

Proposition de thèse

Systèmes MIMO massifs et non massifs pour les liaisons "Beyond 5G" et la "6G"

- **Systèmes MIMO**

Les systèmes de transmission MIMO (Multiple Input – Multiple Output), pourvus de plusieurs antennes en émission et en réception (Figure 1), permettent l'augmentation potentielle des performances des systèmes de communications sans fil [1] [2].

Ces systèmes permettent en particulier d'augmenter la portée et la fiabilité des liaisons quelque soit le canal de propagation. Plus précisément, pour une propagation en espace libre (LOS ou Line of Sight), ces systèmes permettent l'obtention de gains d'antenne en émission et en réception par la mise en œuvre de techniques de beamforming en émission et en réception. Pour une propagation à trajets multiples (NLOS ou non LOS), ces systèmes permettent l'exploitation de gains de diversité induits par la diversité des canaux de propagation entre les différentes antennes d'émission et de réception.

Les systèmes MIMO permettent également d'augmenter le débit des transmissions à puissance émise et à bande constante par multiplexage spatial en émission de plusieurs trains binaires indépendants [3], [4]. Intuitivement, le fait de disposer de plusieurs antennes en émission permet d'émettre des informations indépendantes sur chacune d'entre elles qu'il est possible d'extraire, sous certaines conditions, par des traitements spatiaux adaptés.

Le potentiel important de ces systèmes a engendré leur utilisation dans de nombreux standards de communication tels que l'IEEE 802.11n, l'IEEE 802.16 [5], le LTE [6] ou le LTE-Advanced [7]. Ainsi les réseaux mobiles cellulaires de 4^{ème} génération (4G) intègrent, au moins sur le lien descendant, des liaisons MIMO ($N_e \times 2$) où $N_e \geq 2$ vaut typiquement quelques unités.

Pour supporter l'accroissement en débit des liaisons futures et la densification des réseaux, en nombre d'utilisateurs, avec l'arrivée des objets connectés, les réseaux 5G intégreront des systèmes MIMO dotés d'un nombre très important d'antennes sur station de base (quelques dizaines à quelques centaines). On parle alors de systèmes MIMO massifs [8], [9].

D'autres systèmes de transmission, civils ou militaires, n'échappent pas non plus à cette tendance à exploiter des antennes multiples en émission et/ou en réception, en nombre croissant, sur les infrastructures fixes, sur les plateformes mobiles (avions, véhicules, drones, bateaux), sur les postes portables et même sur les humains eux-mêmes.

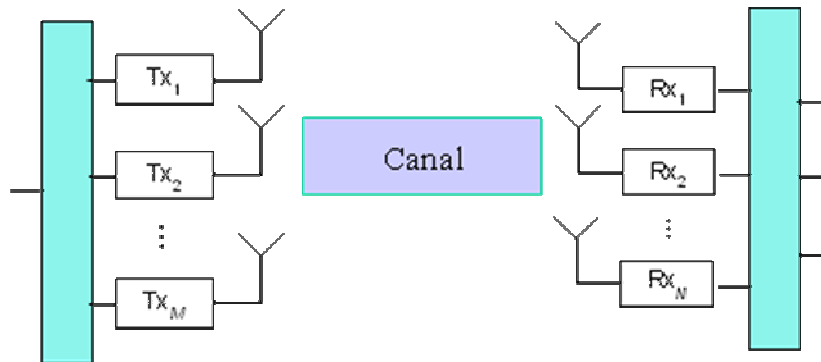


Figure 1. Système MIMO

- **Systèmes MIMO sans et avec précodage spatial**

Les systèmes MIMO peuvent être structurés en deux grandes familles correspondant aux systèmes sans et avec précodage spatial.

Les systèmes sans précodage spatial, encore appelés systèmes en boucle ouverte, n'exploitent, en émission, aucune information sur le canal de propagation. Ils permettent l'exploitation de la diversité spatiale en émission à partir de la mise en œuvre de codes spatio-temporels en émission. Ces codes peuvent intégrer ou non le multiplexage spatial de trains binaires indépendants. Ils ne permettent cependant pas l'obtention de gain d'antennes en émission. Le code spatio-temporel le plus populaire est le code d'Alamouti [10] conçu pour des systèmes à 2 antennes en émission.

Les systèmes avec précodage spatial [1-2], encore appelés systèmes en boucle fermée, exploitent, en émission, l'information sur le canal de propagation. Cette information sur le canal est acquise soit par l'émetteur lui-même (mode TDD), soit par le récepteur (mode FDD), lequel renvoie alors l'information à l'émetteur via un canal de service (feedback link) (Figure 2). Ces systèmes permettent l'exploitation conjointe de gains d'antennes et de la diversité spatiale en émission à partir de la mise en œuvre de schémas MIMO précodés, pouvant intégrer ou non le multiplexage spatial de trains binaires indépendants. Bien sûr le canal ne doit pas avoir changé entre l'estimation de celui-ci et son utilisation par l'émetteur. Cela suppose en général une variation lente du canal à l'échelle de la transmission, c'est-à-dire une situation de fading lent pour des contextes opérationnels fixes ou mobiles à faible vitesse.

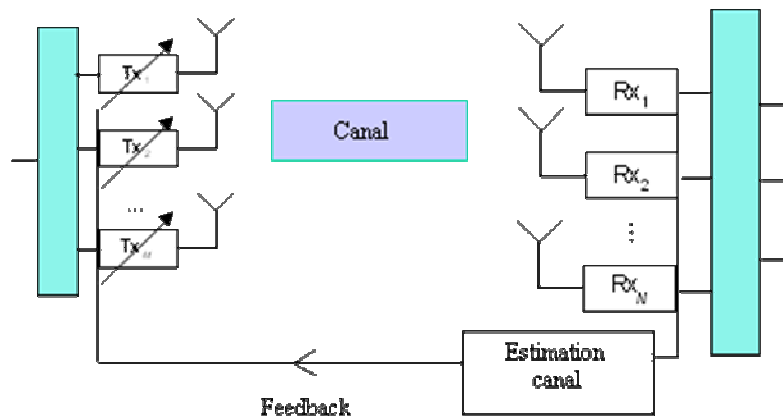


Figure 2. *Système MIMO avec feedback*

- **Systèmes MIMO mono et multi-utilisateurs**

Un système MIMO dit mono-utilisateur (SU-MIMO ou single user MIMO), correspond à une simple liaison MIMO entre deux points de l'espace (Figure 1).

En revanche, un système MIMO dit multi-utilisateurs (MU-MIMO ou multi-user MIMO) [11], correspond à un ensemble de liaisons MIMO entre un ou plusieurs points de l'espace à l'émission et un ou plusieurs points de l'espace en réception utilisant les mêmes ressources temps-fréquence. Cette utilisation des mêmes ressources temps-fréquence permet d'accroître la capacité ou l'efficacité spectrale d'un réseau de transmission sans augmenter la bande.

La Figure 3 montre le synoptique de liaisons MU-MIMO entre un point d'émission (une station de base par exemple) et plusieurs points de réception (différents utilisateurs multi-antennes par exemple). Cette situation caractérise ce qui est appelé le mode "broadcast" en lien descendant et le mode "d'accès" en lien montant. D'autres configurations MU-MIMO sont bien sûr possibles. Par exemple, différents systèmes MU-MIMO de type broadcast appartenant à différentes cellules peuvent utiliser les mêmes ressources temps-fréquence. Ils peuvent alors interférer, sans coopération, ou coopérer pour créer un système MU-MIMO multi-points à multi-points.

Les systèmes MU-MIMO requièrent idéalement l'exploitation des informations de canal de tous les utilisateurs à l'émission de manière à optimiser les liens vers chacun des utilisateurs en limitant les interférences générées sur les autres liens. Cette lutte anti-interférences à l'émission peut être envisagée de différentes manières telles qu'à partir de l'exploitation de techniques d'alignement d'interférences [12] par exemple. De tels systèmes sont intégrés dans les réseaux cellulaires 4G.

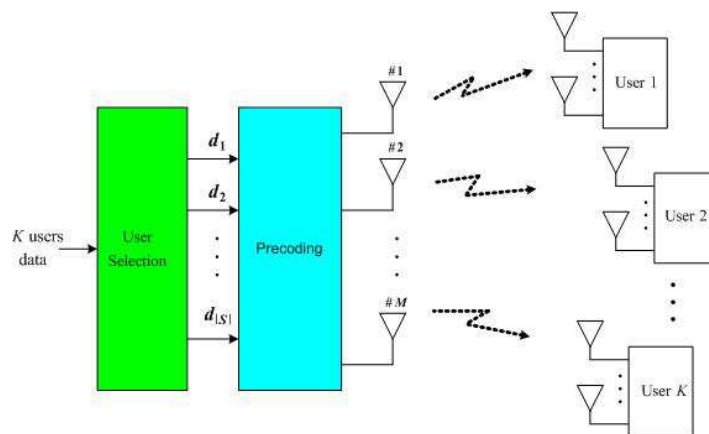


Figure 3. Exemple de système MU-MIMO (Mode Broadcast)

• Systèmes MIMO Massifs

Le système MU-MIMO de la Figure 3 devient un système MIMO massif lorsque le nombre d'antennes sur station de base (N_e) est très grand (quelques dizaines à quelques centaines) et très supérieur au nombre d'utilisateurs K .

Les systèmes MIMO massifs [8-9], couplées aux ondes millimétriques, constituent l'une des avancées technologiques les plus importantes des réseaux 5G, dont les premiers essais ont démarré début 2020, alors que débutent les premières recherches sur les systèmes "Beyond 5G" et la "6G". Ces systèmes offrent de nombreux avantages opérationnels parmi lesquels on peut citer:

- la densification des réseaux, en nombre d'utilisateurs, requise par l'arrivée des objets connectés [13]. Cette densification est rendue possible grâce à l'utilisation, par de nombreux utilisateurs (téléphones ou objets connectés) séparables spatialement, des mêmes ressources temps-fréquence, permettant ainsi un accroissement du débit/Hz/m².
- une diminution de l'énergie transmise vers (ou par) les utilisateurs grâce à la mise en oeuvre d'antennes très directives (par formation de faisceaux) dans leur direction.
- une réduction des interférences vers les autres utilisateurs (ou provenant des autres utilisateurs) grâce à la focalisation de l'énergie transmise (ou reçue) vers ceux-ci.

Ces avantages sont d'autant plus prononcés que le nombre d'éléments rayonnants du réseau d'antennes est important. En particulier, au delà d'une certaine ouverture de réseau d'antennes et d'un certain nombre d'antennes, les utilisateurs deviennent tous orthogonaux spatialement, ce qui confère, dans ce cas, une optimalité à la formation de faisceau, au prix d'un coût substantiel inhérent au nombre important de chaînes d'émission et de réception.

Pour cette raison, des réseaux moyennement massifs, comportant moins d'une centaine d'éléments rayonnants, sont aussi envisagés, nécessitant une gestion (ou un traitement) des interférences intra-réseau plus sophistiquée.

De nombreuses recherches sont actuellement en cours autour de ce thème relatif à la suppression d'interférences au sein des systèmes MIMO, qu'ils soient massifs ou moyennement massifs. L'un des enjeux actuels pour les communications beyond 5G et pour la 6G est de

permettre un accès non orthogonal des utilisateurs au réseau cellulaire [14], facilitant sa densification, contrairement aux réseaux 2G, 3G, 4G ou 5G pour lesquels l'accès multiple est orthogonal (en temps, par les codes ou en fréquence), ce qui requiert de la ressource.

- **Objectifs de la thèse**

La thèse concerne principalement la lutte contre les interférences dites "multi-utilisateurs" ou "internes au réseau" au sein des systèmes MIMO, qu'ils soient massifs ou moyennement massifs (ondes millimétriques) ou non massifs (ondes non millimétriques), pour les systèmes "Beyond 5G" et la "6G". La thèse est structurée en deux grandes parties.

La première partie concerne l'analyse de l'apport de techniques d'intelligence artificielle de type "Deep Learning" pour l'optimisation de systèmes MIMO massifs et moyennement massifs précodés dans la perspective des systèmes Beyond 5G et 6G.

La seconde partie concerne l'analyse de l'apport de techniques de type "Expectation-Propagation" pour l'optimisation de systèmes MIMO arbitraires, massifs ou non, précodés ou non, dans la perspective des systèmes Beyond 5G.

- a) *MIMO massif et Deep learning pour applications de type 6G*

Bien qu'elles évoluent un peu par rapport à la modulation OFDM de la 4G, release 16, les formes d'onde restent multi-porteuses pour la 5G avec un accès de type OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access). Pour la 6G, elles resteront probablement multi-porteuses avec, le cas échéant, des évolutions plus importantes pour accroître l'efficacité spectrale (ex : forme d'onde FBMC [15] ou autres plutôt que OFDM, mais rien n'est sûr).

Pour ces applications, les techniques MIMO, qu'elles soient mono ou multi-utilisateurs, sont mises en oeuvre porteuse par porteuse et sont conçues jusqu'à présent pour des canaux à fading plat (pour les formes d'ondes avec préfixe cyclique comme l'OFDM en particulier) [16].

Dans ce contexte, un premier volet novateur de la thèse concernera en priorité l'analyse de l'apport de l'apprentissage profond (« deep learning ») sur les systèmes MIMO massifs avec précodage, dans un contexte multi-utilisateurs, pour des formes d'onde de type OFDM pour la 6G.

En effet, en ce qui concerne les systèmes MU-MIMO ou MIMO massifs, sous l'hypothèse de canal à fading plat, de nombreuses techniques visant à optimiser les précodeurs-récepteurs via un critère de débit système (sum rate) maximal ou de qualité minimale (min du SNR) des liaisons ont été développées depuis une quinzaine d'années [11]. Toutefois la plupart de ces techniques sont des techniques itératives très coûteuses, lourdes à mettre en oeuvre et sans garantie de convergence.

Pour pallier ces limitations, des techniques relatives à l'optimisation de précodeurs à faible coût et des récepteurs associés ont été développés ces dernières années. Cette optimisation est aujourd'hui réalisée par des méthodes sous-optimales ou nécessitant des recherches « greedy » [17], [18]. Ces précodeurs étant non-linéaires, une optimisation par deep learning est très adaptée, en particulier dans le contexte de formes d'onde multi-porteuses, que ce soit pour le précodage [19] ou pour l'estimation des canaux [20].

Dans la thèse, il est envisager de réaliser un apprentissage global et un apprentissage sur une architecture paramétrique, dite par « deep unfolding » [21]. De plus, les interférences sur les

bandes adjacentes pourront être étudiées et la puissance dans les bandes adjacentes intégrée dans les métriques d'optimisation. Une comparaison sera réalisée avec les systèmes de référence de la littérature.

b) Récepteurs MIMO de type Expectation-Propagation pour applications Beyond 5G

Sous l'hypothèse de canaux à fading plat (forme d'onde multi-porteuses (cf 5G et 6G) avec traitement porteuse par porteuse) ou de canaux à fading sélectif en fréquence (formes d'onde mono-porteuse (cf liaisons HF, aéronautiques etc...)), le second volet novateur de la thèse concernera l'analyse de récepteurs de type "Expectation-Propagation" pour l'optimisation de systèmes MIMO arbitraires, précodés ou non.

En effet, les récepteurs optimaux pour la démodulation des trains de symboles émis par les antennes d'émission d'un système MIMO optimisent un critère de type MAP (Maximum A posteriori) ou MLSE (Maximum Likelihood Sequence Estimation). Ils correspondent à des récepteurs de type BCJR ou Viterbi. Leur complexité croît exponentiellement avec le nombre de trains de symboles et, pour des formes d'onde mono-porteuse, avec l'étalement temporel du canal en nombre de symboles.

De manière à diminuer la complexité de ces récepteurs, des algorithmes de type BCJR simplifiés ou Viterbi simplifiés ont été développés [22]. Toutefois, ces récepteurs restent très coûteux surtout pour des constellations d'ordre élevé. Une alternative à ces récepteurs correspond aux récepteurs MMSE [23], lesquels s'avèrent beaucoup moins coûteux mais aussi beaucoup moins performants. Pour cette raison, des processus de type Serial Interference Cancellation (SIC) ont été couplés aux récepteurs MMSE pour accroître leur performance mais au prix d'une augmentation de complexité et d'un risque de propagation d'erreurs de décision. Ainsi, des récepteurs performants, robustes et à complexité raisonnable restent à développer pour des systèmes MIMO à forte efficacité spectrale.

Dans ce contexte, une nouvelle famille de récepteurs, basés sur des approches Bayésiennes itératives empruntées de la théorie du "machine learning" et appelés récepteurs à Expectation Propagation (EP) sont apparus tout récemment dans le domaine des communications numériques pour des liaisons aussi bien classiques [24-26] que Faster than Nyquist [27-28]. Les récepteurs EP peuvent être considérés comme une généralisation des récepteurs "Belief Propagation" forçant la procédure de message passing associée à propager des familles de distributions exponentielles comme la distribution Gaussienne.

L'application de ces récepteurs aux systèmes MIMO a été proposée tout récemment [29-30] mais n'en est qu'à ses débuts. L'objectif du second volet de la thèse est donc d'optimiser de tels récepteurs pour des systèmes MIMO, avec et sans précodeur, pour des formes d'onde aussi bien mono que multi-porteuses et pour des canaux sélectifs en fréquence.

• Encadrement

Ce travail d'investigation sera mené dans le cadre d'une collaboration entre le l'équipe LAETITIA du laboratoire CEDRIC du CNAM et le laboratoire ETIS de l'université de Cergy Pontoise.

La thèse sera co-encadrée par les professeurs Pascal Chevalier, Professeur du CNAM sur la chaire d'Electronique, et Inbar Fijalkow, Professeur des Universités à l'Université de Cergy-Pontoise.

Le doctorant sera installé au sein du laboratoire CEDRIC du CNAM mais des séjours réguliers au sein du laboratoire ETIS de l'université de Cergy Pontoise pourront être envisagés.

• Références

- [1] D. Gesbert, M. Shafi, D. Shiu, P. Smith, A. Naguib, "From theory to practice : an overview of MIMO space-time coded wireless systems", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol 21, N°3, pp. 281-302, April 2003.
- [2] A.J. Paulraj, D.A. Gore, R.U. Nabar, H. Bolcskei, "An overview of MIMO communications – A key to Gigabit wireless", *Proc IEEE*, Vol 92, N°2, pp. 198-218, Feb 2004.
- [3] G. Foschini, M. Gans, "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas", *Wirel. Personal Commun.* 6 (3) (1998) 311–335, doi: 10.1023/A:1008889222784.
- [4] E. Telatar, "Capacity of multi-antenna gaussian channels", *Eur. Trans. Telecommun.* 10 (6) (1999) 585–595 .
- [5] S.N. Diggavi, N. Al-Dhahir, A. Stamoulis, A.R. Calderbank, "Great expectations: the value of spatial diversity in wireless networks", *Proc. IEEE* 92 (2) (2004) 219–270 .
- [6] D. Astély, E. Dahlman, A. Furuskär, Y. Jading, M. Lindström, S. Parkvall, "Lte: the evolution of mobile broadband", *IEEE Commun. Mag.* 47 (4) (2009) 44–51 .
- [7] D. Bai, C. Park, J. Lee, H. Nguyen, J. Singh, A. Gupta, Z. Pi, T. Kim, C. Lim, M.-G. Kim, I. Kang, "Lte-advanced modem design: challenges and perspectives", *IEEE Commun. Mag.* 50 (2) (2012) 178–186 .
- [8] E.G. Larsson, F. Tufvesson, O. Edfors, T.L. Marzetta, "Massive MIMO for Next Generation Wireless Systems", *IEEE Communications Magazine*, Vol 52, N°2, pp. 186-195, Feb 2014.
- [9] L. Lu, G.Y. Li, A.L. Swindlehurst, A. Ashikhmin, R. Zhang, "An Overview of Massive MIMO: Benefits and Challenges", *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, Vol 8, N°5, Oct. 2014.
- [10] S. M. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 16, no. 8, pp. 1451–1458, Oct. 1998.
- [11] D. Gesbert, M. Kountouris, R.W. Heath, C.B. Chae, T. Salzer, "From single-user to Multi-user Communications shifting the MIMO paradigm", *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol 24, N°5, pp. 36-46, Oct. 2007.
- [12] V.R. Cadambe, S.A. Jafar, "Interference alignment and spatial degrees of freedom for the K-user interference channel", in: 2008 *IEEE Trans. Inf. Theory*, volume 54, 8, IEEE, 2008, pp. 3425–3441.
- [13] O. Audoin, B. Decocq, I. Fijalkow, C. Grangeat, G. Pujolle, "5G, Exposition aux ondes et Efficacité énergétique », white paper SYSTEMATIC, O. Audoin, B. Decocq, I. Fijalkow, C. Grangeat, G. Pujolle, 2020.
- [14] L. Dai and al., "A Survey of Non-Orthogonal Multiple Access for 5G", *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Vol 20, N°3, pp. 2294-2323, Third-Quarter. 2018.
- [15] Farhang-Boroujeny and R. Kempter, "Multicarrier communication techniques for spectrum sensing and communication in cognitive radios," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 46, no. 4, pp. 80–85, Apr. 2008.
- [16] R Zayani, H Shaiek, D Roviras, " PAPR-Aware Massive MIMO-OFDM Downlink ", *IEEE Access* 7, 25474-25484, 2019.
- [17] AK Saxena, I Fijalkow, AL Swindlehurst, "Analysis of One-Bit Quantized Precoding for the Multiuser Massive MIMO Downlink », *IEEE Transactions on Signal Processing* 65 (17), 4624 – 4634, 2017.
- [18] I Fijalkow, AL Swindlehurst « Predistortion techniques for vector perturbation precoding of one-bit massive-MIMO », I Fijalkow, AL Swindlehurst, in proceedings of ASILOMAR 2017.
- [19] E Björnson, L Sanguinetti, H Wymeersch, J Hoydis, TL Marzetta "Massive MIMO is a reality - What is next ? : Five promizing research directions for antenna arrays", *Digital Signal Processing* 94, 3-20, 2019.
- [20] AK Gizzini, M Chafii, A Nimr, G Fettweis, " Enhancing least square channel estimation using deep learning ", in proceedings of *IEEE VTC2020-Spring*.
- [21] T. O'Shea and J. Hoydis, "An introduction to deep learning for the physical layer", *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, vol. 3, no. 4, pp. 563–575, Dec. 2017

- [22] C. Fragouli, N. Al-Dhahir, S. N. Diggavi, and W. Turin, "Prefiltered space-time M-BCJR equalizer for frequency-selective channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 50, no. 5, pp. 742–753, May 2002.
- [23] M. Tuchler, A. Singer, "Turbo-Equalization: An overview" *IEEE Trans. Info. Theory*, vol. 57, no. 2, pp. 920–952, Feb. 2011.
- [24] I. Santos, J. J. Murillo-Fuentes, and P. M. Olmos, "Block expectation propagation equalization for ISI channels," in *2015 23rd European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, pp. 379–383, Aug 2015.
- [25] S. Sahin, A. M. Cipriano, C. Poulliat, and M. Boucheret, "Iterative Equalization With Decision Feedback Based on Expectation Propagation," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 66, no. 10, pp. 4473–4487, Oct 2018.
- [26] S. Sahin, A. M. Cipriano, C. Poulliat, and M. Boucheret, "A Framework for Iterative Frequency Domain EP-Based Receiver Design," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 66, no. 12, pp. 6478–6493, Dec 2018.
- [27] T. Petitpied, R. Tajan, G. Ferre, P. Chevalier, and S. Traverso, "A New Widely Linear Equalizer based on Expectation Propagation for Faster-Than-Nyquist," in *IEEE GLOBECOM 2019*, pp. 1–6, (Hawaiï), Dec 2019.
- [28] T. Petitpied, R. Tajan, P. Chevalier, G. Ferre, S. Traverso, "A Frequency domain EP-based receiver for Faster than Nyquist Signaling," in *IEEE SPAWC 2020, Atlanta (USA)*, May 2020.
- [29] J. Cespedes, P.M. Olmos, M. Sanchez-Fernandez, F. Perez-CRuz, "Expectation Propagation Detection for high order high dimensional MIMO systems," *IEEE Trans. On Communications*, Vol. 62, N°8, pp. 2840-2849, Aug. 2014.
- [30] X. Tian, Y-L. Ueng, Z. Zhang, X. You, C. Zhang, "A low-complexity Massive MIMO detection based on approximate Expectation Propagation" *IEEE Trans. On Vehicular Technology*, Vol. 68, N°8, pp. 7260-7272, Aug. 2019.

- **Contacts**

Pascal Chevalier
Professeur du CNAM - Titulaire de la Chaire d'Electronique
EPN03 - Laboratoire CEDRIC
pascal.chevalier@cnam.fr

Inbar Fijalkow
Professeure des Universités
ETIS, UMR 8051
CY Cergy Paris University, ENSEA, CNRS
Inbar.fijalkow@ensea.fr