



**HAL**  
open science

# Stabilisation de service dans les infrastructures à connectivité polymorphe

Lucas Bréhon–Grataloup, Rahim Kacimi, André-Luc Beylot

## ► To cite this version:

Lucas Bréhon–Grataloup, Rahim Kacimi, André-Luc Beylot. Stabilisation de service dans les infrastructures à connectivité polymorphe. 10èmes Rencontres Francophones sur la Conception de Protocoles, l'Évaluation de Performances et l'Expérimentation des Réseaux de Communication (CORES), Jun 2025, Saint Valery-sur-Somme, France. ⟨hal-04995199⟩

**HAL Id: hal-04995199**

**<https://hal.science/hal-04995199v1>**

Submitted on 18 Mar 2025

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

# Stabilisation de Service dans les Infrastructures à Connectivité Polymorphe

Lucas Bréhon--Grataloup<sup>1 †</sup> et Rahim Kacimi<sup>2</sup> et André-Luc Beylot<sup>2</sup>

<sup>1</sup>SAMOVAR, Télécom SudParis, Institut Polytechnique de Paris, 91120 Palaiseau, France

<sup>2</sup>IRIT, Université de Toulouse, CNRS, Toulouse INP, UT3, Toulouse, France

---

Afin de permettre une communication fiable et à faible latence dans la ville du futur, les véhicules doivent échanger de manière transparente de grands volumes de données entre eux et avec les éléments d'infrastructure routière. Les scénarios urbains, caractérisés par de multiples obstacles et des changements de couverture réseau, impactent souvent la stabilité de connectivité et dégradent les performances. Nous présentons une double approche qui s'appuie sur les technologies de communication V2X les plus répandues (C-V2X, ITS-G5, LTE et 5G) pour améliorer la connectivité et atténuer les perturbations réseau. Notre solution proactive combine une analyse des performances des liens et une cartographie de la qualité du service radio, en guidant les véhicules vers des bascules de technologies d'accès radio optimales en fonction de leur emplacement. En outre, nous explorons les techniques de relais de paquets à l'aide du sidelink C-V2X, où les nœuds intermédiaires relaient les données pour étendre la couverture réseau dans des conditions de fortes perturbations. Une vaste campagne expérimentale impliquant des véhicules autonomes connectés démontre la haute performance à courte portée du ITS-G5, ainsi que la résilience *device-to-device* étendue du C-V2X. D'autre part, les bascules verticales proactives engendrent une réduction significative de la latence par rapport au mécanisme existant de repli cellulaire. Ces travaux soulignent le potentiel d'un relais V2X et de bascules verticales proactives s'appuyant sur la cartographie pour une communication robuste dans les réseaux de mobilité urbaine.

**Mots-clés :** Véhicules autonomes connectés, V2X, Bascule verticale, Relayage, Plateforme

---

## 1 Introduction

Les communications véhiculaires dans la ville connectée motivent le déploiement à grande échelle des réseaux mobiles 5G et au-delà. Amélioré par des protocoles de communication dédiés, le véhicule autonome connecté (VAC) peut offrir une variété de services, allant de la sécurité routière à la conduite à distance. En outre, le paradigme Multi-access Edge Computing (MEC) s'adapte au contexte de la ville intelligente, avec des temps de propagation réduits pour demander des ressources serveur, mais il soulève le besoin d'une connectivité stable pour assurer une livraison fiable et efficace des données [ETS18].

La connectivité des véhicules est assurée par de multiples interfaces et protocoles de mise en réseau, mais leur mécanisme de sélection reste à déterminer. Chacune de ces technologies d'accès radio (RAT) s'accompagne de ressources radio spécifiques, de méthodes d'accès et de performances contextuelles globales.

La sélection multi-RAT optimale dépend donc fortement des conditions dans lesquelles un véhicule cherche à transmettre des messages. Cette situation devient encore plus complexe dans un contexte urbain, il est donc nécessaire de mener des recherches sur les moyens d'améliorer la couverture et la sélection des RAT dans des conditions de réseau particulièrement instables.

Nous présentons un mécanisme de bascule avant rupture (*make-before-break*) qui sélectionne l'interface la plus appropriée entre ITS-G5, 5G-V2X PC5, 5G-V2X Uu et LTE-V2X Uu, en fonction de la performance mesurée à une position donnée. De plus, nous étudions les performances du relayage de paquets *device-to-device* (D2D) dans un contexte véhiculaire urbain. Ce travail s'inscrit dans le cadre de la plateforme autOCampus, transformant un campus universitaire en un site intelligent, innovant et écologique [IRI24].

---

<sup>†</sup>Contact : lucas.brehon-grataloup@telecom-sudparis.eu

Ce travail est inspiré de nos contributions présentées aux conférences IEEE LCN 2023 et IEEE Globecom 2024.

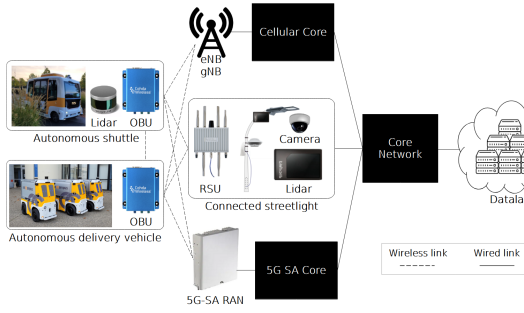


FIGURE 1 – Les équipements constitutifs de l’infrastructure autOCampus

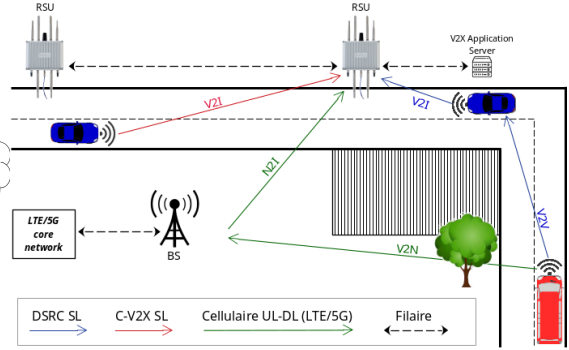


FIGURE 2 – Un ensemble de communications V2X. La zone hachurée représente une obstruction immobile.

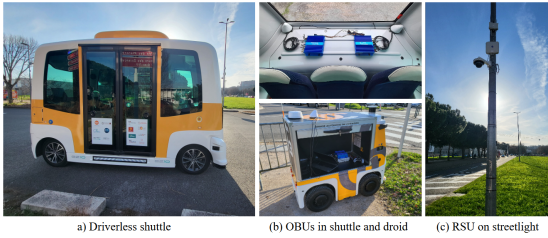


FIGURE 3 – Matériel utilisé

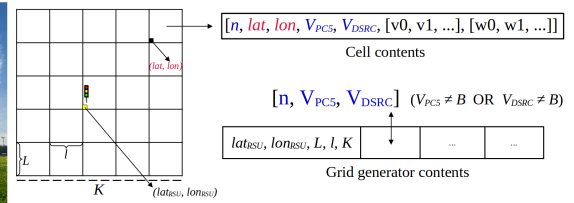


FIGURE 4 – Structure d’une grille, d’une case et d’un générateur.

## 2 Bascule verticale proactive

Dans les réseaux véhiculaires, les véhicules diffusent leurs CAM sur le sidelink pour partager des informations contextuelles telles que leur position et leur vitesse, à une fréquence  $f_{cam}$  allant de 1 à 10 Hz [ETS14]. Nous déclenchons la propagation des CAM sur les interfaces sidelink : ITS-G5 et C-V2X PC5. Les interfaces  $Uu$  opèrent de manière analogue aux réseaux cellulaires commerciaux, permettant d’allonger la portée aux prix d’une latence accrue [EHF22].

À la réception, les RSU enregistrent les performances des deux interfaces et alimentent une base de données géographique. Si aucun message n’est reçu sur une interface en provenance d’une position associée à une case donnée, les données de QoS pour cette case et cette interface ( $v0, v1, w0, w1...$ ) reçoivent une valeur maximale  $B$ . Lorsque plusieurs CAM sont reçus de la même case et de la même interface au fil du temps, les données de QoS sont mises à jour selon une moyenne mobile sur les derniers  $M$  paquets reçus.

La structure d’une grille, d’une case et d’un générateur est illustrée sur la figure 4. Chaque RSU génère et gère une grille carrée de  $K$  lignes et  $K$  colonnes, chaque case couvrant une plage de latitude  $L$  et une plage de longitude  $l$ . La RSU se situe au centre de sa propre grille. Chaque case est identifiée par son ID unique  $n$ , ainsi que par les coordonnées GPS de son coin inférieur gauche  $lat$  et  $lon$ . Ces informations sont ensuite diffusées aux véhicules sous la forme d’un générateur de grille facilitant la sélection de RAT par le véhicule. La structure est illustrée sur la figure 4. Les générateurs de grille sont envoyés par chaque RSU à la fréquence  $f_{grid}$ , et via l’interface PC5. Nous faisons ce choix spécifiquement pour sa meilleure robustesse face à la distance et aux obstacles, et afin d’éviter que le réseau cellulaire ne soit sollicité par les RSU.

## 3 Relayage

Nous souhaitons obtenir un premier aperçu des transmissions D2D relayées dans un scénario urbain tout en fournissant une connectivité cellulaire. Pour vérifier l’intérêt des relais D2D, nous menons plusieurs expériences. L’expérience 2 est réalisée sur une portion de route droite le long d’une succession de bâtiments. L’expérience 3 est réalisée le long d’un virage, où le point d’accès à atteindre est complètement obstrué et inaccessible une fois le virage franchi. En effet, nous positionnons le point d’accès sur le mur d’un bâtiment

situé en amont du virage, ce qui bloque toute ligne de vue. De plus, un véhicule relai est positionné en sortie du virage, dans une zone à forte densité d’obstacles végétaux. Les messages transmis sont des CAM, générés à une fréquence  $f_{cam}$  et de taille  $D_{cam}$ . Le protocole de transport est supposé être identique à travers les RAT. Nous cherchons à mesurer les données de performance au niveau des paquets (latence, taux de succès (PDR)) ainsi que la portée de la communication.

L’expérimentation est menée sur le campus, où une navette autonome EasyMile EZ10 [Eas] roule le long d’une piste préprogrammée. Les trajets sont tous identiques. Deux OBU sont placées à l’intérieur de la navette afin d’éviter les variations de performance entre les parcours dues aux fluctuations du trafic routier : une unité envoie des données via l’interface cellulaire (V2N), l’autre via l’interface C-V2X PC5 (V2V/V2I).

Un relais véhiculaire est positionné sur la voie sous la forme d’un robot de livraison autonome, hébergeant sa propre OBU fonctionnant en mode relayage de paquets. Le matériel expérimental en bord de route et dans le véhicule est illustré dans la figure 3.

## 4 Conditions expérimentales

Les équipements déployés pour ces trois expériences sont des OBU et RSU Cohda Wireless MK6, respectant la norme 3GPP Rel. 15 et équipés de l’ensemble des RAT évoqués précédemment. Les RSU sont interconnectées sur une dorsale en fibre optique. La navette se déplace à une vitesse maximale de 20 km/h.

TABLE 1 – Paramètres expérimentaux

Item	Valeur (Exp.#1)	Valeur (Exp.#2)	Valeur (Exp.#3)
Longueur de piste	2.8 km	750 m	2.8 km
Altitude de la RSU	2.5 m	4 m	2.5 m
RAT utilisés	DSRC, LTE, 5G NSA, 5G-V2X	LTE, 5G NSA, 5G-V2X	LTE, 5G NSA, 5G-V2X
Puissance d’émission C-V2X	23 dBm	23 dBm	23 dBm
Valeur de $f_{cam}$	1 Hz	1 à 10 Hz	1 à 10 Hz
Valeur de $D_{cam}$	400 B	400 B	400 B

## 5 Résultats expérimentaux

### 5.1 Optimisation de bascule verticale

La figure 5 présente une projection des emplacements des bascules, ainsi que la portion de la piste parcourue en exploitant chaque RAT. L’exploitation du DSRC, comme pressenti, implique des bascules entre les technologies D2D, comme le montre la figure 5a le long des lignes droites. En effet, alors que le scénario opportuniste déclenche le passage au D2D dès que la couverture C-V2X est disponible, le scénario amélioré déclenche des bascules supplémentaires pour continuer d’améliorer les performances, par exemple lorsque le DSRC est favorisé avec une ligne de vue directe. En outre, la zone supérieure gauche de la figure 5b présente un phénomène de ping-pong entre C-V2X et cellulaire, en raison des arbres qui perturbent la propagation. L’OBU opportuniste interprète ces positions comme étant cellulaires, tandis que l’OBU améliorée par la grille les associe au RAT le plus performant, pour lequel les performances sont encore meilleures que pour le cellulaire simple. Notre solution augmente la résilience face aux longues distances et aux obstacles.

La figure 6 présente les visualisations des grilles, projetées sur une vue satellite de la zone d’expérimentation sous la forme d’une carte thermique. 6(a) et 6(b) affichent respectivement les valeurs de QoS pour C-V2X et DSRC. Les emplacements des RSU sont en vert. Plus la couleur d’une cellule est chaude, plus la latence est élevée. Nous remarquons un nombre de cellules colorées est beaucoup plus important pour le PC5 C-V2X que pour le DSRC, ce qui traduit une plus grande portée de communication d’environ 60%. La robustesse aux obstacles physiques est également plus grande pour le C-V2X, cas des cellules couvrant des positions obstruées (indiquées aux points 1, 2 et 3), où la latence est plus élevée pour le DSRC que pour le C-V2X. Notre hypothèse est vérifiée. On observe enfin que, dans des conditions favorables comme les courtes distances, le DSRC atteint des latences plus faibles que le C-V2X.

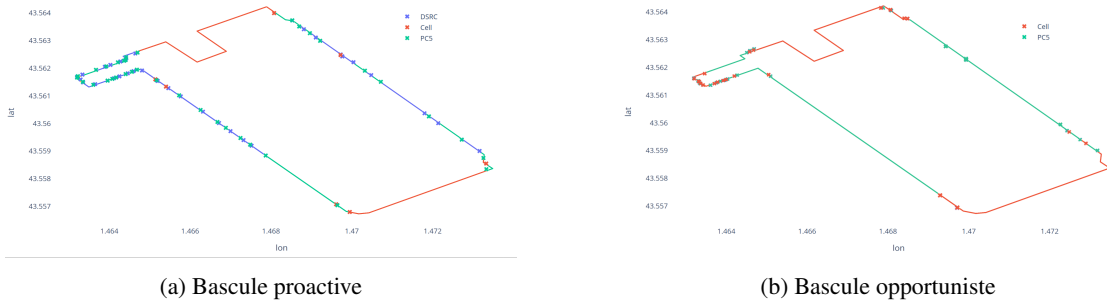


FIGURE 5 – Cartographie des lieux de bascule verticale

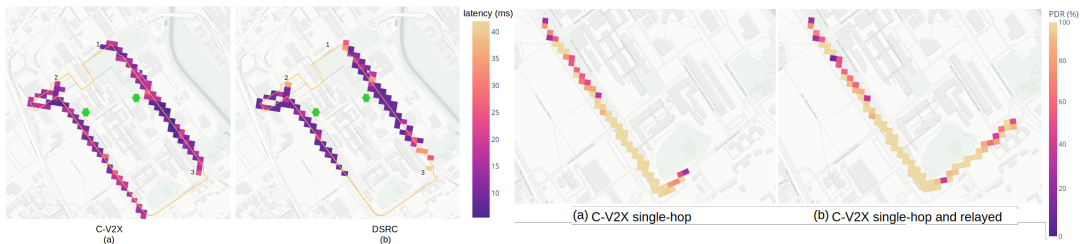


FIGURE 6 – Comparaison des portées et latences

FIGURE 7 – PDR avec et sans relayage

## 5.2 Relayage

L'expérience 2 (Table 2) montre qu'en moyenne, le relayage améliore considérablement les performances du réseau par rapport aux communications cellulaires. Dans le pire des cas, la comparaison entre latence maximale relayée et latence minimale cellulaire montre encore une réduction de 42%. Suite à l'expérience 3, la figure 7 affiche les valeurs de PDR projetées sur une vue satellite de l'aire de jeu. La sous-figure 7(a) montre les performances pour le PC5 C-V2X à un saut ; la sous-figure 7(b) inclut également les messages utilisant le PC5 relayé. Les taux de succès observés sont proches de 100% sur le PC5 entre 0 et 200 mètres du point d'accès. Il est également montré que le fait de s'appuyer sur une autre OBU pour relayer les paquets maintient des valeurs de PDR élevées sur de longues distances avant de diminuer progressivement.

Enfin, dans la Table 3, on observe les mêmes phénomènes, montrant des performances toujours bénéfiques pour les paquets relayés par rapport aux transmissions cellulaires. Cependant, cette portion de route rencontrant un plus grand nombre d'obstacles, les fluctuations de performance sont plus fortes, mis en évidence dans les intervalles de confiance. Ce dernier point doit être gardé à l'esprit lors de la généralisation des infrastructures V2X urbaines tirant parti de la présence de plusieurs dispositifs de relais.

TABLE 2 – Evaluation de la latence (ms), Expérience 2

	Moyenne	Minimum	Maximum
PC5 Single-hop	15.38 ± 0.81	9.84	20.29
PC5 Relayed	25.65 ± 1.56	15.11	34.11
Cellular	71.31 ± 1.78	59.28	122.34

TABLE 3 – Evaluation de la latence (ms), Expérience 3

	Moyenne	Minimum	Maximum
PC5 Single-hop	16.08 ± 1.06	6.92	35.51
PC5 Relayed	24.80 ± 1.92	10.47	43.17
Cellular	69.15 ± 2.10	47.02	151.39

## 6 Conclusion

Dans ce travail, nous avons présenté des solutions complémentaires pour améliorer les performances du V2X dans les environnements urbains, accompagnées d'expérimentations sur le terrain. Le DSRC montre des latences particulièrement faibles dans des conditions de visibilité directe, tandis que le C-V2X se démarque dans des scénarios d'obstruction et de portée étendue, avec des relais D2D allant jusqu'à 200 mètres par saut. La bascule proactive, qui s'appuie sur une cartographie de la QoS, a permis de réduire la quantité de replis cellulaires et d'obtenir des latences inférieures à celles des méthodes opportunistes. En outre, les transmissions relayées ont toujours été plus performantes que les alternatives cellulaires, y compris en obstruction. Les travaux futurs permettront d'étendre ces expériences à des scénarios de trafic plus dense et d'élargir le déploiement des RSU afin d'améliorer encore la couverture D2D et l'évolutivité du système.

## Références

- [Eas] EasyMile. EZ10 passenger shuttle. Consulté le 06.02.2025.
- [EHF22] Mahmoud M. Elsayed, Khalid M. Hosny, and Mostafa M. Fouda. Vehicles communications handover in 5G : A survey. *ICT Express*, January 2022.
- [ETS14] ETSI. Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2 : Specification of Cooperative Awareness Basic Service, September 2014. EN 302 637-2 V1.3.0.
- [ETS18] ETSI. Multi-access Edge Computing (MEC); Study on MEC Support for V2X Use Cases, September 2018. GR MEC 022 - V2.1.1.
- [IRI24] IRIT. autOCampus project, Jan 2024. Consulté le 06.02.2025.