

Titre Thèse Title	Développement des réseaux de communication pour les futurs systèmes véhiculaires connectés – approche machine learning et sécurité par la conception Development of communication networks for future connected vehicular systems – machine learning approach and security by design.	
(Co)-Directeur	Eric SIMON	E-mail : eric.simon@univ-lille.fr
(Co)-Directeur		E-mail :
(Co)-Encadrant (s)	Joumana FARAH	E-mail : joumanafarah@ul.edu.lb
Laboratoire(s)	IEMN	Web :
Groupe(s)	TELICE	Web :
Financement demandé	Contrat Doctoral Etablissement	ULille <input checked="" type="checkbox"/> Centrale Lille <input type="checkbox"/> Yncrea <input type="checkbox"/>
	Région – Autre <input type="checkbox"/> Préciser : bourse région	Co-financement acquis Oui / non <input type="checkbox"/> Préciser :
Financement acquis ? <input type="checkbox"/> Financement partiellement acquis ? <input type="checkbox"/>	Contrats de Recherche <input type="checkbox"/> Préciser :	Autre <input type="checkbox"/> Préciser :

Résumé :

1) Sujet de thèse et contexte scientifique et économique :

Les communications dans les réseaux véhiculaires [1,2] suscitent de plus en plus d'importance dans la communauté scientifique. Ces réseaux trouvent de nos jours une multitude de domaines d'application allant de la conduite autonome intelligente à la gestion des convois de véhicules. On prévoit, dans les prochaines années, un accroissement considérable du besoin de ce type de systèmes à cause de l'urbanisation intensive des villes, du coût énergétique et de l'impact environnemental considérables des moyens de transport actuels, des exigences de plus en plus élevées en termes de sécurité routière et d'expérience de conduite des usagers (confort, info-divertissement), etc.

La gestion des communications entre les véhicules et l'infrastructure du réseau pose de nombreuses contraintes techniques telles que l'exigence d'une grande fiabilité et d'une ultra-faible latence dans la transmission des commandes, d'un niveau élevé de la sécurité des communications, et la nécessité d'un haut degré d'interopérabilité avec les autres réseaux sans-fil ou mobiles, pour n'en citer que quelques-unes.

Les nouvelles normes de communication 5G et plus devront permettre de répondre à ces exigences. Elles devront en outre assurer une couverture, une ubiquité et une capacité importantes pour des réseaux de plus en plus denses et évolutifs dans un contexte de ressources spectrales limitées. Pour atteindre ces objectifs, un certain nombre de technologies de rupture doit être mis en œuvre. Une des premières grandes technologies de rupture est le paradigme *cell-free* [3,4] qui repose sur la suppression du concept de la subdivision des régions de couverture en cellules. En effet, le concept cellulaire trouve ses limites lors de la densification des réseaux en raison des interférences élevées en bordure des cellules et du nombre important de handovers nécessaires en forte mobilité. Dans le contexte cell-free, un grand nombre de points d'accès (APs : Access points) est distribué sur une vaste zone géographique pour servir de façon optimisée tous les véhicules présents dans cette zone. Ces APs sont reliés à un centre de calcul (CPU) par un lien backhaul filaire ou sans-fil. Le concept cell-free englobe la technique 5G du *massive MIMO* (multiple input, multiple output) qui consiste à utiliser un grand nombre d'antennes colocalisées à l'émission [5,6], mais en **distribuant ces antennes sur toute la zone**. Ainsi, le cell-free massive MIMO constitue une généralisation du massive MIMO de la 5G et permet une meilleure uniformisation de la couverture et une connectivité accrue des véhicules grâce à la proximité et la diversité des points d'accès. De plus, ces configurations distribuées permettent une réduction significative de la consommation énergétique et du coût de gestion (OPEX) et d'implémentation (CAPEX) des réseaux par les opérateurs.

Une deuxième grande technologie de rupture concerne la technique d'accès au milieu, c'est-à-dire la manière dont les utilisateurs se partagent les ressources spectrales : le NOMA (*accès multiple non*

orthogonal) [7,8]. Dans les normes précédentes (2G à 4G), les accès au milieu ont été réalisés de manière orthogonale (OMA pour orthogonal multiple access) : TDMA (multiplexage temporel) pour la 2G, CDMA (multiplexage par codes d'étalement) pour la 3G, OFDMA (répartition orthogonale de la fréquence) pour la 4G. Une telle conception orthogonale présente l'avantage d'empêcher les interférences mutuelles entre les utilisateurs, ce qui permet d'assurer de bonnes performances au niveau du système. Cependant, allouer une ressource spectrale/temporelle complète par utilisateur ne permet plus de répondre aux exigences des nouveaux réseaux véhiculaires. Le NOMA, proposé pour la norme 5G et plus, consiste à placer deux ou plus d'utilisateurs sur une même ressource spectrale/temporelle, en utilisant des techniques de multiplexage par puissance, d'où une meilleure efficacité spectrale. Néanmoins, plusieurs verrous technologiques doivent encore être levés pour permettre l'implémentation pratique du NOMA dans le contexte cell-free massive MIMO. Parmi eux, se dégage notamment la nécessité d'une estimation de canal précise, indispensable pour une annulation correcte des interférences entre les signaux des utilisateurs NOMA alloués à un même rayon (beam). En pratique, la limitation du nombre de séquences pilotes disponibles en voie montante compromet l'estimation du canal, notamment dans un réseau dense. Ce phénomène est connu sous le nom de *contamination des pilotes*. Ce problème est encore plus critique dans les réseaux véhiculaires à grande vitesse à cause de la forte sélectivité temporelle (effet Doppler) des canaux, ce qui limite de façon significative la longueur temporelle des séquences pilotes (à cause du temps de cohérence réduit) et donc leur nombre. Un autre problème est la prise en considération d'un lien *backhaul sans-fil*, ce qui constitue une nécessité pour un déploiement évolutif des réseaux. L'intégration de ce genre de backhaul a été peu considéré dans la littérature, où la plupart des études supposent l'existence d'un backhaul à canal idéal et aux ressources spectrales illimitées.

Par ailleurs, les techniques proposées par le candidat seront testées et validées sur de vrais scénarios de mesures. Le Laboratoire IEMN, Université de Lille, dispose en effet d'équipements dédiés aux mesures de canal, dont un sondeur de canal massive MIMO unique en Europe, le sondeur MaMIMOSA [9, 10]. Le candidat prendra part aux campagnes de mesures. Contrairement à la grande majorité des études précédentes qui considéraient des environnements de propagation simulés, l'étude proposée aura l'avantage de se baser sur des mesures de canal réelles en vue de dégager des méthodes d'optimisation des performances des réseaux dans des conditions réalistes.

Enfin, la robustesse de chaque solution proposée face à des attaques électromagnétiques de type brouillage sera évaluée et constituera un élément clé de la validation de la solution.

2) L'état du sujet dans le laboratoire d'accueil.

Ce sujet s'inscrit pleinement dans les thématiques de recherche du laboratoire d'accueil. Notre groupe a développé une forte expertise dans le domaine du sondage de canal en environnement mobile et a procédé à de nombreuses campagnes de mesure avec le sondeur MaMIMOSA. De plus, l'aspect sécurité des transmissions sans fil face aux attaques électromagnétiques est un autre thème fort du groupe.

3) Les objectifs visés, les résultats escomptés.

Ce travail de thèse comporte une multitude de techniques novatrices du traitement du signal et des communications numériques qui visent à lever les multiples verrous susmentionnés en vue de permettre une implémentation efficace des réseaux véhiculaires 6G. L'optimisation de ces réseaux sera à la fois bénéfique aux utilisateurs véhiculaires et aux opérateurs des réseaux. Pour les premiers, elle permettra une amélioration notable de la qualité de service et une meilleure équité de ces services vis-à-vis des normes antérieures. Pour les seconds, elle aura une retombée financière importante, puisqu'elle permettra l'intégration d'un plus grand nombre d'utilisateurs, par rapport aux systèmes précédents, avec un coût d'exploitation plus faible et un impact écologique inférieur grâce à une meilleure gestion des ressources spectrales et énergétiques.

L'une des études principales de la thèse portera sur l'utilisation conjointe du cell-free massive MIMO et du NOMA dans les systèmes véhiculaires 6G et plus particulièrement l'introduction de nouvelles structures d'émission-réception appropriées au cell-free MIMO-NOMA véhiculaire. Ces

structures seront articulées avec de nouveaux schémas d'allocation des pilotes et d'estimation de canal prenant en considération les contraintes spécifiques au contexte (faible latence, fiabilité élevée, basse complexité calculatoire, etc.).

Un autre aspect de la thèse, indispensable pour le déploiement de ce type de réseaux, est l'optimisation conjointe de l'allocation des ressources temporelles, spectrales, spatiales et énergétiques de ces systèmes. Le candidat devra œuvrer à l'introduction de nouvelles méthodes de gestion des ressources qui répondent aux exigences de forte mobilité et de faible latence des communications véhiculaires. Une attention particulière devra être donnée à la maximisation de l'efficacité énergétique de ces systèmes, en vue de minimiser l'impact écologique de ces réseaux. L'interaction entre la couche physique et la couche MAC (Medium Access Control) constitue aussi un aspect intéressant à explorer, plus particulièrement l'influence des techniques de détection et d'estimation de canal sur l'optimisation de la gestion des ressources. A notre connaissance, aucune étude précédente n'a considéré les systèmes 6G cell-free MIMO-NOMA dans un contexte véhiculaire.

Un autre aspect important à explorer sera l'extensibilité (*scalability*) du système cell-free véhiculaire, à savoir la possibilité d'implémenter ces structures dans des réseaux denses où le nombre élevé de points d'accès (APs), d'antennes et d'utilisateurs nécessite une politique appropriée de déploiement et de gestion des ressources. Dans ce cadre, les méthodes d'intelligence artificielle (*Machine Learning*) peuvent permettre d'obtenir des solutions satisfaisantes aux divers problèmes d'optimisation : planification de l'emplacement des APs, clustering des utilisateurs, sélection adaptative d'antennes, etc. Grâce aux campagnes de mesure intensives, des bases de données réalistes pourront être constituées pour être exploitées dans l'apprentissage des méthodes de Machine Learning.

Enfin, l'aspect sécurité guidera le développement de chacune de ces solutions, en prenant en compte les menaces dès la conception. Le sujet portant principalement sur les couches physique et MAC des réseaux, les principales attaques concernant ces couches, comme le brouillage, seront étudiées et leur impact analysé, ce qui orientera le design de solutions le plus robustes possibles à ces types d'attaques. Nous avons déjà suivi cette démarche dans notre étude [8].

4) Le programme de travail avec les livrables et l'échéancier prévisionnel.

Cette thèse de doctorat se déroulera sur trois ans. Le tableau suivant présente un calendrier prévisionnel des différentes tâches prévues avec les livrables correspondants :

Période	Travaux	Livrables
Septembre 2022 – Octobre 2022 (2 mois)	Etude bibliographique détaillée des différentes techniques dans l'état de l'art	Résumé et présentation orale
Novembre 2022 - Mars 2023 (5 mois)	Introduction de nouvelles techniques d'allocation des pilotes pour minimiser l'effet de contamination des pilotes. Comparaison des méthodes classiques à de nouvelles approches de machine learning.	Un article de conférence
Avril 2023 – Novembre 2023 (8 mois)	Développement de nouvelles méthodes d'estimation du canal en forte mobilité pour le réseau véhiculaire. Applications à des cas de réels avec des campagnes de mesures.	Un article de revue et un article de conférence
Décembre 2023 – Avril 2024 (5 mois)	Introduction de techniques de machine learning pour le clustering des utilisateurs en Massive MIMO avec incorporation de la sélection d'antennes adaptative	Un article de revue
Mai 2024 – Décembre 2024 (8 mois)	Mise en place de nouvelles méthodes d'allocation des ressources fréquentielles et de la puissance conjointement pour les réseaux d'accès (entre véhicules et Accés Points) et dans le Backhaul (entre Accés Points et Centre de Calcul)	Un article de revue et un article de conférence
Janvier 2025 – Mai 2025 (5 mois)	Etude de nouvelles stratégies pour optimiser l'interopérabilité entre les réseaux véhiculaires et les réseaux cellulaires	Un article de revue
Juin 2025 – Aout 2025 (3 mois)	Rédaction du manuscrit de thèse et préparation de la soutenance finale	Manuscrit de thèse
Soutenance prévue : début septembre 2025		

5) Les collaborations prévues

Les travaux de cette thèse seront réalisés en collaboration avec plusieurs partenaires de recherche. Parmi eux, nous citons tout d'abord la Prof. Joumana Farah de la faculté de Génie de l'Université Libanaise qui travaille depuis de nombreuses années sur les méthodes d'allocation des ressources avec un accès non orthogonal au spectre (NOMA) et des configurations d'antennes distribuées. Elle a à son actif un grand nombre de brevets d'invention et de publications majeures dans ce contexte. Par ailleurs, elle a, au cours des dernières années, participé à de nombreux projets communs avec l'équipe d'accueil du doctorant à l'IEMN et au co-encadrement de plusieurs post-docs et stages de Master. J. Farah sera co-encadrante de la thèse.

Une autre collaboration qui sera très profitable à cette thèse est avec la DR Virginie Deniau de l'université Gustave Eiffel, Villeneuve d'Ascq, qui travaille avec E. Simon depuis de nombreuses années sur la sécurité des transmissions sans fil, à travers l'encadrement de doctorants et post-doc. Dans ce cadre nous avons également monté le Groupement d'Intérêt Scientifique pour la Cybersécurité des systèmes embarqués communicants sans fil (Cybcom).

6) Une liste de 10 publications maximum portant directement sur le sujet en soulignant celles du laboratoire.

- [1] F. Talaei, J. Zhan and X. Dong, "Low Complexity MIMO Channel Prediction for Fast Time-Variant Vehicular Communications Channels Based on Discrete Prolate Spheroidal Sequences," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 23398-23408, 2021.
- [2] D. Tian, J. Zhou, Z. Sheng and V. C. M. Leung, "Robust Energy-Efficient MIMO Transmission for Cognitive Vehicular Networks," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 6, pp. 3845-3859, June 2016.
- [3] G. Interdonato, M. Karlsson, E. Björnson and E. G. Larsson, "Local Partial Zero-Forcing Precoding for Cell-Free Massive MIMO," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, no. 7, pp. 4758-4774, July 2020.
- [4] T. K. Nguyen, H. Nguyen and H. D. Tuan, "Max-Min QoS Power Control in Generalized Cell-Free Massive MIMO-NOMA With Optimal Backhaul Combining," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 10, pp. 10949-10964, Oct. 2020.
- [5] Z. Ding, R. Schober, and V. Poor, "A general MIMO framework for NOMA downlink and uplink transmission based on signal alignment." *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15 no.6, pp. 4438-4454, 2016.
- [6] X. Chen et al. "User pairing and pair scheduling in massive MIMO-NOMA systems", *IEEE Communications Letters*, vol.22 no.4, pp. 788-791, 2017.
- [7] E. P. Simon, J. Farah and P. Laly, "Performance Evaluation of Massive MIMO With Beamforming and Nonorthogonal Multiple Access Based on Practical Channel Measurements," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 18, no. 6, pp. 1263-1267, June 2019.
- [8] J. Farah, E. P. Simon, P. Laly and G. Delbarre, "Efficient Combinations of NOMA With Distributed Antenna Systems Based on Channel Measurements for Mitigating Jamming Attacks," in *IEEE Systems Journal*, vol. 15, no. 2, pp. 2212-2221, June 2021.
- [9] P. Laly et al. "Massive radio channel sounder architecture for 5G mobility scenarios: Mamimosa", *14th IEEE European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2020.
- [10] D. P. Gaillot et al. "Measurement of the V2I Massive Radio Channel with the MaMIMOSA Sounder in a Suburban Environment", *15th IEEE European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2021.

Abstract:

Title: Development of communication networks for future connected vehicular systems – machine learning approach and security by design.

Context:

Communications in vehicular networks [1,2] are gaining more and more importance in the scientific community. These networks are nowadays used in a multitude of application domains ranging from intelligent autonomous driving to the management of vehicle convoys. The need for these systems is expected to grow considerably in the coming years due to the intensive urbanization of cities, the high energy costs and environmental impact of current transportation means, the increasing requirements in terms of road safety and user experience (comfort, infotainment), etc.

The management of communications between vehicles and the network infrastructure poses many technical constraints such as the requirement for high reliability and ultra-low latency in the transmission of commands, an important level of communication security, and the need for a high degree of interoperability with other wireless or mobile networks, to name a few.

The new 5G and beyond communication standards will have to meet these requirements. In addition, they are expected to provide significant coverage, ubiquity and capacity for increasingly dense and scalable networks in the context of limited spectrum resources. To achieve these objectives, a number of disruptive technologies must be implemented. One of the first major disruptive technologies is the *cell-free paradigm* [3,4], which is based on the suppression of the concept of subdividing coverage regions into cells. Indeed, the cellular concept finds its limits when densifying networks due to the high interference at the cell edges and the large number of handovers required in high mobility. In the cell-free context, an important number of access points (APs) are distributed over a large geographical area to optimally serve all vehicles present in the area. These APs are connected to a central processing unit (CPU) via a wired or wireless backhaul link. The cell-free concept encompasses the 5G technique of *massive MIMO* (multiple input, multiple output) which consists of using a large number of co-located antennas at the transmitter side [5,6], allowing for a distribution of antennas over the area. As a result, cell-free massive MIMO is a generalization of 5G massive MIMO and allows for a more uniform coverage and an increased vehicle connectivity due to the proximity and diversity of access points. In addition, these distributed configurations enable a significant reduction in energy consumption and network management (OPEX) and implementation (CAPEX) costs for operators.

A second major disruptive technology concerns the access technique, i.e. the way users share spectrum resources: NOMA (*non-orthogonal multiple access*) [7,8]. In the previous standards (2G to 4G), the access to the medium was realized in an orthogonal way (OMA for orthogonal multiple access): TDMA for 2G, CDMA for 3G, OFDMA (orthogonal frequency division multiple access) for 4G. Such an orthogonal design has the advantage of preventing mutual interference between users, thus ensuring good system performance. However, allocating one spectral resource per user no longer meets the requirements of new vehicular networks. NOMA, proposed for 5G and beyond, consists in placing two or more users on the same spectral/temporal resource, using power multiplexing techniques, resulting in a better spectral efficiency. Nevertheless, several technological barriers still need to be overcome to allow the practical implementation of NOMA in the cell-free massive MIMO context. Among them, the need for an accurate channel estimation is essential for a correct cancellation of the interference between the signals of NOMA users allocated to the same beam. In practice, the limitation of the number of pilot sequences available in the uplink compromises the channel estimation, especially in a dense network. This phenomenon is known as *pilot contamination*. This problem is even more critical in high-speed vehicular networks due to the high temporal selectivity (Doppler effect) of the channels, which significantly limits the temporal length of the pilot sequences (due to the reduced coherence time) and thus their number. Another problem is the inclusion of a wireless backhaul link, which is a necessity for scalable network deployment. The integration of such a backhaul has been given little consideration in the literature, where most studies assume the existence of an ideal channel backhaul with unlimited spectral resources.

Objectives:

This thesis focuses on the joint use of cell-free massive MIMO and NOMA in 6G vehicular systems and more specifically on the introduction of new transmit-receive structures suitable for vehicular cell-free MIMO-NOMA. These structures will be articulated with new pilot allocation and channel estimation schemes taking into account the context-specific constraints.

Another aspect of the thesis, which is essential for the deployment of such networks, is the joint optimization of the allocation of temporal, spectral, spatial and energy resources of these systems. The candidate will work on the introduction of new resource management methods that meet the high mobility and low latency requirements of vehicular communications. Particular attention will be given to maximizing the energy efficiency of these systems, in order to minimize the ecological impact of these networks. The interaction between the physical layer and the MAC (Medium Access Control) layer is also an interesting aspect to explore, especially the influence of channel detection and estimation techniques on the optimization of resource management. To our knowledge, no previous study has considered 6G cell-free MIMO-NOMA systems in a vehicular context.

Moreover, the techniques proposed by the candidate will be tested and validated on real measurement scenarios. The TELICE group of the IEMN Laboratory, University of Lille, has indeed

hardware equipment dedicated to channel measurements, including a massive MIMO channel sounder unique in Europe, the MaMIMOSA sounder [9, 10]. The candidate will take part in the measurement campaigns. Unlike the vast majority of previous studies that considered simulated propagation environments, the proposed study will have the advantage of relying on real channel measurements in order to derive methods for optimizing network performance under realistic conditions.

Another important aspect to explore will be the scalability of the vehicular cell-free system, i.e. the possibility to implement these structures in dense networks where the high number of access points, antennas and users requires an appropriate deployment and resource management policy. In this context, Machine Learning methods can provide efficient solutions to various optimization problems: AP location planning, user clustering, adaptive antenna selection, etc. Thanks to the intensive measurement campaigns, realistic databases can be built up to be used in the training of Machine Learning methods.

Key words: 5G and beyond networks – Vehicular communications – Massive MIMO – NOMA – Channel measurements – Machine Learning (AI).

Prerequisite: Master and/or Engineering diploma in Telecommunications or Signal Processing.

References

- [1] F. Talaei, J. Zhan and X. Dong, "Low Complexity MIMO Channel Prediction for Fast Time-Variant Vehicular Communications Channels Based on Discrete Prolate Spheroidal Sequences," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 23398-23408, 2021.
- [2] D. Tian, J. Zhou, Z. Sheng and V. C. M. Leung, "Robust Energy-Efficient MIMO Transmission for Cognitive Vehicular Networks," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 6, pp. 3845-3859, June 2016.
- [3] G. Interdonato, M. Karlsson, E. Björnson and E. G. Larsson, "Local Partial Zero-Forcing Precoding for Cell-Free Massive MIMO," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, no. 7, pp. 4758-4774, July 2020.
- [4] T. K. Nguyen, H. Nguyen and H. D. Tuan, "Max-Min QoS Power Control in Generalized Cell-Free Massive MIMO-NOMA With Optimal Backhaul Combining," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 10, pp. 10949-10964, Oct. 2020.
- [5] Z. Ding, R. Schober, and V. Poor, "A general MIMO framework for NOMA downlink and uplink transmission based on signal alignment." *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15 no.6, pp. 4438-4454, 2016.
- [6] X. Chen et al. "User pairing and pair scheduling in massive MIMO-NOMA systems", *IEEE Communications Letters*, vol.22 no.4, pp. 788-791, 2017.
- [7] E. P. Simon, J. Farah and P. Laly, "Performance Evaluation of Massive MIMO With Beamforming and Nonorthogonal Multiple Access Based on Practical Channel Measurements," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 18, no. 6, pp. 1263-1267, June 2019.
- [8] J. Farah, E. P. Simon, P. Laly and G. Delbarre, "Efficient Combinations of NOMA With Distributed Antenna Systems Based on Channel Measurements for Mitigating Jamming Attacks," in *IEEE Systems Journal*, vol. 15, no. 2, pp. 2212-2221, June 2021.
- [9] P. Laly et al. "Massive radio channel sounder architecture for 5G mobility scenarios: Mamimosa", *14th IEEE European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2020.
- [10] D. P. Gaillot et al. "Measurement of the V2I Massive Radio Channel with the MaMIMOSA Sounder in a Suburban Environment", *15th IEEE European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2021.

