



DINH-THUY PHAN-HUY
GRAND PRIX DE L'ÉLECTRONIQUE
GÉNÉRAL FERRIÉ
INGÉNIEURE R&D SENIOR
ORANGE LABS NETWORKS

Le Grand Prix de l'Électronique Général Ferrié récompense des travaux ayant contribué aux progrès de la radioélectricité, de l'électronique et de leurs applications. Décerné depuis 1949, il commémore les travaux du Général Ferrié, pionnier de l'utilisation de la radio auquel on doit des réalisations remarquables telles que la liaison Côte d'Azur-Corse dès 1901 et la première station radiophonique commerciale de la Tour Eiffel.

Focalisation des ondes radio pour un Internet des objets efficace en énergie

Les défis de la 5^e Génération (5G) de réseaux

Au début des années 2010, l'industrie des réseaux sans fil est en alerte et anticipe un déferlement massif de plusieurs dizaines de milliards d'objets connectés à l'horizon des années 2020 [1]. C'est dans ce contexte alarmant que démarre le projet européen METIS 2020 sur la 5G [2] et que les principaux opérateurs de réseaux mobiles du monde quantifient les objectifs à atteindre par la future 5G :

« La 5G devrait supporter 1 000 fois plus de trafic dans les 10 prochaines années, avec la moitié de la consommation d'énergie dans tout le réseau qui est aujourd'hui consommée typiquement, dans les réseaux d'aujourd'hui. Ceci nécessite que l'efficacité énergétique soit améliorée d'un facteur 2000 dans les dix prochaines années » [3].

Le cahier des charges établit aussi une liste vertigineuse de nouveaux objets à connecter : des vêtements intelligents, des capteurs connectés, des caméras connectées, des trains à grande vitesse (TGV), des robots, etc. Les défis à relever, en termes de quantité de trafic à écouler, d'efficacité énergétique et de diversité de services sont inédits.

Des antennes relais intelligentes plus efficaces en énergie, mais à l'usage limité

Moins de 10 ans plus tard, la première version de la norme 5G est publiée [4] et son déploiement activement préparé. Qu'apporte exactement cette nouvelle norme ? L'une des ruptures technologiques introduite par la 5G est une nouvelle antenne relais que l'on peut qualifier « d'antenne intelligente ». Une antenne intelligente est composée de plusieurs dizaines voire quelques centaines d'éléments rayonnants synchronisés. Cependant, ses éléments sont coordonnés pour focaliser le faisceau. La figure 1a rappelle le fonctionnement d'une antenne classique. Pour délivrer son message à un smartphone sans connaître sa position, l'antenne, émet dans toute une zone de couverture. En conséquence, beaucoup d'énergie est gaspillée en couverture superflue. Par opposition, une antenne intelligente focalise l'énergie sur la seule zone essentielle à couvrir : l'emplacement du smartphone. La focalisation est utilisable de deux manières. Dans la figure 1b, l'antenne intelligente augmente la puissance et le débit reçus par le smartphone, sans modifier sa puissance d'émission. Dans la figure 1c, l'antenne intelligente réduit la puissance émise vers les zones superflues, sans diminuer la puissance et le débit reçus par le smartphone. Dans les deux cas, le débit du smartphone rapporté à la puissance émise par l'antenne relais (et à l'énergie consommée par le réseau) augmente. En d'autres termes, l'antenne intelligente est plus efficace énergétiquement, grâce à la focalisation.

Comment fonctionne la focalisation en 5G ? La norme spécifie une procédure en deux étapes. Lors d'une étape d'apprentissage, le smartphone émet

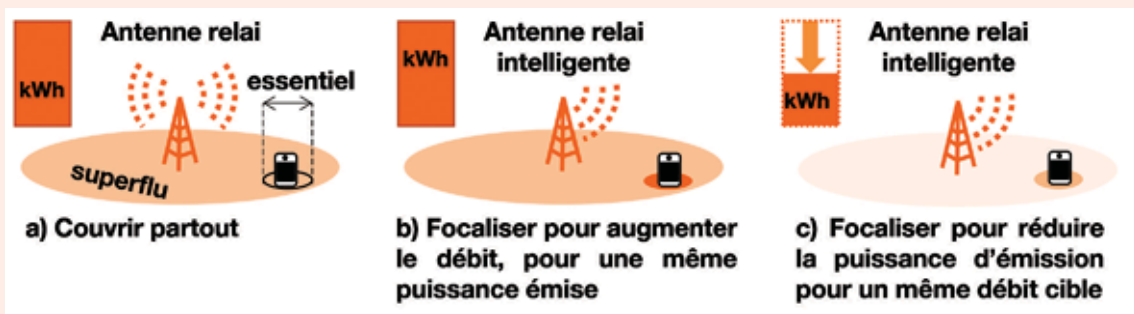


Figure 1 : Une antenne intelligente plus efficace énergétiquement grâce à la focalisation.

des signaux pilotes permettant à l'antenne relais d'estimer la réponse en fréquence du canal de propagation entre ses propres éléments rayonnants et le smartphone. Lors d'une étape de focalisation, l'antenne-relais applique à ses éléments rayonnants une loi de phase et d'amplitude, appelée « précodage » qui est adaptée à la réponse en fréquence du canal mesurée lors de la première étape. Cette procédure est répétée régulièrement pour suivre les variations du canal de propagation. Elle exploite le fait que la réponse en fréquence du canal de propagation du smartphone vers l'antenne relais

est identique à la réponse en fréquence du canal de propagation de l'antenne vers le smartphone. Ce principe dit de « réciprocité du canal de propagation » n'est valide que lorsque la même bande de fréquence est utilisée lors des deux phases. C'est le cas pour le mode de duplexage en temporel, appelé Time Division Duplex (TDD) qui sera utilisé dans les bandes de la 5G situées autour de 3,5 GHz en France.

En théorie, si un élément rayonnant omni-directionnel est remplacé par N éléments omni-directionnels coordonnés, la puissance à émettre est divisée par N [5]. En pratique,

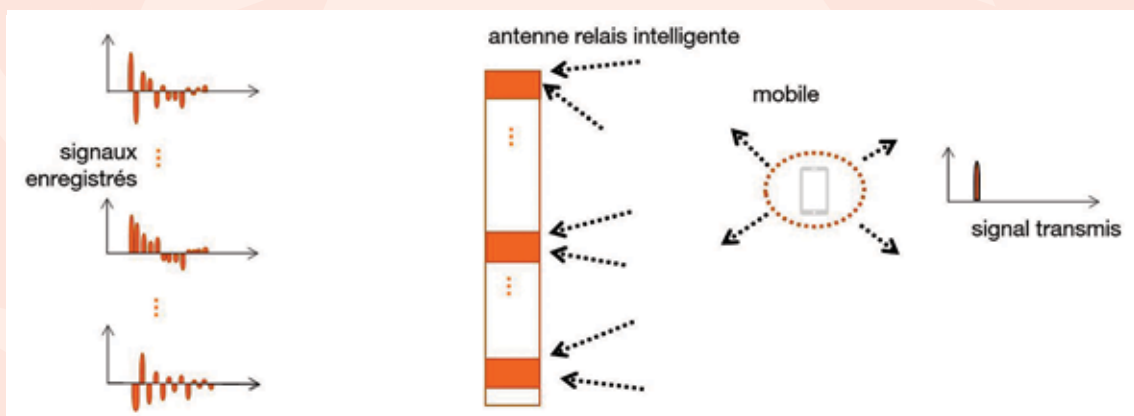


Figure 2 : Principe du retournement temporel : phase d'apprentissage.

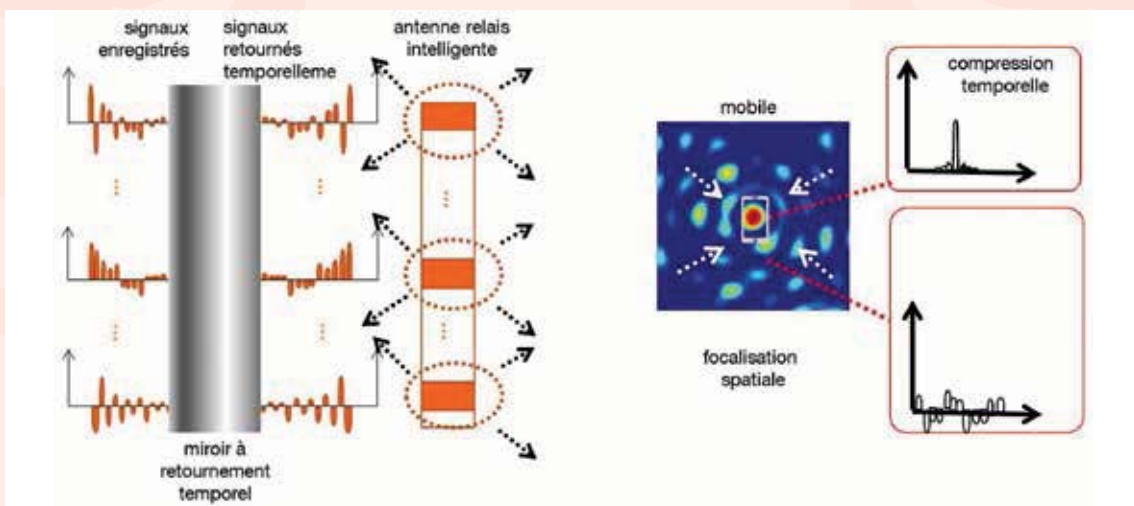


Figure 3 : Principe du retournement temporel : phase de focalisation spatio-temporelle.

le gain en efficacité énergétique d'une antenne intelligente par rapport à une antenne classique, dépend de l'implémentation, de l'équipement, de la propagation et aussi de l'antenne classique prise comme référence. Les gains demeurant considérables, l'antenne intelligente est un fondement incontournable de la 5G. Malheureusement, dans la première version de la 5G, l'utilisation de la focalisation est limitée et optimisée pour le smartphone faiblement mobile. Pour anticiper une diversification massive des services, nous avons développé des solutions pour étendre l'usage de la focalisation à l'internet des objets, dans les futures évolutions de la 5G.

Une innovation pour connecter en haut débit un objet qui ne fait aucun effort

Le premier problème auquel nous nous sommes attelés est le suivant : comment transmettre en haut débit, toujours

de manière focalisée, vers de petits objets connectés tels que des lunettes connectées ? Ces petits objets sont encore plus contraints en coût, en complexité et en autonomie que le smartphone. Nous avons conçu un « récepteur idiot », bas coût et basse consommation, mais haut débit, avec les objectifs suivants. Ce récepteur reçoit une forme d'onde mono-porteuse, la plus simple des formes d'onde. Ce récepteur ne combat pas les échos multiples, pour être ainsi plus simple qu'un récepteur de 2^e génération (2G). Enfin, ce récepteur a une bande passante de 1 à 100 MHz (10 à 1 000 fois celle de la 2G), pour recevoir du haut débit. Ces objectifs sont a priori incompatibles, car une telle bande passante entraîne l'apparition d'un grand nombre d'échos.

Afin de résoudre ce problème, nous exploitons l'intelligence de l'antenne relais 5G pour compenser la carence en traitement du signal du « récepteur idiot ». Nous exploitons la technique de focalisation spatio-temporelle par retourne-

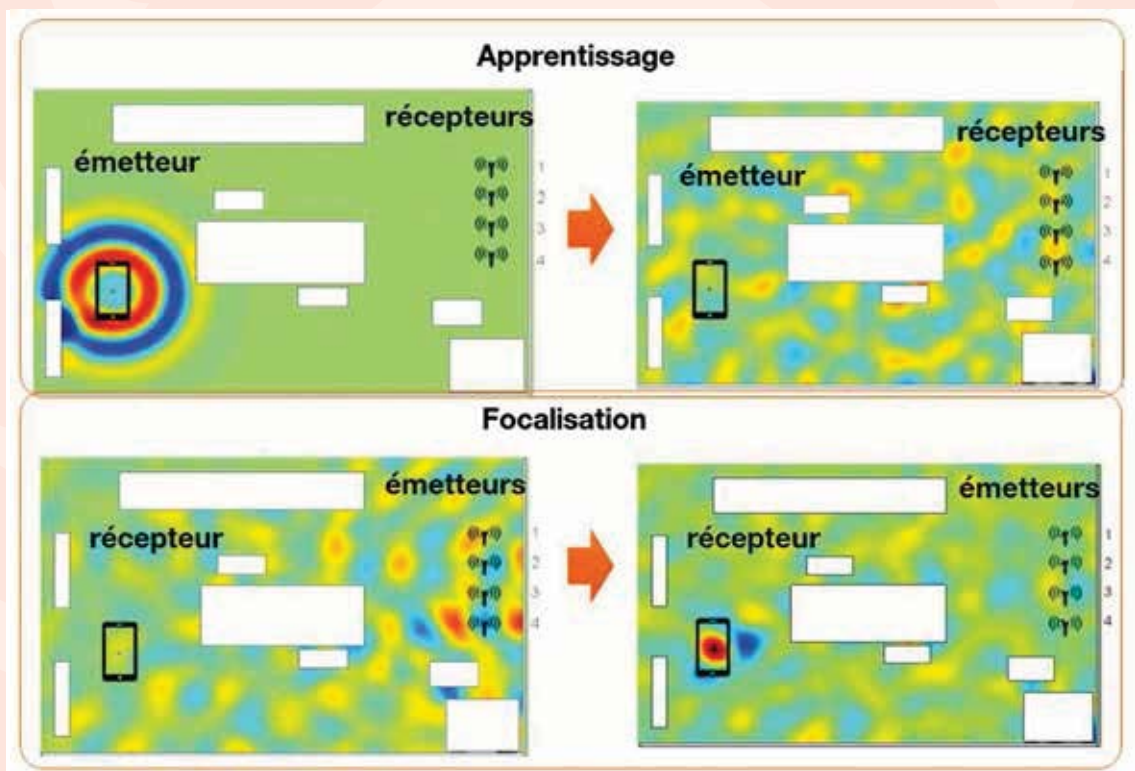


Figure 4 : Retournement Temporel dans un milieu complexe : tache focale [7].

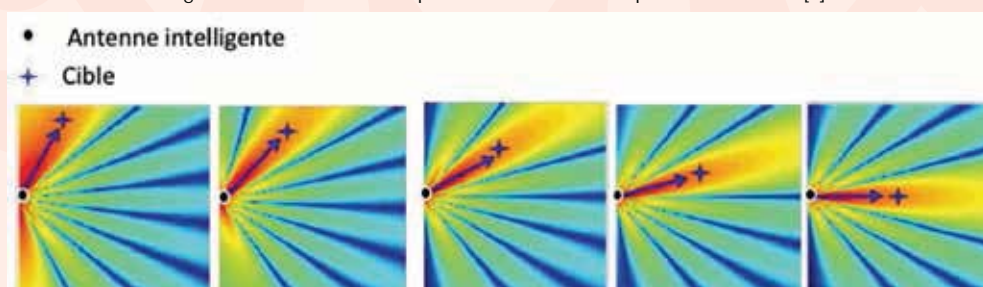


Figure 5 : Retournement temporel en espace libre : faisceau [7].

ment temporel (RT). Cette technique a été appliquée aux télécommunications pour la première fois, par M. Fink et son équipe, au milieu des années 2000 [6], et est décrite ci-après. Lors de l'étape d'apprentissage illustrée dans la figure 2, l'antenne relais estime la réponse impulsionnelle du canal. Lors de l'étape 2 illustrée dans la figure 3, l'antenne relais utilise l'inverse temporelle de la réponse impulsionnelle du canal pour préfiltrer (ou préencoder) les signaux de données à transmettre.

La figure 4 illustre la focalisation spatiale obtenue par retournement temporel dans un milieu de propagation complexe tel qu'un bâtiment ou une ville. Les rectangles blancs sont des obstacles provoquant de la multi-diffusion. Dans ce cas particulier, l'onde re-converge au point focal sous plusieurs angles d'arrivée. Le résultat est donc une tache focale circulaire.

La figure 5 illustre la focalisation spatiale obtenue par retournement temporel en espace libre. Ce type de propagation se trouve plutôt en milieu rural. Dans ce cas, l'onde re-converge vers la cible sous des angles d'arrivée très proches. Le résultat est un « faisceau », comme en radar.

En plus de la focalisation spatiale, le retournement temporel a un avantage illustré dans la figure 3 : la compression temporelle. Le signal reçu au point focal, est quasiment sans écho, même dans un milieu très multi-diffusant. Nos travaux ont montré que, grâce à cet avantage, le « récepteur idiot », démodule avec succès jusqu'à une centaine de mégabits par seconde (Mbit/s), même à l'intérieur d'un bâtiment. Ce résultat résulte de premières simulations [8] menées en collaboration avec l'Institut national des sciences appliquées (INSA) de Rennes, dans le cadre du projet de l'Agence nationale de la recherche (ANR) TRIMARAN. Récemment, nous avons effectué une preuve de concept expérimentale avec un prototype d'antenne intelligente développé par Nokia Bell Labs pour la 5G [9], dont les résultats sont illustrés dans la figure 6. Cette expérience montre que le « récepteur idiot » reçoit avec succès 72 Mbit/s dans un bâtiment, grâce à une antenne intelligente de 55 éléments.

Aujourd'hui, le RT combiné à une forme d'onde monoporteuse ne fait pas encore partie de la norme 5G. Cependant, c'est une technologie très prometteuse pour les petits objets connectés. En effet, le *maximum ratio transmission*

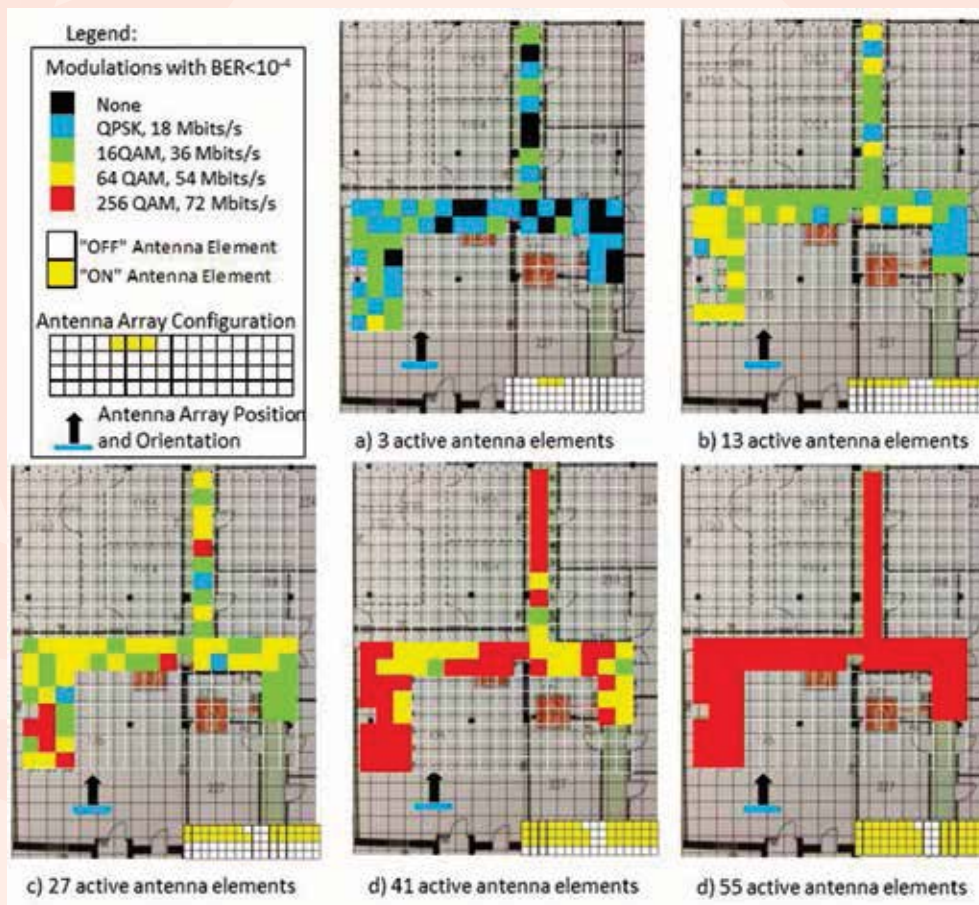


Figure 6 : Débits atteints par le « récepteur idiot » pour divers nombres d'éléments rayonnants activés de l'antenne intelligente, avec un taux de bits erronés (BER) de 10^{-4} [9].

(MRT), une technique de focalisation déjà utilisée dans la 5G, n'est rien d'autre que l'équivalent mathématique du RT appliqué à une forme d'onde multi-porteuse.

Une innovation pour connecter en haut débit un objet qui bouge trop vite

Le deuxième problème auquel nous nous sommes attelés est la mobilité. Lorsque la cible de la focalisation est un véhicule connecté (muni d'une antenne sur son toit) se déplaçant rapidement (comme une voiture ou un TGV), à cause du délai entre l'apprentissage et la focalisation, l'antenne intelligente « rate » sa cible. Cet inconvénient est illustré dans la figure 7a.

Nous avons donc introduit une antenne supplémentaire en amont du véhicule, appelée « antenne prédictive » et illus-

trée dans la figure 7b. L'antenne prédictive envoie les signaux pilotes d'apprentissage, pour permettre à l'antenne intelligente de focaliser les ondes radio sur l'antenne cible, en arrière du véhicule, sans « rater sa cible » [10]. A priori, cette astuce ne fonctionne que lorsque la vitesse de déplacement v coïncide avec le délai τ entre mesure et focalisation et avec l'espace-ment d entre l'antenne cible et l'antenne prédictive, c'est-à-dire quand $v = d/\tau$. Des algorithmes de prédiction de canal basés sur l'interpolation spatiale de multiples mesures permettent à la focalisation de fonctionner pour toutes les vitesses inférieures ou égales à d/τ [11]. Il est important de noter que cette focalisation fonctionne même quand la propagation est complexe et sans visibilité, c'est-à-dire même quand le « beam tracking » (ou faisceau poursuivant une cible en visibilité) ne fonctionne pas. Récemment, dans le cadre du projet européen

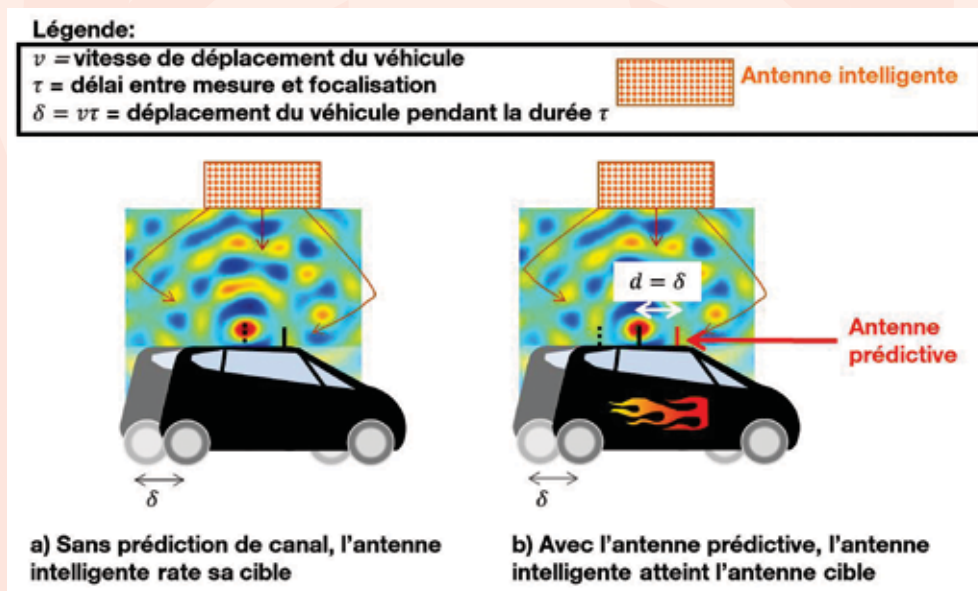


Figure 7 : Focalisation vers un véhicule connecté.

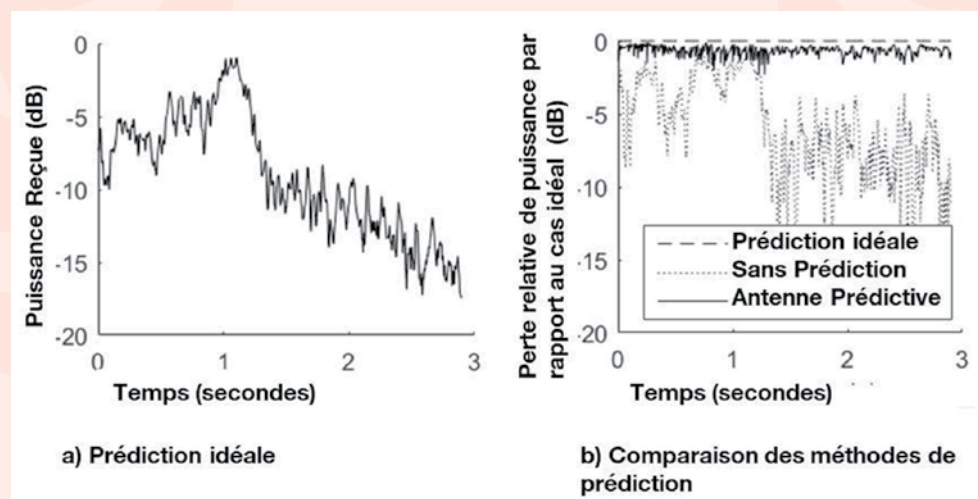


Figure 8 : Performance de l'antenne prédictive.

5GCAR, en collaboration avec l'université d'Uppsala, et grâce à un prototype d'antenne intelligente pour la 5G développé par Nokia Bell Labs, nous avons réalisé une preuve de concept expérimentale de cette innovation [12].

La figure 8 illustre les résultats expérimentaux permettant de valider le fonctionnement de l'antenne prédictive pour une vitesse de 500 km/h, lorsque $\tau = 3$ ms. La figure 8a illustre la puissance reçue par le véhicule, dans le cas idéal (l'antenne est toujours dans la tâche focale). La figure 8b, montre la perte de puissance reçue par le véhicule, par rapport au cas idéal, dans le cas sans prédiction et dans le cas avec l'antenne prédictive. Le gain de l'antenne prédictive est considérable. Cette innovation a très tôt été identifiée parmi les « *Most Promising Technical Approaches for 5G* » du projet METIS 2020.

Une innovation pour connecter en haut débit les villes

Un troisième problème auquel nous nous sommes attelés, est celui du ultra haut débit dans les villes. Nous avons proposé « d'habiller » les bâtiments et le mobilier urbain de « chapelets d'antennes millimétriques ». Nous avons proposé un algorithme de précodage (de focalisation) simple exploi-

tant le parallélisme de l'architecture urbaine. Cet algorithme, présenté pour la première fois, en collaboration avec l'université d'Aalborg et d'Oulu [13] a été également identifié comme « *Most Promising Technical Approach for 5G* » au sein du projet METIS 2020.

La preuve de concept a ensuite été réalisée avec succès, dans le cadre du projet européen mmMAGIC, en collaboration avec Samsung UK, le CEA LETI, les universités de Bristol, d'Aalto et de Chalmers [14]. Plus précisément, les algorithmes ont été testés en déployant virtuellement ces chapelets d'antennes dans les rues de Bristol (figure 9) et dans l'aéroport d'Helsinki, via des outils modélisant finement ces environnements (figure 10) grâce à des mesures expérimentales du milieu faites au laser [14]. Les résultats de cette preuve de concept montrent que des efficacités spectrales de l'ordre du kbit/s et par Hz peuvent être atteintes avec une complexité 10 000 fois supérieure à celle du précodage optimal (la décomposition en valeurs singulières).

D'autres innovations pour connecter en haut débit d'autres objets

Nous avons aussi montré que la focalisation peut bénéficier à d'autres objets :



Figure 9 : Liens testés dans les rues de Bristol [14].

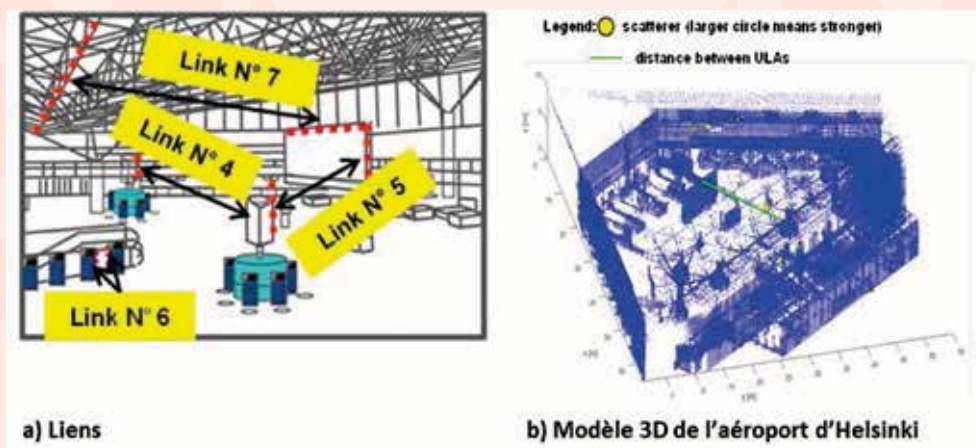


Figure 10 : Liens testés dans l'aéroport d'Helsinki [14].

- un objet ne pouvant profiter de la réciprocité du canal (utilisant le mode de duplexage en fréquence de la 5G) [15] ;
- un objet utilisant une forme d'onde multiporteuse avancée de faible occupation spectrale [16] ou un objet avec des chaînes RF incomplètes [17-18].

Nous avons aussi utilisé la focalisation pour faire du guidage ou de la navigation en imitant le Petit Poucet ou les fourmis, en générant des balises spatio-temporelles électromagnétiques à la place des cailloux ou des phéromones [19] (figure 11). Ces travaux ont été menés en collaboration avec l'IMT Atlantique, l'Institut Langevin, l'INSA de Rennes, Thalès

Communication and Securities, ATOS et CentraleSupélec, dans le cadre des ANR SpatialModulation et TRIMARAN.

Montrer la focalisation des ondes radio au grand public

Les ondes radio sont invisibles à l'œil humain. Dans le cadre du projet TRIMARAN, nous avons mis au point une démonstration expérimentale [19] illustrée par la figure 12. Nous avons montré une tâche focale générée par notre premier prototype d'antenne intelligente (développé par INSA Rennes), grâce à une dalle (conçue par Luxondes) montrant



Figure 11 : Navigation et guidage par focalisation [19].

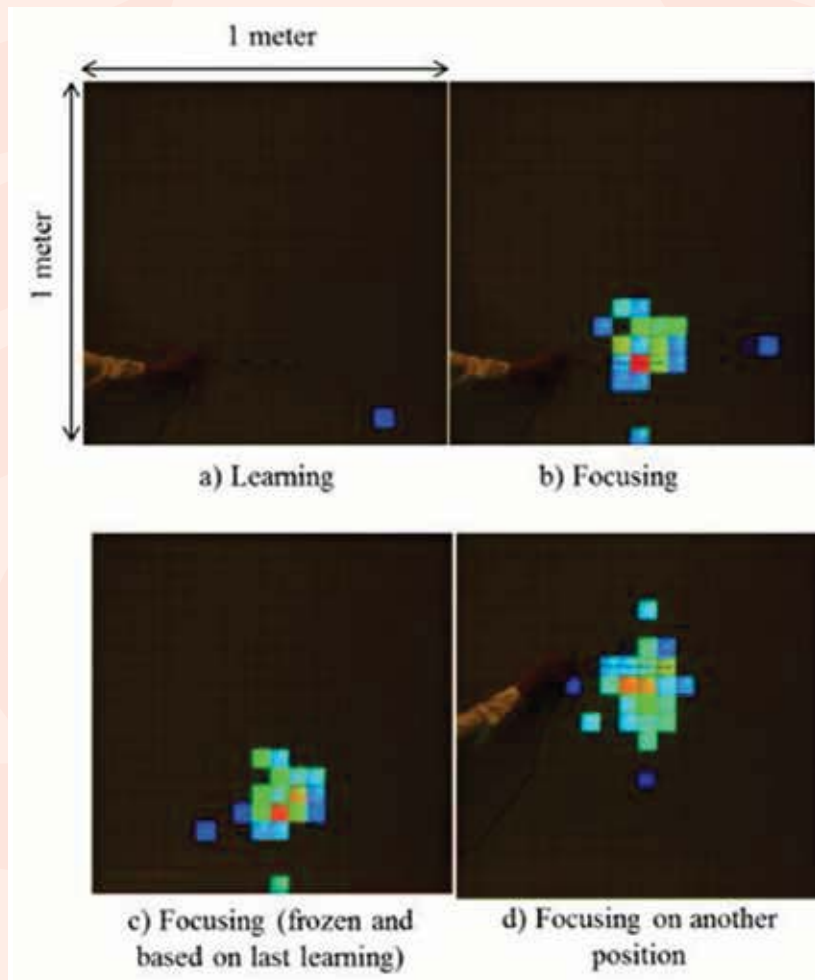


Figure 12 : Démonstration de focalisation visualisée avec la dalle Luxondes [28].

en échelle de couleur et en temps réel la puissance des ondes radio qui la traversent.

Conclusion

La focalisation est incontournable dans la 5G, car elle permet de délivrer du haut débit d'une manière plus efficace énergétiquement. Notre contribution a été de développer les briques technologiques manquantes pour la rendre applicable à l'ensemble de l'internet des objets. Nos innovations sont actuellement protégées par 41 brevets en rapport avec les travaux du prix Général Ferrié.

Remerciements

Je remercie mes 54 co-auteurs et/ou co-inventeurs. Je remercie A. Gati, M. Liénard, J. De Rosny, P. Séhier, N. Rajatheva, Hunukumbure, N. Demassieux, A. Vamparys, B. Le Floch, E. Hardouin, O. Simon, C. Gallard et P. Chemouil, pour leur soutien.

Références

- [1] « More than 50 billion connected devices », Ericsson White Paper, Février 2011, disponible au lien suivant : https://www.akos-rs.si/files/Telekomunikacije/Digitalna_agenda/Internetni_protokol_ipv6/More-than-50-billion-connected-devices.pdf
- [2] "Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society," METIS 2020, <https://metis2020.com/>
- [3] Next Generation Mobile Networks (NGMN) 5th Generation (5G) White Paper, 17 février 2015, https://www.ngmn.org/fileadmin/ngmn/content/images/news/ngmn_news/NGMN_5G_White_Paper_V1_0.pdf
- [4] Spécifications de la norme "New Radio (NR)" pour la 5G, https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/
- [5] F. Rusek, D. Persson, B. K. Lau, E. G. Larsson, T. L. Marzetta, O. Edfors, and F. Tufvesson, "Scaling Up MIMO: Opportunities and Challenges with Very Large Arrays," IEEE Signal Processing Magazine, vol. 30, no. 1, pp. 40-60, Jan. 2013.
- [6] G. Lerosey, J. d. Rosny, A. Tourin, A. Derode, G. Montaldo and M. Fink, "Time reversal of electromagnetic waves and telecommunication," in Radio Science, vol. 40, no. 06, pp. 1-10, Dec. 2005.
- [7] H. Terchoune, D. Lautru, A. Gati, M. F. Wong, J. Wiart and V. Fouad Hanna, "Investigation of space-time focusing of time reversal using FDTD," 2009 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Boston, MA, 2009, pp. 273-276.

L'AUTEURE

DINH-THUY PHAN-HUY est docteure en électronique et télécommunications de l'INSA de Rennes (2015) et ingénieure Supélec (2001). Elle travaille actuellement aux Orange Labs de Châtillon où elle est responsable de projet et ingénieure R&D senior dans le domaine des réseaux mobiles. Elle dirige le projet de l'Agence nationale de la recherche (ANR) SpatialModulation sur les évolutions de la 5G pour les objets connectés depuis 2016. Elle a dirigé le projet ANR TRIMARAN sur le retournement temporel de 2011 à 2014, récompensé du Prix « Impact Economique » des Rencontres du numérique de l'ANR en 2016. Elle est membre de la communauté « Réseaux du Futur » des Orange Experts depuis 2011.

- [8] D.-T. Phan-Huy, S. Ben Halima, M. H elard, "Dumb-to-perfect receiver throughput ratio maps of a time reversal wireless indoor system," 2013 20th International Conference on Telecommunications (ICT).
- [9] D.-T. Phan-Huy, S. Wesemann, P. Sehier, "How Wireless Dumb Devices Could Attain High Data Rates Thanks to Smart Massive MIMO Networks," accepted to Workshop on Smart Antennas 2019, Vienna, 25th April 2019.
- [10] D.-T. Phan-Huy, M. H elard, "Large MISO beamforming for high speed vehicles using separate receive & training antennas," 2013 IEEE 5th International Wireless Vehicular Communications (WiVeC), 2013.
- [11] D.-T. Phan-Huy, M. Sternad, T. Svensson, "Making 5G adaptive antennas work for very fast moving vehicles," IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine 7 (2), 71-84, 2015.
- [12] D.-T. Phan-Huy, S. Wesemann, J. Bj orsell, M. Sternad, "Adaptive massive MIMO for fast moving connected vehicles: It will work with predictor antennas!," 22nd International Workshop on Smart Antennas (WSA2018), Bochum 2018.
- [13] D.-T. Phan-Huy, A. T olli, N. Rajatheva, E. De Carvalho, "DFT based spatial multiplexing and maximum ratio transmission for mm-wave large MIMO," 2014 IEEE Wireless Comm. and Networking Conference, 913-918, 2014.
- [14] D.-T. Phan-Huy, P. Ratajczak, R. D'Errico, J. Jaervelainen, D. Kong, K. Haneda, B. Bulut, A. Karttunen, M. Beach, E. Mellios, M. Castaneda, M. Hunukumbure, T. Svensson, "Massive Multiple Input Massive Multiple Output for 5G Wireless Backhauling," 2017 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), 1-6 2017.
- [15] D.-T. Phan-Huy, S. Ben Halima, M. H elard, "Frequency division duplex time reversal," 2011 IEEE Global Telecom. Conf. (GLOBECOM 2011), 1-5, 2011.
- [16] D.-T. Phan-Huy, P. Siohan, M. H elard "Make-it-real-and-anticirculating orthogonal space-time coding for MIMO OFDM/OQAM," 2015 IEEE Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC) 2015.
- [17] D.-T. Phan-Huy, M. H elard, "Receive antenna shift keying for time reversal wireless communications," 2012 IEEE International Conference on Communications (ICC), 4852-4856, 2012.
- [18] D.-T. Phan-Huy, Y. Kokar, J. Rioult, N. Malhouroux-Gaffet, J.-C. Pr evotet, C. Buey, P. Ratajczak, M. H elard, Kammel Rachedi, Abedlawheb Ourir, Chirstian Leray, Julien de Rosny, Alain Le Cornec, Azeddine Gati, T. Sarrebourg, Patrice Pajusco, Marco Di Renzo, "First Visual Demonstration of Transmit and Receive Spatial Modulations Using the "Radio Wave Display," WSA 2017- March 15-17, 2017, Berlin, Germany.
- [19] D.-T. Phan-Huy, N. Malhouroux-Gaffet and M. H elard, "Time reversal for ant trails in wireless networks," 2014 IEEE Global Communications Conference, Austin, TX, 2014, pp. 4077-4082.
- [20] D.-T. Phan-Huy, N. Malhouroux-Gaffet, J. Rioult, Y. Kokar, J-C Pr evotet, A. Le Cornec, A Gati, T. Sarrebourg, P. Pajusco, M. H elard "The Radio Waves Display: an Intuitive Way to Show Green Techniques for 5G to the General Public," 2017 IEEE Int'l Conference on Communications Workshops (ICC) 2017.
- [22] https://worldwide.espacenet.com/searchResults?ST=singleline&locale=en_EP&submitted=true&DB=&query=dinh+thuy+phan+huy