

Proposition de thèse

Systèmes de Communication Faster-Than-Nyquist pour canaux sélectifs en fréquence

1. Contexte

Le développement croissant des communications numériques, qu'elles soient mobiles ou fixes, civiles ou militaires, conjointement aux nouveaux services proposés tels que, par exemple, la transmission d'images ou de vidéos à très haute résolution ou la télésurveillance, engendre un besoin d'augmentation substantielle des débits transmis.

Les moyens classiques d'accroissement des débits de transmission correspondent, pour les liaisons dites SISO (Single Input - Single Output) utilisant une seule antenne à l'émission et à la réception, à une augmentation de la bande passante des liaisons et/ou à une augmentation de la puissance des signaux transmis. Toutefois, la pénurie de bande passante disponible dans les gammes de fréquence dédiées aux services les plus standards (réseaux cellulaires, télécommunications par satellite, radiocommunications HF etc...) conjointement aux contraintes d'efficacité énergétique des liaisons, engendre la nécessité de développer d'autres solutions pour accroître le débit des liaisons SISO.

La compression de la durée symbole, c'est-à-dire l'augmentation du débit symbole ou débit baud, à bande passante et à puissance émise constante, constitue une alternative prometteuse aux techniques classiques pour augmenter le débit de transmission. Les liaisons utilisant cette technique sont appelées liaisons Faster Than Nyquist (FTN) [1-2], pour des raisons présentées ci-après.

La thèse proposée vise à évaluer l'intérêt des liaisons FTN dans le contexte des communications numériques pour des canaux de propagation à trajets multiples, dits sélectifs en fréquence, inhérents aux transmissions dans les gammes HF, VHF, UHF, SHF et aux communications mobiles cellulaires en particulier. Des formes d'onde aussi bien mono que multi-porteuses seront considérées pour des systèmes aussi bien mono (SISO) que multi-antennes en réception (SIMO ou Single Input Multiple Output), en émission (MISO ou Multiple Input - Single Output) ou en émission et en réception (MIMO ou Multiple Input - Multiple Output).

Une approche globale multicritères, prenant en compte des critères opérationnels majeurs tels que l'efficacité spectrale de la liaison, le bilan énergétique, la qualité de la liaison, la robustesse aux interférences (involontaires ou volontaires), la complexité des récepteurs associés... sera conduite afin d'appréhender au mieux les avantages/inconvénients des méthodes proposées par rapport aux liaisons classiques dite Nyquist.

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 IMS (Intégration du Matériau au Système) de Talence. La thèse sera co-encadrée par les professeurs Pascal Chevalier, Professeur du CNAM sur la chaire d'Electronique, Guillaume Ferre, Maître de Conférences HDR et Romain Tajan, Maître de Conférences, à l'Université de Bordeaux. Une expertise industrielle de la société Thales, acteur majeur du secteur des communications numériques en particulier et impliquée depuis quelques années dans l'analyse des liaisons FTN (expert Sylvain Traverso), pourra accompagner les travaux menés durant cette thèse.

Le doctorant sera installé au sein du laboratoire CEDRIC du CNAM mais des séjours réguliers au sein du laboratoire IMS de l'université de Bordeaux seront envisagés.

2. Les liaisons Faster-Than-Nyquist

Un des enjeux majeurs de la conception des futurs systèmes de communications numériques réside dans l'augmentation de leur efficacité en termes : d'efficacité spectrale, d'efficacité énergétique, de portée et de latence. Dans un contexte de transmission de symboles, l'efficacité spectrale des systèmes actuels est souvent contrainte par la volonté de transmettre des symboles utilisant des formes d'ondes dites orthogonales, plus faciles à traiter. La condition d'orthogonalité dépend des ressources utilisées et peut être réalisée dans différents domaines tels que : le temps, la fréquence, l'espace, le code etc.

Temporellement, pour les systèmes mono-porteuse, il s'agit de respecter, au moins en canal idéal, le critère de Nyquist d'absence d'interférence entre symboles (IES), qui impose des propriétés sur la version échantillonnée au rythme symbole du filtre équivalent de la chaîne émission/réception. On parle alors de liaisons de type Nyquist.

Fréquentiellement, pour les systèmes multi-porteuses, il s'agit de respecter des espacements entre sous-porteuses permettant de respecter l'orthogonalité entre ces dernières, comme pour l'OFDM, forme d'onde au cœur de la 4G. Cette fois encore, cet espacement est conditionné par l'allure de la densité spectrale de puissance (DSP) du filtre de mise en forme.

Le non-respect délibéré de ces critères d'orthogonalité, par compression de la durée symbole et/ou de l'espacement entre sous-porteuses, c'est-à-dire par choix de liaisons dites Faster Than Nyquist [1-2] mono ou multi-porteuses, permet en particulier d'augmenter l'efficacité spectrale mais au détriment de l'apparition des phénomènes d'IES et, pour les liaisons multi-porteuses, d'interférences entre Porteuses (IEP) à la réception. Il en résulte une augmentation de la complexité des traitements des signaux en réception et, possiblement, une diminution de l'efficacité énergétique ou de la qualité de la communication. Il apparaît alors contradictoire de chercher à améliorer simultanément le triptyque efficacité spectrale, efficacité énergétique, qualité ou portée de la liaison sous la contrainte de garder une complexité de récepteurs raisonnable. Il s'agit plutôt d'étudier dans quelle mesure l'amélioration d'un ou plusieurs paramètres détériore le ou les autres afin de trouver les meilleurs compromis.

Les enjeux du travail de recherche du présent projet de thèse concernent l'optimisation de ce triptyque dans le cadre de communications numériques dites FTN, où les critères d'orthogonalités en temps et/ou en fréquence ne seront pas respectés.

3. Etat de l'art

La pénurie de bande passante VHF-UHF couplée à la puissance de calcul des processeurs de traitement du signal, aux récentes avancées en traitement du signal pour les communications numériques, aux besoins de faible latence, pousse la communauté scientifique à se détourner des critères d'orthogonalités entre symboles jusqu'alors fondamentaux dans les systèmes de communications numériques.

Mazo fait partie des pionniers à avoir analysé l'approche communément appelée *Faster Than Nyquist*. Les premiers travaux sur le FTN remontent aux années 70. En particulier, Mazo [3] a démontré que si un traitement adapté de l'IES est réalisé, il est possible de décoder le signal émis avec les mêmes performances de décodage, en termes de probabilité d'erreur binaire sur canal à bruit blanc

additif Gaussien, que le système travaillant au rythme de Nyquist. Il est donc possible d'augmenter l'efficacité spectrale, à puissance émise constante, sans dégrader les performances de décodage. Néanmoins, cette augmentation est obtenue au prix d'une complexité supplémentaire à la réception.

Malgré l'intérêt des résultats de Mazo, le gain de bande passante vis-à-vis de l'augmentation de la complexité du récepteur n'était pas une motivation suffisante pour que le concept de liaison FTN suscite un engouement pour la communauté scientifique. Depuis les choses ont beaucoup évolué. En effet, comme précisé précédemment, la pénurie de bande passante et les travaux de Rusek et Anderson [4], dans lesquels il est démontré qu'un système FTN permet d'atteindre le débit d'information maximal pour des signaux à DSP imposée, ont entraîné un regain d'intérêt considérable pour les systèmes FTN. Les projets Européen METIS I, II (<https://metis-ii.5g-ppp.eu>) et 5G-NOW (<http://www.5gnow.eu>), ou encore le projet ANR WONG5 sont aussi des indicateurs quant à l'engouement actuel autour des systèmes non-orthogonaux.

Jusqu'à très récemment, la plupart des travaux de l'état de l'art sur le FTN étudient le FTN à l'aune d'un seul paramètre comme :

- le taux d'erreur binaire (TEB) [3], [5-6] où il est montré qu'une augmentation de l'efficacité spectrale est possible, à puissance constante, sans augmentation de la bande passante ni du TEB.
- l'efficacité spectrale [5] où il est montré que le débit d'information théorique est accru pour des transmissions codées, en utilisant une communication FTN, par rapport à une communication Nyquist à DSP constante.
- le peak to average power ratio (PAPR) [7] où le compromis entre PAPR et efficacité spectrale est étudié dans un contexte de communications satellitaires en présence de défauts d'amplificateurs (non-linéarité).
- la complexité : en effet, les récepteurs optimaux au sens du taux d'erreur trame ou du taux d'erreurs binaires pour les communications FTN sont des récepteurs de type du maximum de vraisemblance (algorithme de Viterbi) ou MAP (algorithme BCJR) [8-9] qui opèrent sur un treillis de M^L états (ou M est le nombre de symboles de la constellation de la modulation et L la mémoire du canal équivalent). Ces récepteurs sont très coûteux et des récepteurs alternatifs ont été envisagés dans la littérature. Parmi ceux-ci on peut citer ceux basés sur des algorithmes travaillant sur des treillis simplifiés (M-Viterbi, M-BCJR) [10], lesquels restent très coûteux, et ceux, moins coûteux, travaillant avec des critères d'optimisation différents (MMSE, MMSE-DFE..) [11], mais qui s'avèrent souvent beaucoup moins performants.

En outre, la plupart des travaux de la littérature relatifs aux liaisons FTN considèrent des liaisons SISO et des canaux idéaux ou non sélectifs en fréquence. Ils sont adaptés à certaines applications telles que les liaisons satellite.

Les travaux les plus avancés sur ce thème concernent la thèse CIFRE de Titouan Petitpied, financée par Thales et co-encadrée par l'IMS et le CEDRIC, qui prend fin en Décembre 2020. Dans le cadre de cette thèse, une analyse multi-critères, fondamentale pour envisager une mise en oeuvre opérationnelle, a été adoptée pour la première fois dans le contexte des liaisons FTN. Il a été montré [12-13], qu'en utilisant des récepteurs très novateurs et itératifs dits EP (Expectation Propagation), empruntés à la théorie du "Machine Learning" et introduits très récemment dans le domaine des communications numériques [14-16], on pouvait envisager l'optimisation de liaisons FTN à complexité raisonnable permettant d'atteindre des efficacités spectrales jusqu'à 3 à 5 bits/s/Hz, résultat non envisageable avec des liaisons de type Nyquist.

Toutefois, ces résultats ne concernent que les systèmes SISO mono-porteuse et ne sont pas exploitables pour les liaisons à canaux sélectifs en fréquence telles que les liaisons HF, ou celles relatives aux réseaux mobiles cellulaires. Dans ce contexte, il s'agit de poursuivre les travaux

précédents en les adaptant aux canaux sélectifs en fréquence, pour des liaisons SISO aussi bien mono que multi-porteuses, puis aux systèmes SIMO/MISO/MIMO mono et multi-porteuses, puis, le cas échéant, aux systèmes MIMO multi-utilisateurs.

La première originalité de l'approche proposée repose notamment sur la prise en compte des récepteurs itératifs à complexité raisonnable de type EP. La seconde originalité est relative à la prise en compte de la liaison dans sa globalité, via une analyse multicritères, mêlant efficacité spectrale, efficacité énergétique, qualité/portée de liaison, complexité du récepteur et intégrant également des contraintes RF/FI/BB comme celles en lien avec : la linéarité des amplificateurs de puissance utilisés (critère du PAPR) ou encore celles relatives à la désynchronisation temps/fréquence des signaux reçus (robustesse aux erreurs de synchronisation). Les résultats obtenus seront comparés avec les approches orthogonales classiques afin d'être en mesure de juger de l'efficacité des propositions.

4. Organisation des travaux

Tout en ciblant un haut niveau d'innovation théorique, principalement en termes de propositions algorithmiques en réception et d'évaluation multi-critères des performances de la chaîne de communications numériques associée, la thèse vise à l'applicabilité opérationnelle des innovations techniques et algorithmiques qui seront proposées.

Afin d'atteindre les objectifs décrits précédemment, le travail sera découpé en 4 étapes :

- Etape 1 : systèmes FTN SISO/SIMO mono-porteuse,
- Etape 2 : systèmes FTN SISO/SIMO multi-porteuses,
- Etape 3 : systèmes FTN MISO/MIMO mono et multi-porteuses,
- Etape 4 : systèmes FTN multi-utilisateurs MIMO.

4.1 Systèmes FTN SISO/SIMO mono-porteuse

Cette première étape s'inscrit dans la continuité du travail effectué par Titouan PETITPIED dans le cadre de sa thèse. Il s'agit d'adapter les récepteurs itératifs dits EP développés dans sa thèse aux liaisons FTN SISO/SIMO mono-porteuse pour des canaux sélectifs en fréquence. Dans un second temps, ces liaisons seront évaluées pour différents étalements temporels et sélectivité en fréquence du canal.

4.2 Systèmes FTN SISO/SIMO multi-porteuses

Dans cette seconde étape, il s'agira d'étendre les résultats de l'étape 1 au cas des communications FTN multi-porteuses. Une étude bibliographique sera nécessaire pour positionner les travaux par rapport à l'existant et pour faire le point sur les récents résultats. La littérature comporte un certain nombre de travaux dans ce contexte comme en particulier [17-29] et leurs références. En revanche, ces études ne considèrent pas les récepteurs EP.

L'objectif de cette étape sera dans un premier temps d'étendre les récepteurs EP de l'étape 1 aux liaisons FTN pour formes d'onde multi-porteuses, puis de comparer les performances de ces récepteurs à ceux de la littérature actuelle et aux performances des liaisons de type Nyquist multi-porteuses, c'est-à-dire aux approches multi-porteuses orthogonales.

4.3 Systèmes FTN MISO/MIMO mono et multi-porteuses

Dans cette étape il s'agira d'étendre les résultats des étapes 1 et 2, à base de récepteurs EP, au cas des systèmes de communications MISO/MIMO [30-31], au coeur des liaisons 4G et 5G, et

incontournables pour la plupart des systèmes "Beyond5G" et la 6G, dans le but d'augmenter les performances et le débit de transmission à puissance et bande constantes. Une étude bibliographique sera nécessaire pour positionner les travaux par rapport à l'existant et pour faire le point sur les récents résultats. L'extension des communications FTN aux systèmes MIMO a été proposée en 2007 par [32]. Plus récemment des récepteurs à plus faible complexité ont été proposés [33-35]. Des récepteurs EP ont été appliqués récemment aux systèmes MIMO mais pour des liaisons de type Nyquist [36-37].

4.4 Systèmes FTN MIMO multi-utilisateurs

Dans cette étape il s'agira d'étendre les résultats de l'étape 3 dans un contexte multi-utilisateurs. Une étude bibliographique sera nécessaire pour positionner les travaux par rapport à l'existant et pour faire le point sur les récents résultats.

5. Références

- [1] J.B. Anderson, F. Rusek, V. Owall, "Faster-Than Nyquist Signaling ", Proceedings of the IEEE, Vol 101, N°8, pp. 1817-1830, August 2013.
- [2] J. Fan, S. Guo, X. Zhou, Y. Ren, G.Y. Li, X. Chen, "Faster-Than-Nyquist Signaling: An overview", IEEE Access, Vol 5, pp. 1925-1940, 2017.
- [3] J. E. Mazo, "Faster-than-Nyquist signaling," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 54, no. 8, pp. 1451–1462, 1975.
- [4] F. Rusek and J. B. Anderson, "Constrained Capacities for Faster-Than-Nyquist Signaling," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 55, no. 2, pp. 764–775, Feb. 2009.
- [5] J. E. Mazo and H. J. Landau, "On the minimum distance problem for faster-than-Nyquist signaling," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 34, no. 6, pp. 1420–1427, 1988.
- [6] A. D. Liveris and C. N. Georghiades, "Exploiting faster-than-Nyquist signaling," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, no. 9, pp. 1502–1511, Sep. 2003.
- [7] J.-A. Lucciardi, N. Thomas, M.-L. Boucheret, C. Poulliat, and G. Mesnager, "Trade-off between spectral efficiency increase and PAPR reduction when using FTN signaling: Impact of non linearities," in *IEEE International Conference on Communications (ICC 2016)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2016, pp. 1–7.
- [8] G. Forney, "Maximum-likelihood sequence estimation of digital sequences in the presence of intersymbol interference," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 18, no. 3, pp. 363–378, 1972.
- [9] G. Ungerboeck, "Adaptive maximum-likelihood receiver for carrier-modulated data-transmission systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 22, no. 5, pp. 624–636, 1974.
- [10] 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.
- [11] M. Tuchler, A. Singer, "Turbo-Equalization: An overview" *IEEE Trans. Info. Theory*, vol. 57, no. 2, pp. 920–952, Feb. 2011.
- [12] 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, (Hawai) , Dec 2019.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] F. Rusek and J. B. Anderson, "The two dimensional Mazo limit," in *Proceedings. International Symposium on Information Theory, 2005. ISIT 2005.*, 2005, pp. 970–974.
- [18] J. B. Anderson and F. Rusek, "Improving OFDM: Multistream faster-than-Nyquist signaling," in *Turbo Codes&Related Topics; 6th International ITG-Conference on Source and Channel Coding (TURBOCODING), 2006 4th International Symposium on*, 2006

- [19] A. Barbieri, D. Fertonani, and G. Colavolpe, "Time-frequency packing for linear modulations: spectral efficiency and practical detection schemes," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 57, no. 10, pp. 2951–2959, Oct. 2009.
- [20] F. Rusek and J. Anderson, "Multistream Faster than Nyquist Signaling," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 57, no. 5, pp. 1329–1340, May 2009.
- [21] D. Dasalukunte, F. Rusek, and V. Owall, "An Iterative Decoder for Multicarrier Faster-Than-Nyquist Signaling Systems," in *2010 IEEE International Conference on Communications*, 2010, pp. 1–5.
- [22] S. Isam and I. Darwazeh, "Simple DSP-IDFT techniques for generating spectrally efficient FDM signals," in *Communication Systems Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP), 2010 7th International Symposium on*, 2010, pp. 20–24.
- [23] S. Isam and I. Darwazeh, "Peak to average power ratio reduction in spectrally efficient FDM systems," in *Telecommunications (ICT), 2011 18th International Conference on*, 2011, pp. 363–368.
- [24] D. Dasalukunte, F. Rusek, and V. Owall, "Multicarrier Faster-Than-Nyquist Transceivers: Hardware Architecture and Performance Analysis," *IEEE Trans. Circuits Syst. Regul. Pap.*, vol. 58, no. 4, pp. 827–838, Apr. 2011.
- [25] A. Modenini, G. Colavolpe, and N. Alagha, "How to significantly improve the spectral efficiency of linear modulations through time-frequency packing and advanced processing," in *2012 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2012, pp. 3260–3264.
- [26] S. Isam and I. Darwazeh, "Robust channel estimation for spectrally efficient FDM system," in *Telecommunications (ICT), 2012 19th International Conference on*, 2012, pp. 1–6.
- [27] A. Piemontese, A. Modenini, G. Colavolpe, and N. S. Alagha, "Improving the Spectral Efficiency of Nonlinear Satellite Systems through Time-Frequency Packing and Advanced Receiver Processing," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 61, no. 8, pp. 3404–3412, Aug. 2013.
- [28] M. Secondini *et al.*, "Optical Time "Frequency Packing: Principles, Design, Implementation, and Experimental Demonstration," *J. Light. Technol.*, vol. 33, no. 17, pp. 3558–3570, Sep. 2015.
- [29] T. Xu and I. Darwazeh, "Spectrally Efficient FDM: Spectrum Saving Technique for 5G?," 2014.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] F. Rusek, "A first encounter with faster-than-Nyquist signaling on the MIMO channel," in *2007 8th IEEE Wireless Communications and Networking Conference (IEEE Cat No. 07TH8918)*, 2007, pp. 1094–1098.
- [33] M. McGuire, A. Dimopoulos, and M. Sima, "Faster-than-Nyquist Single-Carrier MIMO Signaling," in *2016 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 2016, pp. 1–7.
- [34] B. G. Jo, M. C. Park, and D. S. Han, "SM-MIMO scheme with FTN signalling for UHD TV," in *2016 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, 2016, pp. 514–515.
- [35] G.-W. Park and J.-W. Jung, "A study on MIMO-FTN scheme based on layered space time code using turbo codes," in *2016 Eighth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, 2016, pp. 505–507.
- [36] 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.
- [37] 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