

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	Joumana FARAH	E-mail : joumana.farah@univ-lille.fr
(Co)-Encadrant (s)		E-mail :
Laboratoire(s)	IEMN	Web :
Groupe(s)	TELICE	Web :
Financement acquis ?	Oui <input type="checkbox"/>	Non <input checked="" type="checkbox"/>
	Origine :	
Financement demandé	Contrat Doctoral <input type="checkbox"/>	Etablissement porteur : Univ. Lille <input checked="" type="checkbox"/> Centrale Lille <input type="checkbox"/> JUNIA <input type="checkbox"/>
	Région <input checked="" type="checkbox"/> ½ bourse région – ½ bourse ULille	Co-financement acquis : Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Préciser son origine (qu'il soit acquis ou non) :
	Autre :	

Résumé :

Cette thèse porte sur la conception des réseaux de communication pour les futurs systèmes véhiculaires connectés. Ces réseaux de communication s'inscrivent dans les réseaux multi-antennes massifs en configuration sans cellules (*cell-free*), avec un accès multiple non orthogonal (NOMA). L'un des problèmes de ces réseaux est l'estimation du canal en forte mobilité qui nécessite la mise en place de nouvelles procédures adéquates au contexte cell-free. Cette estimation requiert, en amont, une allocation optimisée des pilotes aux utilisateurs de manière à minimiser l'effet de contamination des pilotes. Dans ce cadre, on se propose d'appliquer des méthodes de machine learning en vue d'optimiser les étapes d'allocation et d'estimation.

Un autre aspect essentiel à étudier est le regroupement (*clustering*) des utilisateurs avec une sélection d'antennes adaptative au niveau des points d'accès (*access points* : *AP*), basé là aussi sur des nouvelles approches de machine learning qui seront introduites pour booster les performances par rapport aux approches classiques.

Une partie importante du travail sera dédiée à l'introduction de nouvelles méthodes d'optimisation de l'allocation des ressources fréquentielles et énergétiques, prenant en compte conjointement les réseaux d'accès (liens entre véhicules et APs) et le Backhaul (liens entre APs et Centre de Calcul). Ceci constitue un aspect novateur majeur de l'étude par rapport aux précédentes qui ne considéraient pas les imperfections du Backhaul.

De plus, pour chaque développement réalisé, étant donné le niveau de criticité des communications véhiculaires, la sécurité face à des attaques de brouillage sera prise en compte, dans une approche *security by design*.

Abstract:

This thesis focuses on the design of communication networks for future connected vehicular systems. These communication networks are part of massive multi-antenna networks in cell-free configuration, with non-orthogonal multiple access (NOMA). One of the problems of these networks is the estimation of the channel in high mobility, which requires the implementation of new procedures adequate to the cell-free context. This estimation requires, upstream, an optimized allocation of pilots to users to minimize the effect of pilot contamination. In this context, we propose to apply machine learning methods to optimize the allocation and estimation steps.

Another essential aspect to be studied is the clustering of users with adaptive antenna selection at access points (APs), again based on new machine learning approaches that will be introduced to boost the performance compared to classical approaches.

An important part of the work will be dedicated to introducing new methods for optimizing the allocation of frequency and energy resources, taking into account both the access networks (links between vehicles and APs) and the Backhaul (links between APs and the Computing Center). This is a major innovative aspect of the study compared to previous ones that did not consider the imperfections of the Backhaul.

Moreover, for each development, given the criticality level of vehicular communications, security against jamming attacks will be considered in a security-by-design approach.

1) Le sujet de recherche choisi et son 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, infodivertissement), 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], 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*) [6,7,8]. 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) Les collaborations prévues (préciser le cadre, la nature des collaborations, l'ancrage régional, national, international, la transdisciplinarité éventuellement).

Les travaux de cette thèse seront réalisés en collaboration 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).

Eric SIMON est maître de conférence HDR à l'IEMN- groupe TELICE. La professeure Joumana FARAH est professeure honoraire de l'Université de Lille.

5) 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] E.P. Simon, J. Farah, P. Laly, G. Delbarre "A Gradual Resource Allocation Technique for Massive MIMO-NOMA" *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, 2021.

[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.

