

Contribution à l'optimisation de la couche physique des réseaux 5G

Theodoret N.¹, Randriamitantsoa P. A.², Randriamitantsoa A. A.³

Laboratoire de Recherche en Télécommunication, Automatique, Signal et Images (LR-TASI)
École Doctorale en Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation (ED-STII)
Équipe d'Accueil Doctorale Télécommunication, Automatique, Signal et Images (EAD-TASI)
Université d'Antananarivo

BP 1500, Ankatso – Antananarivo 101 – Madagascar

¹nosisoa0908@gmail.com, ²rpauguste@gmail.com, ³andriau23@gmail.com

Résumé

En environnement réel, les performances du système de transmission dépendent des caractéristiques du canal de propagation (canal plat ou canal sélectif) et du profil des utilisateurs qui sont classés en fonction de leur vitesse de mobilité.

Suivant les besoins des usagers, les concepteurs doivent tenir compte de plusieurs facteurs comme la rapidité de transfert des données (temps de latence), la capacité à recevoir des informations fiables (faible taux d'erreur binaire) malgré les conditions de transmission extrêmes (vitesse allant jusqu'à 500 km/h). Dans cette optique, il est primordial d'optimiser la couche physique responsable de la transmission et la réception des signaux radios. Cela se traduirait par l'adoption d'une technique de modulation en mesure de supporter les nouvelles exigences technologiques imposées par la 5G.

La modulation FBMC-OQAM présente des avantages qui la rendent attrayante pour les réseaux 5G notamment pour les communications V2V dont le succès repose sur une communication fiable et ultra-rapide.

Dans cet article, nous envisageons de précoder la modulation FBMC-OQAM par la matrice DFT afin de restaurer l'orthogonalité complexe du système.

La finalité de nos recherches est de proposer la modulation FBMC-OQAM précodée comme technique d'accès en liaison montante pour remplacer la technique SC-FDMA utilisée par la 4G.

Abstract

In the real world, the performance of the transmission system depends on the characteristics of the transmission channel (flat channel or selective channel) and the profile of the users who are classified according to their mobility speed. Depending on the needs of users, designers must take into account several factors such as the speed of data transfer (latency), the ability to receive reliable information (low bit error rate) despite extreme transmission conditions (speed up to 500 kilometres per hour). In this context, it is essential to optimize the physical layer responsible for the transmission and reception of radio signals. This would result in the adoption of a modulation technique able to support the new technological requirements imposed by 5G.

FBMC-OQAM modulation has advantages that make it attractive for 5G networks especially for V2V communications whose success is based on reliable and ultra-fast communication.

In this paper, we plan to precode the FBMC-OQAM modulation with the DFT matrix in order to restore the complex orthogonality of the system.

The purpose of our research is to propose precoded FBMC-OQAM modulation as an uplink access technique to replace the SC-FDMA technique used by 4G.

Keywords : 5G, FBMC-OQAM, latency, BER, spectral efficiency, energy efficiency.

1. Introduction

Les attentes des utilisateurs sont de plus en plus pressantes en termes de débit de transmission et de seuil de latence acceptable. Le déploiement de la 5G permettra de fournir un réseau fiable avec des performances homogènes et des qualités de services hétérogènes en fonction des demandes des utilisateurs quelle que soit sa position par rapport à la station de base.

En outre, le réseau 5G sera en mesure d'intégrer un ensemble de technologies englobant tous les usages liés à l'internet des objets (mMTC) et aux applications garantissant des communications ultra-fiables et à faible temps de latence (uRLLC) ou des communications ultra-haut débit (eMBB). [01] [02]

Pour faire face à cette augmentation exponentielle de besoins, un schéma de modulation élaboré devra être mis en place afin de maximiser l'exploitation efficace de la bande passante tout en utilisant des dispositifs qui ne sont pas énergivores.

La modulation OFDM est largement utilisée par les communications sans fil.

Cependant, la modulation OFDM présente un PAPR élevé qui détériore l'efficacité de l'amplificateur de puissance et augmente la consommation de la batterie. Ensuite, l'ajout du préfixe cyclique pour renforcer la robustesse de la technique OFDM face aux interférences entre symboles conduit à une perte de l'efficacité de la bande. Enfin, la modulation OFDM n'a pas une bonne localisation en fréquence, ce qui augmente les fuites hors bande et détériore le confinement spectral. [03]

2. Principales contributions et méthodologies

D'un point de vue théorique, cet article permet d'établir un nouveau cadre de recherche basé sur le profil des modulations multi-porteuses FBMC-OQAM qui se rapprochent des exigences technologiques imposées par les réseaux 5G malgré la

pression de certains opérateurs à soutenir le maintien de l'adoption des modulations OFDM.

Le banc de test utilisé est un outil de mesure en temps quasi-réel puisque le signal est généré hors ligne pour être ensuite transmis sur un canal sans fil et pour finalement être évalué hors ligne, permettant ainsi d'évaluer les performances des réseaux à grande échelle à l'aide des simulations de Monte Carlo.

Les paramètres de mesure utilisés au cours des simulations sont :

- La **densité spectrale de puissance** (DSP) : C'est un paramètre qui permet d'observer la répartition fréquentielle de la puissance d'un signal suivant les fréquences qui le composent.
- L'**efficacité spectrale** : C'est une métrique liée à la capacité du canal de transmission permettant de caractériser l'efficacité d'utilisation des ressources spectrales. Elle détermine si la bande passante est utilisée de façon optimale et se calcule à partir du rapport entre le débit binaire (en bits/s) et la bande passante (en Hz).
- L'**efficacité énergétique du réseau** : Cet indicateur de mesure correspond à la quantité de bits d'information transmise aux usagers ou reçue des usagers, par unité de consommation d'énergie du réseau d'accès radio.
- L'**émission hors bande** (OOB ou Out-Of-Band) : C'est une émission sur une ou des fréquences situées en dehors de la largeur de bande nécessaire
- Le **rapport signal sur bruit** (SNR) : C'est un paramètre qui permet de mesurer l'impact de la puissance du signal parasite sur la puissance du signal transmis.
- La **probabilité d'erreur binaire** (BER) : C'est un paramètre qui permet de définir le taux auquel des erreurs se produisent dans un système de transmission.

Les figures 01, 02 et 03 permettent de mettre en évidence les principales différences entre la modulation CP-OFDM,

la modulation FBMC-OQAM et la modulation FBMC-OQAM précodée. D'après la figure 01 et la figure 02, la modulation FBMC se différencie de la modulation OFDM par les aspects suivants :

- Les modules IFFT/FFT de la modulation OFDM sont remplacés par les bancs de filtres de synthèse et d'analyse
- L'insertion de préfixe cyclique n'est pas nécessaire pour la modulation FBMC.
- Pour la modulation FBMC, chaque sous-canal est filtré séparément.
- La fonction prototype de la modulation OFDM est un filtrage rectangulaire, égale à l'inverse de l'espacement entre les sous-porteuses pour assurer l'orthogonalité. Par contre, la modulation FBMC peut bénéficier d'un large choix de filtre prototype auquel on peut appliquer une structure polyphase.

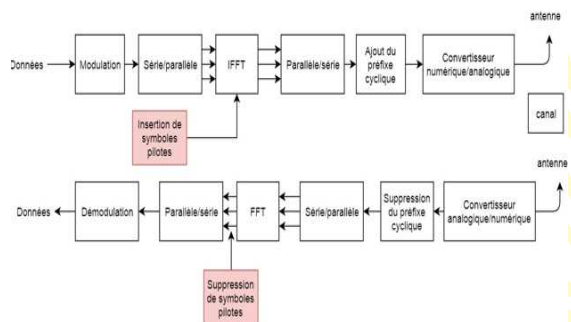


Figure 01 : Schéma en bloc de la modulation CP-OFDM

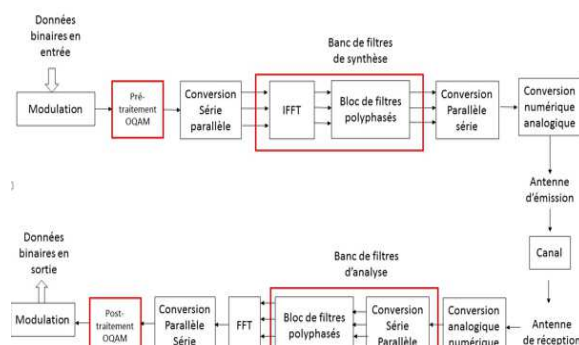
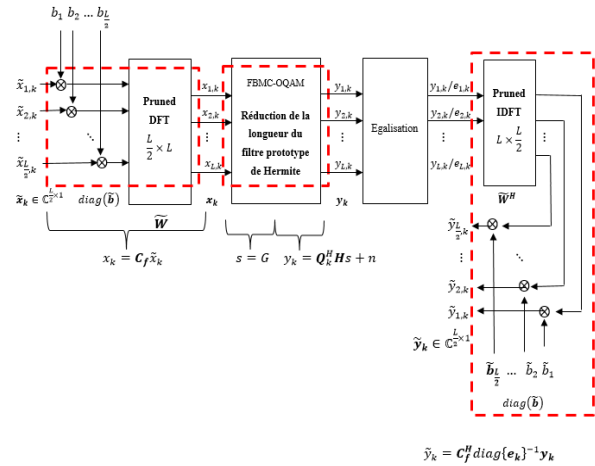


Figure 02 : Schéma en bloc de la modulation FBMC-OQAM



Le précodage est une technique qui permet de restaurer l'orthogonalité complexe de la modulation FBMC-OQAM en utilisant une matrice de précodage DFT de taille plus petite que celle utilisée par la technique d'accès SC-FDMA. [05]

Dans les systèmes FBMC-OQAM, chaque position temps-fréquence ne peut porter que des symboles réels, de sorte que nous avons besoin de 2 time-slots pour transmettre 1 symbole complexe. Les symboles à valeurs réelles sont transmis sur une grille temps-fréquence rectangulaire, favorisant alors l'apparition des interférences intrinsèques.

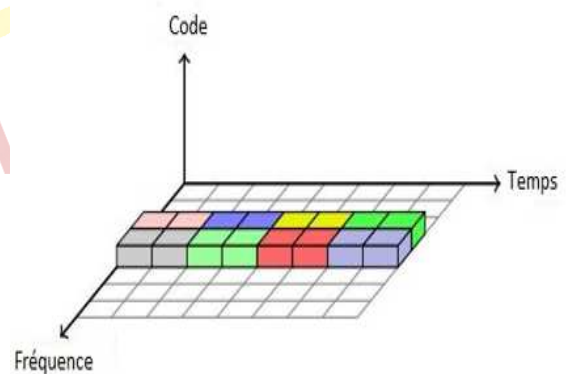


Figure 04 : Représentation temps-fréquence de la modulation FBMC-OQAM classique

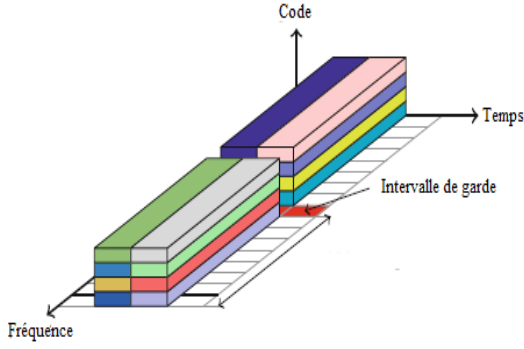


Figure 05 : Représentation temps-fréquence de la modulation FBMC-OQAM précodée

Contrairement à la modulation FBMC conventionnelle, les symboles de données pour le cas de la modulation FBMC-OQAM précodée n'appartiennent plus à une certaine position temps-fréquence, mais sont répartis sur plusieurs positions temporelles ou fréquentielles afin de restaurer l'orthogonalité complexe dans un bloc. [05] [06]

2.1. Modélisation des modulations multi-porteuses

L'expression mathématique du signal transmis $s(t)$ s'exprime comme suit :

$$s(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L g_{l,k}(t) x_{l,k} \quad (1)$$

Le symbole $x_{l,k}$ de l'alphabet χ est un symbole issu d'une constellation QAM et transmis à la $l^{\text{ème}}$ sous-porteuse et à la $k^{\text{ème}}$ position temporelle.

L'impulsion de base transmise $g_{l,k}(t)$ est une version décalée en temps et fréquence du filtre prototype $p_{TX}(t)$ définie par l'expression suivante:

$$g_{l,k}(t) = p_{TX}(t - kT) e^{j2\pi lF(t-kT)} e^{j\theta_{l,k}} \quad (2)$$

Où T représente l'espacement temporel et F désigne l'espacement entre sous-porteuses.

Après la transmission du signal sur un canal AWGN, les symboles reçus sont décodés en projetant le signal reçu $r(t)$ sur les impulsions de base de réception $q_{l,k}(t)$.

$$y_{l,k} = \langle r(t), q_{l,k}(t) \rangle \quad (3)$$

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} r(t) q_{l,k}^*(t) dt$$

L'expression de l'impulsion de base de réception $q_{l,k}(t)$ est donnée par:

$$q_{l,k}(t) = p_{RX}(t - kT) e^{j2\pi lF(t-kT)} e^{j\theta_{l,k}} \quad (4)$$

Soient $f_s = \frac{1}{\Delta t} = FN_{FFT}$ la fréquence d'échantillonnage, L le nombre de sous-porteuses et O le facteur de chevauchement avec $N_{FFT} \geq L$.

Pour $-\frac{OT_0}{2} + T \leq t < \frac{OT_0}{2} + KT$,

l'impulsion de base échantillonnée $g_{l,k}(t)$ s'exprime comme suit :

$$[g_{l,k}]_i = \sqrt{\Delta t} g_{l,k}(t) \Big|_{t=(i-1)\Delta t - \frac{OT_0}{2} + T} \quad (5)$$

Où $i = 1, 2, \dots, N$

Avec $N = (OT_0 + T(K-1))f_s$

La matrice de transmission $\mathbf{G} \in \mathbb{C}^{N \times LK}$ s'exprime comme suit:

$$\mathbf{G} = [g_{1,1} \dots g_{L,1} \quad g_{1,2} \dots g_{L,K}] \quad (6)$$

Où L est le nombre de sous-porteuses et K est le nombre de symboles transmis pour une période donnée.

Le vecteur de symboles transmis $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{LK \times 1}$ qui regroupe tous les symboles de données transmis est donné par :

$$\mathbf{x} = \text{vec} \left\{ \begin{bmatrix} x_{1,1} & \dots & x_{1,K} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{L,1} & \dots & x_{L,K} \end{bmatrix} \right\} \quad (7)$$

$$= [x_{1,1} \dots x_{L,1} \quad x_{1,2} \dots x_{L,K}]^T$$

Sous forme matricielle, le signal transmis $\mathbf{s} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ définie par l'expression (1) va s'exprimer comme suit :

$$\mathbf{s} = \mathbf{G}\mathbf{x} \quad (8)$$

La matrice de réception $\mathbf{Q} \in \mathbb{C}^{N \times LK}$ s'exprime comme suit :

$$\mathbf{Q} = [q_{1,1} \dots q_{L,1} \quad q_{1,2} \dots q_{L,K}] \quad (9)$$

Pour modéliser un canal variant dans le temps et subissant les effets des trajets multiples, on utilise une réponse

impulsionnelle $h[m_\tau, n]$ où n représente la position temporelle et m_τ le délai.

Pour exprimer la réponse impulsionnelle, on utilise une matrice de convolution $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{N \times N}$ variant dans le temps définie par :

$$[H]_{i,j} = h[i - j, i] \quad (10)$$

L'expression (3) va alors se réécrire comme suit:

$$y = Q^H r = Q^H H G x + n \quad (11)$$

Où $\mathbf{r} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ représente le signal reçu échantillonné et

$n \sim \mathcal{CN}(0, P_n, Q^H Q)$ représente le bruit blanc gaussien additive tel que P_n est la puissance du bruit blanc gaussien dans le domaine temporel.

Les interférences induites par le canal sont négligeables par rapport au bruit, ce qui signifie que les éléments non diagonaux de $Q^H H$ sont si petits qu'ils sont dominés par le bruit d'où on pourra déduire l'expression suivante :

$$y \approx \text{diag}\{h\} Q^H G x + n \quad (12)$$

2.2. Principes de la modulation FBMC-OQAM précodée

Le système Pruned DFT Spread se caractérise par la restauration de l'orthogonalité complexe du système via la matrice de précodage $\tilde{\mathbf{W}}$ qui permet d'étaler les données dans le domaine temporel et par l'utilisation d'un filtre prototype de Hermite tronqué.

Le signal de transmission peut être modélisé par l'expression suivante :

$$s = \sum_{k=1}^K G_k x_k = G x \quad (13)$$

Où $G_k \in \mathbb{C}^{N \times L}$ telle que $G_k = \begin{bmatrix} g_{1,k} & \dots & g_{L,k} \end{bmatrix}$ et $x_k = \begin{bmatrix} x_{1,k} & \dots & x_{L,k} \end{bmatrix}^T \in \mathbb{C}^{L \times 1}$

L'expression du système de transmission global, similaire à l'expression (4.15), est donnée par la relation suivante :

$$y \approx \text{diag}\{h\} Q^H G x + n \quad (14)$$

Les $L/2$ symboles de données complexes $\tilde{x}_k \in \mathbb{C}^{L/2 \times 1}$ sont répartis sur L sous-porteuses grâce à la matrice de précodage C_f .

Les symboles FBMC transmis à la position temporelle k s'expriment comme suit:

$$x_k = C_f \tilde{x}_k \quad (15)$$

Où $C_f \in \mathbb{C}^{L \times L/2}$ représente la matrice d'étalement de fréquence.

Les symboles de données reçus $\tilde{y}_k \in \mathbb{C}^{L/2 \times 1}$ sont obtenus par une simple égalisation des symboles reçus $e_k \in \mathbb{C}^{L \times 1}$ tels que:

$$\tilde{y}_k = C_f^H \text{diag}\{e_k\}^{-1} y_k \quad (16)$$

On admet que $H = I_N$.

Pour restaurer l'orthogonalité complexe, la condition suivante doit être respectée :

$$C_f^H Q_k^H G_k C_f \approx I_{L/2} \quad (17)$$

L'opération d'étalement (Spreading) et l'opération inverse d'étalement (Despreading) sont assurées par une matrice DFT notée $\mathbf{W} \in \mathbb{C}^{L \times L}$.

On considère le vecteur auxiliaire $\mathbf{a} = \text{diag}\{\mathbf{W}^H Q_k^H G_k \mathbf{W}\}$ tel que $\mathbf{a} \in \mathbb{R}^{L \times 1}$.

La technique *Pruned DFT Spread FBMC* consiste alors à utiliser une matrice de précodage C_f pour diminuer la taille de la DFT, de sorte que seuls les vecteurs colonnes de $\mathbf{W}$ correspondant aux $\frac{L}{2}$ plus grands éléments de $\mathbf{a}$ sont utilisés, c'est-à-dire uniquement les premiers vecteurs $\frac{L}{2}$ de $\mathbf{W}$.

La matrice de précodage peut être modélisée comme suit :

$$C_f = \tilde{\mathbf{W}} \text{diag}\{\tilde{\mathbf{b}}\} \quad (18)$$

Où $\tilde{\mathbf{W}} \in \mathbb{C}^{L \times L/2}$ qui correspond à la matrice

DFT définie par $\tilde{\mathbf{W}} = \mathbf{W} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{L/2} \\ \mathbf{0}_{L/2} \end{bmatrix}$ et $\tilde{\mathbf{b}} \in \mathbb{R}^{L/2 \times 1}$

est un facteur d'échelle défini par $[\tilde{\mathbf{b}}]_i = \sqrt{\frac{1}{|a|_i}}$ avec $i = 1, 2, \dots, \frac{L}{2}$.

L'élément $[a]_i$ correspond au $i^{\text{ème}}$ vecteur colonne de $\mathbf{W}$.

Le filtre prototype de Hermite tronqué est utilisé par le système: il s'agit d'un filtre prototype de Hermite pour lequel l'impulsion est mis à zéro après le premier passage par zéro.

3. Résultats et interprétations

Scénario 1 : Communication sans fil impliquant les services V2V et V2I

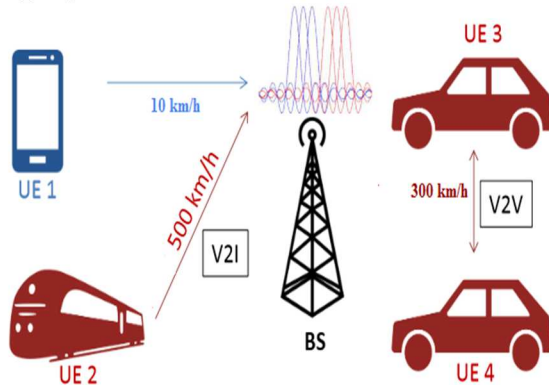


Figure 06 : Communication sans fil impliquant les services V2V et V2I

On utilisera la même puissance de transmission $P_s = \frac{1}{KT} \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbb{E}\{|s(t)|^2\}$ pour les trois systèmes afin de fiabiliser les mesures de comparaison.

Pour la mise en forme des impulsions, on a utilisé le filtre prototype de Hermite en raison de sa bonne localisation temporelle et fréquentielle.

Pour la modélisation du canal, on a opté pour le modèle de Rayleigh à spectre Doppler de Jakes.

Pour caractériser le décalage Doppler, on calcule $v_{max} = \frac{v}{c} f_c$ où v indique la vitesse, c est la célérité de la lumière et f_c donne la fréquence de la porteuse.

L'espacement entre les sous-porteuses est égal à $F = 15$ kHz.

Le schéma de modulation utilisé par les trois systèmes est la modulation 64-QAM.

Le nombre de trajets multiples est 200.

L'une des exigences techniques des réseaux 5G est une transmission fiable à faible temps de latence et dans des conditions extrêmes, c'est pourquoi nous allons prendre des délais de retards extrêmement

fiables et des vitesses pouvant aller jusqu'à 500 km/h.

- **Profil 1 :** un piéton marchant à une vitesse de 10 km/h
 - a. La racine carrée moyenne du délai de propagation par trajets multiples (RMS) a été fixée à 46 ns.
 - b. La fréquence d'échantillonnage est égale à 10.08 MHz.
 - c. On se place dans le cas d'un canal à évanouissement plat.
- **Profil 2 :** un conducteur roulant à une vitesse allant de 0 à 500 km/h
 - a. La racine carrée moyenne du délai de propagation par trajets multiples (RMS) a été fixée à 370 ns.
 - b. La fréquence d'échantillonnage est de 2.94 MHz.
 - c. On se place dans le cas d'un canal doublement sélectif

La figure 07 représente la probabilité d'erreur binaire (BEP) d'un système utilisant les modulations OFDM, CP-OFDM et FBMC pour transmettre les symboles de données dans le contexte d'un canal plat (Profil 1).

La figure 08 illustre la probabilité d'erreur binaire (BEP) d'un système utilisant les modulations OFDM, CP-OFDM et FBMC dans le contexte d'un canal doublement sélectif (Profil 2).

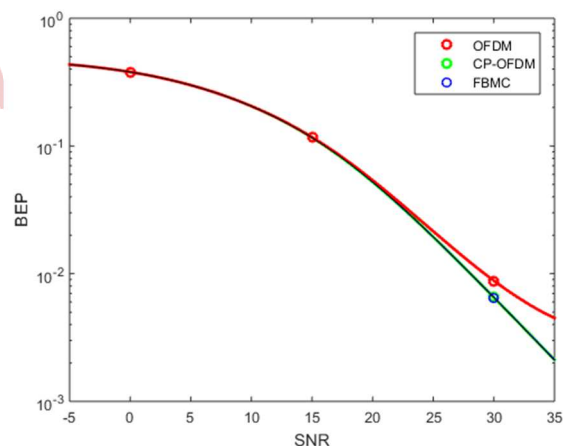


Figure 07 : Probabilité d'erreur binaire pour le cas d'un canal plat

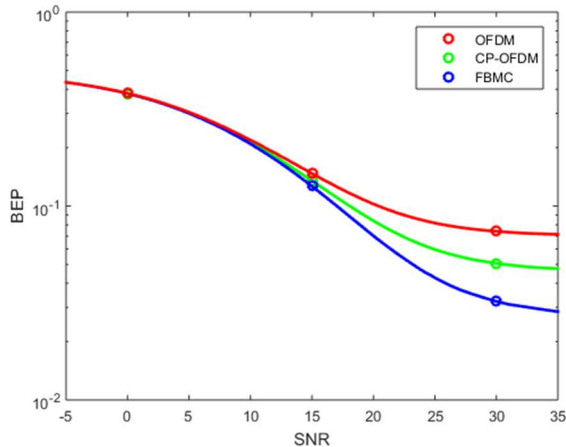


Figure 08 : Probabilité d'erreur binaire pour le cas d'un canal doublement sélectif

Les résultats observés dans les figures 07 et 08 montrent les points suivants :

Les modulations multi-porteuses sont fortement sensibles au décalage fréquentiel : cela se traduit par l'ajout du bruit qui contribue à la dégradation du taux d'erreur binaire.

Parmi les 3 modulations étudiées, la modulation OFDM est la plus affectée par le décalage en fréquence. Toutefois, l'insertion du préfixe cyclique permet d'améliorer ses performances en BER.

Dans un canal plat, les modulations CP-OFDM et FBMC ont les mêmes performances en BER.

Dans un canal doublement sélectif, le taux d'erreur binaire est identique pour les trois modulations jusqu'à une certaine valeur du SNR. Cependant, les modulations OFDM et CP-OFDM ne surpassent les performances de la modulation FBMC en termes de taux d'erreur binaire.

Ainsi, les modulations multi-porteuses sont très sensibles au décalage fréquentiel, lequel se traduit par l'ajout de bruit sur les symboles, ce qui explique la dégradation du BER. Toutefois, par rapport aux autres techniques de modulation (OFDM et CP-OFDM), la modulation FBMC-OQAM surmonte le problème du décalage en fréquence et offre la meilleure performance en termes de BEP.

Pour quantifier l'influence de la vitesse sur la probabilité d'erreur binaire dans un canal

doublement sélectif, nous reprenons le profil 2 qui correspond à un conducteur roulant à une vitesse allant de 0 à 500 km/h.

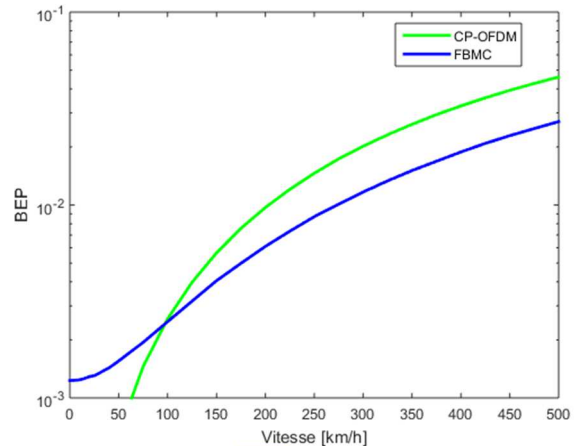


Figure 09 : PEB en fonction de la vitesse dans le contexte d'un canal doublement sélectif

Les résultats de la figure 09 permettent de déduire que la modulation CP-OFDM est très sensible au bruit par rapport à la modulation FBMC-OQAM. En effet, même si pour de faibles vitesses de transmission, le taux d'erreur binaire de la modulation CP-OFDM est négligeable, la performance en BER se dégrade fortement à partir d'une vitesse supérieure à 100 km/h.

Ainsi, les figures 08 et 09 valident notre hypothèse concernant le choix de la modulation FBMC qui est adaptée pour les transmissions critiques qui se traduisent par la double sélectivité du canal dans lequel l'utilisateur se déplace à une vitesse pouvant aller jusqu'à 500 km/h (mobilité fixée par les exigences de la 5G).

Scénario 2 : modulation FBMC-OQAM précodée par la matrice DFT.

Pour évaluer le PAPR d'un système donné, on emploie la fonction de distribution cumulative complémentaire (CCDF) utilisée pour rechercher la probabilité qu'une variable prenne une valeur supérieure à x .

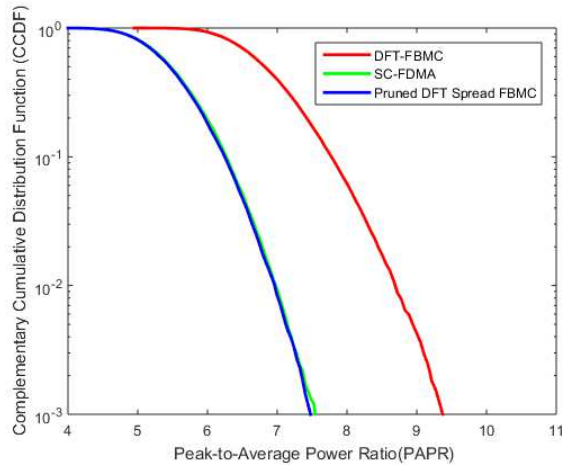


Figure 10 : *PAPR des techniques d'accès SC-FDMA, DFT-FBMC et Pruned DFT Spread FBMC*

La figure 10 permet de déduire que la technique DFT-FBMC présente le PAPR le plus élevé parmi les trois techniques d'accès étudiées. La technique Pruned DFT Spread présente le même PAPR que la technique d'accès SC-FDMA. Ainsi, en ayant un PAPR faible, la technique Pruned DFT Spread FBMC permet de répondre aux besoins des réseaux 5G sur le plan de l'efficacité énergétique

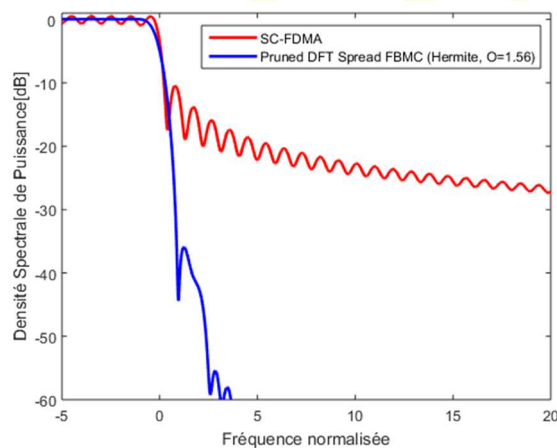


Figure 11 : *Densité spectrale de puissance des techniques SC-FDMA et Pruned Spread FBMC ayant un facteur de chevauchement $O=1.56$*

D'après les figures 11 et 12, le choix de la valeur du facteur de chevauchement est primordial.

En effet, en diminuant le facteur de chevauchement ($O = 0.8$ sur la figure 12 contre $O = 1.56$ sur la figure 11), on

augmente les émissions hors bande. En d'autres termes, plus on augmente la valeur du facteur de chevauchement, plus les émissions hors bande diminuent.

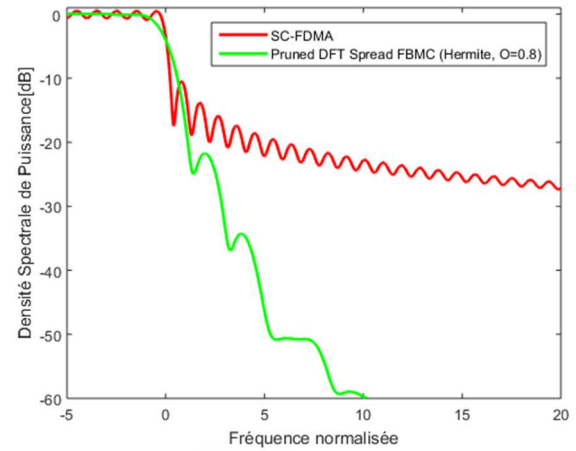


Figure 12 : *DSP des techniques SC-FDMA et Pruned Spread FBMC ayant un facteur de chevauchement $O=0.8$*

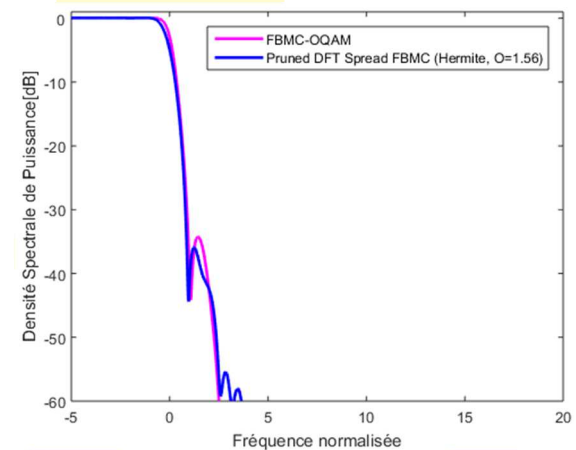


Figure 13 : *DSP des techniques FBMC-OQAM et Pruned Spread FBMC ayant un facteur de chevauchement $O=1.56$*

La figure 13 montre que les propriétés spectrales des techniques Pruned DFT Spread FBMC et FBMC-OQAM sont similaires.

4. Discussions

La technique FBMC-OQAM permet de supporter les communications critiques impliquant des vitesses de mobilité extrêmement élevées, ce qui la rend attractive pour les applications 5G.

Pour réduire le PAPR, les systèmes LTE utilisent la technique d'accès SC-FDMA en liaison montante. Cependant, le bloc de

précodage DFT utilisé par la technique SC-FDMA n'est pas adapté à la technique FBMC, c'est pourquoi la technique Pruned DFT Spread FBMC a été proposée afin de combiner les avantages apportés par la modulation OFDM-OQAM et la technique d'accès SC-FDMA.

La technique Pruned DFT Spread FBMC permet d'optimiser les efficacités spectrale et énergétique du système. En effet, celle-ci permet de bénéficier d'une faible émission hors bande comparable à celle de la technique FBMC-OQAM et d'un faible PAPR identique à celui de la technique SC-FDMA.

Par ailleurs, les efficacités spectrales et énergétiques ne sont pas les seuls critères technologiques à optimiser pour un meilleur déploiement de la 5G. C'est pourquoi nos futurs travaux de recherche vont se concentrer sur l'impact des valeurs du facteur de chevauchement et le temps de latence du système.

5. Références

- [01] A. Alexiou, « *5G Wireless Technologies* », The Institution of Engineering and Technology, 2017.
- [02] X.Ge, W. Zhang, « *5G Green Mobile Communication Networks* », Springer, 2019.
- [03] R. Nissel, « *Symbol detection in high speed channels* », in The Vienna LTE-Advanced Simulators: Up and Downlink, Link and System Level Simulation, pp. 39–60, Singapore: Springer-Verlag, 2016.
- [04] P. Marsch, Ö. Bulakçı, O. Queseth, M. Boldi, “5G System Design Architectural and Functional Considerations and Long Term Research”, Wiley, 2018.
- [05] C. Lélé, P. Siohan, R. Legouable, M. Bellanger, « *OFDM/OQAM for spread spectrum transmission* », in Proceedings of the International Workshop on Multi-Carrier

Spread-Spectrum (MCSS '07), Herrsching, Germany, May 2007.

- [06] C. Lélé, P. Siohan, R. Legouable, M. Bellanger, « *CDMA transmission with complex OFDM/OQAM* », EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, vol. 2008, Article ID 748063, 12 pages, 2008.