Au sein du groupe de travail NGMN¹ sur V2X, un certain nombre d'entreprises ont fourni des résultats de simulation aux niveaux liaison et système pour LTE-V2X PC5 [B13][B28]. Dans les simulations, les modes 4 et 3 au niveau du système ont été pris en compte. Les hypothèses et paramètres utilisés sont décrits dans l'Annexe A. Les résultats de cette section sont des extraits de simulations détaillées au niveau du système². Les trois figures suivantes, à savoir Figure 19, Figure 20 et Figure 21, illustrent les résultats des performances du système

¹ NGMN Alliance, <https://www.ngmn.org>

² Des simulations DSRC ont également été réalisées, mais non reprises ici car réalisées selon les normes américaines et à partir de chipsets obsolètes.

des modes 3 et 4 du LTE-V2X. Les graphiques présentés par des barres présentent sur l'axe des y la portée de communication atteinte dans le scénario spécifique qui est indiqué sur l'axe des x. en supposant un taux de réception de paquets PRR (*Packet Reception Ratio*) de 80%, 90%, 95% sur les Figure 19, Figure 20 et Figure 21 respectivement. Chaque figure illustre les résultats, de quatre scénarios:

- Environnement urbain avec des vitesses moyennes de 15 km/h et 60 km / h.
- Environnement autoroutier avec des vitesses moyennes de 70 km / h et 140 km / h.

Pour chaque scénario, la barre du milieu indique la valeur moyenne des résultats SLS (*System Level Simulation*) fournis par les différentes entreprises. La portée de communication pour le mode 3 est supérieure à celle du mode 4.

La principale amélioration par rapport au mode 3 proviendrait de l'utilisation d'un mécanisme d'ordonnancement centralisé, qui évite au mieux les interférences grâce à l'affectation des ressources radio contrôlées par l'eNB. Le mode 3 montre des gains par rapport au mode 4 dans des scénarios où les véhicules sont exposés un fort degré d'interférence de UEs de proximité, qui émettent en même temps. Notez que certaines simulations du mode 3 ont été effectuées dans des conditions idéales, sans tenir compte de la faible précision des positions des véhicules, du nombre de véhicules desservis et de la périodicité fluctuante des messages ITS Cooperative Awareness Messages (CAMs) et Basic Safety Messages (BSMs). De plus, un ordonnancement semi-persistant est supposé. De plus, en réalité, il y aura une combinaison de véhicules en Mode 3 et Mode 4, ce qui n'a pas été pris en compte dans les simulations.

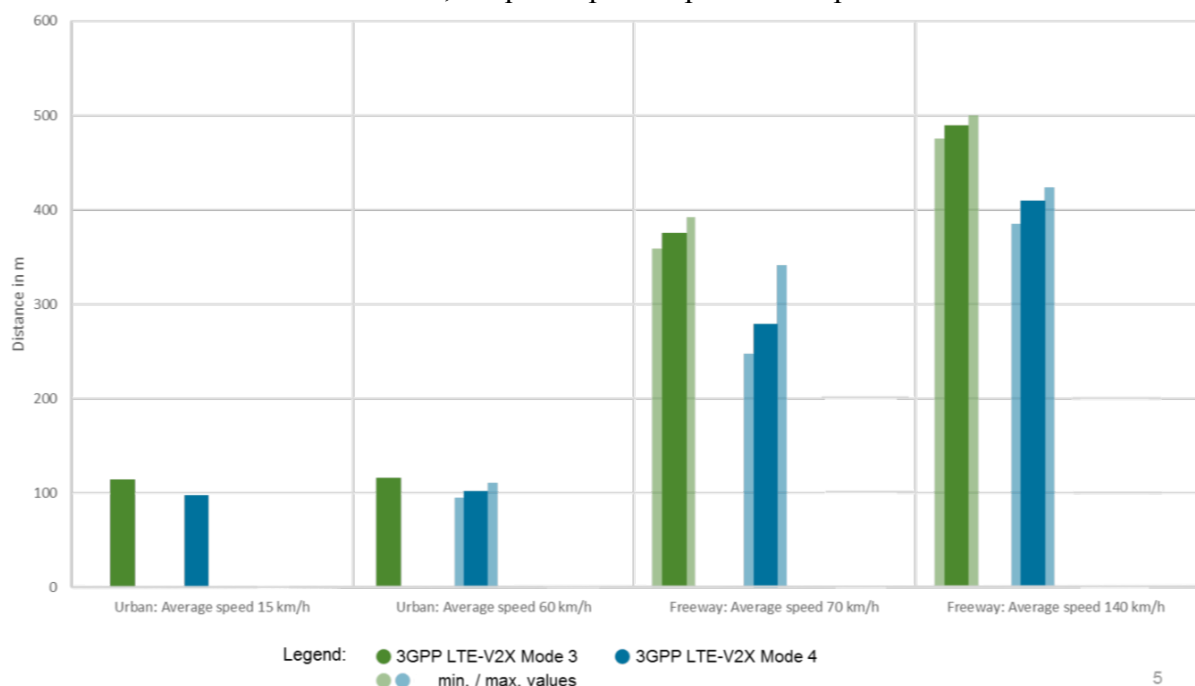


Figure 19: Comparaison des résultats SLS - PRR 80% - mode 4 par rapport au mode 3, scénarios de conduite dans un milieu urbain (15 km / h et 60 km / h) et autoroute (70 km / h et 140 km / h)

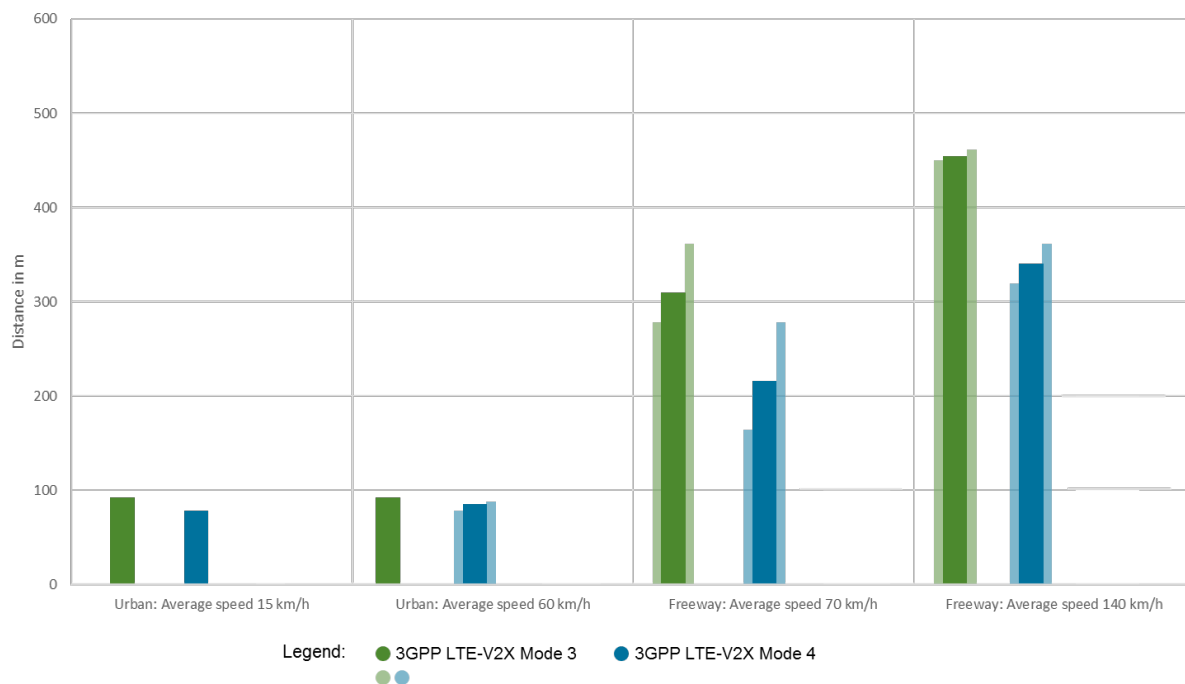


Figure 20 Comparaison des résultats SLS - PRR 90% - mode 4 par rapport au mode 3, scénarios de conduite dans un milieu urbain (15 km / h et 60 km / h) et autoroute (70 km / h et 140 km / h)

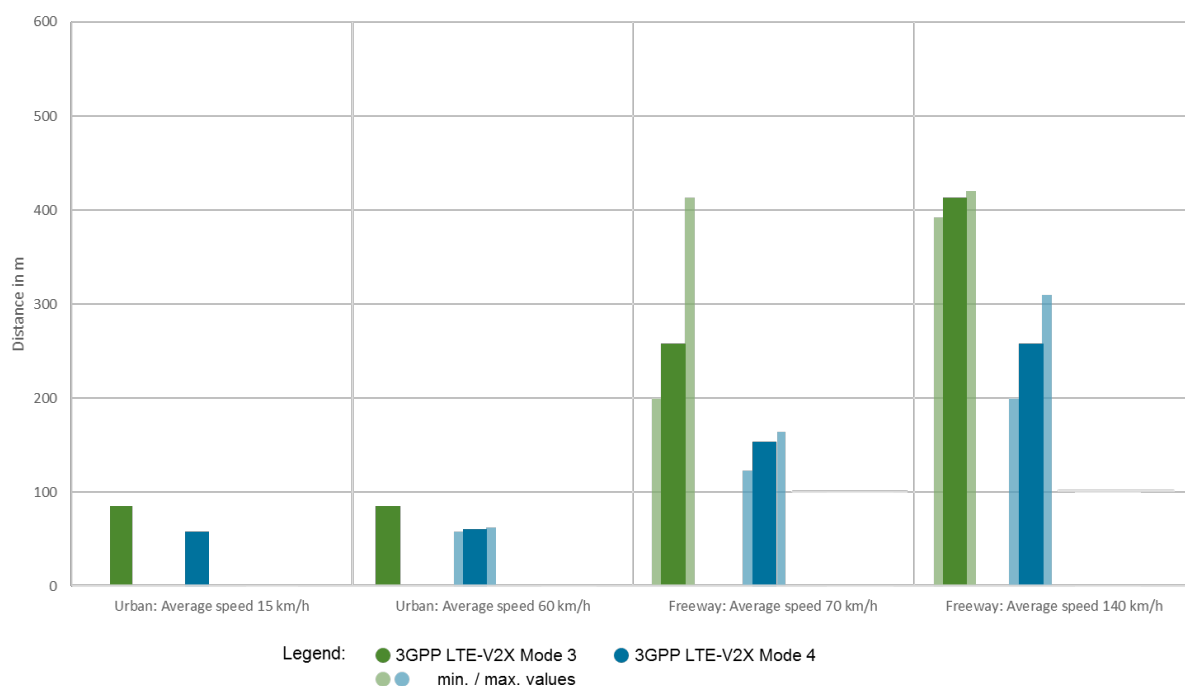


Figure 21 Comparaison des résultats SLS - PRR 95% - mode 4 par rapport au mode 3, scénarios de conduite dans un milieu urbain (15 km / h et 60 km / h) et autoroute (70 km / h et 140 km / h)

- Ratio de livraison de paquets (PDR)

Cette section présente une analyse des performances du mode 4 dans les scénarios autoroute rapide (60 véhicules/ km à 140 km / h) et autoroute lente (120 véhicules / km à 70 km / h) [B16]. Les véhicules transmettent des paquets de 190 octets, sauf un paquet sur cinq qui est

d'une taille de 300 octets [B29]. Les paquets sont transmis périodiquement toutes les 100, 50 ou 20 ms (10, 20 ou 50 paquets par seconde respectivement). Nous supposons qu'un canal de 10 MHz à 5,9 GHz est entièrement dédié au mode 4 utilisant les canaux PSCCH + PSSCH. Quatre sous-canaux de 12 RBs sont définis. Les paquets de 300 octets occupent deux sous-canaux et les paquets 190 octets un seul canal. Les erreurs de transmission radio sont modélisées à l'aide de tables de correspondance de [B29] qui à chaque rapport signal sur interférence plus bruit (SINR) associe un taux d'erreur sur les blocs (BLER). Nous supposons une synchronisation parfaite et tous les véhicules émettent à 23 dBm. La valeur du bruit est fixée à 9 dB et le seuil RSRP (*reference signal received power*) du mécanisme SPS est initialement fixé à -110 dBm.

Des simulations sont effectuées pour obtenir le taux de livraison PDR pour différentes valeurs de distances allant de 0 m à 500 m entre l'émetteur et le récepteur. Les simulations montrent que, lorsque le véhicule émet à 10 paquets par seconde le PDR diminue proportionnellement à la distance jusqu'à une distance de 200 m. A partir de 200m le taux de livraison des données diminue de manière significative. Lorsque la charge est augmentée à 50 paquets par seconde, on note une chute rapide à partir de 50 m.

- Latence

La latence peut être maintenue à l'aide de PDB (*Packet Delay Budget*), qui correspond à la fenêtre de temps pendant laquelle les ressources sont affectées aux paquets à l'aide de SPS (*Semi-Persistent Scheduling*). La latence moyenne et maximale reste la même, même si la charge du système augmente.

Nous présentons ci-après les résultats des tests de latence pour différentes conditions du canal. Les paramètres de simulation et de configuration des tests sont donnés en Annexe B.

Résultats de tests avec atténuation en espace libre

Un test de laboratoire contrôlé a été mis en place pour analyser la fiabilité de la communication à différents niveaux de latence [B30]. Ce test émule des scénarios de terrain dans lesquels la puissance du signal reçu diminue soit à cause de la distance entre l'émetteur et le récepteur, ou soit à cause d'obstacles entre les deux. Ce test n'induit pas davantage d'interférences dans le canal.

Les résultats de la latence moyenne de LTE-V2X est quasi-stable pour une atténuation du canal comprise entre 69 dB et 119 dB. Cependant, lorsque l'atténuation est supérieure à 125 dB, le temps de latence augmente en fonction de l'atténuation.

Résultats de tests avec atténuation avec bruit additif blanc gaussien (AWGN)

D'autres tests complètent les résultats précédents dans lesquels l'affaiblissement de propagation est modélisé avec un bruit additif blanc gaussien. On note une latence moyenne supérieure à 10 ms et une performance égale en utilisant ou non une transmission de type HARQ pour un bruit compris entre -127 dBm et -120 dBm.

- Passage à l'échelle

En se basant sur les résultats de la section « Couverture de communication » plus haut, il a été montré que le LTE-V2X PC5 modes 4 et mode 3 peuvent garantir une distance de communication significative pour un besoin en fiabilité donné, aussi bien dans les scénarios urbains que dans les scénarios autoroutiers (en particulier dans le scénario urbain de vitesse absolue 15 km / h). 3GPP LTE-V2X s'adapte bien au nombre de véhicules. Dans une zone donnée, un nombre plus élevé de liaisons de communication entre véhicules peut être pris en charge avec une fiabilité acceptable.

Il est à noter que des simulations dans des conditions idéales ont montré que les performances du LTE-V2X PC5 mode 3 sont légèrement meilleures que celles du LTE-V2X PC5 mode 4.

- Résultats des tests sur le terrain avec le chipset Qualcomm

Des validations d'essais sur le terrain sont actuellement en cours avec le chipset Qualcomm 9150 C-V2X aux États-Unis, en Europe et en Asie [B31]. Dans cette section, nous présentons les résultats obtenus lors de ces tests sur le terrain.

Test LOS /fiabilité à Miramar, San Diego.

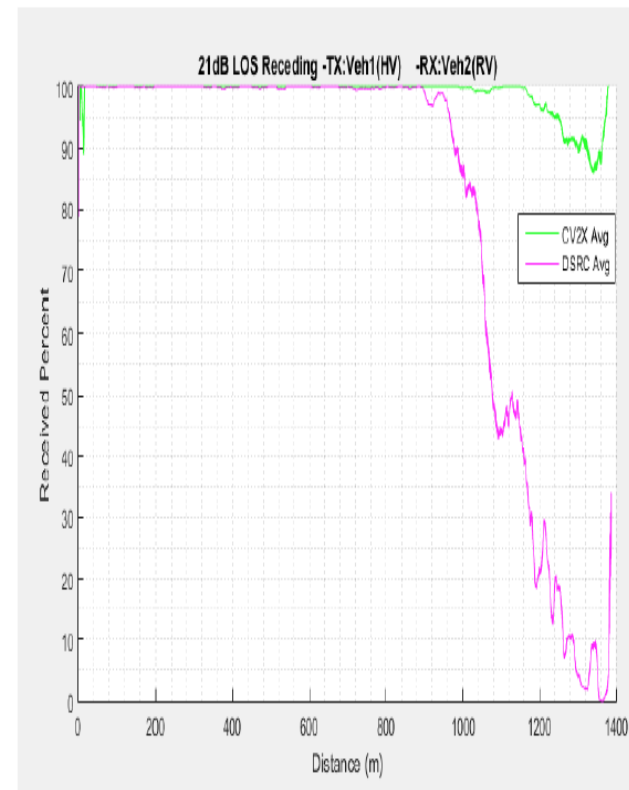


Figure 22 Test Visibilité directe (LOS)/ fiabilité à Fowlerville, Michigan

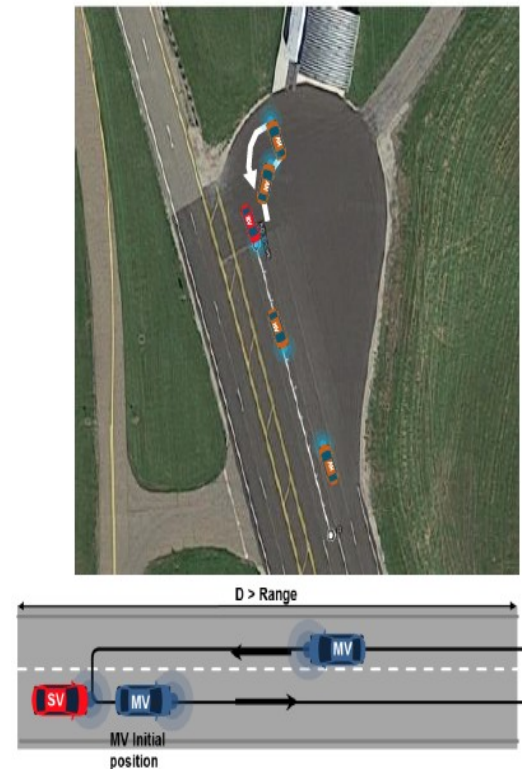


Figure 23 Test LOS scenario à Fowlerville Michigan

Test NLOS / fiabilité à Miramar, San Diego.

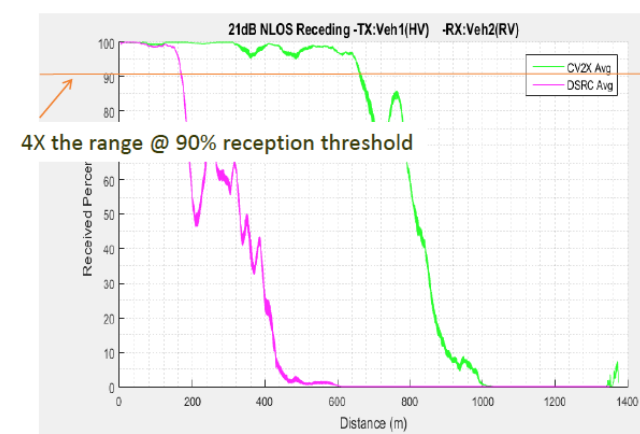


Figure 24 Test NLOS / fiabilité à Fowlerville Michigan

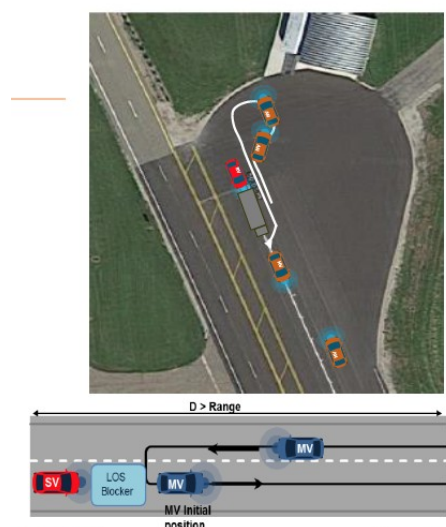


Figure 25 Scenario NLOS à Fowlerville Michigan

Test Couverture/ Fiabilité à Miramar, San Diego.

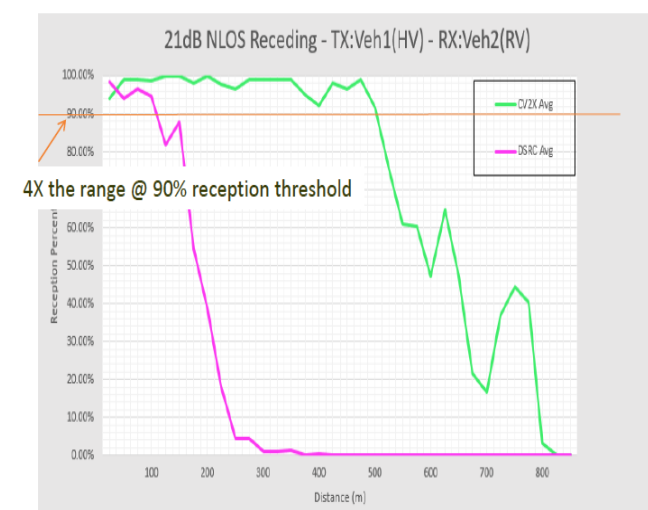


Figure 26 Test NLOS couverture / fiabilité à Miramar, San Diego

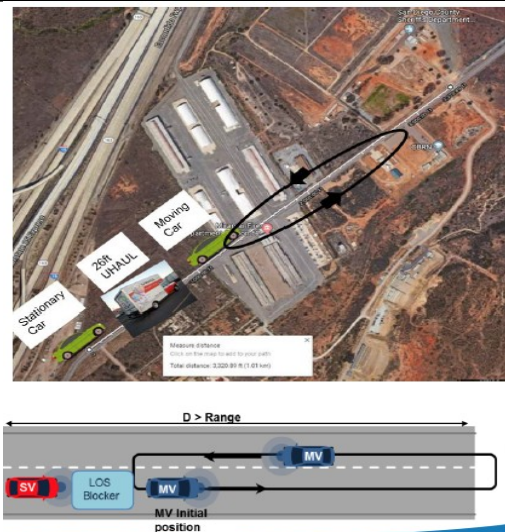


Figure 27 Scenario NLOS à Miramar, San Diego

Test sur autoroute de Pékin :

- Véhicules conduits à 80 km / h, 100 km / h et 120 km / h
- Les deux voitures se séparent lentement jusqu'à ce qu'aucun paquet ne soit reçu, puis se rapprochent trois fois
- Distance maintenue à 200m, 400m, 600m etc. pendant 5 min



Figure 28 Scénario d'essais routiers près de Pékin.

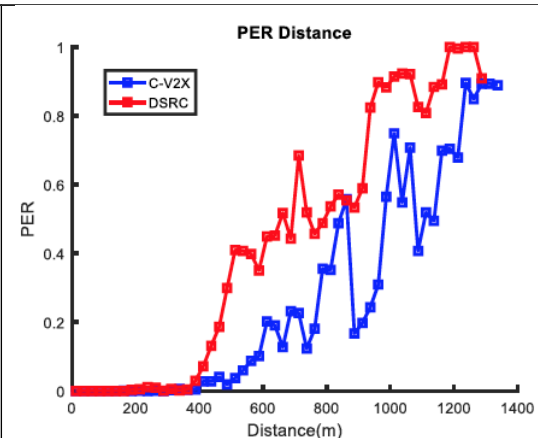


Figure 29 Taux d'erreur de paquets (PER)

- Evaluation de performance de LTE-V2X Mode 4

Cette sous-section présente une analyse complète des performances du mode 4 de LTE-V2X. Les paramètres de simulation sont identiques à ceux de la section « Latence » ci-dessus.

Impact des transmissions redondantes

L'étude sur le PDR ci-dessus montre que, tout comme le 802.11p, les performances du LTE-V2X sont considérablement dégradées lorsque les véhicules transmettent plus de paquets par

seconde et que la charge augmente. De nombreuses applications de conduite autonome nécessitent que les véhicules transmettent un nombre élevé de paquets par seconde. Dans ce cas, il est important d'analyser l'efficacité de certains des mécanismes de contrôle de congestion. La Figure 30 montre l'effet de la transmission de chaque paquet SCI + TB une fois (pas de redondance) ou deux fois. La Figure 30 montre que les transmissions redondantes améliorent le PDR en cas de faibles charges (10 paquets par seconde). Cependant, les transmissions redondantes augmentent la charge, et donc les collisions de paquets, comme illustré par la Figure 31.

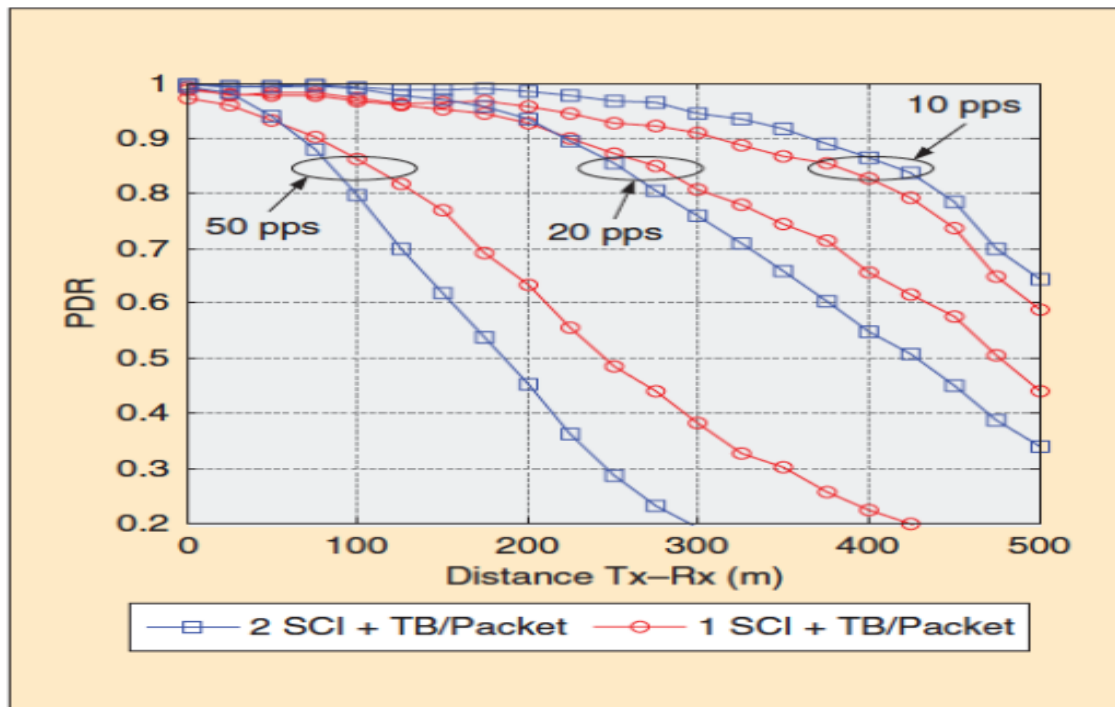


Figure 30 L'impact du nombre de transmissions par paquet dans le scénario Highway Fast

Scenario	pps	Redundant Transmission	Occupied Subchannels (%)	Subchannels with Packet Collisions (%)
Highway Fast	10	No	17.08	0.78
		Yes	31.72	3.21
	20	No	32.22	2.76
		Yes	55.03	14.37
	50	No	62.08	23.33
		Yes	80.39	56.83
Highway Slow	10	No	32.46	3.38
		Yes	55.23	14.13
	20	No	55.05	14.53
		Yes	76.09	44.47
	50	No	80.91	56.64
		Yes	91.35	79.05

Figure 31 L'impact des transmissions redondantes et du nombre de paquets transmis par seconde sur les collisions des paquets

Impact du MCS

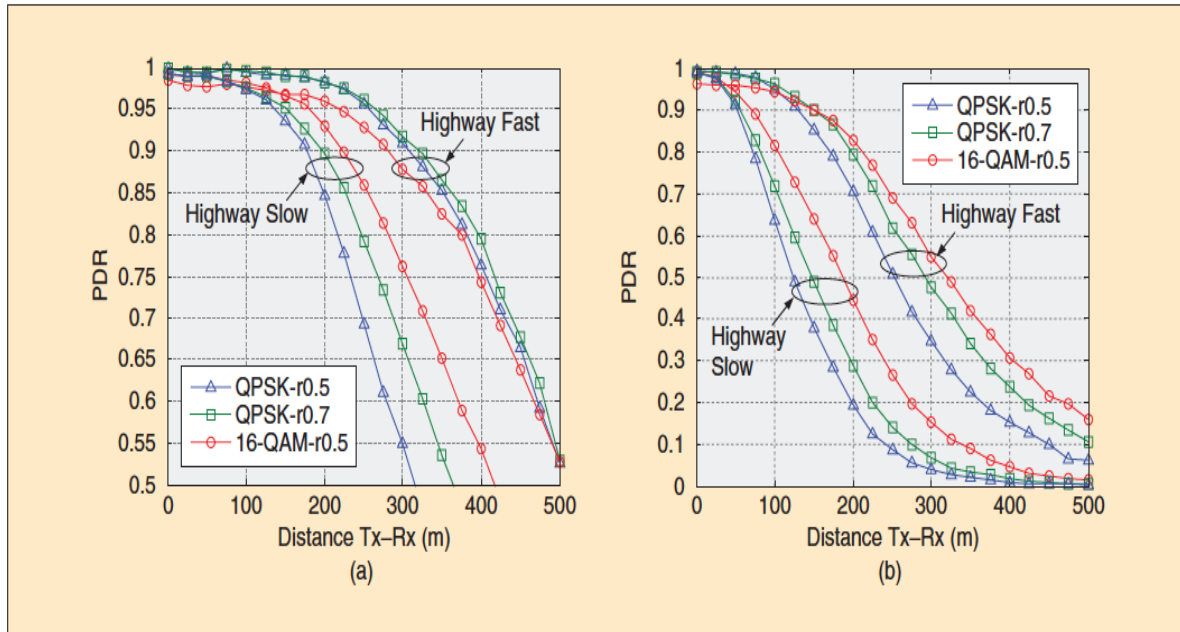


Figure 32 Effet du MCS (a) 20 pps et (b) 50 pps.

La Figure 32 analyse le débit de données en considérant que tous les paquets ont une taille de 190 octets et que chaque paquet est transmis deux fois. Cette figure illustre le PDR pour QPSK et un taux de de codage de 0,5 (QPSK-r0,5), QPSK et un taux de codage de 0,7 (QPSK-r0,7), et 16-QAM et un taux de codage de 0,5 (16-QAM -r0,5). Chaque paquet occupe 16, 12 et 8 RBs avec QPSK-r0.5, QPSK-r0.7 et 16-QAM-r0.5, et chaque trame comprend trois, quatre et six sous-canaux, respectivement. L'augmentation du débit de données diminue la protection contre les erreurs, mais également le nombre de collisions (Figure 33).

Scenario	pps	MCS	Occupied Subchannels (%)	Subchannels with Packet Collisions (%)
Highway Fast	20	QPSK-r0.5	66.43	12.53
		QPSK-r0.7	51.93	7.12
		16-QAM-r0.5	36.88	2.54
	50	QPSK-r0.5	97.19	71.85
		QPSK-r0.7	90.41	49.23
		16-QAM-r0.5	78.57	20.56
Highway Slow	20	QPSK-r0.5	91.82	51.82
		QPSK-r0.7	82.28	29.82
		16-QAM-r0.5	64.49	12.59
	50	QPSK-r0.5	99.82	97.05
		QPSK-r0.7	99.13	90.22
		16-QAM-r0.5	95.49	67.26

Figure 33 Impact du MCS sur l'occupation du canal et les collisions des paquets.

- Performance du peloton

Dans cette section, nous présentons les performances des communications entre le chef de peloton et ses membres (PL à PM) dans des applications de déploiement en peloton avec la technologie LTE-V2X [B7][B11][B12][B32]. Dans [B32] la portée de réception des communications PL2PM V2V est évaluée avec différents paramètres du MCS. Pour ce faire, ils envisagent un scénario avec un seul peloton. La Figure 34 indique la probabilité de réception réussie du CAM PL-à-PM en fonction de la distance du PL pour différents valeurs d'indice de qualité de canal CQI. Les métriques diminuent avec la distance, en raison de la faiblesse du signal reçu. De plus, des probabilités plus faibles sont observées pour des paramètres d'indice de qualité de canal (CQI) plus élevés, qui sont moins robustes. En particulier, à 200 m du PL, ce qui pourrait ressembler à la position d'un PM à la queue du peloton (par exemple, dans le cas d'un peloton de 20 véhicules et d'un espace intra-peloton égal à 10 m), la probabilité de réception est de l'ordre de 0,9, pour des valeurs CQI égales ou inférieures à 7. À une distance de 100 m, pour un CQI égal à 3, 5, 7, les métriques sont très proches de 1, assurant ainsi une très grande fiabilité de la réception de CAM à partir du PL. Le peloton avec des véhicules espacés de 10 m, ce qui correspond au réglage habituel du peloton, peut être situé à 100 m du PL. Notez que pour un CQI = 3, la fiabilité est inférieure à celle de CQI = 5-7. Cela peut être dû au fait que, pour recevoir avec succès une transmission, le récepteur doit décoder correctement tous les RBs utilisés pour cette transmission (c'est-à-dire que la probabilité d'erreur est également proportionnelle au nombre de RBs utilisés). Comme un message CAM envoyé avec un CQI = 3 occupe beaucoup plus de RBs qu'avec un CQI = 5-7 (comme le montre la Figure 34), la probabilité d'une réception erronée est plus grande.

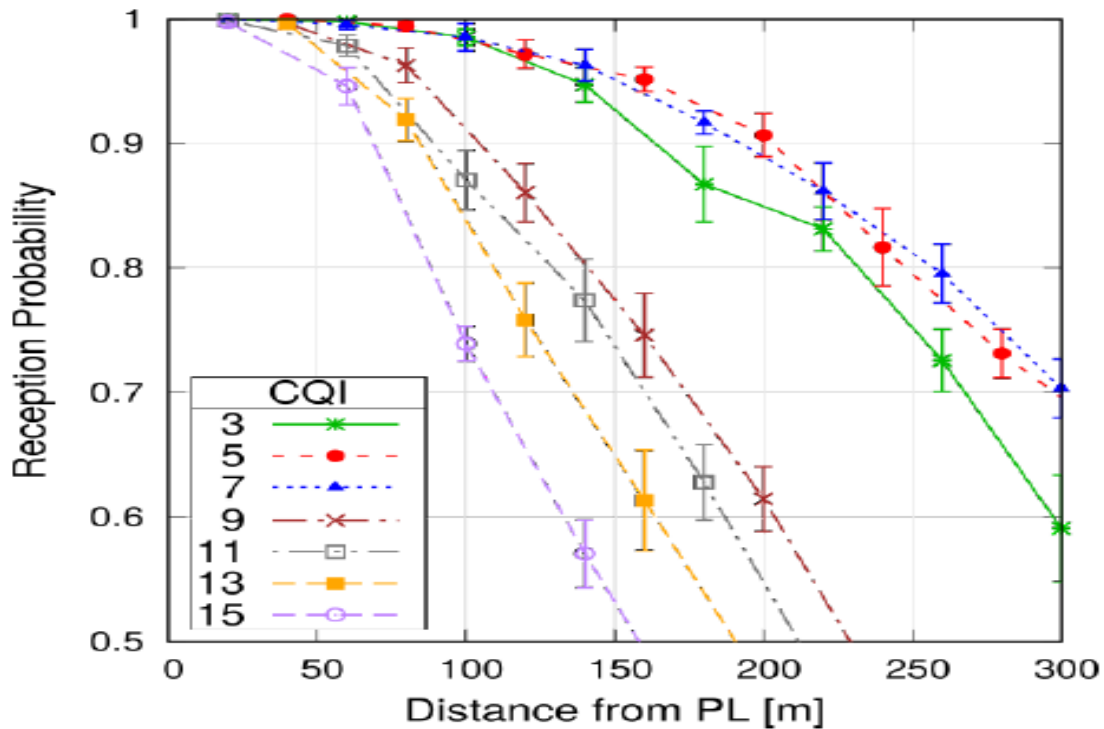


Figure 34 Probabilité de réception réussie du CAM PL-à-PM, en fonction de la distance du PL

3.2.3 5G

Les travaux de recherche sur la 5G donnent des résultats significatifs sur l'évaluation des performances de ces réseaux. Quelques scénarii de communication sont utilisés pour mesurer les performances de ces réseaux en particulier les communications ultra fiables à faible latence (*ultra-reliable and low-latency communications* URLLC), les larges bandes étendues aux mobiles (*enhanced Mobile BroadBand* eMBB), et les communications massives pour machine (*massive Machine Type Communication* mMTC). Les expérimentations indiquent qu'une latence (moyenne) de 0.5-1.0 ms est obtenue sur des tests de communications en 5G.

Iwabuchi et al [C7] a conduit une expérimentation pour mesurer l'impact de la 5G notamment sur les performances des communications URLLC sur les véhicules à Yokohama, au Japon. Ils ont observé une performance de transmission de paquets avec taux de réussite de 100% pour différentes tailles de paquet (32, 50, 100, et 200 octets). La latence des liens du plan utilisateur (montants et descendants) varie de 0.5 ms à 1.2 ms pour tous les points de mesure et pour toutes les tailles de paquet excepté pour les paquets supérieurs à 200 octets dont la mesure est de 2.9 ms.

Dans une autre étude d'Iwabuchi et al [C6], les auteurs proposent un prototype d'un environnement de test pour différentes tailles de paquets pour évaluer les performances du mécanisme URLLC. L'environnement a été déployé à Yokohama (Japon). La latence moyenne obtenue sur les essais est d'environ 0.6 ms. Le tableau suivant analyse 4 indicateurs de performances pour différentes tailles de paquets (fiabilité, probabilité de transmission avec succès, latence maximale et moyenne de transmission de paquet du plan utilisateur) avec une vitesse de 25 km/h.

Taille paquet	Fiabilité	Prob. de succès	Latence plan utilisateur max. (Maximum)	Latence plan utilisateur moy. (Moyenne)
100-octets	100%	100%	908 μ s	646 μ s
200-octets	99.989%	99.990%	2874 μ s	641 μ s

Tableau 10 Performances pour différentes tailles de paquets

Maaz et al [C8] ont évalué les performances des réseaux 5G en présentant des analyses de niveau système de l'URLLC pour différents espaces entre sous porteuses adoptées dans la 5G NR. Les résultats de simulation montrent qu'il faut moins de 0.5 ms de latence pour un plus grand espacement entre sous-porteuses tandis que la latence la plus élevée est obtenue pour de faibles espacements entre sous-porteuses. Le tableau suivant présente les latences observées sur la 5G NR pour différentes tailles de paquets et différents espacements inter-sous-porteuses pour une disponibilité de service de 95%.

Δf (kHz)	10 paquets/sec	100 paquets/sec	1000 paquets/sec
30	1.7 ms	1.9 ms	2.22 ms
60	0.75 ms	0.85 ms	1.05 ms
120	0.3 ms	0.34 ms	0.44 ms

Tableau 11 Latences pour différentes tailles de paquets et différents espacements inter-sous-porteuses

Hytonen et al [C9] a évalué les performances de URLLC en termes de fiabilité et de latence par des études de simulation. Le taux de paquets envoyés avec une latence inférieure à 1ms

est aussi élevé pour une grande densité (2000 UEs) que pour une faible densité (200 UEs) et vaut respectivement 0.9978 et 0.998.

Yoshioka et al [C10] a travaillé sur un POC pour un réseau 5G mmW avec une vitesse de mouvement allant jusqu'à 20 km/h dans la région de Yokosuka au Japon. Ils ont obtenu des latences inférieures à 3ms (pour un temps d'aller/retour) pour 70-80% des essais.

Beyranvand et al [C11] ont développé un modèle analytique pour illustrer les performances des réseaux 5G et ont comparé les résultats avec ceux donnés par la simulation. Les deux résultats montrent que la technique proposée réduit le temps moyen bout-en-bout à 1 ms pour des trafics de charges réseaux très élevés.

Pocovi et al [C12] ont présenté des analyses des performances des modes URLLC et eMBB à l'aide de simulations. La solution proposée réduit la latence URLLC de 1.3 à 1ms dans 99.999% des cas, avec moins de 10% de dégradation des performances sur la bande passante du eMBB comparé aux politiques habituelles.

Jacobsen et al [C13] ont simulé un grand macro-réseau urbain pour mesurer les apports d'un système réel URLLC. La latence la plus basse obtenue est de 1 ms pour une charge réseau à 40 UEs et entre 0.5 and 1 ms pour une charge réseau de 10 UEs avec une fiabilité de $1 - 10^{-5}$.

Mountaser et al [C14] ont implanté aussi bien eMBB que URLLC dans des réseaux 5G en comparant un partage orthogonal et non-orthogonal des ressources des frontaux. Selon ces résultats, si le facteur k de découpage des trames est inférieur ou égal à 5 pour eMBB et URLLC en utilisant une transmission partagée des frontaux, alors la latence moyenne n'excède pas 0.01 ms.

3.3 Enjeux de cybersécurité

3.3.1 Exigences de sécurité pour les applications V2X

Les caractéristiques des applications V2X impose des exigences de sécurité spécifiques. Le document ETSI [32] et 3GPP [4] spécifient les exigences de sécurité de plusieurs groupes d'application. Dans ce qui suit, on liste ces exigences :

- **Authentification et autorisation** : L'authentification et l'autorisation des émetteurs doit être assurée pour permettre seulement aux entités de confiance de participer au système de communication V2X. Cette authentification et autorisation peut être révoquée pour exclure les entités malveillantes du système C-ITS.
- **Intégrité des données** : Les mécanismes de sécurité doivent garantir que les données envoyées ne sont pas manipulées par des entités malveillantes
- **Confidentialité** : La confidentialité peut être requise par quelques applications V2X. Le contenu des messages envoyés doit être confidentiel
- **Protection de la vie privée** : les mécanismes de protection de vie privée doivent être mis en place pour éviter de pister les véhicules ou de faire le lien entre leurs identités temporaires par des entités malveillantes internes ou externes au système de communication C-ITS.

3.3.2 Mécanismes de sécurité et de protection de vie privée dans les communications ITS-G5

La sécurité dans les communications ITS-G5 est basée sur la cryptographie asymétrique. Chaque station ITS détient une paire de clé asymétrique où la clé publique fait partie d'un certificat numérique. Ces certificats sont délivrés et signés par une infrastructure à clés publiques appelée communément PKI (Public key Infrastructure).

Pour sécuriser un message V2X (i.e., un message CAM ou un message DENM), l'émetteur signe ce message avec sa clé privée et le transmet ensuite en y intégrant son certificat. Pour authentifier l'émetteur et vérifier l'intégrité du message, le receveur vérifie la signature du message avec le certificat envoyé par l'émetteur.

La protection de la vie privée est un concept très important dans les communications véhiculaires. Ces réseaux sont exposés à des menaces de pistage (le terme utilisé communément est le terme anglais « tracking ») par des entités malveillantes. Le pistage des véhicules utilise les informations contenues dans les messages diffusés dans le réseau telles que l'identité, la localisation et les différentes données de mobilité. Une entité malveillante peut exploiter ces données pour lier les identités des véhicules avec leurs localisations géographiques. Pour pallier à ce problème, l'utilisation des pseudonymes semble une approche largement acceptée. Les véhicules utilisent des identités pseudonymes qu'ils changent régulièrement tout au long de leur trajet. Plus concrètement, les véhicules utilisent des certificats temporaires qu'ils changent régulièrement. Avec le changement du certificat, le véhicule est amené aussi à changer ses identifiants tels que son adresse MAC, son identifiant GeoNet et son identifiant de station ITS. En faisant ainsi, faire le lien entre les identifiants d'une station ITS devient difficile pour les entités malveillantes.

3.3.3 L'infrastructure à clé publiques (PKI)

La figure présente l'architecture de la PKI ETSI [32].

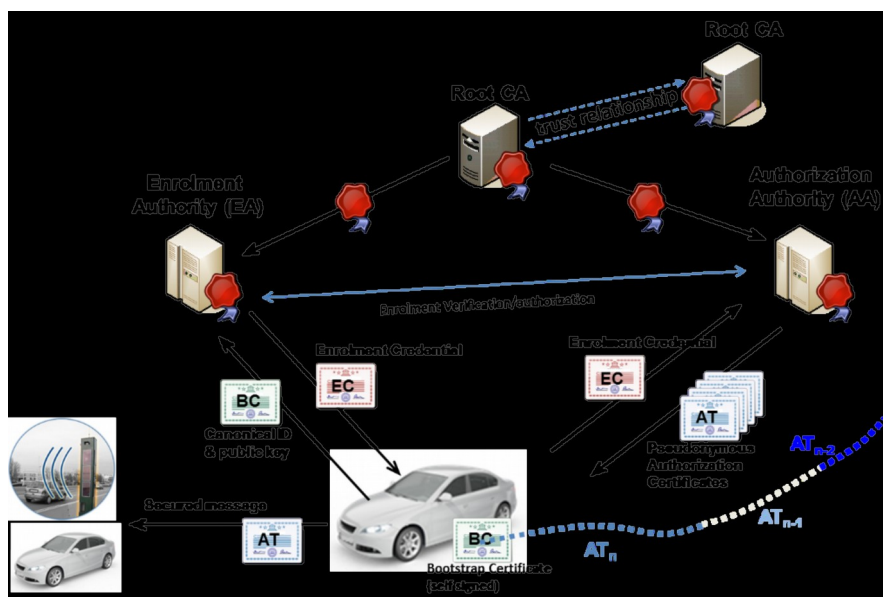


Figure 35 Architecture de PKI ITS de l'ETSI

La PKI est composée de trois éléments essentiels :

- **L'autorité racine de certificats (Root CA en anglais) :** C'est la racine de confiance. Elle fournit des certificats respectivement aux autorités d'enregistrement (EA) et d'autorisation (AA). Ceci leur permettra de fournir aux stations ITS des certificats d'enregistrement (Enrollment Certificate en anglais) et des certificats d'autorisation (Authorization Ticket en anglais)
- **L'autorité d'enregistrement (Enrollment authority en anglais)** fournit des certificats long terme (Enrollment certificates EC). Ces certificats sont utilisés par les stations ITS pour demander des certificats d'autorisation à l'autorité d'autorisation.
- **L'autorité d'autorisation (Authorization authority en anglais)** fournit des certificats court terme aux stations ITS. Ils sont utilisés par les stations ITS pour signer les messages et sont changés régulièrement pour protéger la vie privée des stations ITS.

3.3.4 Mécanismes de sécurité et de protection de vie privée dans les communications LTE-V2X

- Sécurité sur l'interface LTE PC5

Le document 3GPP TS 133 185 [4] spécifie les exigences de sécurité sur les différentes interfaces de l'architecture LTE-V2X. Les mêmes exigences de sécurité des applications V2X sont appliquées dans les communications utilisant le LTE PC5. Selon [4], Le 3GPP délègue la spécification des mécanismes de sécurité à d'autres organismes tels que l'ETSI et l'IEEE/SAE. Par conséquent, l'échange des messages V2X sur le LTE PC5 n'intègre pas la sécurité des couches de communication 3GPP.

Concernant la protection de la vie privée, l'identité des UEs ne doit pas être pistée. Les UEs doivent changer régulièrement leur identité. Le changement des identités doit être synchronisé entre les différentes couches utilisées dans les communications LTE-V2X.

Il convient cependant de noter que le mécanisme de changement de pseudonymes en LTE-V2X reste à spécifier et à tester en vraie grandeur. Des travaux sont en cours à l'ETSI pour amender la norme EN 302 636-4-1 pour le LTE-V2X.

- Sécurité sur l'interface LTE-Uu

Selon la spécification dans [4], la sécurité dans les communications basées sur le LTE-Uu réutilisent les mêmes mécanismes de sécurité existants dans le LTE. Les messages V2X unicast envoyés par les équipements mobiles au E-UTRAN utilisent les mécanismes du LTE classiques. Cependant, l'utilisation du eMBMS pour l'envoi des messages broadcast à un nombre arbitraire de stations dans une zone géographique spécifique n'est pas trivial. Ceci car la sécurité radio dans le LTE est basée sur des clés symétriques partagées. Ceci suppose que les véhicules qui sont localisés dans une zone géographique spécifique sont déjà approvisionnés avec des clés partagées.

Concernant la protection de la vie privée, la spécification [4] ne prévoit pas d'améliorer les mécanismes LTE existants pour les communications V2X sur le LTE-Uu.

Cependant, pour la connexion via cellulaire (LTE 3G/4G actuel ou futur 5G), les connexions unicast doivent être sécurisés en End2End : la sécurité LTE ou 5G ne couvre pas la communication via internet jusqu'aux serveurs/Cloud. Il existe un draft (CD) ISO 21177 est non finalisé qui spécifie les mécanismes de sessions sécurisés pour les ITS. Sur la protection de la vie privée par le changement des pseudonymes, il y a un risque de casser la protection des changements de pseudonymes sur la communication ITS-G5 ou PC5 en retrouvant des messages

signés transmis également sur l'infra cellulaire LTE (via interface Uu) : on utilise un certificat unique pour les CAMs et DENMs et les identifiants 'pseudonymes' sont des hash de ce certificat commun. Cette problématique est commune à l'hybridation ITS-G5/cellulaire, LTE-V2X/Uu et à la 5G.

4 Disponibilité des technologies

Le présent chapitre vise à rendre compte de la disponibilité des technologies de façon factuelle, à travers les projets qui les utilisent, les éventuels mandats et annonces industrielles les concernant.

4.1 ITS-G5

Projets

Projets de pré-déploiement et déploiement	
Connected Vehicles Safety Pilot Program [A19]	<p><u>Pays</u> : Etats-Unis <u>Durée</u> : 2012-2013 <u>Objectifs</u> : 1) Démontrer les technologies de véhicules connectés dans un environnement réel et multimodal 2) Déterminer l'acceptation par le conducteur et l'adoption de systèmes de sécurité 3) Évaluer la faisabilité, l'évolutivité, la sécurité et l'interopérabilité de la technologie DSRC/IEEE 802.11p, 4) Évaluer les options pour accélérer les avantages en matière de sécurité. <u>Cas d'usages</u> : Avertissement d'angle mort, Avertissement de dépassement, Avertissement de freinage urgence, Avertissement de collision frontale, Assistance au franchissement d'intersection, avertissement de changement de voie, avertissement de feu rouge, avertissement de vitesse en virage, avertissement de collision avec un piéton <u>Nombre d'ITS-Ss équipés avec l'ITS-G5</u> : 3000 voitures, camions, et bus, 30 UBRs.</p>
Connected Vehicles Pilot Deployment Program [A20]	<p><u>Pays</u> : Etats-Unis <u>Durée</u> : 2015-2020 <u>Objectif</u> : 1) Connexion sans fil de véhicules, mais également via d'autres éléments tels que les appareils mobiles, l'infrastructure et le TMC (traffic monitoring center), 2) Mesure des impacts et des bénéfices observés lors de déploiements dans le monde réel <u>Nombre de ITS-Ss équipés avec l'ITS-G5</u>: 1) ICF/Wyoming Pilot : 75 UBRs, 400 véhicules dont 150 poids lourds, 2) New Your City pilot : 8000 véhicules et 350 UBRs 3) Tampa pilot : 2000 véhicules et 40 UBRs <u>Cas d'usages</u> : avertissement de collision frontale, Avertissement de freinage urgence, avertissement de changement de voie, avertissement d'angle mort, assistance au mouvement dans intersection, véhicule tournant à droite devant autobus, adaptation de vitesse (zone de travaux, vitesse de courbe), avertissement de violation du feu rouge, etc.</p>
SCORE@F [A21]	<p><u>Pays/Partenaires</u> : France (20 partenaires) <u>Durée</u> : 2010-2013 <u>Objectif</u> : Tester treize cas d'usages sur trois sites (région des</p>

	<p>Yvelines, région d'Orléans et région de l'Isère), afin de préparer un FOT à grande échelle avant son déploiement.</p> <p><u>Pilot sites</u> : 28 véhicules, 18 UBRs.</p> <p><u>Cas d'usages</u> : Avertissement de travaux routiers, avertissement de panne de voiture, avertissement d'accident, avertissement de conditions météorologiques (route glissante, forte pluie, brouillard), feux de freinage urgence, véhicule en approche, avertissement d'obstacle, notification d'obstacle, alerte de tiers sur le parcours, avertissement de présence de piéton/ animal / autre, limitation de vitesse, notification dans le véhicule, notification de point d'intérêt et covoiturage dynamique.</p>
Drive C2X [A22]	<p><u>Pays/Partenaires</u> : Finlande, France, Allemagne, Italie, Pays-Bas, Espagne et Suède (32 partenaires)</p> <p><u>Durée</u> : 2011-2014</p> <p><u>Objectif</u> : 1) Créer un environnement de test harmonisé à l'échelle européenne pour les systèmes coopératifs, 2) évaluer les systèmes coopératifs et 4) promouvoir la conduite en coopération.</p> <p><u>Nombre d'ITS-Ss équipés avec l'ITS-G5</u>: 200 véhicules (750 conducteurs), 1,5 million de km de route.</p>
ITS Corridor [A23]	<p><u>Pays</u>: Allemagne, Pays-Bas et Autriche</p> <p><u>Durée</u> : 2016-2019</p> <p><u>Objectif</u> : Déploiement d'infrastructure STI coopérative en bord de route pour les services initiaux dans le couloir coopératif ITS Rotterdam – Francfort / M. – Vienne.</p> <p><u>Cas d'usages</u> : C-ITS Services Day-1</p> <p><u>Technologies</u> : ITS-G5 et LTE</p>
InterCor [A24]	<p><u>Pays/Partenaires</u> : Allemagne, Pays-Bas, Autriche, France, Royaume-Uni et Belgique (16 partenaires)</p> <p><u>Durée</u> : 2016-2019</p> <p><u>Objectif</u> : Permettre aux véhicules et à l'infrastructure routière de communiquer des données via l'ITS-G5 ou cellulaires, sur des corridors routiers traversant les Pays-Bas, la Belgique, le Royaume-Uni et la France.</p> <p><u>Cas d'usages</u> : C-ITS Services Day-1</p> <p><u>Technologies</u> : ITS-G5 et LTE</p>
SCOOP [A25]	<p><u>Pays/Partenaires</u> : France (18 partenaires)</p> <p><u>Durée</u> : 2014-2018</p> <p><u>Objectif</u> : Equiper 5 sites pilotes: Ile de France, autoroute Paris-Strasbourg, Isère, périphérique de Bordeaux, Bretagne, tester et évaluer 5 groupes de services prioritaires</p> <p><u>Cas d'usages</u> : 5 groupes de services prioritaires</p> <p><u>Déploiement</u> : 3000 véhicules sur 2000 km de route.</p>
C-ROADS [A26]	<p><u>États membres principaux</u>: Autriche, Belgique / Flandres, Belgique / Vallonia, République tchèque, Danemark, Finlande, France, Allemagne, Hongrie, Italie, Pays-Bas, Royaume-Uni, Portugal, Slovaquie, Espagne, Suède, Royaume-Uni</p> <p><u>Durée</u> : 2016-2020</p> <p><u>Objectif</u> : Déploiement de services C-ITS harmonisés et interopérables en Europe</p> <p><u>Cas d'usages</u> : C-ITS Services Day-1</p> <p><u>Technologies</u> : ITS-G5 and LTE</p>

Projets pour applications avancées	
SARTRE [A27]	<u>Pays/Consortium</u> : Royaume-Uni, Espagne, Allemagne et Suède (7 partenaires) <u>Durée</u> : 2009-2012 <u>Objectif</u> : Atténuer l'impact sur l'environnement et les embouteillages, et améliorer l'efficacité et le confort du conducteur en matière de transport personnel en utilisant des pelotons. <u>Cas d'usages</u> : Conduite en peloton_ <u>Technologies</u> : ITS-G5
IMAGinE [A28]	<u>Pays/Consortium</u> : Allemagne (12 partenaires) <u>Durée</u> : 2016-2018 <u>Objectif</u> : Développement de systèmes innovants d'assistance à la conduite, de perception collective et de protocoles de communication en temps réel, pour une conduite coopérative. <u>Cas d'usages</u> : Fusion coopérative sur les autoroutes, contrôle longitudinal coopératif sur les autoroutes, dépassement coopératif sur des routes de campagne, virage coopératif à des jonctions, dépassement coopératif par des poids lourds sur des autoroutes <u>Technologies</u> : ITS-G5
Project Sweden4Platooning [A29]	<u>Pays/Consortium</u> : Suède (6 partenaires) <u>Durée</u> : 2016-2019 <u>Objectif</u> : tester des pelotons avec des camions de Scania et de Volvo afin de réduire les émissions de carbone et d'améliorer l'efficacité du transport de marchandises. <u>Technologie</u> : ITS-G5
Auto C-ITS [A30]	<u>Pays/Consortium</u> : Espagne, France et Portugal (7 partenaires) <u>Durée</u> : 2016-2018 <u>Objectif</u> : Contribuer au déploiement de services coopératifs en Europe en améliorant l'interopérabilité de la conduite autonome et promouvoir le rôle des C-ITS en tant que catalyseur de la mise en œuvre de la conduite autonome. <u>Sites pilotes</u> : Madrid, Paris et Lisbon <u>Cas d'usages</u> : Services du Day 1 pour les véhicules autonomes <u>Technologies</u> : ITS-G5
PAC V2X [A31]	<u>Pays/Consortium</u> : France (8 partenaires) <u>Durée</u> : 2016-2019 <u>Objectif</u> : Etendre la perception du véhicule en intégrant des technologies de détection d'objets fixes et mobiles telles que les radars, les lidars, les caméras et des technologies de télécommunication locales. <u>Cas d'usages</u> : Alerte violation de signal, Alerte accès sur l'autoroute à contresens, assistance à l'insertion sur autoroute, alerte passage d'une zone de chantier, dépassement avec une visibilité faible, ordonnancement de trafic, assistance au passage d'une zone de péage <u>Technologie</u> : ITS-G5 et LTE

Mandats

Le 13 décembre 2016, à Washington DC, la NHTSA a annoncé la proposition d'instaurer des règles pour rendre obligatoire la communication V2V sur les véhicules légers, permettant ainsi aux voitures de se "parler" les unes aux autres dans le but d'éviter les accidents. L'annonce a ensuite été officialisée dans [A32], une action intitulée «Avis de proposition de réglementation (NPRM)» datée du 12 janvier 2017 au registre fédéral américain, dans laquelle la NHTSA propose l'établissement d'une nouvelle norme fédérale de sécurité des véhicules automobiles (FMVSS), rendre obligatoire les communications V2V pour les nouveaux véhicules légers et normaliser le message et le format des transmissions V2V. Cette action a permis aux États-Unis d'être les premiers au monde à imposer la communication V2V sur tous les nouveaux véhicules légers. Dans [A32], nous pouvons lire: *without a mandate to require and standardize V2V communications, the NHTSA agency believes that manufacturers will not be able to move forward in an efficient way and that a critical mass of equipped vehicles would take many years to develop, if ever. Implementation of the new standard will enable vehicle manufacturers to develop safety applications that employ V2V communications as an input, two of which are estimated to prevent hundreds of thousands of crashes and prevent over one thousand fatalities annually.*

Industrialisation

Audi et Autotalks	<p>Audi et Autotalks ont achevé l'intégration d'applications V2X sur une antenne de toit compacte</p> <p><u>Annonce originale, le 22 avril 2015 [A38]:</u> <i>Leading premium car brand, Audi AG, has completed development of integrated V2X roof antenna. The series-production ready smart antenna contains an entire V2X solution, including radio and modem, GNSS antenna and receiver, V2X protocol stack and security, vehicle connectivity and V2X application matching Car-to-Car Communication Consortium (C2C-CC) Day-1 profile.</i></p>
Volkswagen Group	<p>À partir de 2019, Volkswagen commencera à équiper ses premiers modèles avec la technologie pWLAN</p> <p><u>Annonce originale, le 28 juin 2017 [A34]:</u> <i>Connectivity between different vehicles as well as between vehicles and transport infrastructure in the vicinity is another important step towards connected motoring that aims to reduce road accidents or minimise their consequences. As from 2019, Volkswagen will therefore start fitting its first models with pWLAN (IEEE 802.11p) as standard in order to serve as an additional communication technology for the exchange selected information relevant to traffic between cars made by different manufacturers. This will involve information being exchanged both between vehicles (car-to-car), as well as between vehicles and the transport infrastructure (car-to-X)*. This will, for example, enable information about the current traffic situation, accidents and other situations relating to traffic conditions to be shared with the local environment, within a radius of approx. 500 m, even faster than has been possible in the past.</i></p>
Toyota	<p>Toyota et Lexus lanceront une technologie permettant de connecter des véhicules et des infrastructures aux États-Unis en 2021</p> <p><u>Annonce originale, le 16 avril 2018 [A35]:</u> <i>Will Provide Enhanced Safety Benefits to Drivers, Including Increased Road Safety and Efficiency, While Enabling Greater Advances in Connected- and Automated-Driving Systems.</i> <i>Plan Accelerates Adoption of Vehicle-to-Vehicle and Vehicle-to-Infrastructure Communications Capabilities</i> <i>Will Begin Deploying 5.9GHz Dedicated Short-Range Communications</i></p>

	<i>(DSRC); Encourages All Automakers to Adopt DSRC in the U.S.</i>
GM	<p>Cadillac va étendre son système « super croisière » sur toute sa gamme. <u>Annonce originale, le 6 juin 2018:</u> <i>V2X communication debuts in Cadillac crossover in 2023....[A36]</i> <i>Cadillac introduced vehicle-to-vehicle (V2V) communications on the CTS sedan in 2017, which uses Dedicated Short-Range Communications (DSRC) technology. Using the Basic Safety Message as a base, V2V can be extended to the roadway infrastructure and other roadway users (e.g., cyclists, pedestrians, etc.) establishing a V2X ecosystem. Using V2X, compatible vehicles can be notified of hazardous road conditions, traffic light statuses, changing work zones and more. With a range of nearly 1,000 feet, drivers can be alerted to possible threats in time to avoid a crash. [A36]</i> <i>Currently, only the Cadillac CTS is equipped with this technology, but Cadillac plans to gradually roll it out across its lineup.[A37]</i></p>

4.2 LTE-V2X

Projets

Projets (preuves de concept, <i>field operational tests</i>)	
ConVex	<p>Consortium: Qualcomm (chef de file), Audi, Ericsson, Swarco Traffic Systems, Université de Kaiserslautern. Durée du projet: 2016-12-01 au 2019-06-30 https://www.eit.uni-kl.de/wicon-tmp/convex/ Objectif: mettre en place un banc d'essai pour les premiers tests sur le terrain de la version Cellular V2X (C-V2X) 3GPP LTE version 14 pour valider les performances et la faisabilité. Cas d'utilisation: Forward collision warning, Do not pass warning, Blind intersection movement assistance, Queue and shock wave warning, blind curve hazard warning, cooperative adaptive cruise control and platooning, Vulnerable user alert, Green light optimal speed advisory, discover parking and charging, Follow me. Technologies: LTE-V2X</p>
Wuxi Internet of Vehicle (C-V2X)	<p>Projet de Huawei : https://www.huawei.com/en/industry-insights/outlook/mobile-broadband/lte/use-cases/wuxi-internet-of-vehicle-c-v2x-project Cas d'utilisation: https://www.huawei.com/en/industry-insights/outlook/mobile-broadband/lte/use-cases/wuxi-internet-of-vehiclec-project-use-cases</p>

	Technologies : LTE-V2X
D2D4V2X	<p>Pays/Consortium : FR, IT (Telecom ParisTech, L2S, UMRC), research project</p> <p>Durée: 2017-2018</p> <p>Objectif: étudier comment utiliser les communications hybrides et le clustering pour améliorer la dissémination des données dans les réseaux véhiculaires</p> <p>Cas d'usage: avertissement en cas d'embouteillage, conduite coopérative, prévention des collisions aux intersections</p> <p>Technologies : ITS-G5, LTE-V2X</p>
VEHICAST	<p>Pays/Consortium: France (Telecom ParisTech, L2S)</p> <p>Durée: 2018-2019</p> <p>Objectif: concevoir la stratégie d'allocation des données pré-extraites aux unités en bordure de route ou véhicules, de manière à fournir une couverture élevée pour les véhicules qui demandent des données en prenant en compte les exigences de privacy.</p> <p>Cas d'usage: service de divertissement</p> <p>Technologies: ITS-G5, Wi-Fi, LTE-V2X</p>
PROCORE2018	<p>Pays/Consortium: France/Hong Kong (HKUST, Telecom ParisTech, IMT-Lille Douai)</p> <p>Durée: 2018-2019</p> <p>Objectif: concevoir un mécanisme de gestion du cache des unités au bordure des routes afin de prendre en charge la demande de trafic en fonction de l'évolution dynamique de la bande passante et du débit de données entre les unités et les véhicules</p> <p>Etudier l'impact de la protection des données à caractère personnel.</p> <p>Utiliser le paradigme SDN/</p> <p>Cas d'usage: prévention des accidents, amélioration de l'efficacité du trafic, téléchargement audio / vidéo</p> <p>Technologies: ITS-G5, WiFi, LTE-V2X</p>
CONCORDA	<p>Consortium / Pays: Projet européen, Renault, PSA & Qualcomm</p> <p>https://connectedautomateddriving.eu/project/concorda/</p> <p>Objectif: combiner la connectivité 802.11p et LTE-V2X sans affecter les services existants en termes d'interférences et d'interopérabilité pour assurer l'interopérabilité des services C-ITS en amont avec les services harmonisés par C-ROAD dans des situations de trafic réelles.</p> <p>Cas d'utilisation: conduite connectée et automatisée et présence de camions à haute densité</p>

	Technologies: 802.11p et LTE-V2X
--	----------------------------------

Industrialisation

Qualcomm	Qualcomm Technologies, Inc. (QTI), une filiale de Qualcomm Incorporated (NASDAQ: QCOM), a présenté sa première solution commerciale annoncée C-V2X (Cellular Vehicle-to-Everything) basée sur les spécifications de la version 4 du projet de partenariat de troisième génération (3GPP) pour les communications directes basées sur PC5, le Qualcomm® 9150 C-V2X: https://www.qualcomm.com/news/releases/2017/09/01/qualcomm-announces-groundbreaking-cellular-v2x-solution-support-automotive
Huawei	La première unité bord de route : https://www.huawei.com/en/press-events/news/2018/6/Huawei-v2x-strategy-RSU-launch
Autotalks	CRATON2 chipset 2eme generation: https://www.autotalks.com/product/craton2/
Lacroix City	Disponibilité d'UBR C-V2X au premier trimestre 2019 : http://www.lacroix-city.com/en/france/actualites/detail/new-roadside-unit-products-for-connected-roads/

4.3 5G

Projets

Projets de recherche	
5G CroCo	<p>Objectif: Contrôle transfrontalier de cinquième génération visant à tester et valider les technologies 5G pour une mobilité coopérative, connectée et autonome (CCAM)</p> <p>https://www.worldsensing.com/innovation-project/5gcroco/</p> <p>Durée: 2018-11-01 à 2021-10-31</p> <p>Cas d'utilisation: contrôle transfrontalier</p> <p>Technologies: 5G V2X</p>

5G CARMEN	<p>Objectif: 5G pour une mobilité coopérative, connectée et automatisée: https://5g-ppp.eu/5g-carmen/</p> <p>Date de début du projet: 2018-11-01</p> <p>Technologies: 5G V2X</p>
5GCAR	<p>Objectif: développer une architecture globale 5G V2X: https://5gcar.eu/</p> <p>Durée du projet: 2017-06-01 au 2019-05-31</p> <p>Technologies: 5G V2X</p>
5G-DRIVE	<p>«Recherche et essais 5G harmonisés pour l'évolution des services entre l'UE et la Chine» - financé par le programme H2020 –</p> <p>Durée du projet: démarré en septembre 2018 et se termine en février 2021. - Partenaires: il est coordonné par Eurescom (Allemagne) et comprend 16 autres partenaires industriels et universitaires: BMW Group (Allemagne), Dynniq (Finlande), ERTICO (Belgique), Centre commun de recherche de la Commission européenne (JRC) (Belgique), Martel (Suisse), Mandat International (Suisse), Orange (Pologne), Orion Innovations PC (Grèce), OTE (Grèce), SMNET (Grèce), SPI (Portugal), Université de Kent (Royaume-Uni), Université du Luxembourg (Luxembourg), Université de Surrey (Royaume-Uni), Vediafi Oy (Finlande) et VTT (Finlande). - Site Web: http://5g-drive.eu-</p> <p>Objectifs: L'objectif principal de ce projet est de relier les développements actuels de la 5G en Europe et en Chine grâce à des activités communes de tests et de recherche afin de faciliter la convergence des technologies, l'harmonisation du spectre et l'innovation des déploiements commerciaux à grande échelle de réseaux 5G. Pour atteindre cet objectif, 5G-DRIVE développera des technologies clés 5G et des bancs d'essais pré-commerciaux pour les services eMBB et V2X en collaboration avec le projet chinois jumelé dirigé par China Mobile.</p>
5G-MOBIX	<p>Programme 5G pour la mobilité coopérative, connectée et automatisée financée par H2020 –</p> <p>Durée: Action d'innovation de 36 mois (novembre 2018 - octobre 2021), -</p> <p>Partenaires: 46 partenaires de pays européens, de Chine et de Corée du Sud. Exemple de partenaires: ERTICO, AKKA (FR), CATAPULT, DAIMLER, FORD, Institut Fraunhofer, ICI, Nokia, SEIMENS, Telefonica, Université technique de Berlin, TURKCELL, Université du Luxembourg, VALEO (FR), VEDECOM (FR), VTT Technical Centre de recherche de la Finlande, etc.-</p> <p>Objectifs: 5G-MOBIX fournira une évaluation complète et une</p>

	recommandation des technologies 5G innovantes permettant à la CCAM d'améliorer et de tester les fonctionnalités des véhicules automatisés le long de deux couloirs transfrontaliers et de sites d'essais urbains SIX. Ces huit sites permettront au 5G-MOBIX de faire face à toutes les conditions du trafic de véhicules, de la couverture du réseau, de la demande de services, ainsi qu'aux aspects juridiques, commerciaux et sociaux locaux intrinsèquement distincts.
--	---

Agenda de la Commission européenne

Le plan d'action de la Commission européenne pour la 5G³, présenté en septembre 2016, prévoit un calendrier européen commun pour un lancement commercial coordonné des services de 5G en 2020, notamment :

- la couverture 5G d'au moins une grande ville par Etat membre en 2020 et,
- la couverture de toutes les zones urbaines et principaux axes de transport en 2025.⁴

Les objectifs 5G de la France, élaborés dans la feuille de route 5G publiée par le Gouvernement et l'Arcep en juillet 2018, sont en ligne avec ces objectifs européens.

5 Co-existence, complémentarité, évolutivité

5.1 Co-existence dans la bande 5.9 Ghz

Les applications ITS liées à la sécurité bénéficient aujourd'hui au niveau communautaire de conditions techniques harmonisées dans la bande 5875-5905 MHz⁵. Cette harmonisation communautaire se double d'une harmonisation CEPT⁶ (organisation réunissant 48 pays européens) plus large, mais non obligatoire. Cette dernière préconise d'étudier une bande d'extension de 20 MHz (5905-5925 MHz). Une bande de 20 MHz est également identifiée pour les applications ITS sans lien avec la sécurité (5855-5875 MHz), compte tenu du partage de cette bande avec d'autres appareils de faible portée.

Par ailleurs, la Commission européenne a confié en octobre 2017 un mandat à la CEPT visant à étudier l'extension des conditions techniques harmonisées pour les ITS routiers « sécurité » en vigueur dans la bande 5875-5905 MHz à la bande 5905-5925 MHz, tout en ouvrant cette harmonisation aux ITS « rail urbain » couvrant les systèmes de signalisation radio CBTC (« *Communication Based Train Control* ») qui permet aujourd'hui d'automatiser le fonctionnement des rames de métro et des trains de banlieue.

³ <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/communication-5g-europe-action-plan-and-accompanying-staff-working-document>

⁴ Selon la Commission, les zones urbaines sont les villes avec au moins 50 mille habitants, ou d'environ 40% de la population en Europe. La définition se trouve ici : https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Archive:European_cities_%E2%80%93_the_EU-OECD_functional_urban_area_definition. Les axes de transport (y compris les autoroutes, les routes nationales et les chemins de fer) sont définis par le Trans-European Transport Networks

⁵ **Décision 2008/671/CE** de la Commission du 5 août 2008 sur l'utilisation harmonisée du spectre radioélectrique dans la bande de fréquences 5 875-5 905 MHz pour les applications des systèmes de transport intelligents liées à la sécurité

⁶ ECC/DEC/(08)01 on "The harmonised use of the 5875-5925 MHz frequency band for ITS"
ERC/REC/(08)01 on the "Use of the band 5855-5875 MHz for ITS"

Déjà autorisé ou en projet dans de nombreux pays européens (France, Belgique, Danemark, Espagne, Autriche, Allemagne), le CBTC fonctionne aujourd'hui au-dessus de 5905 MHz (5915-5935 MHz en France) mais ne bénéficie pas d'un cadre européen harmonisé pour l'utilisation des fréquences. Ce mandat répond donc également à une attente des industriels et acteurs de ce secteur.

Le mandat demande spécifiquement à la CEPT de traiter la question de la coexistence radio entre ITS routiers et ITS rail urbain ainsi qu'entre les technologies pour les ITS routiers, c'est-à-dire entre technologies ITS-G5 et C-V2X. La réponse de la CEPT attendue pour mars 19 sera ensuite exploitée par la Commission pour étendre en fréquences et en périmètre le cadre européen harmonisé ITS.

Par ailleurs, la bande pour les ITS « *non safety* » va bénéficier en 2019 d'une harmonisation au titre de la réglementation pour les appareils de faible portée, donc en dehors du champ de la Décision 2008/671/CE.

5.1.1 Coexistence entre ITS routiers et ITS rail urbain

Les propositions actuelles de la CEPT, qui seront soumises en consultation publique fin octobre 2018 s'orientent ainsi :

- Elargissement de la bande et à 5935 MHz limitée à l'ITS rail urbain sur 5925-5935MHz. La Commission devrait confirmer cette extension à travers une révision du mandat
- Identification de la bande 5915-5935 MHz comme prioritaire pour les ITS rail urbain et de la bande 5875-5915 MHz comme prioritaire pour les ITS routiers. La solution de partage entre applications ITS à l'étude au sein de l'ETSI doit être déterminée à horizon 3 ans. Elle pourrait être fondée sur le principe de balises le long des lignes couvertes en ITS rail urbain et d'une écoute obligatoire de ces balises par les ITS routiers avant toute communication sur les canaux prioritaires ITS rail urbain. Le comportement des équipements ITS routiers sur réception du signal de balise reste à déterminer.
- Tant que l'ETSI n'a pas adopté une norme harmonisée définissant cette solution de partage, la définition de canaux prioritaires revient à segmenter la bande. Néanmoins, les ITS routiers pourraient être autorisés dans 5915-5925 MHz sur une base nationale, limités aux applications V2I et sous régime d'autorisation individuelle, permettant ainsi une coordination avec les déploiements ITS rail urbain.
- La CEPT entend imposer au niveau réglementaire la solution de partage si l'ETSI ne parvient pas à adopter une norme dans les trois prochaines années.



Figure 36 Répartition des canaux 5,9 GHz entre ITS routiers et ITS rail urbain

5.1.2 Coexistence ITS-G5 et C-V2X

CEPT et ETSI échangent à propos des solutions de partage entre les deux technologies ITS routiers en cherchant à concilier le principe de neutralité technologique et l'absence de segmentation de la bande ainsi qu'à éviter la préemption du spectre par une technologie.

On peut regrouper les solutions de partage identifiées à ce stade par l'ETSI en deux catégories :

- La définition de canaux préférentiels d'une manière semblable à la solution retenue entre ITS routiers et ITS rail urbain
- La mise en œuvre de mécanismes de réservation d'un canal tels que :
 - utilisation d'un mécanisme de détection de l'autre technologie (détection d'énergie, balise, préambule, collision, etc.) afin de libérer la ressource,
 - message de réservation en ITS-G5 (nouveau CAM) par le C-V2X,
 - utilisation d'un entête ITS-G5 avant envoi d'un signal C-V2X (à préciser),
 - réservation d'une période de transmission par le C-V2X par l'envoi d'un signal d'énergie détecté par l'ITS-G5,
 - éléments communs dans la couche MAC.

Ces mécanismes sont à l'étude notamment pour évaluer :

- la faisabilité,
- l'efficacité de la réservation du canal,
- la dégradation de la latence,
- l'efficacité spectrale,
- l'impact sur les normes ITS-G5 et C-V2X (nécessité et complexité de tout changement).

En pratique, il apparaît impossible de réconcilier parfaitement la neutralité technologique et la coexistence co-canal (c'est-à-dire l'absence de toute forme de segmentation). Le rapport CEPT, à l'issue de la consultation publique, devrait proposer plusieurs options qui seront considérées par la Commission en 2019 pour la révision de la Décision 2008/671/CE. Le choix de l'option préconisée par la Commission ne sera sans doute pas indépendant, pour des raisons de cohérence, de l'approche qui sera retenue dans l'acte délégué sur les C-ITS en termes de technologie et d'interopérabilité (ITS-G5 considéré, ou non, comme première technologie ITS ? rétrocompatibilité ? interopérabilité entre stations ITS ?).

Les questions de brouillage entre canaux adjacents sont aussi discutées entre ETSI et CEPT, en notant que la norme ETSI EN 302 663 spécifie alternativement des puissances de 33 et 23 dBm selon les canaux.

5.1.3 Coexistence en bande adjacente

La protection des équipements de télépéage (TTT, « *Transport and Traffic Telematics* ») fonctionnant dans la bande 5795-5815 MHz vis-à-vis des équipements ITS est décrite dans la spécification technique ETSI TS 102 792. Elle impose que lorsqu'une station ITS s'approche d'un télépéage, la puissance d'émission et de rayonnement non désiré soient diminuées.

La bande au-dessus de 5925 MHz est utilisée par des faisceaux hertziens. La désignation de la bande 5925-5935 MHz pour les ITS rail urbain obligera les administrations à coordonner tout déploiement avec les assignations de faisceaux hertziens utilisant le premier canal du plan et, le cas échéant, à changer de canal. Pour cette raison, la bande 5925-5935 MHz ne sera pas uti-

lisible, même à terme, par les ITS routiers compte tenu de l'impossibilité d'effectuer une telle coordination avec eux.

Cette bande est aussi à l'étude pour les RLAN (WiFi) en partage avec les faisceaux hertziens. La conséquence de l'extension des ITS à 5935 MHz est que seule la bande au-dessus de cette fréquence restera à l'étude pour les RLAN. Par ailleurs, la CEPT étudiera la protection des ITS vis-à-vis des RLAN et devrait limiter les rayonnements non désirés de ces équipements en-dessous de 5935 MHz afin de protéger les ITS.

5.2 Conditions techniques en cours de définition pour l'utilisation de la 5G dans les différentes bandes de fréquences

Les fréquences utilisées en 5G diffèrent d'un pays à un autre. La figure ci-dessous récapitule la répartition actuelle :

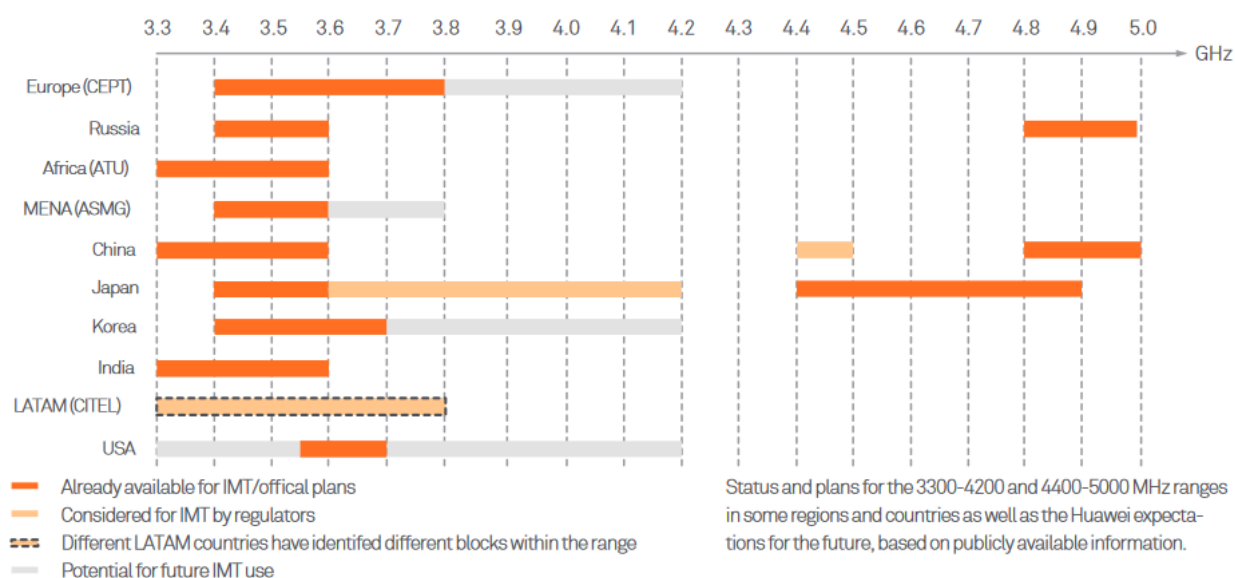


Figure 37 Fréquences 5G par pays

Le spectre 3,4-3.6Ghz est considéré commun à toutes les régions.

5.3 Complémentarité et évolutivité des technologies

5.3.1 Hybridation de l'ITS-G5

L'hybridation de l'ITS-G5 avec d'autres technologies, notamment les technologies cellulaires, est prise en compte dans des projets tels que SCORE@F, ITSSV6, CODECS pour une quantité croissante d'informations permettant d'atteindre un niveau élevé de qualité de service, de redondance et la possibilité d'utiliser des informations agrégées provenant de multiples utilisateurs individuels et fournisseurs de services (voir Figure 38).

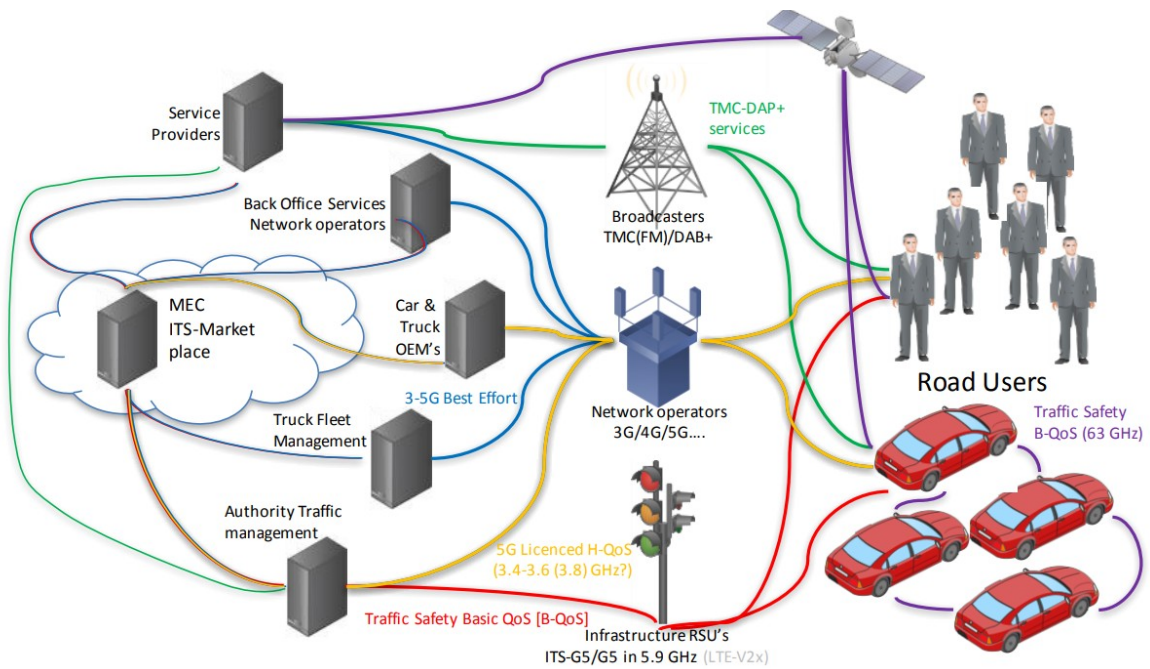


Figure 38 La communication hybride combine les éco-systèmes de communication

Cette approche hybride a aussi été mise en œuvre dans SCOOP@F, elle est poursuivie dans la plateforme C-Roads et correspond à la stratégie de la Commission européenne..

Un système de communication hybride peut être implémenté dans un véhicule et dans une UBR, comme illustré aux Figure 39 et Figure 40.

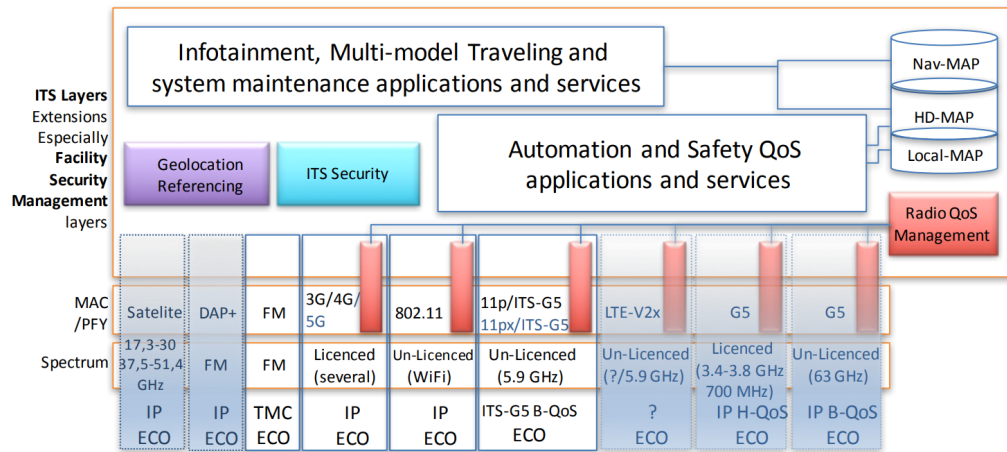


Figure 39 Un exemple de système de communication hybride de véhicule.

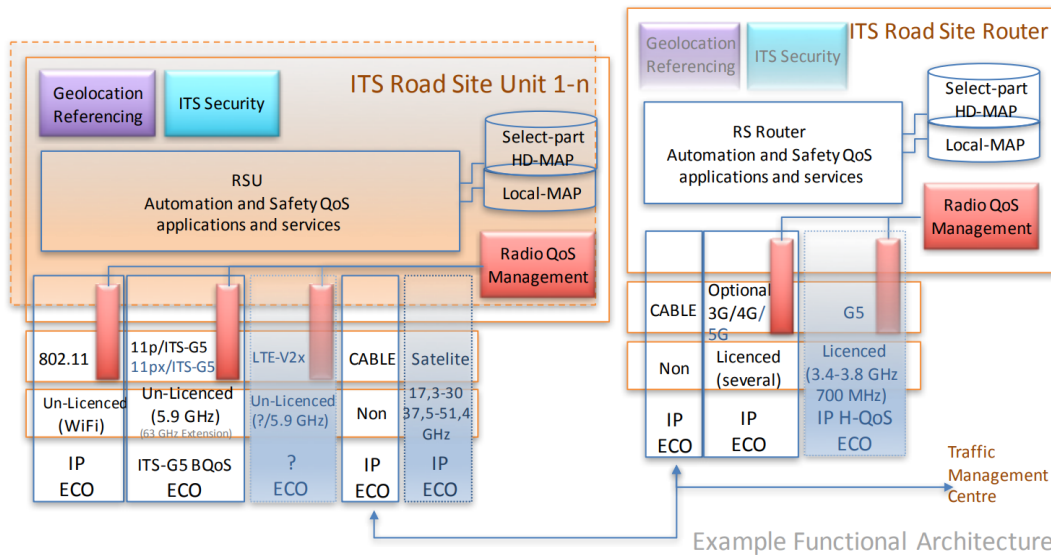


Figure 40 Un exemple de système de communication hybride d'UBR.

Mobile Edge Computing (MEC), Clustering et l'intelligence artificielle devraient constituer les solutions de communication hybrides les plus prometteuses permettant un débit élevé, une latence faible et un handover transparent [A40]-[A41].

5.3.2 Evolutivité de l'ITS-G5

La norme IEEE 802.11p actuelle est dérivée de la norme IEEE 802.11a spécifiée en 1999. Au cours des dernières décennies, la technologie IEEE 802.11 est passée de la norme IEEE 802.11a (1999) à la norme IEEE 802.11n (2009), IEEE 802.11ac (2013), IEEE 802.11ah (2017) et l'amendement IEEE 802.11ax en cours, avec un débit de 54 Mbps à près de 10 Gbps, ainsi qu'une fiabilité et une portée accrues. Les exemples des technologies PHY avancées de ces normes ultérieures sont

- Low-Density Parity-Check Coding (11n et après - déployés dans les produits aujourd'hui)
- Space Time Block Coding (11n et après - déployés dans les produits aujourd'hui)
- Multiple-Input and Multiple-Output support (11n et après - déployés dans les produits aujourd'hui)
- Extension de la couverture (11ax)
- Dual Sub-Carrier Modulation (11ax)
- Mid-amble (11ax Draft2.0) : surtout si LDPC est utilisé.

Pour répondre aux besoins futurs en matière de technologie de communication V2X et fournir une technologie évolutive basée sur la norme 802.11 pour les applications V2X, l'IEEE travaille actuellement sur l'amendement IEEE 802.11bd (NGV : Next Generation V2X) intitulé «*Norme pour la technologie de l'information - Télécommunications et échange d'informations entre systèmes réseaux métropolitains et métropolitains - Exigences spécifiques - Partie 11: Spécifications du contrôle d'accès au réseau local (MAC) et de la couche physique (PHY) au réseau local sans fil - Amendement: améliorations pour la prochaine génération V2X*» [A42][A43].

Les travaux d'amendement sont de définir les modifications à apporter aux MAC et PHY du 11p pour la bande 5,9 GHz et, éventuellement, dans la bande de fréquence 60 GHz (57 GHz à 71 GHz) pour **un débit plus élevé** (au moins deux fois plus élevé), et **une couverture plus large** (au moins 3 dB moins de sensibilité), avec **procédures de positionnement** en

conjonction avec la communication V2X. Enfin, cet amendement assurera **l'interopérabilité, la coexistence, la rétrocompatibilité et l'équité avec IEEE 802.11p**[A43].

La date prévue pour la soumission du projet d'amendement pour le vote initial des sponsors est septembre 2020. La date d'achèvement est prévue pour septembre 2021[A43].

Actuellement, l'amendement vise les cas d'usages suivants [A44]:

Cas d'usage	Description et exigences
Sensor sharing	<p>Description : Les véhicules diffusent périodiquement tous les objets détectés de tous les capteurs et reçoivent des objets de tous les autres véhicules.</p> <p>Exigences : Le paquet NGV doit contenir un nombre d'octets transmis supérieur au paquet IEEE802.11p (> 50%) dans les mêmes conditions (durée du paquet, PER, plage, canal sans fil).</p>
Fonctionnement simultané sur plusieurs canaux	<p>Description : Un canal est le canal de sécurité et le second est le canal non-sécurisé. Un canal autre que de sécurité peut être utilisé pour les décisions de conduite autonome (par exemple, le peloton des camions).</p> <p>Exigences : Haut débit (le paquet NGV devrait porter un nombre d'octets transmis supérieur à 802.11p (> 50%))</p>
Applications d'infrastructure	<p>Description : Transmission de données de sécurité et de fluidité du trafic d'infrastructure aux véhicules</p> <p>Exigences : Haute disponibilité du canal de sécurité et forte utilisation de tous les canaux. Une grande quantité de données peut être reçue rapidement, par exemple une base de données CRL ou potentiellement une carte HD.</p>
Position et localisation des véhicules	<p>Description : Position du véhicule par rapport aux autres usagers de la route. Mesurez la distance précise par rapport aux autres usagers de la route en fonction de la position connue de l'antenne. Localisation et navigation de la voiture dans des endroits non couverts par le GPS.</p> <p>Exigences : 0,3 m de précision LoS et 1-2 m de précision NLoS</p>
Aide à la conduite automatisée	<p>Description : Le véhicule partage sa trajectoire future et l'ajuste potentiellement en fonction de la trajectoire des véhicules à proximité</p> <p>Exigences : Fonctionnement multicanal. Le paquet NGV doit contenir un nombre d'octets transmis supérieur au paquet IEEE 802.11p (> 50%) dans les mêmes conditions (durée du paquet, PeR, plage, canal sans fil).</p>
Application ITS de véhicule aérien	<p>Description : Les véhicules aériens assurent la sécurité routière et surveillent les infractions au code de la route avec une connectivité LoS</p>

	Exigences : V2X y compris véhicule aérien à X ; Haut débit pour fournir des informations vidéo sur le trafic des véhicules aériens aux autorités (agents de police) ; Fonctionnement multicanal ; Latence de transmission de paquets courte.
Train à Train	<p>Description : Pour la sécurité critique et pour un fonctionnement efficace. Protection des trains autonomes et prévention des collisions, contrôle à distance, couplage automatique et intégrité des trains; couplage virtuel (peloton)</p> <p>Exigences : Pour une vitesse relative de 500 km / h (avec antennes directives 800 km / h) et une distance de 2000 m, le VGN fournit au moins un débit binaire de 1 Mbps, une précision de télémétrie de 1% de la distance et une latence de 10 ms, ainsi que la fiabilité (SIL2)</p>
Véhicule à Train	<p>Description : Pour la sécurité critique et pour un fonctionnement efficace. Espace partagé aux passages à niveau, spectre partagé pour la bande ITS de 5,9 GHz entre communications V2X et voies ferrées urbaines.</p> <p>Exigences : Pour une vitesse relative de 500 km / h et une distance de 2000 m, NGV fournit au moins un débit binaire de 1 Mbps, une précision de plage comprise entre 5% et 10% de la distance et une latence de 100 ms, ainsi que des supports fiabilité (SIL2)</p>

5.3.3 Hybridation et évolutivité du LTE-V2X

Le LTE-V2X est conçu pour s'intégrer naturellement au réseau LTE (mode Uu). C'est une forme d'hybridation native.

Selon Qualcomm⁷ et le GSMA⁸, le C-V2X est conçu avec un chemin d'évolution vers la 5G. En particulier, Qualcomm, le fabricant de puces de hautes technologies, y compris celles pour le DSRC et le C-V2X, indique que, de par sa conception, l'évolution du C-V2X peut intégrer les dernières avancées de la technologie de communications sans fil, tout en maintenant la compatibilité avec les versions antérieures. Les standards pour le C-V2X du package *Release 14* sont évolutifs vers le C-V2X à base de la 5G NR, qui peut compléter la *Release 14* avec des capacités complémentaires ainsi que de nouvelles capacités, tout en maintenant la compatibilité descendante. Les standards de la *Release 14* peuvent être utilisés pour les communications de sécurité de base entre véhicules et le C-V2X à base de la 5G NR peut être utilisé pour des cas d'utilisation avancés pour une conduite autonome. Le C-V2X basé sur la 5G NR est conçu pour fournir un débit élevé, un support de porteuse large bande, une latence ultra faible et une fiabilité pour des situations d'utilisation autonome, telles que le partage de capteurs, le partage d'intention et les mises à jour de cartes 3D HD.

Les cas d'usages du 5G-V2X prévus sont, entre autres :

Cas d'usage	Description
Assistant de virage à gauche	Les alertes sont renvoyées au conducteur quand il tente de tourner à gauche, afin de l'aider à éviter des accidents avec les véhicules venant

⁷ <https://www.qualcomm.com/news/onq/2018/04/25/lets-set-record-straight-c-v2x>

⁸ https://www.gsma.com/iot/wp-content/uploads/2017/12/C-2VX-Enabling-Intelligent-Transport_2.pdf

	de la direction opposée
Aide au mouvement d'intersection	Le système informe le conducteur lorsqu'il est dangereux de saisir l'intersection - par exemple, quand quelque chose gêne le regard du conducteur sur la vue d'en face ou la traversée du trafic.
Feux de freinage électroniques d'urgence	Le conducteur est alerté quand il y a du freinage par des véhicules devant.
Avertissement de file d'attente	Le système prévient en avance une situation potentiellement dangereuse, en fournissant des messages et des informations au conducteur.
Harmonisation de la vitesse	Le système formule des recommandations en fonction des conditions de circulation et des informations météorologiques.
Conscience de la situation en temps réel	Le système fournit les informations sur les projets de voirie, les fermetures de voies, le trafic et autres conditions qui peuvent nécessiter un ajustement de conduite.
Mises à jour de logiciel	Le système fournit des mécanismes de mettre à jour le véhicule avec le logiciel le plus récent ainsi que les standards de sécurité afin d'assurer un bon fonctionnement du véhicule.
Surveillance à distance de l'état du véhicule	Le système fournit un mécanisme permettant de diagnostiquer à distance les problèmes du véhicule. La conduite de la voiture deviendra un système autonome, ce qui en fait un mécanisme privilégié pour le contrôle permanent des fonctions du véhicule et de son état.
Cartes haute définition en temps réel	Prise en compte de la situation géographique des véhicules autonomes dans un segment de route critique dans des cas de modification de conditions de route (par exemple, une nouvelle signalisation détectée précédemment par un autre véhicule sur la même route.
Partage de données du capteur en haute définition	Fournit un mécanisme pour que les véhicules puissent partager les données récoltées via les capteurs (lidar, appareils photo, etc.) afin de permettre une meilleure coordination dans la gestion des intersections ou dans le platooning.
Vision à travers des véhicules devant	Possibilité pour les véhicules de partager les images des routes captées par leur appareil avec les véhicules derrière.
Découverte d'utilisateurs vulnérables sur la route	Possibilité d'identifier les conditions de sécurité liées à la présence de passagers vulnérables tels que les piétons ou les cyclistes.

Source : 5GAA⁹

5.3.4 Possibilité d'un double équipement ITS-G5 / LTE-V2X

Un double équipement n'est souhaité ni par les gestionnaires routiers ni par les constructeurs automobile en raison de son surcoût.

L'étude des performances techniques montre que les deux technologies permettent de réaliser sensiblement les mêmes cas d'usage (Day 1 à Day 2). Les cas d'usage Day 1 sont des cas d'usage informatifs qui ne nécessitent a priori pas la redondance que pourrait apporter un double équipement. La question peut se poser pour les cas d'usage Day 2.

⁹ http://www.3gpp.org/ftp/information/presentations/Presentations_2017/A4Confo10_Dino%20Flore_5GAA_v1.pdf

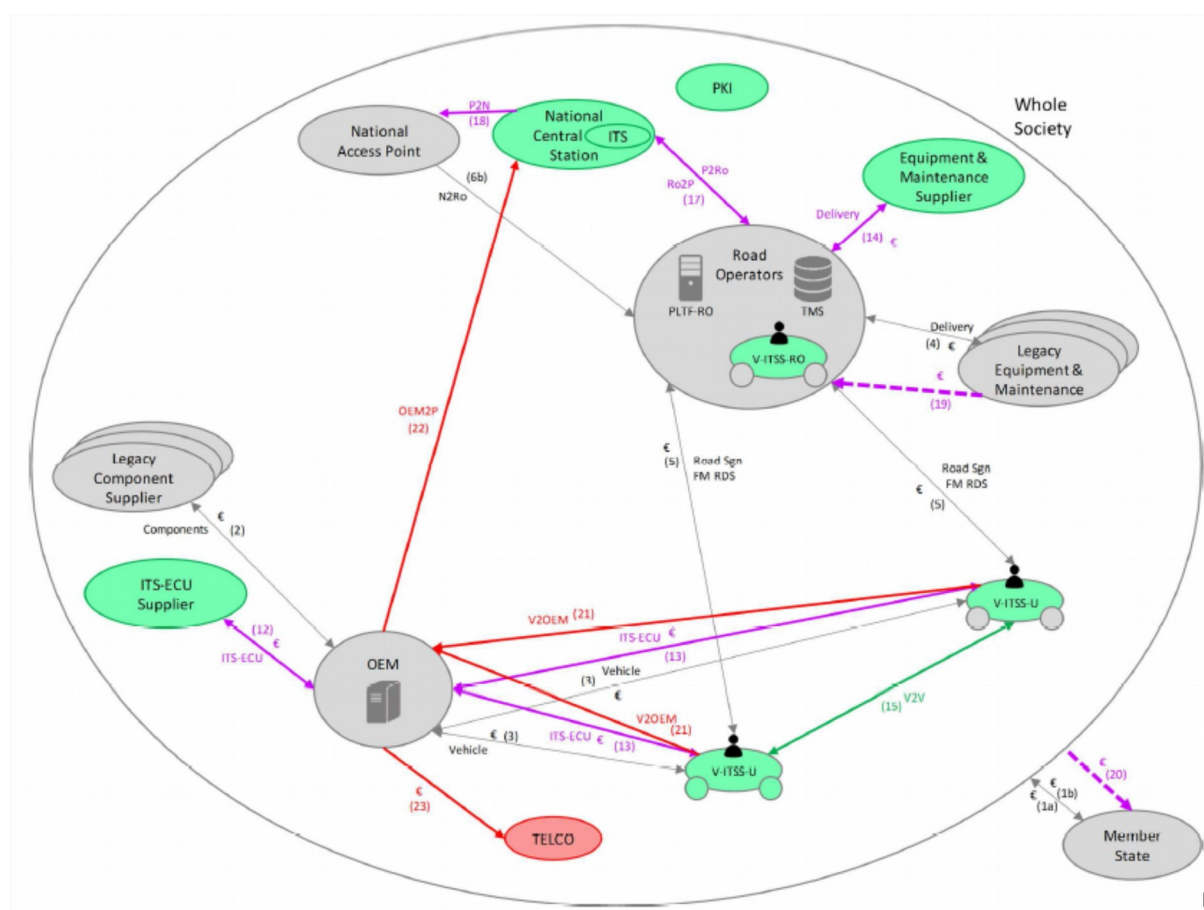
6 Conditions de déploiement

6.1 Business model

Si le bilan socio-économique d'un déploiement des STI coopératifs est indiscutablement positif, la propension à payer du conducteur pour le service n'est pas démontrée. Les constructeurs considèrent que les services de sécurité routière sont difficilement vendables car perçus comme un dû pour le conducteur. La construction de bouquets de services associant des services de sécurité routière à d'autres services de confort, comme les itinéraires conseillés ou l'information sur les places de stationnement, pourrait débloquent la propension à payer.

Quoi qu'il en soit, la production du service nécessite un échange de cash flows entre l'ensemble des acteurs de l'écosystème (gestionnaires routiers, constructeurs automobile, opérateurs télécom etc).

Le projet SCOOP@F a exploré la question dans l'hypothèse d'une hybridation ITS-G5-cellulaire 3G/4G. Le résultat est présenté ci-dessous :



13	Price of the ITS ECU bought by the OEM to the supplier. It won't be exposed since only "14" is important.
14	Price the customer will pay for ITS functionality. It includes "13" but also its integration into the vehicle (screws, electric cables). At this step of the project, no one knows if the vehicle price could be adjusted due to C-ITS services, whether in correlation with OEM costs or not. But, safety being considered by customers as a condition when using the vehicle, he may not accept to pay more than today.
15	Road side units and maintenance services bought by the road operators to suppliers.
16	Messages exchanged between user vehicles (CAM, DENM, according to use cases and ETSI standards).
18	Reduction of equipment cost compared to the actual situation. For instance: <ul style="list-style-type: none"> • In the short/mid-term: <ul style="list-style-type: none"> ◦ Sensor under the road to detect vehicles speed and traffic conditions, ◦ Video camera along the road side. • In the long term: <ul style="list-style-type: none"> ◦ Since Road signage will become vehicle in-signage, thanks to ITS technology.
19	Reduction of "1b" costs, thanks to C-ITS.
20	DENM messages and aggregated information from CAM sent to the National Central Station.
21	Information sent to the national access point, in compliance with [b] and [c] delegated acts of ITS European directive.
22	V2OEM (Vehicle-to-OEM): the vehicle sends information to the OEM back-end server, using the SIM card included in the TCU.
23	OEM2P (OEM-to-Platform): the OEM sends aggregated data to the National Central Station since the road operator can't do it.
24	It corresponds to LTE/3G fees paid by OEM to TELCO to send vehicle data to the OEM server (22).

Figure 41 Business model hybride ITS-G5 / cellulaire proposé par le projet SCOOP@F

Quelle est la transposabilité de ce business model à un cas LTE-V2X / Uu ? Les opérateurs télécom participant au groupe s'accordent pour ne pas envisager de déployer d'unités bord de route LTE-V2X ou la mise en place d'une supervision mode 3. Le scénario de déploiement le plus probable est donc celui d'un investissement en unités bord de route par les gestionnaires routiers, d'un fonctionnement en mode 4 et d'une intervention des opérateurs télécom uniquement pour les services Uu. Le business model est dès lors très comparable à celui de l'ITS-G5 hybridé au réseau cellulaire 3G/4G.

Le business model de la 5G apparaît différent et encore incertain. On peut imaginer deux possibilités polaires :

- Possibilité 1 : les nombreux cas d'usage non véhiculaires de la 5G, et notamment les cas d'usage de confort du passager du véhicule, laissent espérer une fourniture du service V2X au coût marginal par l'opérateur télécom.
- Possibilité 2 : la couverture de certains axes est imposée aux opérateurs télécom, mais ceci à un surcoût qui pourrait nécessiter la mise à contribution des acteurs des transports.

6.2 Couverture du réseau routier

6.2.1 Analyse stratégique

Il ressort des chapitres précédents que :

- l'ITS-G5 et le LTE-V2X répondent tous deux au besoin de performance des services Day 1,
- ni l'un ni l'autre ne répondent au besoin de performance des services Day 3, mais la 5G et la NGV pourraient y répondre,
- la disponibilité de l'ITS-G5 pour le déploiement est immédiate, celle du LTE-V2X l'est moins mais les mises sur le marché s'accélèrent,
- le scénario d'un double équipement ITS-G5 / LTE-V2X est peu probable.

Dès lors, on peut imaginer les quatre scénarios suivants pour assurer la couverture du réseau routier en connectivité :

- **scénario 1** : déploiement de l'ITS-G5 à partir de 2019, suivi de la 5G lorsque celle-ci sera disponible,

- **scénario 2** : déploiement de la technologie LTE-V2X à partir de 2021, suivi de la 5G lorsque celle-ci sera disponible,
- **scénario 3** : pas d'investissement massif tant que la 5G-V2X n'est pas opérationnelle, ce qui devrait arriver vers 2025¹⁰,
- **scénario 4** : déploiement de l'ITS-G5 à partir de 2019, suivi d'une future technologie NGV lorsqu'elle sera disponible.

Afin d'évaluer les investissements envisagés dans les technologies ITS-G5 ou LTE-V2X, le scénario 3 sera considéré comme le scénario de référence de cette évaluation. Il décrit ainsi la situation la plus probable en l'absence d'investissements. Le scénario 4 ne sera pas évalué car il ne se distingue du scénario 1 que par des choix qui peuvent être différés. Les rythmes de déploiement des différentes technologies sont précisés dans le tableau ci-dessous.

	ITS-G5	LTE-V2X	5G
Début de déploiement des infrastructures	2019	2021	2025
Durée de déploiement des infrastructures	5 ans	5 ans	10 ans
Premiers véhicules équipés	2019	2021	2025
Équipement de l'ensemble des véhicules neufs	2023	2025	2029

Tableau 12 Hypothèses sur le rythme de déploiement

Le déploiement des technologies d'ITS-G5 et LTE-V2X nécessite l'installation par le gestionnaire routier d'unités bords de route (UBR) le long du réseau national. La 5G est déployée par les opérateurs de télécommunication indépendamment du gestionnaire selon une logique de couverture des zones les plus denses en priorité.

Dans les deux scénarios faisant l'objet d'une évaluation, la technologie 5G-V2X est supposée avoir une hybridation ou rétro-compatibilité avec la technologie ITS-G5 ou LTE-V2X déployée initialement. Autrement dit, les véhicules équipés en 5G peuvent émettre ou recevoir des messages de la part des véhicules équipés de l'ancienne technologie, et ils peuvent également communiquer avec les unités bords de route installées. En revanche, la couverture 5G n'est d'aucune utilité pour les véhicules équipés des technologies ITS-G5 ou LTE-V2X.

Le périmètre de l'évaluation est constitué du réseau routier national, comprenant 11 600 kilomètres d'autoroutes et 9 600 kilomètres de routes nationales. Pour des raisons de disponibilité des données de trafic indispensables à la réalisation de cette évaluation, ce périmètre a été restreint à 17 250 kilomètres pour lesquels ces données ont pu être récoltées à partir de la base ISIDOR. Les trafics sont supposés évoluer de 1,0 % par an pour les véhicules légers et de 1,3 % par an pour les poids lourds.

Le coût d'investissement est de 3000 euros par unité bord de route pour la technologie ITS-G5 et de 4500 euros pour la technologie LTE-V2X. Le coût d'exploitation (entretien/maintenance) est pris à 300 euros par an dans les deux cas. Les unités bord de route sont déployées tous les deux kilomètres et couvrent les deux sens de circulation.

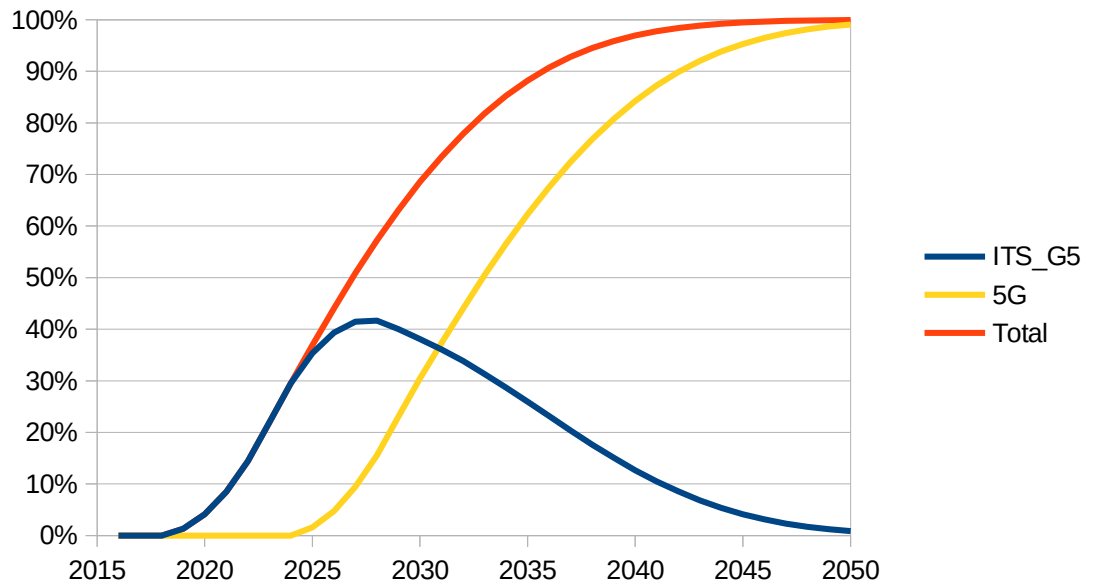
L'équipement des véhicules est supposé s'effectuer sans coûts spécifiques : lorsque la technologie est déployée, les constructeurs sont incités à équiper leurs véhicules pour offrir à leurs clients des services annexes (gestion de l'itinéraire, multimodalité, etc.) non pris en compte ici.

¹⁰ Bien que la 5G sera commercialement disponible dès 2020 pour certains cas d'usages « grand public », il est plus vraisemblable que la 5G pour les applications V2X soit disponible vers 2025, en prenant le compte que le fait que les routes devront être couvertes (ce qui en général commence après la couverture des grandes villes), que les véhicules disposent de la technologie 5G, et que les expérimentations techniques aient abouti à des spécifications techniques pour la 5G-V2X.

6.2.2 Analyse des effets

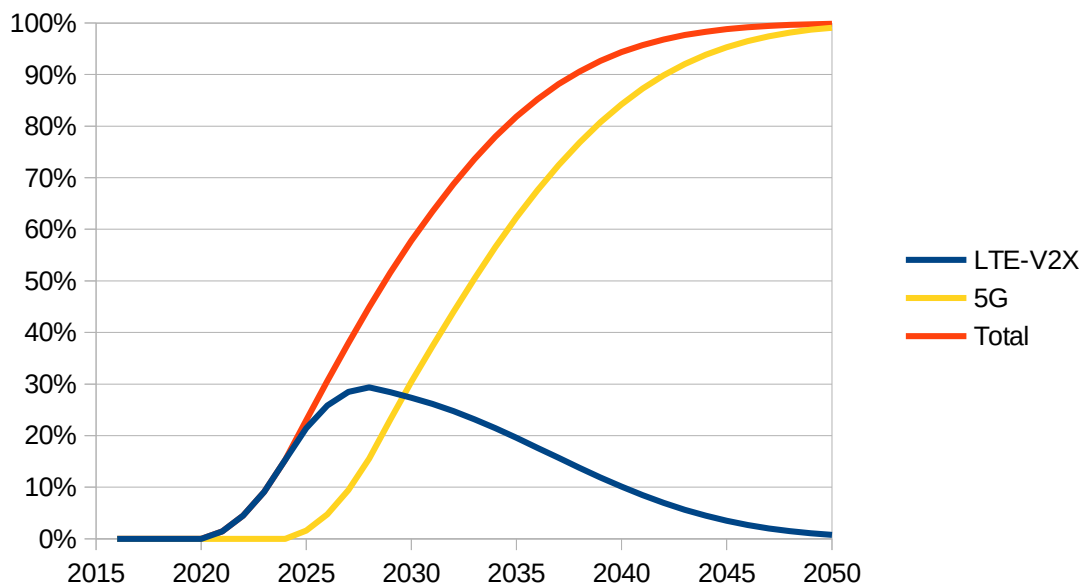
À partir du modèle de parc de la DGITM, le déploiement de la connectivité des véhicules dans le parc a pu être estimé. Les résultats sont présentés dans les deux figures ci-dessous.

Figure 42 Déploiement de la connectivité dans le parc de véhicules : scénario ITS-G5 suivi de la 5G



Dans les zones non équipées de la 5G, tous les véhicules connectés reçoivent et prennent en compte les messages émis par les unités bords de route. Dans les zones équipées de la 5G,

Figure 43 Déploiement de la connectivité dans le parc de véhicules : scénario LTE-V2X suivi de la 5G



seuls les véhicules équipés de l'ancienne technologie utilisent les unités bord de route qui ont été déployés. Ceux-ci continuent néanmoins à fonctionner tant qu'il y a des véhicules pour en recevoir les messages, ou plus exactement tant que les bénéfices apportés l'emportent sur les coûts d'exploitation (entretien/maintenance). Afin de maximiser les bénéfices, la date de fin

d'exploitation des unités de bord de route est située selon le tronçon considéré entre 2045 et 2055.

Le déploiement de la 5G est modélisé sur 10 ans selon une logique de couverture d'un dixième de la superficie du territoire chaque année. Ce déploiement s'effectue par ordre décroissant de densité de population. Ainsi, les routes situées en rase campagne sont équipées de la 5G bien après celles situées en milieu urbain.

Les effets de la connectivité des véhicules sont estimés à partir de la liste des cas d'usage du véhicule connecté. En pratique, les impacts sur les émissions de polluants ou sur le trafic des cas d'usage Day-one sont négligeables comparés aux impacts sur la sécurité. Ainsi, seuls les bénéfices en termes de sécurité routière seront pris en compte dans cette évaluation. Différentes études européennes ont permis d'estimer les apports de nouvelles technologies utilisant la connectivité I2V ou V2V sur le nombre d'accidents, et donc sur le nombre de blessés et de morts sur les routes. Parmi celles-ci, l'étude Drive C2X¹¹ réalisée dans le cadre du « Seventh Framework Programme » sera utilisée pour calculer ces effets.

Le nombre d'accidents évités du fait des investissements réalisés en unités bord de route est modélisé à partir de la formule suivante :

$$NB_{accidents\ évités} = (\alpha P_i + \beta P_i P_c)$$

avec P_i la part des véhicules équipés de la technologie envisagée (ITS-G5 ou LTE-V2X) et $P_{connectés}$ la proportion de véhicules connectés (y compris ceux équipés de la 5G). Le nombre d'accidents, supposé proportionnel au trafic, est modulé en fonction du type de route et du nombre de voies.

Pour le paramètre α , les cas d'usage considérés sont ceux qui ont besoin d'un seul véhicule connecté pour fonctionner, soit ceux qui fonctionnent grâce à une connectivité I2V. Sont ainsi sélectionnés les cas d'usage suivants :

- **IVS-Speed limit** : la limite de vitesse est constamment affichée à l'intérieur du véhicule. S'il la dépasse, une alerte visuelle et sonore est envoyée au conducteur du véhicule.
- **Road Works warning** : le système alerte le conducteur lorsqu'il s'approche d'une zone de travaux, il lui indique aussi quelle sera la limite de vitesse dans cette zone.
- **Weather warning** : via des capteurs implémentés sur les infrastructures, le système est alerté et communique au conducteur s'il y a des événements météorologiques perturbants : vents forts, brouillard, forte pluie, neige ou route verglacée par exemple.
- **Approaching emergency vehicle warning** : le système alerte le conducteur de la position d'un véhicule d'urgence à l'approche. Ce dernier est supposé être toujours équipé.

Pour le paramètre β , les cas d'usage considérés sont ceux qui ont besoin de deux véhicules connectés pour fonctionner, soit ceux qui fonctionnent grâce à une connectivité V2V. Sont ainsi sélectionnés les cas d'usage suivants :

- **Electronic emergency brake light warning** : le système alerte le conducteur que le véhicule qui le précède freine brusquement.
- **Car breakdown warning** : un véhicule en panne ou arrêté sur le bord de la route

¹¹Drive C2X, Deliverable D11.4, *Impact Assessment and User Perception of Cooperative Systems*, version 1.0, 324 pages, juillet 2014 (www.drive-c2x.eu)

prévient les autres véhicules de sa position, pour accroître la vigilance des conducteurs de véhicules les plus proches et éviter un accident.

- **Traffic jam ahead warning** : le système alerte que le conducteur qu'il va arriver à un point de congestion, après avoir reçu l'information depuis le système d'un véhicule présent à l'arrière de cette congestion.

Concernant le cas d'usage **IVS-Speed limit**, il est nécessaire de remarquer que les bénéfices en termes de sécurité routière proviennent des réductions de vitesse induites par ce cas d'usage : lorsque le conducteur dépasse la vitesse maximale autorisée, l'affichage et l'alerte envoyée au conducteur l'incite à réduire sa vitesse. Ainsi, la réduction de l'insécurité routière liée à ce cas d'usage a pour contre-partie des pertes de temps de l'utilisateur par rapport à la situation de référence où celui-ci dépasse les vitesses maximales. De plus, la connectivité du véhicule n'apparaît pas indispensable pour ce cas d'usage : un GPS embarqué est capable d'apporter le même service. Aussi, ce cas d'usage n'a pas été pris en compte pour la suite.

Il est important de noter que certains cas d'usage permettraient d'éviter les mêmes accidents. Certains accidents seraient donc évités deux fois. Ce phénomène a été évalué à partir de l'étude « *Study on the Deployment of C-ITS in Europe: Final Report* », menée par la commission européenne¹², et en particulier de son annexe F. Cette annexe reprend les résultats de différentes études comme celle utilisée plus haut, mais considère en plus le cas des doubles comptes. Ainsi, elle estime que 25 % des accidents évités grâce au cas d'usage *Traffic Jam Ahead* et 25 % des accidents évités par le cas d'usage *Road Works Warning* sont déjà pris en compte dans le calcul de l'apport de l'*Emergency Brake Light Warning*. Ce ratio a donc été déduit des chiffres obtenus pour ces deux cas d'usage.

Au final, la proportion d'accidents évités en fonction du cas d'usage considéré est la suivante.

Paramètre	Cas d'usage	Nombre de morts	Nombre de blessés
α	Road Works warning	-1,9 %	-1,5 %
	Weather warning	-6,2 %	-4,7 %
	Approaching emergency vehicle warning	-0,9 %	-0,9 %
	Total	-9,0 %	-7,1 %
β	Electronic emergency brake light warning	-2,4 %	-2,1 %
	Car breakdown warning	-1,8 %	-1,4 %
	Traffic jam ahead warning	-1,1 %	-1,6 %
	Total	-5,3 %	-5,1 %

Tableau 13 Proportion d'accidents évités par cas d'usage

Ainsi, si 100 % des véhicules étaient connectés, le nombre de morts sur le réseau routier national diminuerait de 14,3 % tandis que le nombre de blessés diminuerait de 12,2 %. Sur l'ensemble de la période d'exploitation des unités bord de route, le nombre de morts évités est évalué à 378 dans le scénario de déploiement de l'ITS-G5 et à 257 dans le cas du déploiement (plus tardif) de la technologie LTE-V2X.

¹²Ricardo, *Study on the Deployment of C-ITS in Europe: Final Report*, report for DG MOVE (European Commission), 218 pages, février 2016 (https://ec.europa.eu/transport/themes/its/studies/its_en)

Scénario	Diminution de l'accidentalité routière	Fourchette basse	Moyenne	Fourchette haute
ITS-G5	Nombre de morts	260	378	500
	Nombre de blessés hospitalisés	1479	2126	2733
	Nombre de blessés légers	3946	5672	7291
LTE-V2X	Nombre de morts	177	257	339
	Nombre de blessés hospitalisés	1010	1442	1847
	Nombre de blessés légers	2693	3843	4924

Tableau 14 Diminution de l'accidentalité routière

En fonction des différentes valeurs présentes dans la littérature, la diminution de la mortalité associée à la connectivité des véhicules est comprise entre 9,4 % et 19,3 % tandis que la diminution du nombre de blessés va de 8,1 % à 16,1 %.

L'essentiel de la réduction de l'insécurité routière provient de la période 2025-2034, durant laquelle le nombre de véhicules équipés de la technologie considérée (ITS-G5 ou LTE-V2X) est maximal.

Scénario	Diminution de l'accidentalité routière	Nombre de morts	Blessés hospitalisés	Blessés légers
ITS-G5	Période 2019-2024	35	189	513
	Période 2025-2029	114	630	1665
	Période 2030-2034	111	627	1672
	Période 2034-2039	73	419	1120
	Période post-2040	46	261	701
	Total	378	2126	5672
LTE-V2X	Période 2019-2024	11	62	175
	Période 2025-2029	74	408	1071
	Période 2030-2034	79	444	1181
	Période 2034-2039	55	315	843
	Période post-2040	37	213	573
	Total	257	1442	3843

Tableau 15 Diminution de l'accidentalité routière par période

6.2.3 Synthèse

Afin d'estimer la valeur de l'investissement, les nombres de morts et de blessés évités ont été associés aux valeurs tutélaires traditionnellement utilisées pour l'évaluation des projets de transports :

- 3 200 000 euros pour un mort,
- 400 000 euros pour un blessé hospitalisé,
- 16 000 euros pour un blessé léger.

Ces valeurs correspondent aux conditions économiques de l'année 2015, elles évoluent proportionnellement au PIB par tête, pour lequel une croissance de 1,2 % par an a été considérée.

Les bénéfices ont été par la suite rapportés sur l'année 2019 d'après un taux d'actualisation de 4,5 %. La valeur actualisée nette du projet (VAN) est donc estimée en utilisant la formule suivante :

$$VAN = -I + \sum_{n=2019} \frac{B_n}{1,045^n}$$

avec I le coût de l'investissement et B_n les bénéfices obtenus pour l'année n .

Au total, la valeur actualisée nette de l'investissement est de 1823 millions d'euros dans le scénario de déploiement de l'ITS-G5 et de 1188 millions d'euros dans le scénario de déploiement de la technologie LTE-V2X. Sur l'ensemble de cette valeur, les cas d'usage V2V pèsent pour 800 millions d'euros pour l'ITS-G5 et pour 522 millions d'euros pour la LTE-V2X.

VAN en M€	Fourchette basse	Moyenne	Fourchette haute
ITS-G5	1172	1823	2469
LTE-V2X	758	1188	1615

Tableau 16 VAN

Le tableau ci-dessous donne la sensibilité de cette évaluation en fonction de deux paramètres : la date de début de déploiement de la technologie 5G-V2X et la part maximale de véhicules connectés dans les ventes. Il s'agit des deux paramètres les plus impactants pour cette évaluation. Les bénéfices de l'investissement sont plus que proportionnels à la proportion de véhicules connectés du fait de l'importance des cas d'usage V2V.

		Part maximale de véhicules connectés dans les ventes			
VAN en M€	Année de disponibilité de la 5G V2X	25 %	50 %	75 %	100 %
ITS-G5	2021	23	164	344	530
	2022	54	273	548	835
	2023	86	385	760	1154
	2024	119	500	979	1484
	2025	153	617	1202	1823
LTE-V2X	2021	-32	-22	-12	-2
	2022	-10	65	154	253
	2023	25	177	354	552
	2024	61	294	562	865
	2025	98	412	776	1188

Tableau 17 Analyse de sensibilité

Le déploiement des infrastructures (unités bord de route) est supposé s'effectuer sur cinq ans. Afin de maximiser les bénéfices en termes de sécurité routière, il a été supposé dans la modélisation que ce déploiement était réalisé en priorité sur les routes pour lesquels les avantages étaient les plus immédiats, c'est-à-dire les routes les plus accidentogènes, que ce soit du fait de leur trafic ou de leurs caractéristiques. La carte ci-dessous donne pour chaque tronçon l'année de déploiement optimal de la connectivité de l'infrastructure dans le cas de la technologie ITS-G5 (le scénario avec la technologie LTE-V2X aboutit à la même carte à très peu de choses près).

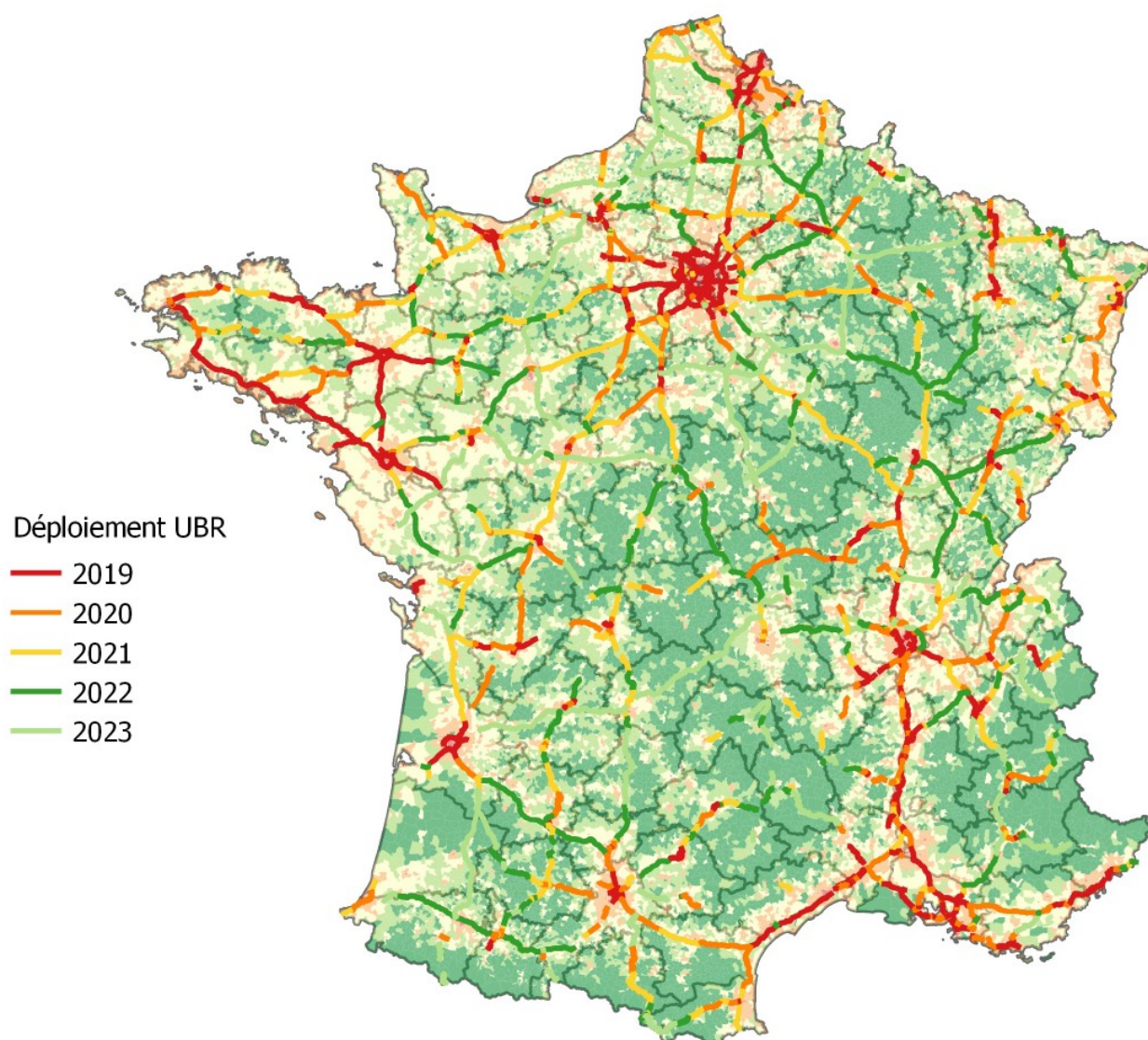


Figure 44 Phasage optimal pour le déploiement des unités bord de route (UBR)

7 Gouvernance

7.1 Au niveau national

Le présent groupe de travail a, pour la première fois, réuni les trois acteurs fondamentaux de l'écosystème des STI coopératifs : les constructeurs automobile, les gestionnaires routiers et

les opérateurs télécom. L'apport d'un quatrième type d'acteurs, les académiques, s'est avéré fondamental. Cette gouvernance a permis de dépassionner le débat et de construire les conclusions qui seront exposées plus loin au chapitre 8.

En phase opérationnelle, si chaque acteur restera maître des ses décisions de déploiement, le dialogue doit se poursuivre pour permettre des déploiements coordonnés.

Il est donc proposé de pérenniser un groupe dans une configuration similaire.

Ce groupe pourrait également conseiller l'Etat pour les choix qui lui incomberont à venir, notamment en matière de sécurité des STI coopératifs, et se positionner également en miroir de la gouvernance communautaire présentée ci-dessous.

7.2 Au niveau communautaire

La Commission européenne a commencé à esquisser ce que pourrait être la gouvernance associée à son acte délégué. Elle prévoit un groupe d'experts rassemblant Etats membres et industrie, avec différents sous-groupes dont un sur l'intégration des nouvelles technologies. La France devra être active dans la participation à ces groupes en proposant des représentants des constructeurs automobile, des gestionnaires routiers et des opérateurs télécom.

8 Conclusions

A l'issue d'un important travail de synthèse des documents existants (spécifications de standards, résultats de mesures terrain ou de simulations logicielles) complété par une étude socio-économique menée par la DGITM, le groupe de travail est en mesure d'apporter les réponses suivantes aux questions posées.

- **Quelles performances attendues de la connectivité pour les différents cas d'usage ?**

A partir des feuilles de route de l'industrie automobile et en sélectionnant les cas d'usage les plus exigeants en termes de performance, le groupe s'est fixé une cible fonctionnelle constituée :

- des cas d'usage Day 1 d'information sur les événements inopinés et dangereux (véhicule d'urgence en approche, véhicule lent, véhicule arrêté, freinage d'urgence, contresens, conditions météorologiques exceptionnelles, personnes sur les voies),
- de cas d'usage Day 1,5 pour la protection des usagers vulnérables,
- de cas d'usage pour le véhicule autonome, dont la négociation d'insertion/fusion de voies, l'alerte risque de collision, le platooning. Ceux-ci peuvent être envisagés avec deux niveaux de performance selon que l'on vise un niveau d'automatisation plus ou moins élevé (assimilable à Day 2/Day 3).

Seules les performances de portée et de latence ont pu être documentées. Les voici dans les cas polaires :

	Services Day 1	Services Day 3		
Source	Normes ETSI	Travaux du 3GPP		
		Platooning	Fusion de voies	Alerte risque de collision
Portée (m)	300	80	80	300
Latence (ms)	300	10	10	10

Ces données ne sont cependant pas endossées par les constructeurs qui sont encore dans une approche exploratoire.

- **Quels critères de choix d'une technologie (qualité, coût, disponibilité, évolutivité...) ?**

La qualité (performance technique), le coût, la disponibilité, l'évolutivité, sont tous des critères pertinents, dont le poids respectif n'est pas évident. Le groupe s'est donc attaché à mener une analyse multi-critères.

- **Quelles performances comparées des technologies ITS-G5, LTE-V2X, 5G, avec quel niveau de certitude ?**
- **Performance technique** : les performances de l'ITS-G5 sont documentées par de nombreux essais terrain, celles du LTE-V2X principalement par des simulations. Il en ressort que tous deux répondent aux besoins des services Day 1, mais qu'aucun ne répond aux besoins des cas d'usages avancés d'automatisation. La 5G et la NGV, évolution annoncée de l'ITS-G5, devraient y répondre.
- **Disponibilité** : l'ITS-G5 dispose d'une disponibilité plus forte que le LTE-V2X. Il a fait l'objet de déploiement pilotes comme SCOOP@F, on trouve sur le marché des unités bord de route disponibles sur étagère et des déploiements de véhicules série équipés sont annoncés par Volkswagen dès 2019. Le LTE-V2X a fait l'objet de preuves de concept dans différents pays en 2018 et Lacroix City annonce la mise en vente d'unités bord de route LTE-V2X dès le premier trimestre 2019. La 5G sort du stade de la recherche et des projets démarrent en Europe pour explorer son utilisation pour le véhicule connecté.
- **Coût** : le coût des composants ITS-G5 est bien documenté par les résultats d'appels d'offres, il a été divisé par trois depuis les premiers appels d'offres de SCOOP@F. Le coût des composants LTE-V2X est annoncé légèrement supérieur mais d'un ordre de grandeur tout à fait similaire. Il en est de même pour les coûts de maintenance. Il est impossible à ce stade d'indiquer des éléments de coût de la 5G pour le véhicule connecté compte tenu de l'incertitude sur le business model.
- **Evolutivité** : il est prévu que l'évolution de l'ITS-G5, la NGV, soit « backwards compatible » et « forwards compatible » avec l'ITS-G5, il est également prévu que le 5G-V2X soit « backwards compatible » avec le LTE-V2X. L'évolution de l'ITS-G5 vers la 5G nécessite une hybridation qui a déjà été testée pour la 4G.
- **Quels besoins de couverture et quelle hiérarchisation du réseau routier, selon les différentes technologies ?**

L'étude socio-économique réalisée en 6.2 montre que les gains socio-économiques d'un déploiement sur le réseau routier national sans attendre la 5G sont largement supérieurs au coût du déploiement des unités bord de route, que ce soit en ITS-G5 ou en LTE-V2X. Elle permet également de prioriser les sections à équiper.

Avec les hypothèses prises (début de déploiement deux ans plus tard pour le LTE-V2X, même interdistance et coût légèrement supérieur pour le LTE-V2X), le bilan est meilleur pour l'ITS-G5.

On peut cependant signaler une étude britannique similaire qui part d'hypothèses différentes (pas de décalage de déploiement, interdistance légèrement supérieure pour le LTE-V2X,

même coûts) et aboutit à des conclusions opposées¹³. Cette même étude conclut en préconisant de ne pas s'engager sur des déploiements massifs à ce stade mais plutôt de continuer les expérimentations dans les deux technologies pour parfaire les connaissances techniques.

- **LTE-V2X : quel échéancier de développement ? quel impact sur les réseaux cellulaires 4G ? quelle interface avec le gestionnaire routier ?**

A ce stade le LTE-V2X n'a pas fait l'objet d'un déploiement pilote à grande échelle, c'est sans doute la prochaine étape. Le marché évolue vite et les premières unités bord de route sont annoncées par Lacroix City pour le premier trimestre 2019. On peut raisonnablement estimer que d'ici 2021 l'ensemble de l'écosystème sera disponible pour un déploiement massif. Le LTE-V2X n'a pas d'impact direct sur le réseau cellulaire 4G, il peut utiliser ce réseau en mode Uu comme l'ITS-G5 lorsqu'il y a hybridation. Les opérateurs télécom ne souhaitent pas déployer massivement des unités bord de route LTE-V2X, il s'agit donc comme pour l'ITS-G5 d'un déploiement par le gestionnaire routier.

- **5G : quel échéancier de normalisation, de développement, de déploiement ? quelle interface avec le gestionnaire routier ?**

L'échéancier de normalisation est présenté en Figure 3. Les échéances de développement et de déploiement sont plus floues, mais le plan d'action de la Commission européenne pour la 5G prévoit un calendrier européen commun pour un lancement commercial coordonné des services de 5G en 2020, notamment : la couverture 5G d'au moins une grande ville par Etat membre en 2020 et la couverture de toutes les zones urbaines et principaux axes de transport en 2025. En 5G, le gestionnaire routier reste au cœur de l'échange de données, il peut également déployer des unités bord de route 5G-V2X.

- **Quelle complémentarité entre l'ITS-G5 et la 5G ? entre le LTE-V2X et la 5G ? De manière générale, quelle complémentarité entre cellulaire et communication directe ?**

De façon générale, la communication directe permet des échanges en l'absence de couverture cellulaire, et une redondance lorsque c'est nécessaire. En attendant la 5G, la communication directe ITS-G5 ou LTE-V2X permet d'atteindre une meilleure latence qu'en passant par le cœur de réseau. Si la 5G est déployée avec une hybridation ou une rétro-compatibilité avec l'ITS-G5 ou le LTE-V2X, les véhicules et les unités bord de route déployés continueront de participer à l'écosystème.

- **Y a-t-il une solution avec double équipement ITS-G5/LTE-V2X côté véhicule ? Côté infrastructure ?**

Un double équipement n'est souhaité ni par les gestionnaires routiers ni par les constructeurs automobile en raison de son surcoût.

L'étude des performances techniques montre que les deux technologies permettent de réaliser sensiblement les mêmes cas d'usage (Day 1 à Day 2). Les cas d'usage Day 1 sont des cas d'usage informatifs qui ne nécessitent a priori pas la redondance que pourrait apporter un double équipement. La question peut se poser pour les cas d'usage Day 2.

¹³ Edward J. Oughton, 2018, Geospatial cost-revenue analysis for Vehicle-to-Infrastructure (V2I) connectivity in an Intelligent Transport System: Cellular V2X versus ITS-G5 deployment in Britain

- **Quelles possibilités de coexistence ou de partage entre l'ITS-G5 et le LTE-V2X dans la bande 5,9 GHz ?**

-
Le CEPT vient de rendre un rapport listant de grandes pistes. L'ETSI doit lancer un *work item* sur le sujet en janvier 2019 et explorer ces pistes pour septembre 2019.

- **La cybersécurité et le respect de la vie privée sont-ils discriminants entre les technologies ?**

A priori ils ne sont pas discriminants, mais le développement de la pile ITS complète avec sécurité en LTE-V2X reste à réaliser et devrait le confirmer.

- **Quels enjeux de certification ? De responsabilité ?**

L'acte délégué en cours de préparation par la Commission européenne devrait prévoir une obligation de certification des stations ITS, mais ceci n'est pas discriminant.

Le sujet de responsabilité intervient sur le couplage avec l'automatisation : celui-ci ouvre une question sur la responsabilité du gestionnaire routier, commune à l'ITS-G5 ou LTE-V2X. En 5G il y a une garantie des KPIs, le rôle de l'opérateur télécom est clair. Dans tous les cas, s'il n'y a pas de signal le véhicule doit rendre la main.

- **Quels enjeux de continuité de service ? Cela exclut-il les solutions de communication non directe entre véhicules ?**

Pour les cas d'usage de type Day 1 qui sont informationnels, il n'y a pas d'enjeu de couverture à 100%. Cependant les gains augmentent fortement avec la couverture comme le montre l'étude socio-économique.

Les cas d'usage de connexion du véhicule automatisé avec l'infrastructure (chantier, péage, carrefour, fusion de voies, zones d'insertion...) sont des cas d'usage localisés. Le déploiement est donc prioritaire dans ces zones-là.

La 4G en communication non directe ne répond pas aux cas d'usage les plus critiques en termes de latence et l'échéancier de couverture des 50000 km d'axes prioritaires aboutit à l'horizon 2027.

Une question importante en matière de continuité de service en cellulaire est l'itinérance à la frontière, traitée dans des projets en cours (5GCroco).

- **Quels coûts pour chaque acteur et quel business model selon les différentes technologies ?**

Si le bilan socio-économique d'un déploiement des STI coopératifs est indiscutablement positif, la propension à payer du conducteur pour le service n'est pas démontrée. Les constructeurs considèrent que les services de sécurité routière sont difficilement vendables car perçus comme un dû pour le conducteur. La construction de bouquets de services associant des services de sécurité routière à d'autres services de confort, comme les itinéraires conseillés ou l'information sur les places de stationnement, pourrait débloquer la propension à payer.

Côté infrastructure, l'ITS-G5 et le LTE-V2X peuvent s'envisager selon un business model similaire où l'investissement est directement supporté par le gestionnaire routier qui déploie des unités bord de route.

Le business model de la 5G apparaît différent et encore incertain. On peut imaginer deux possibilités polaires :

- Possibilité 1 : les nombreux cas d'usage non véhiculaires de la 5G, et notamment les cas d'usage de confort du passager du véhicule, laissent espérer une fourniture du service V2X au coût marginal par l'opérateur télécom.
- Possibilité 2 : le couvreur de certains axes est imposé aux opérateurs télécom, mais ceci a un surcoût qui pourrait nécessiter la mise à contribution des acteurs des transports.

- Quelle gouvernance au niveau français ?

Le présent groupe de travail a, pour la première fois, réuni les trois acteurs fondamentaux de l'écosystème des STI coopératifs : les constructeurs automobile, les gestionnaires routiers et les opérateurs télécom. L'apport d'un quatrième type d'acteurs, les académiques, s'est avéré fondamental. Cette gouvernance a permis de dépassionner le débat et de construire les conclusions présentées ici.

En phase opérationnelle, si chaque acteur restera maître de ses décisions de déploiement, le dialogue doit se poursuivre pour permettre des déploiements coordonnés.

Il est donc proposé de pérenniser un groupe dans une configuration similaire.

Ce groupe pourrait également conseiller l'Etat pour les choix qui lui incomberont à venir, notamment en matière de sécurité des STI coopératifs, et se positionner également en miroir de la gouvernance communautaire.

- Quelle coordination avec la stratégie européenne ? Avec la stratégie française de développement du véhicule autonome ?

La stratégie européenne est double : celle de la DG MOVE vise un déploiement des services Day 1 dès 2019, celle de la DG CNECT vise une couverture des axes de transport majeurs en 5G en 2025. Cette stratégie semble orienter vers un scénario débutant par l'ITS-G5 et se poursuivant par la 5G, mais il ne s'agit que d'un critère à noter dans notre analyse multi-critères.

La stratégie française pour le développement du véhicule autonome met déjà en exergue l'importance de la connectivité. Parmi les actions prévues figurent les actions suivantes :

- Les gestionnaires routiers seront invités à réfléchir à un plan de déploiement de la connectivité, basée sur les technologies matures à ce jour.
- Une étude sera lancée afin d'évaluer la pertinence de la couverture de différentes sections-types du réseau routier en différentes technologies de connectivité (incluant la 5G), pour les besoins du cas d'usage de véhicule connecté et du véhicule automatisé et connecté.

Le présent rapport confirme le rôle central des gestionnaires routiers dans l'investissement pour la technologie ITS-G5, mais aussi pour la technologie LTE-V2X. Un scénario démarrant par l'ITS-G5 est sans doute compatible avec cette stratégie, un scénario démarrant par le LTE-V2X peut également être considéré compatible.

Par ailleurs, l'étude socio-économique menée constitue une première réponse à la seconde question. Des approfondissements pourront être menés sur la problématique du véhicule automatisé et sur les réseaux routiers secondaires.

- Quels sont les orientations des autres pays dans le monde sur ces sujets ?

Le benchmark international présenté en 2.5 montre que la bande de fréquences 5.9 GHz est dédiée au DSRC (équivalent ITS-G5) aux Etats-Unis, au LTE-V2X en Chine. Cependant, derrière ces cas polaires se cachent des situations très contrastées. De façon globale, le sujet reste largement ouvert dans le monde. Il convient de continuer à surveiller les évolutions mondiales afin de ne pas isoler les industriels français et européens.

- Conclusion : quels scénarios de déploiement ? quelles conditions de réalisation ?

En conclusion, on peut imaginer quatre scénarios concernant les investissements dans la bande 5,9 GHz :

- **scénario 1** : déploiement de l'ITS-G5 à partir de 2019, suivi de la 5G lorsque celle-ci sera disponible,
- **scénario 2** : déploiement de la technologie LTE-V2X à partir de 2021, suivi de la 5G lorsque celle-ci sera disponible,
- **scénario 3** : pas d'investissement massif tant que la 5G n'est pas opérationnelle, ce qui devrait arriver vers 2025,
- **scénario 4** : déploiement de l'ITS-G5 à partir de 2019, suivi d'une future technologie NGV lorsqu'elle sera disponible.

Par ailleurs, les scénarios 1 et 2 peuvent être conciliés dans un scénario intermédiaire 1.5 qui consisterait à continuer les expérimentations dans les deux technologies et de conclure plus tard une fois que les connaissances techniques seront approfondies.

Le groupe de travail n'a pas conclu en faveur de l'un ou l'autre des scénarios.

L'analyse multi-critères du groupe est présentée ci-dessous :

	Scénario 1 ITS-G5 puis 5G	Scénario 2 LTE-V2X puis 5G	Scénario 3 Attendre 5G	Scénario 4 ITS-G5 puis NGV
Disponibilité pour un déploiement massif	2019	2021 environ	2025 environ	2019
Performance technique	G5 OK Day 1 à 2 5G OK Day 3	LTE-V2X OK Day 1 à 2 5G OK Day 3	5G OK Day 1 à 3	G5 OK Day 1 à 2 NGV OK Day 3
Coût	G5 coût proche de LTE-V2X 5G coût marginal ou contribution des acteurs transport ?	LTE-V2X coût proche de G5 Coût du brevet 5G coût marginal ou contribution des acteurs transport ?	5G coût marginal ou contribution des acteurs transport ?	G5 coût proche de LTE-V2X NGV nouvel investissement
Facilité de l'évolution	Hybridation, pas backwards compatibility	Facile, backwards compatibility	Sans objet	Facile, backwards et forward compatibility
Bilan socio-économique	Scénario de référence + 1,8 Md€	Scénario de référence + 1,2 Md€	Scénario de référence	Non évalué
Cybersécurité	Non discriminant	Non discriminant	Non discriminant	Non discriminant
Business model	Investissement gestionnaires routiers BM 5G à définir	Investissement gestionnaires routiers BM 5G à définir	BM 5G à définir	Investissement gestionnaires routiers

	Scénario 1 ITS-G5 puis 5G	Scénario 2 LTE-V2X puis 5G	Scénario 3 Attendre 5G	Scénario 4 ITS-G5 puis NGV
Conformité stratégie DG MOVE	OK	NOK	NOK	OK
Conformité stratégie DG CNECT	OK	OK	OK	NOK
Conformité stratégie VA	OK	OK ?	NOK	OK

Références

- [A1] ETSI EN 302 663, Intelligent Transport Systems (ITS); Access layer specification for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band, European Standard, V1.2.1, July 2013
- [A2] IEEE 802.11-2012: IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks-Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, March 2012
- [A3] ETSI TR 302 665 Intelligent Transport Systems (ITS); Communications Architecture, V1.1.1, September 2009
- [A4] ETSI TS 102 687 Intelligent Transport Systems (ITS); Decentralized Congestion Control Mechanisms for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz range; Access layer part, V1.2.1, April 2018
- [A5] ETSI TS 102 636-4-2 Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 4: Geographical addressing and forwarding for point-to-point and point-to-multipoint communications; Sub-part 2: Media-dependent functionalities for ITS-G5, V1.1.1, September 2014.
- [A6] Gozálvarez, Javier, Miguel Sepulcre, and Ramon Bauza. "IEEE 802.11 p vehicle to infrastructure communications in urban environments." *IEEE Communications Magazine* 50, no. 5 (2012).
- [A7] Böhm, Annette, Kristoffer Lidström, Magnus Jonsson, and Tony Larsson. "Evaluating CALM M5-based vehicle-to-vehicle communication in various road settings through field trials." In *Local Computer Networks (LCN)*, 2010 IEEE 35th Conference on, pp. 613-620. IEEE, 2010.
- [A8] Boban, Mate, Tiago TV Vinhoza, Michel Ferreira, Joao Barros, and Ozan K. Tonguz. "Impact of vehicles as obstacles in vehicular ad hoc networks." *IEEE journal on selected areas in communications* 29, no. 1 (2011): 15-28.
- [A9] Mireles, Rui, Mate Boban, Peter Steenkiste, Ozan K. Tonguz, and Joao Barros. "Experimental study on the impact of vehicular obstructions in VANETs." In *VNC*, pp. 338-345. 2010.
- [A10] Bernadó, Laura, Anna Roma, Alexander Paier, Thomas Zemen, Nicolai Czink, Johan Karedal, Andreas Thiel, Fredrik Tufvesson, Andreas F. Molisch, and Christoph F. Mecklenbrauker. "In-tunnel vehicular radio channel characterization." In *Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2011 IEEE 73rd, pp. 1-5. IEEE, 2011.
- [A11] Bai, Fan, and Hariharan Krishnan. "Reliability analysis of DSRC wireless communication for vehicle safety applications." In *Intelligent Transportation Systems Conference*, 2006. ITSC'06. IEEE, pp. 355-362. IEEE, 2006.
- [A12] Paier, A., R. Tresch, A. Alonso, D. Smely, P. Meckel, Y. Zhou, and N. Czink. "Average downstream performance of measured IEEE 802.11 p infrastructure-to-vehicle links." In *Communications Workshops (ICC)*, 2010 IEEE International Conference on, pp. 1-5. IEEE, 2010.
- [A13] Shagdar, Oyunchimeg, "Evaluation of Distributed Congestion Control –Reactive DCC," Inria, Research Report, Dec. 2014. [Online]. Available: <https://hal.inria.fr/hal-01107740>
- [A14] Shagdar, O., Tsukada, M., Kakiuchi, M., Toukabri, T., & Ernst, T. (2012, June). Experimentation towards IPv6 over IEEE 802.11 p with ITS Station Architecture. In *International Workshop on IPv6-based Vehicular Networks* (colocated with IEEE Intelligent Vehicles Symposium).
- [A15] Yao, Yuan, Lei Rao, Xue Liu, and Xingshe Zhou. "Delay analysis and study of IEEE 802.11 p based DSRC safety communication in a highway environment." In *INFOCOM*, 2013 Proceedings IEEE, pp. 1591-1599. IEEE, 2013.
- [A16] Karlsson, Kristian, Carl Bergenhem, and Erik Hedin. "Field measurements of IEEE 802.11 p communication in NLOS environments for a platooning application." In *Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, 2012 IEEE, pp. 1-5. IEEE, 2012.
- [A17] Bergenhem, Carl, Erik Hedin, and Daniel Skarin. "Vehicle-to-vehicle communication for a platooning system." *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 48, no. 2012 (2012): 1222-1233.
- [A18] Bellache, Thiwiza, Oyunchimeg Shagdar, and Samir Tohme. "DCC-enabled contention based forwarding scheme for VANETs." In *Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, pp. 1-8. IEEE, 2017.
- [A19] https://www.its.dot.gov/research_archives/safety/safety_pilot_plan.htm
- [A20] <https://www.its.dot.gov/factsheets/pdf/SafetyPilotModelDeployment.pdf>
- [A21] <http://wiki.fot-net.eu/index.php/SCOREF>
- [A22] http://wiki.fot-net.eu/index.php/DRIVE_C2X
- [A23] <https://itscorridor.mett.nl/c-its+corridor/default.aspx>
- [A24] <http://intercor-project.eu/>
- [A25] <http://www.scoop.developpement-durable.gouv.fr/en/project-r2.html>
- [A26] <https://www.c-roads.eu/platform.html>
- [A27] <https://www.roadtraffic-technology.com/projects/the-sartre-project/>
- [A28] <https://imagine-online.de/en/home/>
- [A29] <https://www.volvogroup.com/en-en/news/2017/oct/trucks-talking-to-each-other-in-multi-brand-platooning-project.html>
- [A30] www.autocits.eu
- [A31] <https://project.inria.fr/pacv2x/>
- [A32] NHTSA Federal Motor Vehicle Safety Standards; V2V Communications. Notice of Proposed Rulemaking (NPRM) Fed. Regist. 2017;82:3854-4019.
- [A33] Renault: <https://media.group.renault.com/global/en-gb/renault/media/pressreleases/21200353/renault-prepare-les-infrastructures-pour-la-voiture-autonome-et-connectee-de-demain-avec-scoop>
- [A34] VW refers to ITS-G5 technology as WLANp or pWLAN, <https://www.volkswagenag.com/en/news/2017/06/pwlan.html>
- [A35] Toyota refers to the V2X technology as DSRC, the US IEEE 802.11p related V2X technology <https://corporatenews.pressroom.toyota.com/releases/toyota+and+lexus+to+launch+technology+connect+vehicles+in+infrastructure+in+u+s+2021.htm>

- [A36] https://media.gm.com/media/cn/en/gm/news.detail.html/content/Pages/news/cn/en/2018/June/0606_Cadillac-Lineup.html
- [A37] <http://www.cadillacwisconsin.com/V2V-Communication-Brookfield-WI>
- [A38] <https://www.auto-talks.com/audi-autotalks-completed-integration-v2x-applications-small-form-factor-roof-antenna/>
- [A39] Deliverable T4.2.1, Workshop ITS Hybrid Communication, H2020 Mobility for Growth, MG-2014_SingleStage_B, Coordination and Support Action, September 2017.
- [A40] M. F. Feteiha and H. S. Hassanein, "Enabling cooperative relaying VANETclouds over LTE-A networks," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 64, no. 4, pp. 1468–1479, Apr. 2015.
- [A41] Ucar, S., Ergen, S.C. and Ozkasap, O., 2016. Multihop-cluster-based IEEE 802.11 p and LTE hybrid architecture for VANET safety message dissemination. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 65(4), pp.2621-2636.
- [A42] Hu, Q., Wu, C., Zhao, X., Chen, X., Ji, Y. and Yoshinaga, T., 2018. Vehicular Multi-Access Edge Computing With Licensed Sub-6 GHz, IEEE 802.11 p and mmWave. IEEE Access, 6, pp.1995-2004.
- [A43] IEEE 802.11-18/0513r2, 802.11 for Next Generation V2X Communication, March 2018.
- [A44] IEEE 802.11-18/0861r8, IEEE P802.11 Wireless LANs, 802.11 NGV Proposed PAR, August 2018.
- [A45] IEEE 802.11-18-1323/r2, NGV SG Use Cases (Next Generation V2X Study Group), July 2018.
- [B1] 3GPP TS 22.186: "Enhancement of 3GPP support for V2X scenarios; Stage 1".
- [B2] 3GPP, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2 (v14.3.-, Release 14)," 3GPP, Tech. Rep. 36.300, June 2017
- [B3] 3GPP TS 24.386: "User Equipment (UE) to V2X control function; protocol aspects; Stage 3".
- [B4] 3GPP TS 33.185: "Security aspect for LTE support of V2X services".
- [B5] 3GPP TS 36.321: "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) protocol specification".
- [B6] 3GPP TS 22.185: "Service requirements for V2X services".
- [B7] ISO TS 17419:2014: "Intelligent Transport Systems - Cooperative systems - Classification and management of ITS applications in a global context".
- [B8] IEEE Std 1609.12-2016: "[IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments \(WAVE\) - Identifier Allocations](#)".
- [B9] 3GPP TS 23.303: "Proximity-based Services (ProSe); Stage 2".
- [B10] ISO 29281-1:2013: "Intelligent Transport Systems - Communications access for land mobiles (CALM) - Non-IP networking - Part 1: Fast networking & transport layer protocol (FNTP)".
- [B11] ETSI TS 102 637- 2 V1.2.1: "Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service".
- [B12] ETSI TS 102 637- 3 V1.1.1: "Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 3: Specifications of Decentralized Environmental Notification Basic Service". 3GPP TS 32.277: "Proximity-based Services (ProSe) charging".
- [B13] V2X White Paper v1.0, NGMN Alliance, 17-06-2018
- [B14] Luoto, Petri, et al. "System level performance evaluation of LTE-V2X network." *European Wireless 2016; 22th European Wireless Conference; Proceedings of*. VDE, 2016.
- [B15] Rafael Molina-Masegosa and Javier Gozalvez. Lte-v for sidelink 5g v2x vehicular communications: a new 5g technology for short-range vehicle-to-everything communications. IEEE Vehicular Technology Magazine, 12(4):30–39, 2017.
- [B16] Andrew Turley, Kees Moerman, Alessio Filippi, Vincent Martinez "C-ITS: Three observations on LTE-V2X and ETSI ITS-G5-- A comparison" NXP.
- [B17] Filippi, Alessio, et al. "IEEE 802.11 p Ahead of LTE-V2V for Safety Applications." *Autotalks NXP*(2017).
- [B18] Filippi, Alessio, et al. "Ready to roll: Why 802.11 p beats LTE and 5G for V2x." *WhitePaper by NXP Semiconductors, Cohda Wireless and Siemens. Nijmegen, Teh Netherlands: NXP Semiconductors*(2016).
- [B19] A whitepaper by NXP Semiconductors, Cohda Wireless and Siemens, Alessio Filippi, Kees Moerman, Gerardo Daalderop, Paul D. Alexander, Franz Schober, and Werner Pfliegl
- [B20] A keynote by President of Huawei at IEEE ICC 2018, YongXing Zhou, "Bring 5G into reality"
https://www.youtube.com/watch?v=0vaZmlI_qGU
- [B21] Presentation by Qualcomm "<https://fr.slideshare.net/qualcommwiressevolution/powerpointmessagin-cellular-v2x>"
- [B22] Experimental results publics – 5G-AA (Ford and Qualcomm),
<https://www.qualcomm.com/media/documents/files/5gaa-the-case-for-c-v2x.pdf>
- [B23] 3GPP, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) protocol specification (v14.3.0, Release14)," 3GPP, Tech. Rep. 36.321, June 2017.
- [B24] 3GPP, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification (v14.3.0, Release14)," 3GPP, Tech. Rep. 36.331, July 2017.
- [B25] Intel Corporation, "R1-1702143. Evaluation of congestion control schemes for V2V communication," presented at 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #88, Athens, Greece, Feb. 2017.
- [B26] 3GPP, "Study on enhancement of 3GPP support for 5G V2X services (v15.0.0, Release 15)," 3GPP, Tech. Rep. 22.886, Mar. 2017.
- [B27] 3GPP MCC Support. "Draft Report of 3GPP TSG RAN WG1 #89 v0.2.0," presented at 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #89, Hangzhou, China, May 2017.
- [B28] <https://www.ngmn.org/news/ngmn-news-and-press-releases/ngmn-news-and-press-releases-details/ngmn-alliance-backs-c-v2x-technology-for-the-connected-car-eco-system.html>
- [B29] 3GPP, "Study on LTE-based V2X services (v14.0.0, Release 14)," Tech. Rep. 36.885, July 2016.
- [B30] http://5gaa.org/wp-content/uploads/2018/11/P-180106-V2X-Functional-and-Performance-Test-Report_Final_051118.pdf
- [B31] <http://5gaa.org/wp-content/uploads/2018/05/3.-The-C-V2X-Proposition-Ford.pdf>

- [B32] Nardini, Giovanni, et al. "Cellular-V2X Communications for Platooning: Design and Evaluation." *Sensors* 18.5 (2018): 1527.
- [B33] ETSI TS 102 940 V1.3.1, "Intelligent Transport Systems (ITS); Security; ITS communications security architecture and security management", April 2018
- [B34] 3GPP TS 23.285 "Architecture enhancement for V2X services", Technical Specifications, 2018.
- [C1] Akyildiz, Ian F., et al. "5G roadmap: 10 key enabling technologies." *Computer Networks* 106 (2016): 17-48
- [C2] Qualcomm: Accelerating C-V2X commercialization, presentation, 2017. 5G Automotive Vision, 5gppp, October 20, 2015, report.
- [C3] Shah, Syed Adeel Ali, et al. "5g for vehicular communications." *IEEE Communications Magazine* 56.1 (2018): 111-117.
- [C4] Liang, Le, et al. "Vehicular communications: A physical layer perspective." *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 66.12 (2017): 10647-10659.
- [C5] 5G-Huawei, 5G Spectrum Public Policy Position , Huawei, 2018
- [C6] Iwabuchi et al, "Evaluation of Coverage and Mobility for URLLC via Outdoor Experimental Trials". *2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 3-6 June 2018, Porto, Portugal. DOI: [10.1109/VTCSpring.2018.8417815](https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2018.8417815)
- [C7] Iwabuchi et al, "5G Field Experimental Trials on URLLC Using New Frame Structure". *2017 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 4-8 Dec. 2017, Singapore, Singapore. DOI: [10.1109/GLOCOMW.2017.8269130](https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2017.8269130)
- [C8] Maaz et al, "URLLC User Plane Latency Performance in New Radio". *2018 25th International Conference on Telecommunications (ICT)*, June 2018. DOI: 10.1109/ICT.2018.8464912
- [C9] Hytonen et al, "Coordinated multi-cell resource allocation for 5G ultra-reliable low latency communications". *2017 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*, 12-15 June 2017, Oulu, Finland. DOI: [10.1109/EuCNC.2017.7980737](https://doi.org/10.1109/EuCNC.2017.7980737)
- [C10] Yoshioka et al, "Field experimental evaluation of beamtracking and latency performance for 5G mmWave radio access in outdoor mobile environment". *2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 4-8 Sept. 2016, Valencia, Spain. DOI: [10.1109/PIMRC.2016.7794604](https://doi.org/10.1109/PIMRC.2016.7794604)
- [C11] Beyranvand et al, "Toward 5G: FiWi Enhanced LTE-A HetNets With Reliable Low-Latency Fiber Backhaul Sharing and WiFi Offloading". *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 25 (2), 690 – 707, 2017. DOI: [10.1109/TNET.2016.2599780](https://doi.org/10.1109/TNET.2016.2599780)
- [C12] Pocovi et al, "Joint Link Adaptation and Scheduling for 5G Ultra-Reliable Low-Latency Communications". *IEEE Access*, 6, 28912 – 28922, 2018. DOI: [10.1109/ACCESS.2018.2838585](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2838585)
- [C13] Jacobsen et al, "System Level Analysis of Uplink Grant-Free Transmission for URLLC". *2017 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 4-8 Dec. 2017, Singapore, Singapore. DOI: [10.1109/GLOCOMW.2017.8269137](https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2017.8269137)
- [C14] Mountaser et al, "Reliable and Low-Latency Fronthaul for Tactile Internet Applications". *IEEE Journal on Selected Areas in Communications (Early Access)*, 2018. DOI: [10.1109/JSAC.2018.2872299](https://doi.org/10.1109/JSAC.2018.2872299)

Annexe A. Hypothèses et paramètres de simulation pour la couverture LTE-V2X

A.1 Scénario d'évaluation

Les résultats de performance de C-V2X et DSRC sont obtenus à partir de simulations au niveau du système. Les hypothèses retenues pour l'évaluation sont dérivées du 3GPP. Les performances du système sont examinées en considérant deux environnements :

- Urbain: vitesse du véhicule de 15 km / h et 60 km / h, les véhicules circulent sur deux voies par direction.
- Autoroute: vitesse du véhicule de 70 km / h et 140 km / h, les véhicules circulent sur trois voies par direction.

Les paramètres de configuration et les valeurs sont indiqués en Figure 1.

Parameter		Value
Carrier frequency		PC5 based V2V& DSRC: 5.9GHz
Bandwidth		PC5 based V2V & DSRC: 10MHz
Number of carriers		1
Synchronization	Frequency Error	Two assumptions for DSRC and LTE-V2X PC5 are made <ul style="list-style-type: none"> - Constant frequency error [Reference Annex B.7] - Uniformly distributed frequency error [Reference Annex B.7]
	Time Error	Assumed ideal for LTE-V2X PC5 and DSRC
Vehicle UE	In-band emission	For LTE-V2X defined in [3GPP TR 36.843, A.2.1.5]
	Antenna height	1.5m
	Antenna pattern	Omni 2D
	Antenna gain	3dBi
	Maximum transmit power	23dBm
	Number of antennas	1 TX and 2 RX antennas for LTE-V2X PC5 and DSRC. Baseline is that 2 RX antennas are separated by wavelength/2.
	Noise figure	9dB

Figure 1: Paramètres de simulation.

A.2 Configuration de scénario et modèle de mobilité

Parameter	Urban case	Freeway case
Number of lanes	2 in each direction (4 lanes in total in each street)	3 in each direction (6 lanes in total in the freeway)
Lane width	3.5m	4m
Road grid size by the distance between intersections	433m * 250m. Note that 3m is reserved for sidewalk per direction (i.e., no vehicle or building in this reserved space)	N/A
Simulation area size	Minimum [1299m * 750m]	Freeway length >= 2000m. Wrap
		around should be applied to the simulation area.
Vehicle density	Average inter-vehicle distance in the same lane is 2.5m (baseline) or $4s \cdot \text{absolute vehicle speed}$. Baseline: The same density/speed in all the lanes in one simulation.	
Absolute vehicle speed	15 km/h, 60 km/h	140 km/h, 70 km/h

Figure 2: Configuration du scénario.

L'emplacement des véhicules utilitaires dans des scénarios urbains et autoroutiers suit les valeurs obtenues à partir d'un processus de Poisson spatial. La distance de sécurité minimale supposée entre véhicules dépend de la vitesse configurée pour la simulation spécifique. La mobilité est supposée dans les deux scénarios avec un paramètre supplémentaire pour prendre en compte la direction souhaitée aux intersections en milieu urbain. Les valeurs de probabilité suivantes sont appliquées:

- Allez tout droit: 0.5
- Tourner à gauche: 0.25
- Tourner à droite: 0,25

Les détails du modèle de mobilité et d'abandon de l'UE dans les véhicules en milieu urbain et autoroutier sont illustrés sur la figure 2. La configuration de la route est illustrée sur la figure 3 et celle de l'autoroute sur la figure 4.

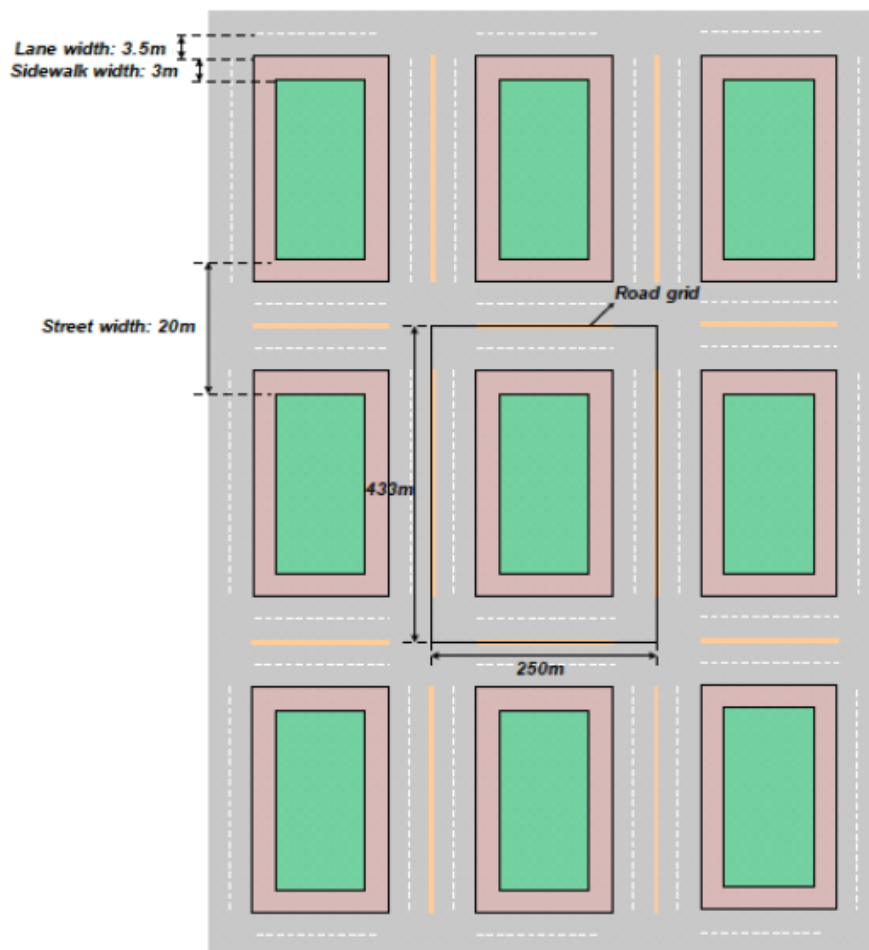


Figure 3: Configurations routières en milieu urbain.

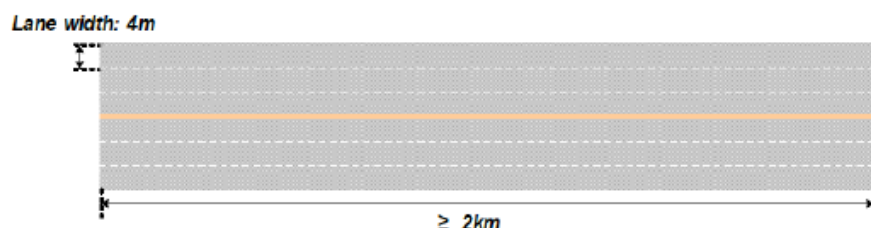


Figure 4: Configuration routière pour environnement autoroutier.

A.3 Modèle de canal

Les valeurs indiquées dans la Figure 5 décrivent les configurations du canal radio.

Parameter		Urban case	Freeway case
Pathloss model	Description	WINNER+ B1 Manhattan grid layout	LOS in WINNER+ B1
	Antenna Hight	1.5m	
	Pathloss (< 3m)	Pathloss at 3m	
Shadowing distribution		Log-normal	
Shadowing standard deviation		Line of Sight (LOS): 3dB Non-Line of Sight (NLOS): 4dB	3dB
Decorrelation distance		10m	25m
Fast fading		NLOS with fixed large-scale parameters during the simulation defined in [TR 36.843, A.2.1.2.1.1 or A.2.1.2.1.2].	

Figure 5: Configuration du modèle de canal pour V2V.

A.4 Modèle de trafic pour V2V

Le trafic de données dans ce scénario est soit généré de manière récurrente, puis périodique, soit généré après qu'un seul événement se soit produit. La simulation au niveau du système distingue le trafic de données généré sur la couche application:

- Périodique: message de 300 octets suivi de quatre messages de 190 octets. L'instance de temps pour générer un message de 300 octets est randomisée parmi les véhicules du scénario spécifique. L'heure d'arrivée entre les messages est de 100 ms dans chaque scénario.
- Déclenchement sur événement: six messages de 800 octets avec une heure d'arrivée entre messages de 100 ms. La probabilité que le premier message soit généré suit un processus de Poisson avec un taux d'arrivée spécifique par seconde et par véhicule.

Il est obligatoire d'évaluer le trafic de données périodique. Toutefois, les entreprises ont également décidé de prendre en compte le trafic périodique lors de l'évaluation du trafic facultatif déclenché par un événement. Pour chaque message de couche application, la surcharge supplémentaire de la couche Liaison peut ou non être prise en compte dans l'évaluation, voir la Figure 6

Technology	Layer 2 Protocol Control Information					
	Sublayer	MAC	RLC	LLC	PDCP	
LTE-V2X		10 byte	1 byte	—	5 byte	Total: 16 byte
DSRC		30 byte	—	8 byte	—	Total: 38 byte

Figure 6: Informations de contrôle de protocole supplémentaires.

A.5 Métriques de Performance: Fiabilité et couverture de communication

Les performances du système sont évaluées en termes de rapport de réception de paquet (PRR). Cette métrique indique le nombre d'EU ayant reçu avec succès un paquet de données transmis (noté X) par rapport au nombre total d'UE (notés Y) dans la distance d'intérêt.

Le calcul de la fonction de distribution cumulative (CDF) prend en compte la distance entre l'émetteur et le récepteur de la plage (a, b).

Annexe B. Paramètres de simulation pour la latence LTE-V2X

Configuration	DSRC	C-V2X (PC5 Mode 4)
Channel	Channel 172	5860 MHz (Channel 172)
Bandwidth	10 MHz	10 MHz
Modulation	QPSK $\frac{1}{2}$ (6 Mbps burst rate)	QPSK 0.46 (MCS 5)
Application Used	Savari	Savari
Tx/Rx Configuration	1 Tx 2 Rx	1 Tx 2 Rx
Device Details	Savari MW1000	Qualcomm Roadrunner platform
HARQ	NA	Enabled
Tx Power	21 dBm	21 dBm
Packet Size	193 Bytes	193 Bytes (5 Sub-Channels)*

* Sub-Channel size = 5 RB

Figure 1: Paramètres de simulation

Configuration de test avec le bruit AWGN:

Ce test utilise une configuration câblée en laboratoire, comme le montre la figure 2. Un Fader Box est utilisé pour générer un AWGN dans la gamme de fréquences du canal, et le périphérique 2 (récepteur) est configuré pour recevoir des données du périphérique 1 sur le même canal.

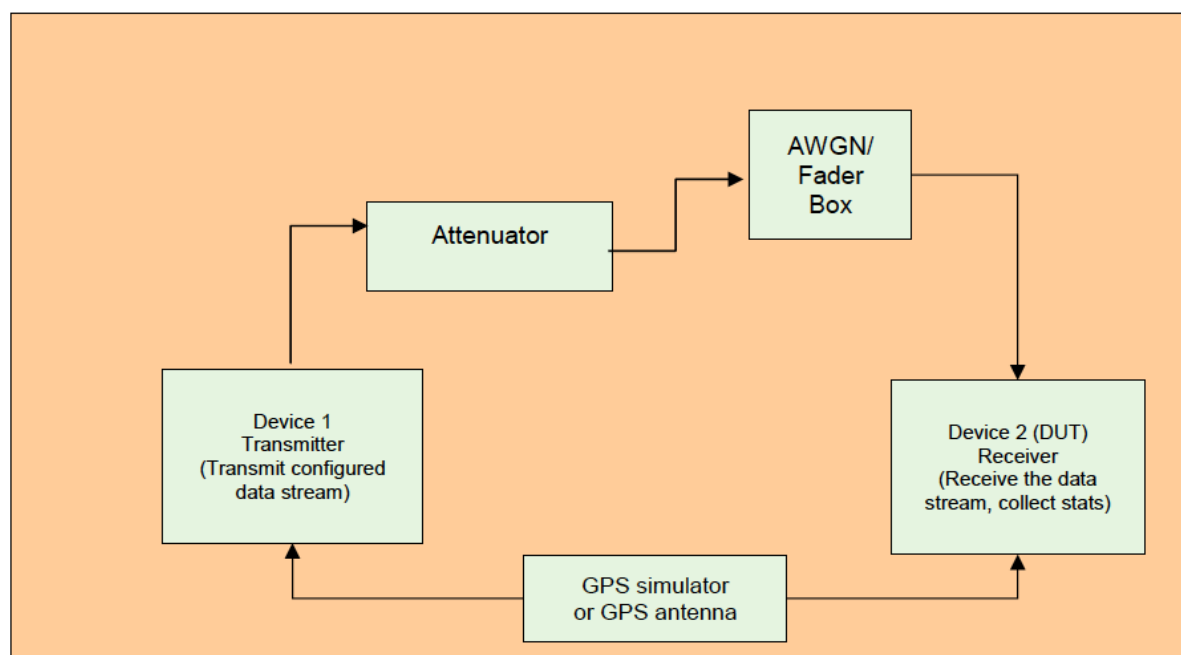


Figure 2: Configuration de test avec le bruit AWGN

Configuration de test sans bruit AWGN

Ce test a utilisé une configuration câblée en laboratoire, comme dans la figure 2, mais sans le fader. Un C-V2X (récepteur) est configuré pour recevoir des données sur la bande ITS (canal 172) avec une bande passante de 10 MHz. Chaque OBU C-V2X a été placé dans un boîtier blindé contre les radiofréquences pour tenir compte d'éventuelles fuites.

