

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Master

Mention Électronique  
Spécialité Système de télécommunications

présenté par

BENAZOUT Nassiba

# Étude et simulation de la technique multi porteuses GFDM.

Proposé par : Dr. Ait Saadi Hocine.

Année Universitaire 2017-2018

## Remerciements

---

*En préambule à ce mémoire je remercie ALLAH qui m'aide et me donne la patience et le courage durant ces longues années d'études.*

*Je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.*

*Je tiens à remercier sincèrement Monsieur, « Aït Saadi Hocine » qui, en tant qu'un encadreur de ce mémoire, s'est toujours montré à l'écoute et disponible durant la réalisation de ce mémoire, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu me consacrer et sans lui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.*

*Mes vifs remerciements vont également aux membres de jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs propositions.*

*Enfin, je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

## Dédicaces

---

*Je dédie ce modeste travail, en premier lieu, aux êtres qui me sont les plus chers ; mes parents qui ont toujours aimés me voir réussir.*

*À mon père « **Redha** » pour son soutien moral et financier, leur énormes sacrifices et leur encouragements qu'ils m'ont apportés tout au long de ces cinq années d'études.*

*À ma mère « **Nadia** » ma source de l'espoir et de tendresse, pour tous ce que tu as sacrifiés pour moi, tu es maman idéale.*

*« Je vous aime »*

*À ma chère grand-mère « qu'ALLAH lui accorde sa sainte Miséricorde et l'accueille en son vaste paradis » qui a souhaité me voir en ce jour là, le jour de ma soutenance, je t'aime, tu ne quitteras jamais mes pensées.*

*À mes chers frère et sœurs « **Farah** », « **Warda** » et « **Rayan** » pour tous les bons moments passés avec vous.*

*« Je vous souhaite une vie joyeuse pleine de succès dans tous les domaines ».*

*À tous mes amis surtout :*

*«**Chaïma** », « **Ikram** », « **Ahlem** », « **Khadidja** », « **Nora** » et « **Sidali** ».*

*Pour avoir rempli ces années d'études de souvenirs en tous genres.  
Pour avoir toujours été là, dans les bons comme dans les mauvais moments. « je n'oublierais jamais les moments que nous avons passé ensemble ».*

*Et tous mes collègues sans exception.*

*À tous les enseignants qui ont collaboré à ma formation.*

---

**Résumé :** L'augmentation fulgurant de la consommation de données au cours des dix dernières années a porté les réseaux de communication à un point de saturation, à la fois en termes de consommation d'énergie et d'utilisation du spectre. Nous envisageons une forme d'onde de couche physique unifié, appelée GFDM pour résoudre ces problèmes. Cette modulation est caractérisée par sa faible émission hors bande grâce à l'utilisation du filtres prototypes et d'autres techniques de plus telles que : GS-GFDM et W-GFDM. Une étude technique détaillé de la technique GFDM est élaborée ici, pour appuyer cette étude, certaines techniques ont été simulées à l'aide de logiciel MATLAB.

**Mots clés :** émission hors bande ; GFDM ; filtres prototypes.

---

**Abstract:** The soaring increase of data consumption in the last ten years has brought communication networks to a saturation point, both in terms of energy consumption and spectrum use. We envision a unified physical layer waveform, referred to as GFDM, to solve these problems. This modulation is characterized by its low out-of-band emission through the use of prototype filters and other additional techniques such as: GS-GFDM and W-GFDM. A detailed technical study of the GFDM technique is developed here, to support this study; some techniques were simulated using MATLAB software.

**Keywords:** out of band emission, GFDM, prototype filters.

---

**ملخص:** أدت الزيادة الكبيرة في استهلاك البيانات في السنوات العشر الاخيرة الى بلوغ شبكات الاتصال الى نقطة التشبع، سواء من حيث استهلاك الطاقة او استخدام الطيف, نحن نتصور شكل الموجة للطبقة الفيزيائية، تسمى GFDM، لحل هذه المشاكل. تتميز هذه التقنية بانخفاض انبعاث اشعتها خارج النطاق من خلال استخدام فلترات خاصة بالاضافة الى تقنيات اخرى مثل: W-GFDM و GS-GFDM.

تمت دراسة هذه التقنية بشكل مفصل هنا و لدعما تم محاكاة بعض التقنيات باستخدام MATLAB برنامج .

**كلمات المفاتيح:** انبعاثات خارج النطاق، GFDM ، prototype filters.

---

## Listes des acronymes et abréviations

<b>4G:</b>	4 <sup>ème</sup> génération.
<b>5G:</b>	5 <sup>ème</sup> génération.
<b>OFDM:</b>	Orthogonal Frequency division multiplexing.
<b>HF:</b>	High Frequency.
<b>FSK:</b>	Frequency Shift Keying.
<b>DSP:</b>	Densité Spectral de Puissance.
<b>FFT:</b>	Fast Fourier Transform.
<b>QAM:</b>	Quadrature Amplitude Modulation.
<b>Wi-Fi:</b>	Wireless Fidelity.
<b>Wi-Max:</b>	Worldwide Interoperability for Microwave Access.
<b>MTC:</b>	Machine Type Communication.
<b>WRAN:</b>	Wireless Regional Area Networks.
<b>PHY:</b>	Physic
<b>CR:</b>	Cognitive Radio.
<b>MIMO:</b>	Multiple-Input Multiple-Output.
<b>WiMedia:</b>	Wireless Multimedia Alliance.
<b>OFDMA:</b>	Orthogonal frequency Division Multiple Acess.
<b>CDMA:</b>	Code Division Multiple Access.
<b>LTE:</b>	Long Terme Evolution.
<b>LTE-A:</b>	Long terme Evolution Advanced.
<b>CP-OFDM:</b>	Cyclic prefix-orthogonal frequency division multiplexing.
<b>SC-OFDM:</b>	Single Carrier-Orthogonal frequency division multiplexing
<b>SC-FDE:</b>	Single Carrier-Frequency Domain Equalization.
<b>ICI :</b>	Inter Carrier Interference.

<b>PAPR:</b>	Peak-to-Average Power Ratio.
<b>OOB:</b>	Out-Of-Band Emission.
<b>CP:</b>	Cyclic Prefix.
<b>IoT:</b>	Internet of Thing.
<b>M2M:</b>	Machine to Machine.
<b>ISI:</b>	Inter Symbol Interference.
<b>RC:</b>	Raised Cosine.
<b>RRC:</b>	Root Raised Cosine.
<b>GS:</b>	Guard symbol.
<b>CS:</b>	Cyclic Suffix.
<b>BPSK:</b>	Binary phase-shift Keying.
<b>W-GFDM:</b>	Windowed-Generalized frequency division multiplexing.

# Table des matières

Introduction générale.....	1
<b>Chapitre 1 : Généralités sur les techniques multi porteuses.</b>	
1.1 Introduction.....	3
1.1.1 Historique.....	3
1.2 Généralités sur l’OFDM.....	7
1.2.1 Principe.....	7
1.2.2 Description mathématique.....	8
1.2.3 Les avantages et les inconvénients.....	9
1.3 Une révolution vers la 5G.....	10
1.3.1 Proposition de nouvelles techniques multi porteuses.....	11
1.4 La problématique et les objectives.....	14
1.5 Conclusion.....	14
<b>Chapitre 2 : GFDM et l’analyse de la réduction des émissions hors bande à l’aide des filtres prototypes.</b>	
2.1 Introduction.....	16
2.2 Principe de GFDM.....	17
2.2.1 Description mathématique.....	18
2.2.2 Les caractéristiques de GFDM.....	19
2.2.3 Les offres de GFDM pour OOB.....	19

2.3 Les filtres de mise en forme d'impulsion pour les signaux GFDM.....	20
2.3.1 Techniques de réduction de l'émission hors bande pour GFDM.....	21
2.4 Conclusion.....	25
<b>Chapitre 3 : Résultats de la simulation de la technique GFDM.</b>	
3.1 Introduction.....	26
3.1.1 Qu'est ce qu'un MATLAB ?.....	26
3.2 Réalisation de la chaine de transmission GFDM sous MATLAB.....	27
3.3 Représentations graphiques des filtres et des fenêtres sous MATLAB.....	28
3.3.1 Les filtres prototypes.....	28
3.3.2 Les fenêtres.....	31
3.4 Simulation de la modulation GFDM.....	33
3.4.1 Simulation de W-GFDM.....	37
3.4.2 Simulation de GS-GFDM.....	40
3.5 Comparaison entre OFDM et GFDM.....	44
3.6 Conclusion.....	46
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>47</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>49</b>

## Liste des figures

<b>Figure 1.1.</b> Représentation fréquentielle et temporelle d'un signal OFDM.....	7
<b>Figure 1.2.</b> Schéma d'un modulateur OFDM.....	8
<b>Figure 1.3.</b> Un exemple de spectre du signal en sortie du modulateur OFDM, décomposé sur chaque porteuse.....	9
<b>Figure 1.4.</b> Vision globale de 5G.....	11
<b>Figure 2.1.</b> Diagramme de bloc de l'émetteur GFDM.....	17
<b>Figure 2.2.</b> Diagramme de bloc de modulateur GFDM détaillé.....	18
<b>Figure 2.3</b> Illustration de premier sous-symbole de bloc GFDM introduit une variation abrupte du signal dans le domaine temporel.....	22
<b>Figure 2.4.</b> W-GFDM dans le domaine temporel.....	23
<b>Figure 3.1.</b> Schéma synoptique d'une chaîne de transmission GFDM.....	27
<b>Figure 3.2.</b> Représentations graphiques de filtre RC dans le domaine temporel.....	28
<b>Figure 3.3.</b> Représentations graphiques de filtre RC dans le domaine fréquentiel.....	29
<b>Figure 3.4.</b> Représentations graphiques du filtre RRC dans le domaine temporel.....	29
<b>Figure 3.5.</b> Représentations graphiques du filtre RRC dans le domaine temporel.....	30
<b>Figure3.6.</b> Représentations graphiques du filtre RRC avec Meyer dans le domaine temporel.....	30
<b>Figure3.7.</b> Représentations graphiques du filtre RRC avec Meyer dans le domaine fréquentiel.....	31
<b>Figure 3.8.</b> Représentation graphique de la fenêtre rectangulaire.....	32
<b>Figure 3.9</b> Représentation graphique de la fenêtre rampe dans le domaine temporel.....	32
<b>Figure 3.10</b> Résultats de la simulation GFDM avec le filtre RC.....	33

<b>Figure 3.11.</b> Comparaisons entre deux spectres GFDM avec deux facteurs $\alpha$ différents.....	34
<b>Figure 3.12.</b> Résultats de la simulation GFDM avec le filtre Meyer RRC pour différentes valeurs de $\alpha$ .....	35
<b>Figure 3.13</b> Simulation des trois filtres pour deux facteurs .....	36
<b>Figure 3.14</b> Représentation graphique de W-GFDM.....	38
<b>Figure 3.15.</b> Représentation graphique de W-GFDM.....	39
<b>Figure 3.16</b> Représentation graphique d'une modulation GFDM avec et sans fenêtre.....	40
<b>Figure 3.17.</b> Représentation graphique de GS-GFDM pour deux tailles différentes de CP.....	41
<b>Figure 3.18.</b> Représentation graphique de la modulation GS-GFDM pour deux différentes tailles de CP.....	42
<b>Figure 3.19</b> Comparaison entre GS-GFDM et GFDM.....	42
<b>Figure 3.20</b> Représentation graphique des spectres de GS-GFDM et W-GFDM.....	43
<b>Figure 3.21</b> Différentes structures de blocs dans OFDM et GFDM.....	45
<b>Figure 3.22</b> Représentation graphique des spectres de l'OFDM et GFDM.....	45

## Liste des Tableaux

<b>Tableau 2.1</b> Les expressions en domaine temporel des filtres prototype.....	21
<b>Tableau 2.2</b> Les fonctions de fenêtres $W[n]$ . .....	23
<b>Tableau 3.1.</b> Paramètres utilisés pour la simulation de GFDM.....	33
<b>Tableau 3.2</b> Paramètres utilisés pour la simulation de GFDM.....	34
<b>Tableau 3.3.</b> Paramètres utilisés pour la simulation de GFDM.....	35
<b>Tableau 3.5</b> Paramètres utilisés dans la modulation W-GFDM.....	37
<b>Tableau 3.4</b> paramètres utilisés dans la modulation W-GFDM.....	38
<b>Tableau 3.6</b> Paramètres utilisés pour la simulation de GS-GFDM.....	41

# Introduction générale

---

L'idée de base de la technique multi-porteuse était de diviser la bande passante en un certain nombre de sous bandes, ce qui permettait de gérer les effets de canal de manière efficace.

Chaque génération de systèmes de communication mobile offerte de nombreux services après lesquels ces systèmes sont classés.

Les communications mobiles de 1G à 4G ont connues d'énormes progrès en matière de capacité d'où la future génération 5G devrait avoir encore une capacité de couverture meilleure, une connectivité de données élevées de 1Gbps, moins consommation d'énergie, haute sécurité et meilleure utilisation spectrale. [1]

Parmi les techniques étudiées pour le système de communication 5G est le GFDM, cette technique est flexible dans laquelle les données sont divisées en un certain nombre de sous-porteuses et sous-symboles, utilisant la mise en forme d'impulsion circulaire pour chaque sous-porteuse.

GFDM couvre OFDM comme un cas particulier, en conservant les avantages de l'OFDM et traitant des limitations, par exemple :

- ❖ GFDM utilise un préfixe cyclique (CP) par groupe de sous-symboles.
- ❖ Il utilise un filtrage prototype avec faible émission OOB (Hors bande) pour améliorer l'utilisation de la bande passante.

Cependant, en raison de la nature non-orthogonale de convention GFDM, l'estimation de canal n'est pas simple. [1]

Nous allons traiter dans ce mémoire les effets des différents filtres prototype sur OOB afin de définir la meilleure pour obtenir une bonne amélioration de l'utilisation de la bande passante.

Dans le premier chapitre, nous allons parler sur les différentes techniques multi porteuses en commençant par les premiers modems HF dans les années 50, arrivant jusqu'à l'OFDM dans les années 60-70 et partant vers les années 2000 où les nouvelles techniques ont vu le jour. Nous allons discuter brièvement sur l'idée de base de cette technique qui est OFDM en concluant par les avantages et les inconvénients de cette dernière.

Dans le deuxième chapitre, nous allons focaliser sur la technique la plus répandue dans les recherches récentes en raison de sa flexibilité, qui est GFDM.

Nous allons étudier cette technique théoriquement ainsi que ses avantages par rapport à l'OFDM en ce qui concerne l'émission hors bande la plus faible plus précisément, en lui traitant avec des techniques spéciales telles que les filtres prototypes et l'insertion des fenêtres pour y avoir des résultats favorables lors de la simulation qui sera réalisée dans le chapitre trois, où nous allons les interpréter et les comparer avec la technique de base (OFDM).

# Chapitre 1 : Généralités sur les techniques multi porteuses

---

## 1.1 Introduction :

Les systèmes cellulaires de la quatrième génération (4G) ont été optimisés pour fournir des débits de données élevés et une couverture fiable aux utilisateurs mobiles.

Les systèmes cellulaires de la prochaine génération (5G) feront face aux exigences d'application plus variées : [1]

- La demande d'un débit de données plus élevé qui dépasse la capacité de la 4G.
- Les communications alimentées par batterie ont besoin d'une faible consommation d'énergie.
- Les applications de contrôle nécessitent des temps de réponses très courts.

Nous envisageons dans ce chapitre les principales caractéristiques de la modulation OFDM et d'autres techniques multi porteuses proposées pour la future génération 5G.

### 1.1.1 Historique:

Aux États-Unis, on commençait à parler de modulations multi-porteuses vers la fin des années 50. On voulait un système robuste qui pouvait remédier aux problèmes liés aux multi-trajets. Dans tel contexte, avec des canaux de transmission hostiles, les modulations classiques mono-porteuses s'avèrent moins efficaces. Alors, il fallait une solution bilatérale pour assurer d'un côté une robustesse du signal multi-trajets et d'un autre côté, un débit acceptable [2].

Premier Modem HF est proposé en 1959, utilise la modulation 2-FSK sur 20 ou 40 voies en parallèle [2].

C'est l'émission simultanée sur des fréquences porteuses différentes des modulations à bas débits. Par la suite, les chercheurs s'intéressent plus en plus aux modulations multi-porteuses.

En 1966, des conditions d'orthogonalité furent mises en évidence. Ce qui permet d'avoir une bande bien optimisée à cause de chevauchement entre les spectres des respectives sous-porteuses. L'OFDM représente comme un type de modulations multi-porteuses avec des propriétés bien précises <l'orthogonalité>. [2]

Quelques années plus tard, les chercheurs américains réalisèrent deux nouveaux modems OFDM. Le premier fonctionnait dans la bande 400 Hz-3000Hz et utilisait 64 porteuses espacées de 40 Hz, le débit atteint était de 4800 bits/s. Le second modem utilisait 43 porteuses sur une bande de 3 KHz dans le canal HF. Le débit obtenu était proche de 2500 bits/s. [2]

Après la réalisation de ces modems et après les études sur les performances du système OFDM, la synchronisation en temps et en fréquence représentait un problème pour ces modulations car il dépendait fortement de l'orthogonalité entre les sous-porteuses. En raison de la complexité en termes de réalisation et mise en œuvre de ces modulations OFDM l'utilisation était uniquement pour le domaine militaire [2].

Avec l'apparition de DSP <<Digital signal processor>> en 1979, les systèmes OFDM devenaient beaucoup plus souples à réaliser car l'implémentation de la FFT sur ces circuits numérique était en fin faisable. Dans la même année, on voyait apparaître un modem pour la bande HF comportant 48 sous-porteuses espacées de 45 Hz utilisait une modulation de 32-QAM et atteignent un débit de 9,6 Kbits/s. [2]

Avançant plus vers les années 90-2000, Avec l'apparition des WLAN (Wireless Local Area Network), comme : IEEE 802.11a/g nommé Wi-Fi et ETSI HiperLAN II, qui adoptaient la modulation multi-porteuses OFDM comme spécification principale dans leur couche physique. [2]

En 2005, la technologie de **WIFI** connaît une amélioration sur le marché des états unis puis en Europe. [2]

Le standard IEEE802 .16 appartenant à la famille de Wi-Fi et nommé Wi-Max, garantit un débit théorique jusqu'à 80 Mbps et une portée linéaire de 50 Km [2]. On trouve en Algérie des opérateurs qui proposent ainsi le service internet en se basant sur ce type de technologie sans fil.

Un an plus tard, le standard 802.11n se présente sur la scène du Wi-Fi il permet à cette technologie d'atteindre des débits théoriques entre 100 et 540 Mbps, en ajoutant l'utilisation de la technique <<MIMO>> en améliorant aussi la portée des réseaux sans fil [2].

En 2006, le procédé de modulation OFDM a été adopté par l'alliance WiMedia pour les communications à très haut débits (480 Mbps) et à courte portée (10m), basées sur la technologie UWB (Ultra Wide Band). Toutes ces améliorations du système Wi-fi représentent les nouvelles applications des réseaux WLAN pour tout ce qui est accès à internet via <<hot spot>> [2].

Dans le domaine des télécommunications, le procédé de modulation OFDM s'imposait de plus en plus dans les systèmes de transmission, à cause de la robustesse des signaux OFDM dans des environnements difficiles (canaux multi trajets avec évanouissement) ainsi qu'aux débits élevés garantis.

L'évolution de l'OFDM donnait la naissance aux autres techniques comme l'OFDMA qui est plus optimisé pour l'accès multiples, elle partage de la ressource spectrale (bande de fréquence) entre nombreux utilisateurs distants les uns aux autres.

L'OFDMA a été développé comme une alternative au codage CDMA, il est principalement utilisé dans le sens de transmission downlink (antenne-relais vers terminal) des réseaux mobiles, car il permet pour une même largeur spectrale, un débit binaire plus élevé grâce à sa grande efficacité spectrale et à sa capacité à conserver un débit élevé même dans des environnements défavorables avec échos et trajets multiples des ondes radio. Il est notamment utilisé dans les réseaux de téléphonie mobile 4G LTE, LTE Advanced et WiMax Mobile (IEEE 802.16 e). [3]

OFDMA présente des inconvénients que d'autres techniques ou ses variantes étaient adoptées comme solution temporaire afin de tomber à des nouvelles exigences qui nous tendent vers l'adoption de nouvelles techniques de la prochaine génération appelée simplement 5 G.

La technologie 5G est aussi nommée technologie clé, qui pourrait permettre des débits de télécommunication mobile de plusieurs gigabits de données par seconde, soit jusqu'à 1000 fois plus rapide que les réseaux mobiles en 2010 et jusqu'à 100 fois plus rapide que la 4G à l'horizon de 2020 [4]. Ces débits de données sont susceptibles de répondre à la demande croissante de données avec l'essor des Smartphones et objets communicants, connectés en réseau, ce type de réseaux devrait favoriser le cloud computing, l'intégration et l'interopérabilité d'objets communicants et de smartgrids et d'autres réseaux dits intelligents, dans un environnement domotisé et une ville intelligente. [4]

Le terme 5G était déjà évoqué par les industriels de l'électronique dans les années 1980, cette technologie pourrait voir le jour vers 2020. Plusieurs techniques ont été proposées par les industriels d'électronique telles que :

- FBMC (filter bank multi-carrier): une autre sous-classe de systèmes multi-porteuse, est une généralisation de l'OFDM où les sous porteuses sont en forme d'impulsion individuellement. Cette technique offre un OOB plus faible en permettant la réduction de la bande de garde et sa faible sensibilité au décalage temporel et fréquentiel permet aussi de réduire le problème de la synchronisation [5].
- UFMC (Universal filtered multi-carrier) : qui a une approche de filtrage plus généralisé. Dans l'UFMC, le filtrage est appliqué à un groupe au niveau de la sous-porteuse. Ce filtrage par blocs produit des filtres spectralement plus larges dans la bande passante et donc plus courts dans le temps. Cela permet de prendre en charge les courtes transmissions en rafale qui est l'un des inconvénients de FBMC [5].

- BFDM (Bi-orthogonal frequency division multiplexing) : Dans BFDM, les impulsions d'émission et de réception sont bi-orthogonales par paires. Ces formes d'impulsion bi-orthogonales bien localisées à l'émetteur et le récepteur rendent le système robuste contre l'effet doppler et multi-trajets. BFDM utilise OQAM avec des impulsions localisées dans les domaines fréquentiels et temporels [5].

En 2009, le concept initial d'un nouveau schéma de modulation appelé multiplexage par répartition en fréquence généralisés a été proposé. Il possède de nombreuses propriétés attrayantes et couvre le CP-OFDM et SC-DFE. Il représente une nouvelle perspective sur la transmission multi-porteuse filtrée avec plus de degrés de liberté que l'OFDM classique ou SC-DFE [5].

La technologie 5G est la technologie à venir. Beaucoup de grands pays investissent énormément d'argent dans ce projet, car la demande était forte. Il va tout à fait fabriquer la flexibilité, la limite, le degré et la comparabilité. Ainsi, il répondra aux sollicitations croissantes des big-data, cloud, machine-to-machine et applications diverses.

## **1.2 Généralité sur l'OFDM :**

Les techniques multi-porteuses consistent à transmettre en même temps des données numériques en les modulant sur un grand nombre de porteuses.

La première technique appliquée était l'OFDM en se basant sur l'idée de diviser la bande spectrale disponible en sous-canaux (sous-porteuses). Cette technique conduit à des sous-porteuses dont la bande de fréquence reste étroite par rapport à la bande de cohérence du canal. Nous avons alors une garantie sur la propriété de la non sélectivité en fréquence du canal [2].

L'OFDM a réussi aussi à obtenir une efficacité spectrale élevée grâce à l'orthogonalité de ses sous-porteuses d'où l'implémentation de cette modulation est possible.

### **1.2.1 Principe :**

Le principe de l'OFDM consiste à répartir sur un grand nombre de sous-porteuses le signal numérique que l'on veut transmettre. Pour avoir des fréquences de sous-porteuses plus proches que possible et ainsi que transmettre le maximum d'information sur une

portion de fréquences donnée, l'OFDM utilise des sous-porteuses orthogonales entre elles. Les signaux des différentes sous-porteuses se chevauchent mais grâce à l'orthogonalité n'interfèrent pas entre eux. [2] Comme le montre la figure 1.1.

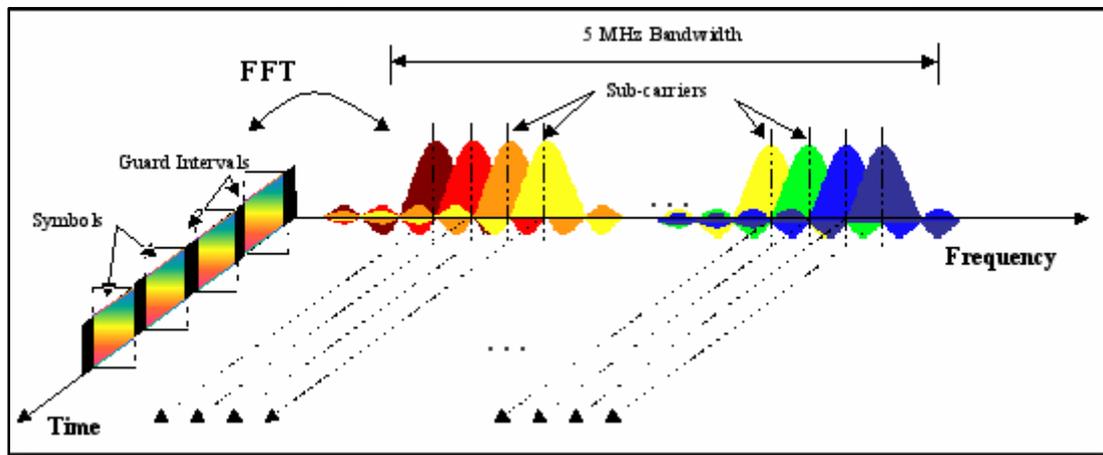


Figure 1.1. Représentation fréquentielle et temporelle d'un signal OFDM [2].

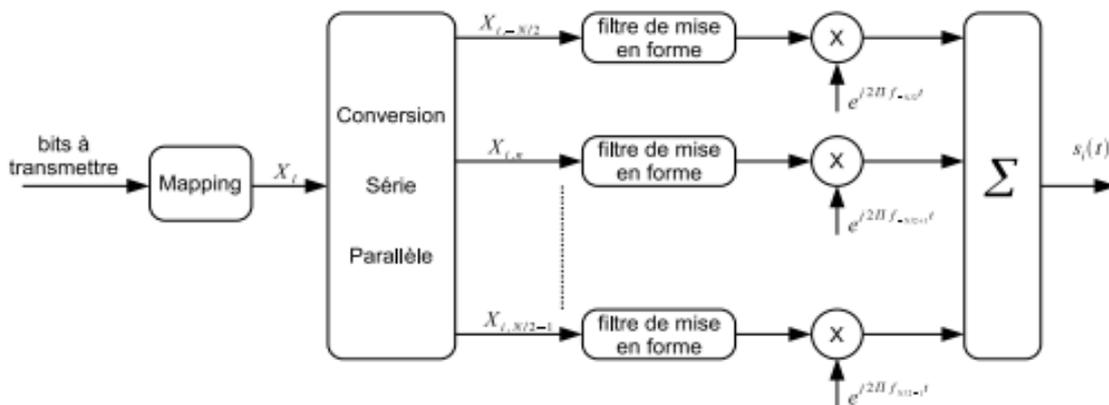


Figure 1.2. Schéma d'un modulateur OFDM [2].

### 1.2.2 Description mathématique :

La figure 1.2 décrit le schéma de principe d'un modulateur OFDM en bande de base : Les bits à transmettre sont codés (codage bit/symboles) , les symboles complexes sont après regroupés par blocs de  $N$  (conversion série/parallèle), mis en forme sur une durée  $T$

(utilisation de forme d'onde  $g(t)$ ) puis envoyés sur les  $N$  porteuses  $\{f_n\}_{n = -\frac{N}{2} \dots \frac{N}{2} - 1}$  afin de former le signal de sortie [3].

En prenant l'intervalle du temps  $[iT, (i + 1)T]$ , le signal OFDM généré s'écrit : [3]

$$S_i(t) = \sum_{n=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} X_{i,n} g\left(t - iT - \frac{T}{2}\right) e^{j2\pi f_n t} \quad (1.1)$$

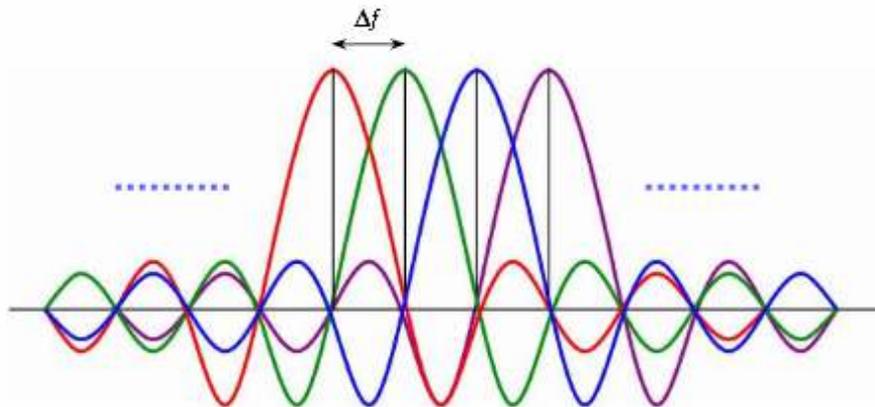
- Il représente le  $i^{\text{ème}}$  symbole OFDM.
- $\{X_{i,n}\}_{n = -\frac{N}{2} \dots \frac{N}{2} - 1}$  représentent les  $N$  symboles complexes  $\{X_i\}$  qu'il transporte.

Le signal reçu s'écrit de façon suivante : [3]

$$y(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{n=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} X_{i,n} g\left(t - iT - \frac{T}{2}\right) e^{j2\pi f_n t} + n_n(t) \quad (1.2)$$

$n_n(t)$  : Bruit additif gaussien introduit par le canal sur la  $n^{\text{ème}}$  porteuse.

Un filtre adapté et un échantillonneur sont utilisés pour récupérer le signal transmis à la réception.



**Figure 1.3.** Un exemple de spectre du signal en sortie du modulateur OFDM, décomposé sur chaque porteuse. [2]

### 1.2.3 Les avantages et les inconvénients :

OFDM a été utilisée dans de nombreux systèmes sans fil haut débit en raison de nombreux avantages qu'elle offre : [3]

- Résistance aux interférences : l'apparition d'interférence sur un canal peut être limitée de la bande passante d'où toutes les données seront perdues.
- L'efficacité du spectre : l'OFDM permet d'utiliser efficacement le spectre disponible.
- L'égalisation du canal plus simple : L'OFDM a résolu le problème de complexité de l'égalisation de canal chez les modulations précédentes comme le CDMA.
- Les techniques OFDM ont une très grande flexibilité dans l'allocation du débit dans un contexte multi utilisateurs.
- Sa résistance à l'interférence inter-symbole.
- Résistance aux effets à bande étroite : recouvrement des symboles perdus.

Malgré ces avantages le système utilisant la technique OFDM n'est pas parfait : [3]

- Il est très vulnérable aux problèmes de décalage en fréquence (Frequency offset) et de synchronisation. Ce décalage engendre des interférences ICI qui peuvent détruire l'orthogonalité entre sous-porteuses.
- Fort facteur de crête du signal à amplifier = problème du PAPR (PAPR très élevé en OFDM).
- Emission hors-bande (OOB) due à la forme d'impulsion rectangulaire du filtre utilisé dans l'émetteur.

### 1.3 Une révolution vers la 5G :

La cinquième génération (5G) est l'avenir des réseaux de télécommunication. Ce n'est pas une avance incrémentale des réseaux cellulaires de la quatrième génération (4G), la 5G est un changement dramatique de paradigme qui prend en charge les hautes fréquences (telles que 60 GHz), densités de nœuds extrêmes, réseau d'antennes à grande échelle, bande passante massive...etc [6]

Les réseaux 5G exigent une grande souplesse et une grande intelligence dans les domaines suivants : [7]

- Partage de spectre.
- Communication millimétriques (onde millimétrique)
- Accès « Internet des objets » intégré.
- MIMO massif.
- Antennes intelligentes, Big Data, cloud computing, et beaucoup autres technologies perturbatrices.

5G signifie un nouveau schéma de transmission, efficacité énergétique extrême et nouvelle réglementation et standardisation de problèmes. Il devrait prendre en charge un débit de données supérieur à 1000 fois le débit en 4G [7].

Ces dernières années, en raison de la croissance sans précédent du nombre de dispositifs et données mobiles, et les développements en cours dans les technologies pour répondre à cette énorme demande de données, les industries sans fil ont lancé une feuille de route pour la transition de 4G à 5G.

Les principaux objectifs des réseaux 5G sont de supporter un gain de 1000 en capacité, des connexions pour au moins 100 milliards d'appareils, et 10 Gb/s livrés aux utilisateurs individuels. En outre, les nouveaux réseaux 5G seront en mesure de fournir une connectivité à faible latence et ultra fiable entre les personnes, les machines et périphériques. La figure 1.4 montre une vision globale de 5G [1].



**Figure 1.4.** Vision globale de 5G. [8]

Pour répondre à ces défis énormes, des innovations disruptives et des améliorations drastiques doivent être faites dans la conception de l'architecture de réseau mobile à la fois les couches physiques et supérieures.

### 1.3.1 Proposition de nouvelles modulations multi-porteuses :

De nombreuses exigences spécifiques de la 5G sont liées au contexte multiutilisateur, telles que l'accès asynchrone, problèmes de coexistence et égalisation de canal par utilisateur et compensation de décalage de fréquence porteuses [1]. De plus, la latence doit être réduite au minimum.

Les modulations multi-porteuses ont eu un succès dans les systèmes de communication par câble ou sans fil en raison de leur efficacité spectrale et de leur flexibilité opérationnelle. Elles sont les premières à choisir pour la couche physique dans 5G et au-delà. Jusque là, la technique la plus largement déployée est CP-OFDM [7], qui est simple dans son concept et facile à réaliser.

#### FBMC

L'effet de filtrage de l'OFDM entraîne des pertes d'efficacité spectrale qui peuvent être sévères en cas d'accès asynchrone et de problèmes de coexistence, ainsi qu'en présence de spectre fragmenté.

Afin de conserver l'efficacité spectrale dans telles conditions, la modulation multi porteuses de banque de filtres (FBMC) a été proposée comme alternative à l'OFDM. [9]

Les bancs de filtres multi porteuses constituent la technique la plus étudiée jusqu'à présent. Dans FBMC, les sous-porteuses sont filtrées à travers un filtre très sélectif. Afin d'obtenir une bonne localisation spectrale, les symboles sont très longs et se chevauchent les uns les autres. Cela rend cette technique spectralement efficace et robuste à l'asynchronisme. Cependant, l'utilisation sur des filtres longs ne répond pas à la nécessité d'une faible latence [9]. Avec cette approche, le concept de préfixe cyclique peut être abandonné et la distorsion de canal doit être atténuée par une égalisation de sous-canal [9].

En fait, FBMC sans l'égalisation de sous-canal fréquentiel peut être considérée comme similaire à OFDM avec un préfixe cyclique très court.

Les caractéristiques de cette technique sont les suivantes : [7]

- Aucun préfixe cyclique n'est nécessaire.
- Les sous-porteuses peuvent être regroupées en blocs indépendant pouvant être modulés numériquement au niveau de bande de base.
- La réception est robuste en présence de désalignements de temps et de fréquence.
- Une durée de symbole significativement plus élevée est attendue, ce qui doit être pris en compte dans les applications avec des rafales très courtes.
- Les exigences strictes en matière d'émission OOB peuvent être facilement satisfaites avec le choix du filtre prototype approprié.

Malgré l'efficacité de cette technique dans la transmission de longues séquences d'informations, elle n'est pas idéalement adaptée aux courtes rafales [7] à cause de l'étalement des symboles provoqué par l'opération de filtrage de sous-porteuses.

CP-OFDM et FBMC peuvent être considérés comme deux cas extrêmes où les transmissions sont soit filtrés par bande ou filtrés par sous-porteuse.

## **UFMC**

Dans ce cas là, UFMC a été introduite comme une généralisation de l'approche de filtrage sur un nombre variable de sous-porteuses, conduisant ainsi à des longueurs de filtre plus courtes par rapport à FBMC.

Avec UFMC, le filtrage est appliqué par sous-bande, chaque sous-bande comprenant un nombre donnée de sous-porteuses consécutives. Cela réduit les niveaux de lobe latéral OOB sans une augmentation aussi importante de la longueur de symbole résultante en fonction des longueurs de filtre plus courte. L'utilisation de l'UFMC dans les réseaux 5G améliorera l'efficacité spectrale des futurs réseaux de communication mobiles par rapport aux LTE-Advanced utilisant la technologie OFDM. UFMC élimine le préfixe cyclique utilisé dans OFDM pour lutter contre les interférences entre symboles, et donc augmenter le débit de transmission de données [6].

En outre, en raison de filtration supplémentaire qui réduit la sous-porteuse de niveau de lobe latéral, UFMC est plus résistant aux erreurs d'estimation des changements fréquents et de temps qu'OFDM. Par conséquent, il ne nécessite pas la transmission de signaux de formation supplémentaires et la synchronisation de systèmes complexes, ce fait est particulièrement important pour les appareils IoT/M2M. [6]

Depuis UFMC, contrairement à FBMC, chaque sous-porteuse n'est pas filtrée séparément mais un groupe de sous-porteuses est filtré, UFMC n'entraînera pas une augmentation significative de longueurs d'un symbole, et donc une latence de transmission de données inférieure à FBMC. [1]

## **GFDM**

Une autre technique proposée dont nous allons l'étudier par la suite est la modulation GFDM « Multiplexage par répartition en fréquence généralisé ». Elle s'agit d'un cas particulier de FBMC en ce qu'il y a un filtre de mise en forme d'impulsions pour chaque sous-porteuse dans l'émetteur. [6]

D'un autre côté, elle présente une similarité avec OFDM dans la mesure où la structure en blocs OFDM avec préfixe cyclique est également présente dans GFDM.

Ceci fait que la convolution linéaire et circulaire entre la séquence transmise et le canal est équivalente, ce qui rend la qualification de bande unique du canal ISI à trajets multiples.

#### **1.4 La problématique et les objectives :**

Pour les techniques de modulation récentes utilisées dans la prochaine génération de systèmes de communication sans fil, le problème principal est la haute OOB produite par ces techniques qui affecte la performance du système de communication. Bien que l'utilisation des techniques de modulation spectrale élevée telles que l'OFDM conduise à augmenter le débit de données, l'OOB est considérée comme un problème limitant l'efficacité énergétique et entraînant de fortes interférences, ce qui exige l'étude de certains filtres prototype utilisés dans la modulation GFDM pour obtenir la plus faible émission hors bande pour une meilleure performance du système de communication de la 5<sup>ème</sup> génération.

#### **1.5 Conclusion :**

La couche physique 5G doit répondre aux exigences spécifiques décrites dans ce projet. La première propriété clé d'une forme d'onde future est la flexibilité, de sorte que différentes applications peuvent être traitées par une seule solution avec différents paramètres au lieu de multiples solutions. Cette flexibilité inclut le partitionnement des ressources temps et fréquence, ainsi que des moyens de spectre ingénierie [1].

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes techniques proposées pour obtenir la meilleure solution qui répondes aux exigences de la future 5G, nous avons présenté brièvement l'OFDM. Nous allons présenter par la suite la technique choisie pour cette étude globale qui est GFDM ainsi que l'analyse de l'OOB.

# Chapitre 2 : GFDM et l'analyse de la réduction des émissions hors bande à l'aide des filtres prototypes.

---

## 2.1 Introduction :

De nos jours, la demande croissante de dispositifs intelligents avec une faible latence d'aller-retour et une fiabilité ultra-élevée apparaît comme un facteur décisif pour la mise en œuvre des futurs systèmes de communication. Les réseaux cellulaires de la 5ème génération (5G) à venir doivent être en mesure de faire face à un nombre élevé d'appareils connectés ainsi qu'à une augmentation significative du volume de données.

Les principaux scénarios pour les réseaux cellulaires 5G sont la communication de type machine (MTC), Tactile Internet, communications Bitpipe, et le réseau régional sans fil (WRAN). En particulier, l'introduction du MTC, caractérisé par des dispositifs à accès aléatoire sporadique, peut être réalisée au moyen de techniques radios cognitives (CR), où la flexibilité dans la mise en forme et la structuration du signal transmis est un aspect clé [10].

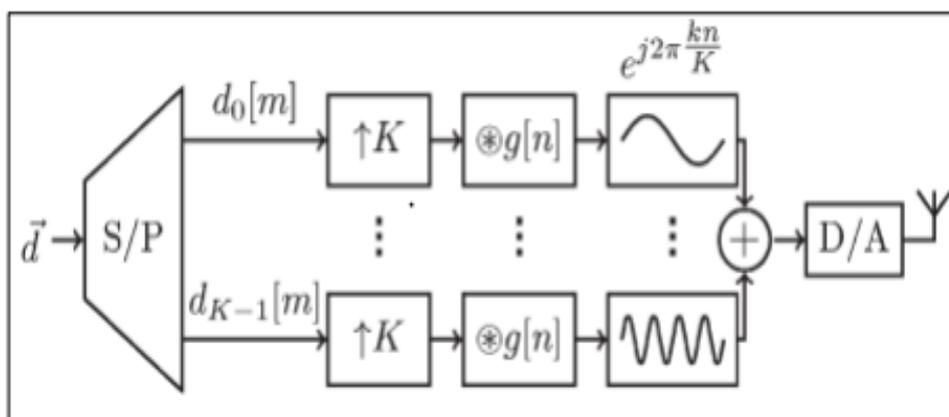
Dans le cas du scénario Tactile Internet, une latence ultra-faible et une fiabilité de courte durée sont des exigences clés. Dans le scénario du WRAN, une plus grande zone de couverture et une très longue propagation de retard sont des défis majeurs et, finalement, dans le cas de communications Bitpipe, les principales exigences sont un réseau dense avec moins d'interférences [11]. GFDM est une solution prometteuse pour la couche PHY 5G car sa flexibilité permet de répondre à différentes exigences. Les filtres prototype utilisés dans cette technique affectent les émissions hors bande. Nous allons présenter dans ce chapitre GFDM et les techniques utilisées pour la réduction de l'OOB.

## 2.2 Principe de GFDM :

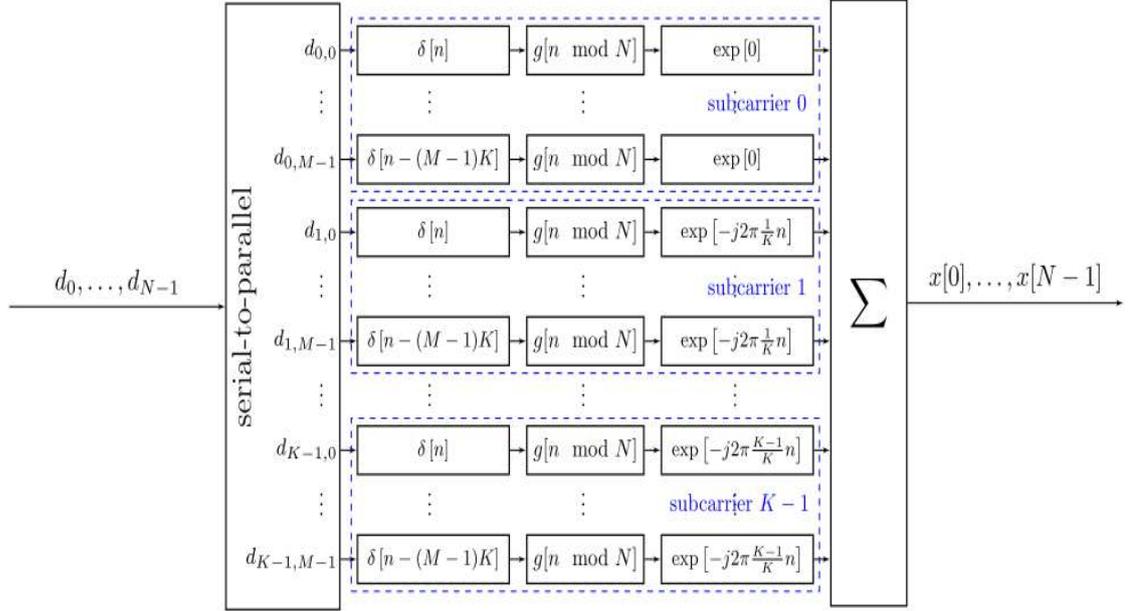
Le multiplexage par répartition en fréquence généralisé (GFDM), est un nouveau concept de transmission multi porteuse flexible qui introduit des degrés de liberté supplémentaires par rapport au multiplexage OFDM traditionnel.

Dans GFDM, le rayonnement hors bande du signal d'émission est commandé par un filtre de mise en forme d'impulsions réglable qui est appliqué aux sous-porteuses individuelles. En outre, une structure de données bidimensionnelle est introduite pour grouper des symboles de données sur plusieurs sous-porteuses et des tranches de temps vers des blocs. La taille des blocs est un paramètre variable et permet de mettre en œuvre des filtres longs ou de réduire le nombre total de sous-porteuses. Le traitement de ces blocs se fait à base de filtres numériques piqueurs qui préservent les propriétés circulaires dans le domaine temporel et fréquentiel. De manière similaire à OFDM, dans GFDM, un préfixe cyclique peut être utilisé pour combattre l'ISI dans un canal à trajets multiples [10]. L'un des inconvénients de cette technique est le filtrage de sous-porteuse qui peut entraîner des sous-porteuses non orthogonales et il peut se produire à la fois une interférence entre symboles (ISI) et une interférence entre porteuses (ICI).

Les figures 2.1 et 2.2 montre deux diagrammes de bloc l'un présente un émetteur GFDM et l'autre un modulateur GFDM détaillé.



**Figure 2.1.** Diagramme de bloc de l'émetteur GFDM [10].



**Figure 2.2.** Diagramme de bloc de modulateur GFDM détaillé [1]

### 2.2.1 Description mathématique :

Le schéma 2.1 représente le principe d'un modulateur GFDM. Une source de données fournit un vecteur de données binaire, ce vecteur est codé et mappé par le QAM en symbole à partir d'une constellation complexe de  $2^n$  d'où  $n$  est l'ordre de modulation.

Le vecteur  $\vec{d}$  résultant désigne un bloc de données contenant  $N$  éléments qui peuvent être décomposés en  $K$  sous-porteuses et  $M$  sous-symboles, le nombre total de symboles est  $N = KM$ . [10]

Les détails de modulateur GFDM sont présentés dans la figure 2.1 dont chaque  $d_{k,m}$  est transmis avec la forme d'impulsion correspondante : [1]

$$g_{k,m}[n] = g[(n - mK) \bmod N] \cdot e^{-\frac{j2\pi k}{K}n} \quad (2.1)$$

Avec  $n$  désignant l'indice de l'échantillonnage.

Chaque  $g_{k,m}[n]$  est une version décalée en temps et en fréquence d'un filtre prototype  $g[n]$ , où l'opération modulo fait de  $g_{k,m}[n]$  une version décalée de  $g_{k,0}[n]$  et l'exponentielle complexe effectue l'opération de décalage en fréquence [1].

Les échantillons d'émission  $x^{\rightarrow}[n] = (x[n])^T$  sont obtenus par superposition de tous les symboles d'émission. [57]

$$x[n] = \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{m=0}^{M-1} g_{k,m}[n] d_{k,m} \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2.2)$$

### 2.2.2 Les caractéristiques de GFDM :

La nature flexible de GFDM rend cette forme d'onde appropriée pour le futur système de communication 5G. Les caractéristiques des techniques GFDM sont listées comme : [10]

- Débits de données plus élevés.
- Faible consommation d'énergie.
- Haute efficacité spectrale et réponse à court terme.
- Une bonne localisation fréquentielle de l'impulsion d'émission rend le système robuste contre la dispersion de fréquence (effet Doppler).
- Une bonne localisation de l'impulsion fournit une robustesse contre la dispersion du temps.
- Taux de puissance moyen maximal (PAPR) inférieur à celui de l'OFDM.
- Modulation multi-porteuse flexible et allocation de spectre dynamique réalisable sans interférence sévère dans le service ou d'autres utilisateurs.
- Petit surcoût en ajoutant un seul CP pour tout le bloc qui contient plusieurs sous-symboles pour réduire la consommation d'énergie, et réaliser la diversité de transmission et de réception, égalisation de complexité car GFDM est une forme d'onde non orthogonale.
- Réduire l'OOB.

### 2.2.3 Les offres de GFDM pour OOB :

Le GFDM est une technique de modulation multi-porteuse soumise à l'interface radio pour les réseaux cellulaires 5G. Contrairement à l'OFDM, le GFDM offre plus de flexibilité et une

fragmentation du spectre facile et fournit également des émissions OOB et un faible PAPR. Il est basé sur la localisation temps-fréquence qui fournit la robustesse contre les effets doppler en raison de sa bonne localisation de fréquence inhérente [10].

En outre, il offre une robustesse contre la dispersion du temps en raison de sa bonne localisation inhérente au temps [10]. Le GFDM est une technique de transmission par blocs dans laquelle chaque bloc GFDM est constitué de  $K$  sous-porteuses et chaque sous-porteuse porte un sous-symbole  $M$  chaque sous-porteuse est individuellement filtrée avec un filtre prototype pour fournir un OOB faible. [6]

Le filtrage basé sur la sous-porteuse atténuera l'OOB mais à un certain niveau, pour atténuer fortement le rayonnement OOB, des fenêtrages basés sur des blocs sont utilisés pour cela, chaque bloc GFDM étant pincé des deux côtés pour fournir un OOB bas. Une fenêtre appropriée doit être choisie, pour fournir un faible OOB et moins d'interférences entre symboles.

### 2.3 Les filtres de mise en forme d'impulsion pour les signaux GFDM :

La flexibilité de GFDM permet de concevoir un signal à très faible rayonnement OOB, pour cela, le choix des filtres de mise en forme d'impulsions influe fortement sur les propriétés spectrales du signal GFDM et le taux d'erreur de symbole. Pour traiter cette partie nous avons choisie trois filtres de mise en forme d'impulsions dont leurs expressions en domaine temporel sont résumées dans le tableau 2.1.  $P_{RC}(t)$  Appelé argument interne du filtre son expression est la suivante : [10]

$$P_{RC}(t) = \left( \frac{|t| - (1-\alpha)T/2}{\alpha T} \right) \quad (2.3)$$

Avec  $\alpha$  : coefficient d'arrondi.

La fonction auxiliaire Meyer est définie comme :  $v(x) = x^4(35 - 84x + 70x^2 - 20x^3)$

Elle est utilisé comme un argument interne de différentes filtres de mise en forme comme le Meyer RRC d'où  $v$  est en fonction de  $P_{RC}(t)$ .

Nome de filtre	Expression en domaine temporel
Cosinus surélevé (RC)	$G_{RC} = 1/2[1 + \cos(\pi P_{RC}(t))]$
Racine cosinus surélevé (RRC)	$G_{RRC} = \sqrt{G_{RC}}$
Meyer RRC	$G_{MRRC} = \sqrt{1/2[1 + \cos(\pi v(P_{RC}(t)))]}$

**Tableau 2.1.** Les expressions en domaine temporel des filtres prototype [10].

Le filtre cosinus surélevé (RC) est un filtre fréquemment utilisé pour la mise en forme d'impulsions dans la modulation numérique en raison de sa capacité à minimiser l'interférence inter symbole (ISI), le filtre racine cosinus surélevé (RRC) est utilisé comme filtre d'émission et de réception dans un système de communication numérique pour effectuer un filtrage adapté. Cela aide à minimiser l'ISI. Et enfin le filtre Meyer RRC, une fonction auxiliaire a été introduite pour réaliser le concept d'une ondelette, cette dernière est une oscillation ondulatoire dont l'amplitude commence à zéro, augmente puis décroît jusqu'à zéro [10]. L'utilisation de cette fonction assure cette transition en douceur afin d'obtenir une meilleure localisation temps-fréquence et aussi pour ajouter de la flexibilité dans la conception du filtre de mise en forme d'impulsion.

### 2.3.1 Techniques de réduction de l'émission hors bande pour GFDM :

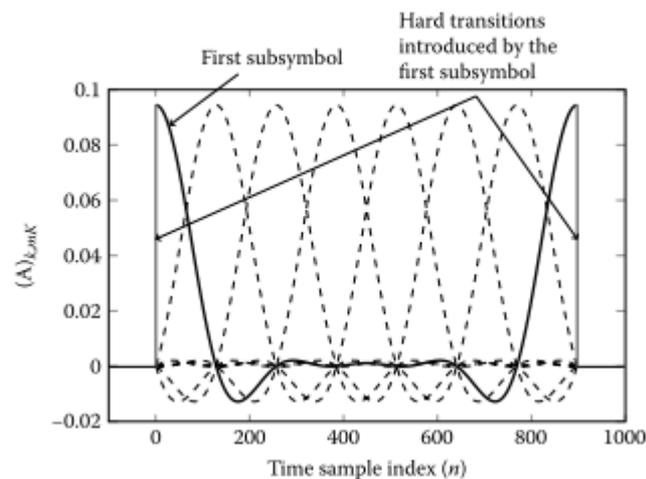
Les sous-porteuses du GFDM sont filtrées avec un filtre prototype décalé circulairement dans le domaine temporel et fréquentiel. Ce processus réduit les émissions hors bande, ce qui rend possible l'attribution de spectre fragmenté et dynamique sans perturber gravement les services en place ou d'autres utilisateurs.

Afin de rendre le filtre de mise en forme d'impulsion plus efficace pour réduire le rayonnement OOB, deux techniques appropriées sont discutées:

a) Insertion des symboles de garde (GS) :

Pour réduire l'émission OOB, il est nécessaire de lisser les transitions entre les blocs GFDM. La circularité du signal dans le domaine temporel permet une solution simple et élégante pour réduire le changement brutal entre les blocs GFDM.

Comme on peut le voir sur la figure 2.3, le premier sous-symbole entoure les bords du bloc, introduire les discontinuités d'amplitude abruptes. Si le premier sous-symbole est effacé, un GS est introduit entre les blocs GFDM, et les bords du signal disparaissent vers zéro, rendant les transitions entre les blocs lisses. Cette technique est appelée GFDM, symbole de garde. L'ajout du CP introduirait des transitions difficiles entre les blocs une fois encore. Une solution pour éviter ce problème est également de rendre le dernier sous-symbole nul et de faire  $N_{cp} = K$ . [6]

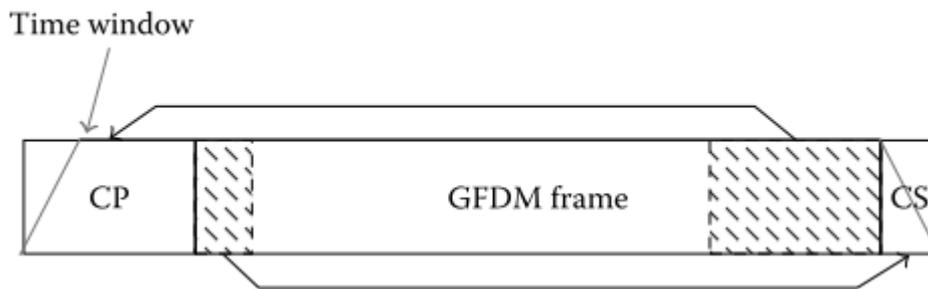


**Figure 2.3** Illustration de premier sous-symbole de bloc GFDM introduit une variation abrupte du signal dans le domaine temporel. [6]

b) GFDM fenêtré :

Le fenêtrage est une méthode appliquée pour réduire les émissions hors bande. Il agit en lissant les changements rapides qui apparaissent dans la réponse impulsionnelle du filtre à impulsions utilisé.

GFDM fenêtré (W-GFDM) utilise une fenêtre temporelle pour lisser la transition entre les blocs GFDM, comme illustré dans la figure 2.5. Un CP de longueur  $N_{CP} = N_{CH} + N_W$  et un suffixe cyclique (CS) de longueur  $N_{CS} = N_W$ , où  $N_{CH}$  est la longueur de la réponse d'impulsion de canal et  $N_W$  est la longueur de la transition de fenêtre temporelle, sont ajoutés au bloc GFDM. Notez que le CS est juste la copie des premiers échantillons  $N_{CS}$  du bloc GFDM à sa fin. [6]



**Figure 2.5.** W-GFDM dans le domaine temporel. [6]

Dans GFDM fenêtré (W-GFDM), il est exploité du côté de l'émetteur en multipliant chaque bloc GFDM par une fonction de fenêtre  $W[n]$  dans le domaine temporel, le tableau 2.2 ci-dessous présente trois fonction de fenêtres :

Fenêtre	Domaine temporel
Rectangulaire	$W_{rect}[n] = 1$
Rampe	$W_R[n] = \sin \frac{N_W}{MK} \left[ \frac{KM + N_W}{2KM} \left( \frac{2n}{KM + N_{CP}} - 1 \right) \right]$
RC	$W_{RC}[n] = \frac{1}{2} [1 - \cos (\pi W_R[n])]$

**Tableau 2.2.** Les fonctions de fenêtres  $W[n]$  [10].

Le tableau ci-dessus présente trois différents types de fonctions fenêtre dont chaque fenêtre à ses propre caractéristiques ainsi que son influence sur l'émission hors bande , la fenêtre rectangulaire est la plus simple. Nous allons définir maintenant chaque fenêtre citée dans le tableau :

❖ Fenêtre rectangulaire :

La fenêtre rectangulaire (ou porte) est la plus simple, elle est définie comme suivant : [10]

$$h(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } t \in [T_1, T_2] \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.4)$$

❖ Fenêtre RC :

La fenêtre RC est utilisée pour réduire le rayonnement OOB introduit dans GFDM, la fenêtre RC atténuera l'OOB et améliorera légèrement le PAPR [10]. Pour contrôler l'émission OOB dans les signaux de bloc GFDM et la fenêtre RC est utilisée à cet effet. La fenêtre est définie comme : [10]

$$W[n] = \begin{cases} W_{montée}[n] & 0 \leq n < N_w \\ 1 & N_w \leq n \leq N_{cp} + N \\ W_{descente}[n] & N_{CP} + N < n < N_{CP} + N + N_w \end{cases} \quad (2.5)$$

D'où  $W_{montée}[n]$  et  $W_{descente}[n]$  représentent la transition en montée et en descente respectivement.

❖ La fenêtre rampe :

Le réseau de prochaine génération doit traiter les grandes zones de couverture en utilisant l'attribution dynamique de canaux basée sur la radio cognitive (CR) avec de faibles émissions OOB et traiter efficacement les effets de trajets multiples en réduisant l'impact du CP dans les débits globaux [10]. Le GFDM peut atteindre des émissions OOB de plusieurs dB en dessous d'OFDM et, par conséquent, est plus approprié pour explorer le spectre vacant et fragmenté. En outre, la configuration GFDM à basse OOB avec un grand M peut réduire l'impact de la longueur de CP dans le débit global et peut augmenter de manière significative l'efficacité spectrale. La fenêtre Rampe est utilisée pour pincer les limites de blocs de signal GFDM, ces blocs pincés fourniront un faible rayonnement OOB et rend GFDM plus compatible avec CR.

La fenêtre Rampe représentée au Tableau 2.2 est constituée de deux parties répétées, la transition Rampe vers le haut représentée dans l'équation 2.4 est utilisée pour pincer la face avant du bloc GFDM et la transition rampe vers le bas illustrée dans l'équation 2.6 [10] est utilisée pour pincer le côté arrière du bloc GFDM.

$$W[n] = \begin{cases} W_{montée}[n] & 0 \leq n < N_W \\ 1 & N_W \leq n \leq N_{CP} + N \\ W_{descente}[n] & N_{CP} + N < n < N_{CP} + N + N_W \end{cases} \quad (2.6)$$

La variation des séquences de montée et descente ( $W_{montée}[n]$ ,  $W_{descente}[n]$ ) a un impacte sur l'émission hors bande. Les séquences qui introduisent des points d'inflexion à faible dérivation sur les bords du signal, fournissent une émission OOB plus faible.

Le W-GFDM peut être utilisé pour obtenir une faible émission OOB tout en conservant une efficacité spectrale élevée, même lorsque M est faible. [10]

## 2.4 Conclusion :

D'après l'étude théorique de GFDM ainsi que ses offres pour l'OOB qui est l'inconvénient chez l'OFDM on peut conclure que cette technique est la bonne solution pour la couche physique. Nous avons présenté GFDM comme un schéma de modulation de forme d'onde candidat pour l'interface radio des futurs réseaux 5G [1]. Nous avons montré comment les exigences imposées par les différents scénarios d'application envisagés peuvent être adressées avec une structure de blocs flexibles et un filtrage de sous-porteuse. Et enfin, Nous avons introduit deux techniques qui, en plus du filtre de sous-porteuse, répondent à l'exigence de faible rayonnement hors bande. Ces études théoriques seront simulées et illustrées dans le prochain chapitre afin de compléter l'étude principale qui est la modulation GFDM.

## Chapitre 3 : Résultats de la simulation de la technique

### GFDM.

---

#### 3.1 Introduction :

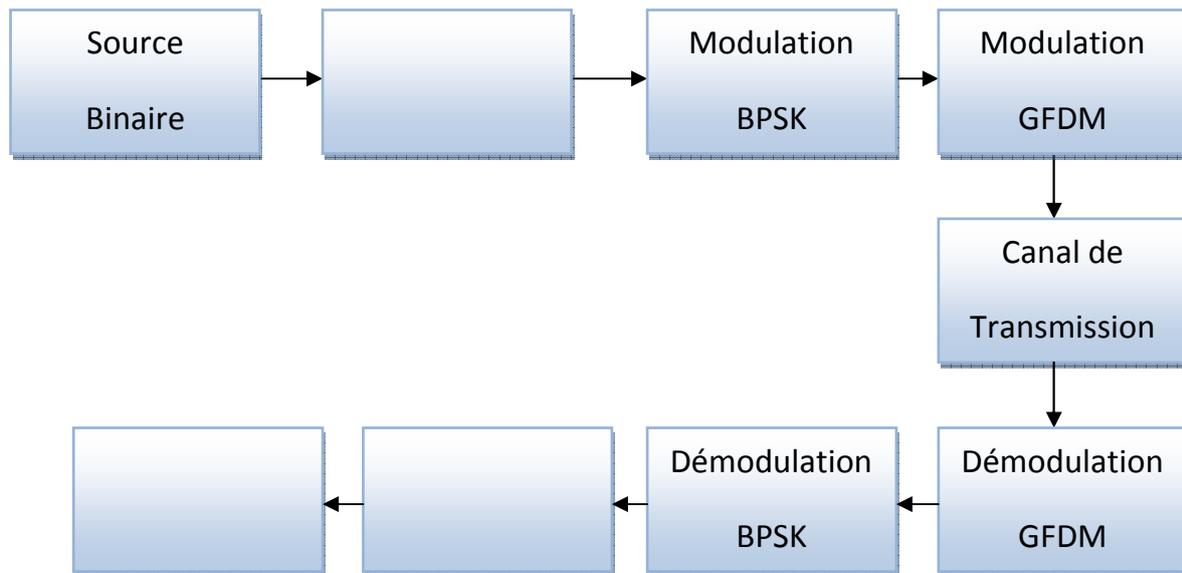
Dans ce chapitre, nous allons utiliser MATLAB comme logiciel pour la simulation de la modulation GFDM. Nous allons présenter les différents filtres utilisés par certains nombre de facteur  $\alpha$  ainsi que les fenêtres (RC, rectangulaire et rampe) afin de minimiser l'émission hors bande. A partir de ces résultats obtenus, nous allons faire une comparaison entre GFDM et OFDM en choisissant un spectre pour chaque modulation et enfin une comparaison entre les densités spectrales de puissance.

##### 3.1.1 Qu'est ce que MATLAB ? :

Le logiciel MATLAB constitue un système interactif et convivial de calcul numérique et de visualisation graphique. Destiné aux ingénieurs, aux techniciens et aux scientifiques, c'est un outil très utilisé, dans les universités comme dans le monde industriel, qui intègre des centaines de fonctions mathématiques et d'analyse numérique (calcul matriciel —le MAT de MATLAB—, traitement de signal, traitement d'images, visualisations graphiques, etc.). Notons que d'autres logiciels compatibles avec MATLAB existent ; citons par exemple OCTAVE —sous Linux— ou encore SCILAB, développé en France par l'INRIA, qui sont tout deux très performants et de plus gratuits (téléchargement libre) [12].

### 3.2 Réalisation de la chaine de transmission GFDM sous MATLAB :

Cette réalisation est faite à l'aide d'un programme écrit sous MATLAB, plusieurs paramètres sont attribués à cette modulation afin d'obtenir des résultats favorable. Ces paramètres seront résumés sous forme de tableaux présentés devant chaque simulation. La figure 3.1 illustre la chaine de transmission d'un système GFDM.



**Figure 3.1.** Schéma synoptique d'une chaîne de transmission GFDM.

Dans cette chaîne de transmission, une source de données fournit des données binaires, ces dernières seront codées puis modulées par la modulation BPSK pour mettre les bits codés en correspondance avec les symboles d'une constellation complexe de  $2^n$ , où  $n$  est l'ordre de modulation (ici  $n = 1$ ). Le vecteur résultant contient  $N$  éléments sera modulé par la modulation GFDM où il sera décomposé en  $K$  sous-symbole. Le nombre total des symboles est  $N = KM$  seront transmis par le canal sans fil (aire), ensuite, ils seront démodulés et décodés avant que le destinataire les reçoive en leur état initial.

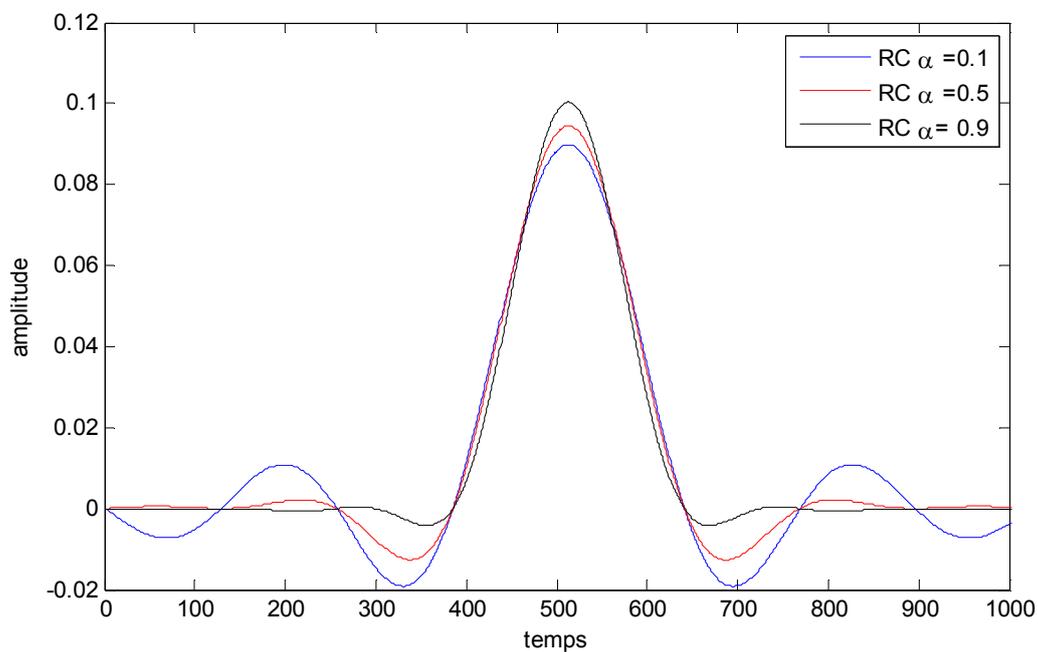
### 3.3 Représentation graphiques des filtres et fenêtres sous MATLAB :

Nous allons présenter les filtres et les fenêtres utilisés dans la simulation dans les deux domaines temporel et fréquentiel pour différents facteurs  $\alpha$  :

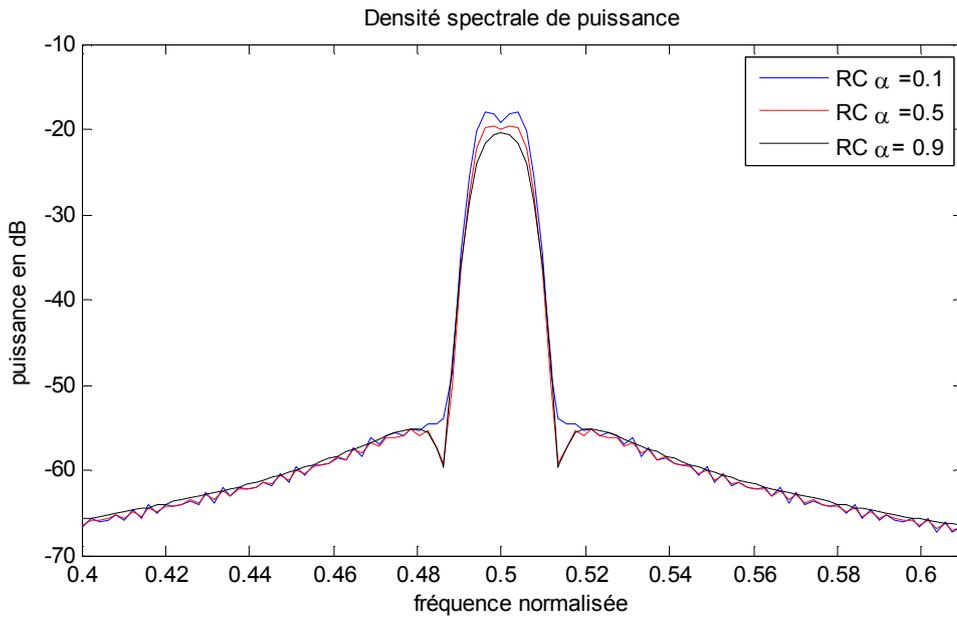
#### 3.3.1 Les filtres prototypes :

Nous avons choisie trois facteurs  $\alpha$  pour simuler les trois filtres prototypes utilisés pour avoir une idée sur l'allure des ces filtres et leur influence sur l'OOB.

a. Filtre RC :

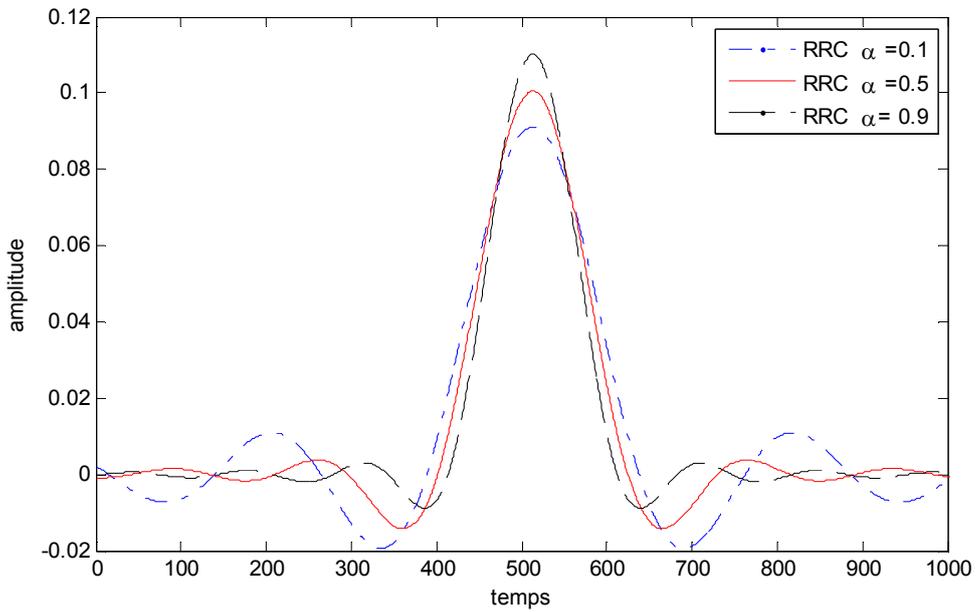


**Figure 3.2.** Représentations graphiques de filtre RC dans le domaine temporel.

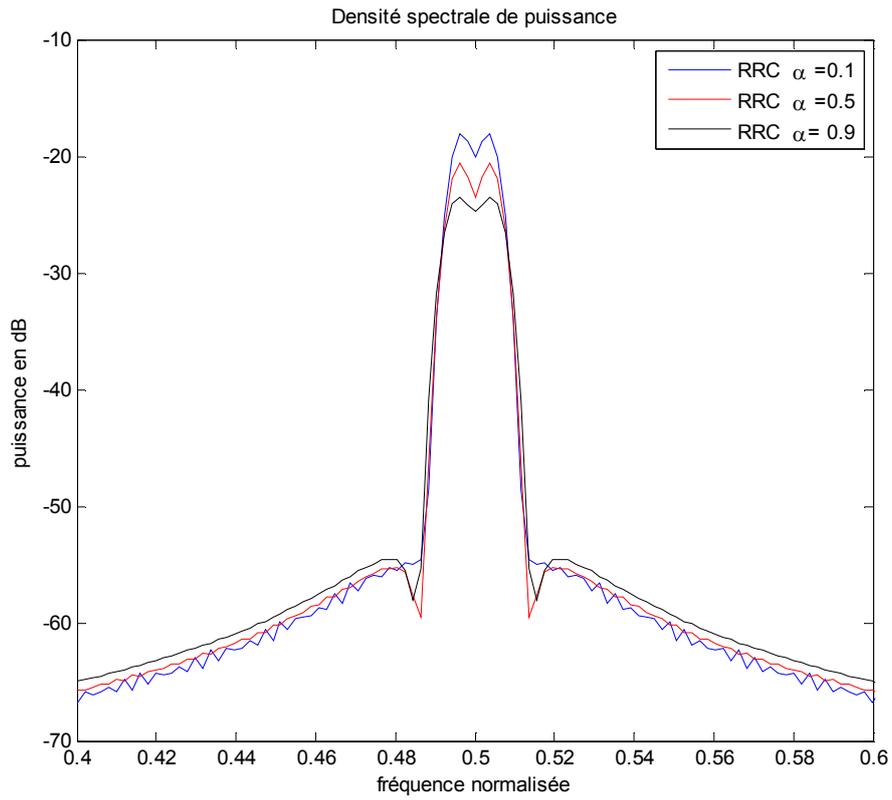


**Figure 3.3.** Représentations graphiques de filtre RC dans le domaine fréquentiel.

b. Filtre RRC :

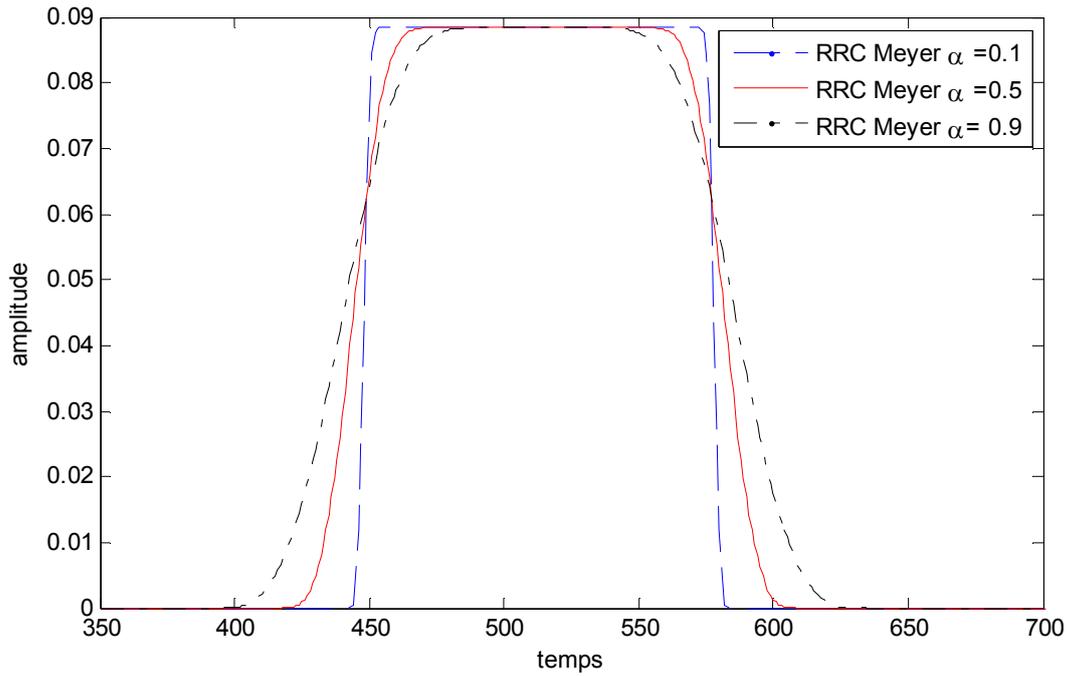


**Figure 3.4.** Représentations graphiques du filtre RRC dans le domaine temporel.

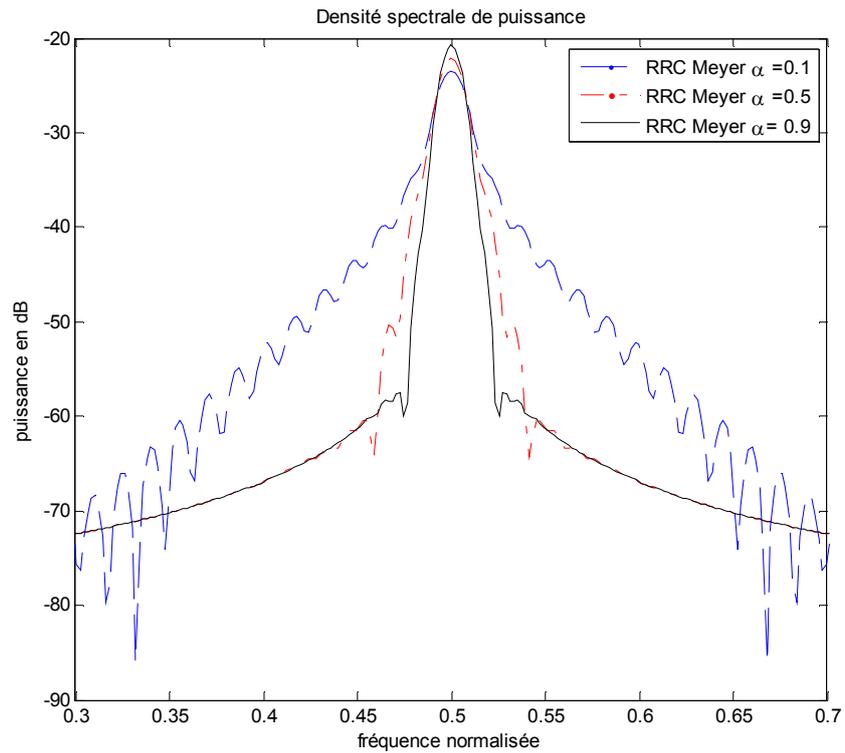


**Figure 3.5.** Représentations graphiques du filtre RRC dans le domaine fréquentiel.

c. Filtre RRC avec Meyer :



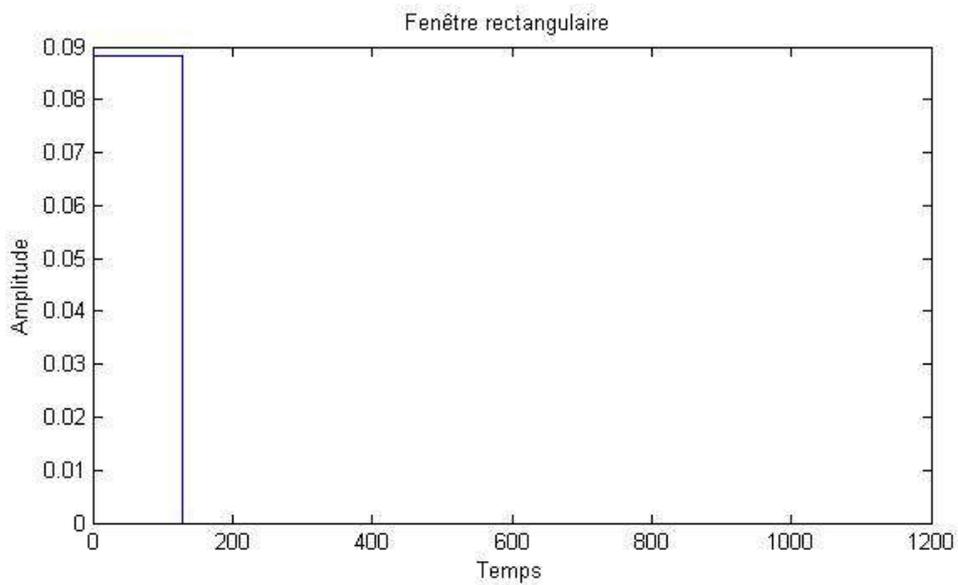
**Figure 3.6.** Représentations graphiques du filtre RRC avec Meyer dans le domaine temporel.



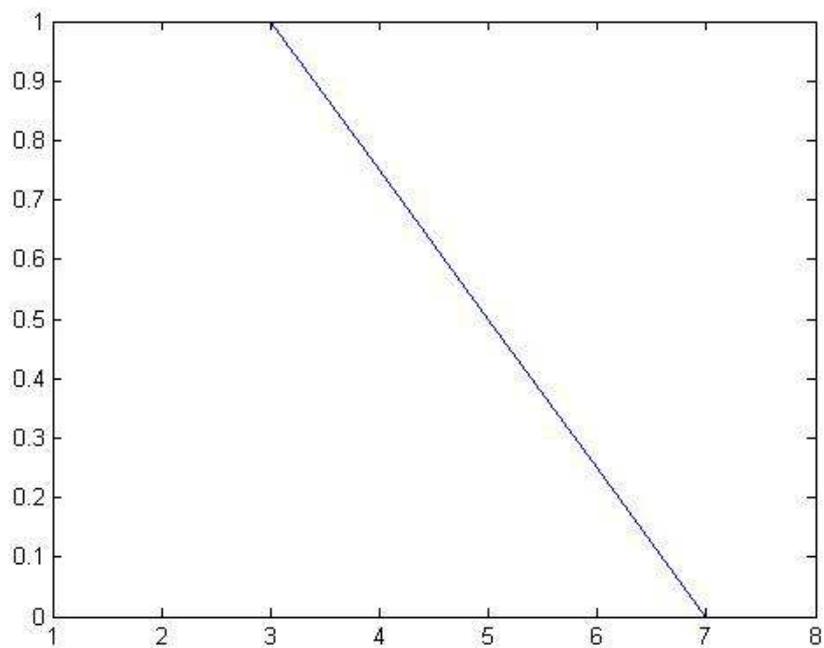
**Figure 3.7.** Représentations graphiques du filtre RRC avec Meyer dans le domaine fréquentiel.

### 3.3.2 Les fenêtres :

Nous avons choisi aussi deux fenêtres pour la simulation de GFDM afin d'étudier aussi l'influence de ces deux fenêtres sur les émissions OOB. Les figures suivantes présentent leur allure dans le domaine temporel :



**Figure 3.8.** Représentation graphique de la fenêtre rectangulaire.



**Figure 3.9** Représentation graphique de la fenêtre rampe dans le domaine temporel.

### 3.4 Simulation de la modulation GFDM :

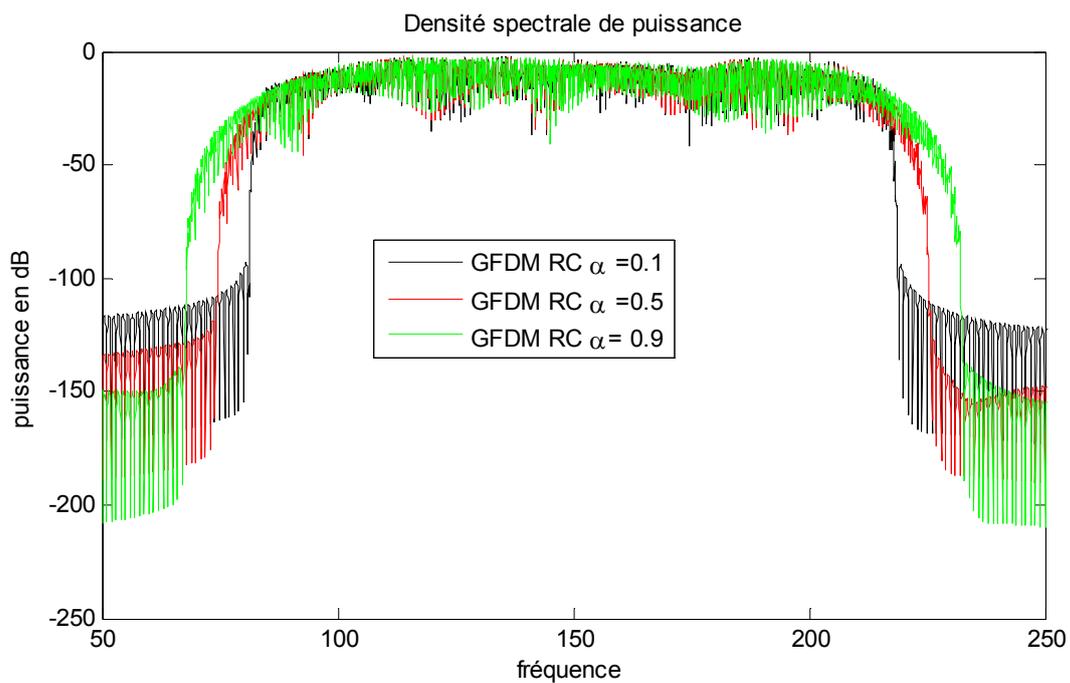
Nous allons maintenant simuler la modulation GFDM en utilisant les paramètres suivants :

#### 1) Pour le filtre RC :

Paramètre	Valeur
Modulation	BPSK
Filtre de transmission	RC
Facteur $\alpha$	0.1, 0.5, 0.9
Nombre de sous-porteuses (K)	512
Nombre de sous-symboles (M)	15
Taille de CS ( $N_{CS}$ )	0
La taille de CP ( $N_{CP}$ )	0

**Tableau3.1.** Paramètres utilisés pour la simulation de GFDM.

Résultats obtenus :



**Figure 3.10** Résultats de la simulation GFDM avec le filtre RC.

**Remarques :** Nous observons qu'à chaque fois que nous augmentons le facteur  $\alpha$  nous obtenons un spectre GFDM à faible émissions hors bande.

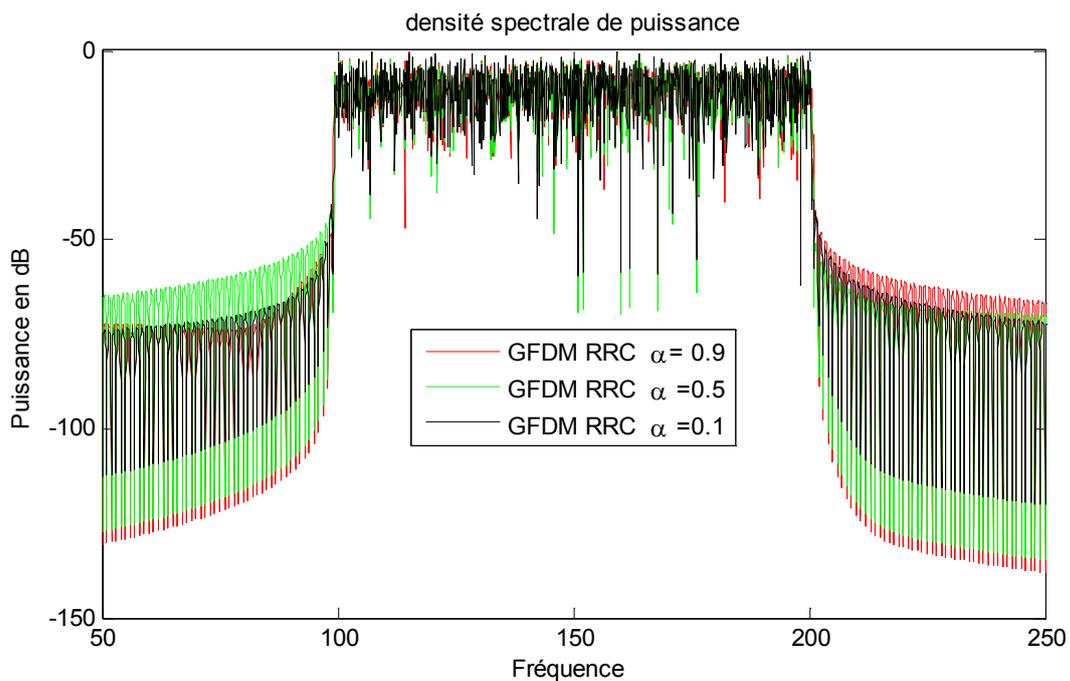
**Interprétation :** Le filtre RC devient plus favorable lorsque nous obtenons un spectre à OOB plus faible avec un facteur plus grand.

**2) Le filtre RRC :**

Paramètre	Valeur
Modulation	BPSK
Filtre de transmission	RRC
Facteur $\alpha$	0.1, 0.5, 0.9
Nombre de sous-porteuses (K)	512
Nombre de sous-symboles (M)	15
Taille de CS ( $N_{CS}$ )	0
La taille de CP ( $N_{CP}$ )	0

**Tableau 3.2** Paramètres utilisés pour la simulation de GFDM.

**Les résultats obtenus :**



**Figure 3.11.** Comparaisons entre deux spectres GFDM.

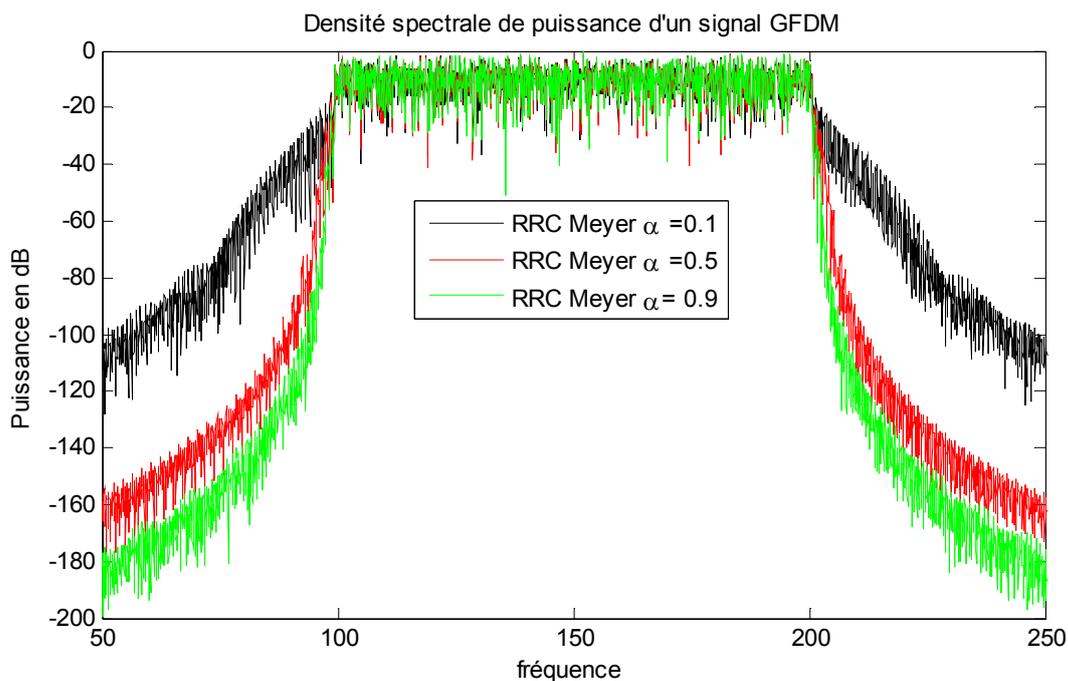
**Interprétation:** Nous remarquons que pour le filtre RRC, les changements sur la valeur de  $\alpha$  nous ne permettent pas d’observer une réduction sur les émissions OOB. En fait, selon la figure 3.5, les différentes des spectres du filtre RRC pour différentes valeurs de  $\alpha$  sont faibles, ce qui veut dire que pour ce filtre le facteur  $\alpha$  n’influence pas énormément sur l’émission OOB.

3) Le filtre Meyer RRC :

Paramètre	Valeur
Modulation	BPSK
Filtre de transmission	Meyer RRC
Facteur $\alpha$	0.1, 0.5, 0.9
Nombre de sous-porteuses (K)	512
Nombre de sous-symboles (M)	15
Taille de CS ( $N_{CS}$ )	0
La taille de CP ( $N_{CP}$ )	0

**Tableau 3.3.** Paramètres utilisés pour la simulation de GFDM

Résultats obtenus :

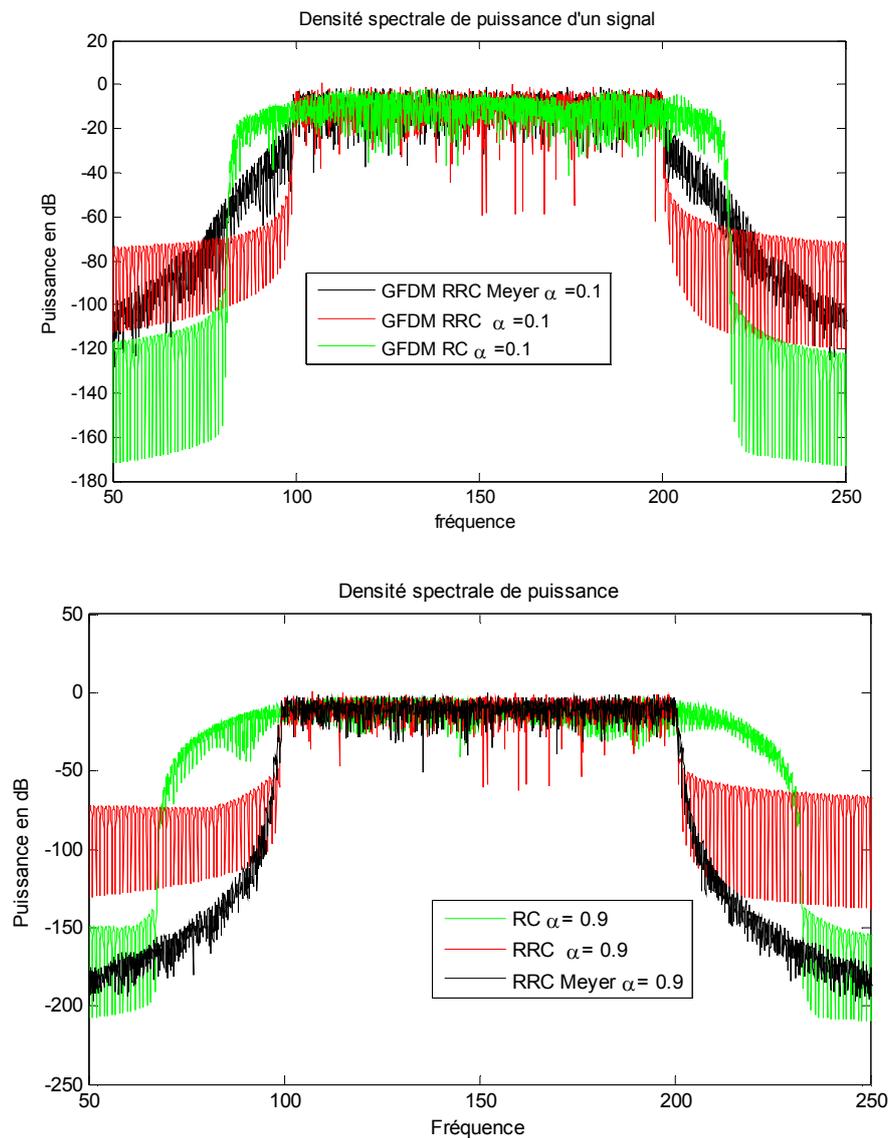


**Figure 3.12.** Résultats de la simulation GFDM avec le filtre Meyer RRC pour différentes valeurs de  $\alpha$ .

**Remarque :** Le filtre Meyer RRC a montré une bonne efficacité sur la réduction des émissions OOB et cette efficacité devient plus importante en augmentant le facteur  $\alpha$ . Nous remarquons que l'OOB décroît rapidement pour  $\alpha = 0.9$ .

**Interprétation :** Le filtre Meyer RRC a réussi à obtenir un spectre à faible émission hors bande dès les premières valeurs  $\alpha$

### Comparaison entre les trois filtres pour $\alpha = 0.1$ et $\alpha = 0.9$ :



**Figure 3.13.** Simulation des trois filtres pour deux facteurs.

**Remarque :** D'après les deux figures illustrées ci-dessus, nous remarquons que le filtre Meyer RRC présente un meilleur affaiblissement de l'OOB par rapport aux deux autres filtres quelque soit la valeur de  $\alpha$ . Pour  $\alpha = 0.9$  la réduction des émissions OOB est très remarquable l'OOB surtout pour les puissances entre 0 et -100 dB.

**Interprétation :** Avoir une faible émission hors bande dépend aux choix de filtre et le choix du facteur d'arrondi. Le filtre Meyer RRC présente ici comme le meilleur choix pour atteindre le but voulu ainsi que le choix du facteur  $\alpha$  a un rôle important.

### Discussion globale sur les résultats obtenus :

Le choix du filtre est très important parce qu'il influe fortement sur les propriétés spectrales du signal GFDM. Les réponses impulsionnelles des filtres dans le domaine temporel montrent qu'à chaque fois que nous augmentons le facteur  $\alpha$  ils deviennent plus larges et dans le domaine spectral ils deviennent plus étroits. C'est ce qui permet de minimiser encore plus l'OOB dans le domaine spectral.

En introduisant la fonction de Meyer dans le filtre RRC nous obtiendront un spectre comme le montre la figure 3.7 avec de faibles ondulations dans les lobes secondaires surtout pour  $\alpha = 0.9$ . La conséquence est une réduction des émissions OOB sur le spectre du signal GFDM.

### Conclusion :

- $\alpha$  est un facteur important pour minimiser les rayonnements hors bande.
- Le filtre RRC avec Meyer est le meilleur choix pour la réduction de l'OOB.

### 3.4.1 Simulation de W-GFDM :

Parmi les techniques à ajouter au filtre pour aussi diminuer l'OOB est d'utiliser les différentes fenêtres avec le filtre prototype choisi. Nous allons prendre le filtre RRC avec un facteur précis plus une fenêtre que nous allons comparer entre eux.

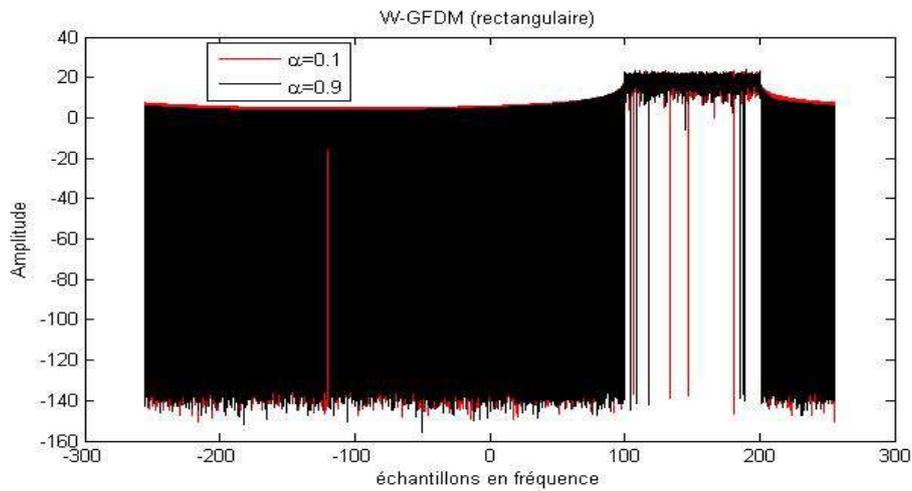
#### a. La fenêtre rectangulaire :

Le tableau ci-dessous résume les paramètres que nous allons les utiliser dans la simulation :

Paramètre	Valeur
Modulation	BPSK
Filtre de transmission	RRC
Facteur $\alpha$	0.1, 0.9
Nombre de sous-porteuses (K)	512
Nombre de sous-symboles (M)	15
Taille de CS ( $N_{CS}$ )	0
La taille de CP ( $N_{CP}$ )	0
Type de fenêtre	Rectangulaire

**Tableau 3.4** paramètres utilisés dans la modulation W-GFDM.

### Résultats obtenus :



**Figure 3.14** Représentation graphique de W-GFDM.

**Remarque :** La fenêtre rectangulaire n'a diminué qu'une petite partie de l'OOB, et nous ne voyons pas une grande différence entre les deux facteurs.

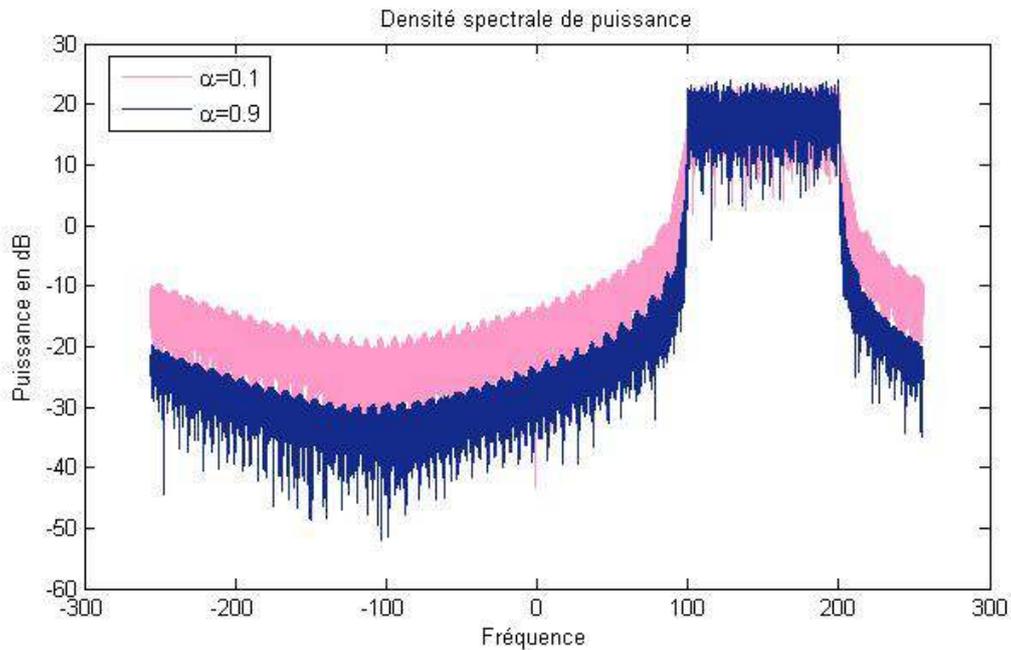
**Interprétation :** Malgré sa simplicité mais cette fenêtre n'ajoute presque rien de nouveau au niveau de spectre dont nous voyons clairement que l'émission hors bande n'affaiblissent pas. Ce qui rend la fenêtre inutile pour la diminution de l'OOB.

#### b. La fenêtre Rampe :

Le tableau ci-dessous représente les différents paramètres utilisés pour cette simulation :

Paramètre	Valeur
Modulation	BPSK
Filtre de transmission	RRC
Facteur $\alpha$	0.1, 0.9
Nombre de sous-porteuses (K)	512
Nombre de sous-symboles (M)	15
Taille de CS ( $N_{CS}$ )	0
La taille de CP ( $N_{CP}$ )	0
Type de fenêtre	Rampe

**Tableau 3.5** Paramètres utilisés dans la modulation W-GFDM.



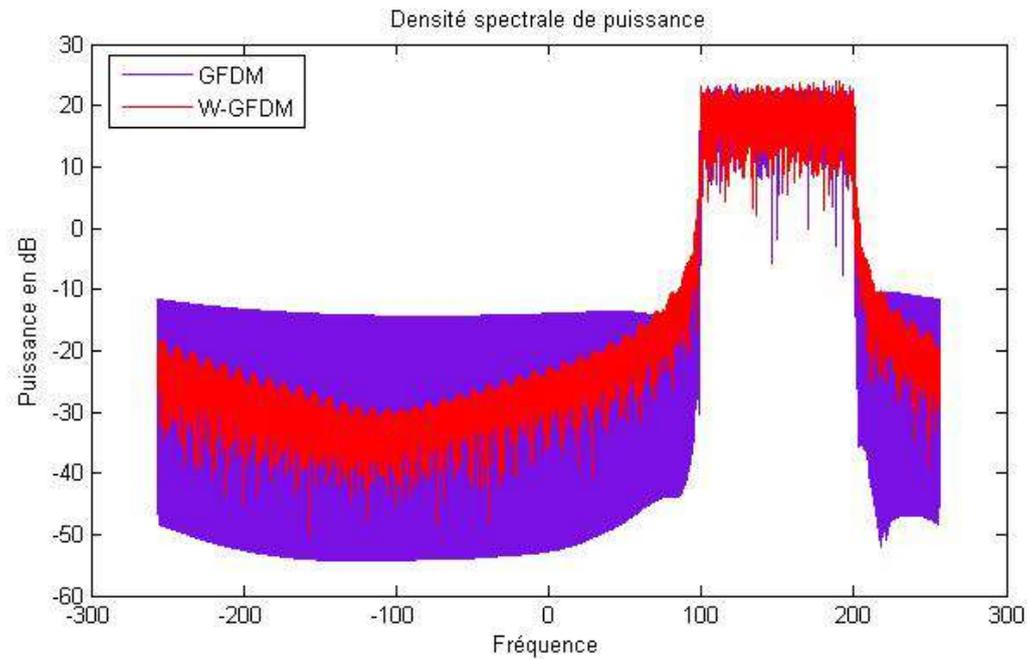
**Figure 3.15.** Représentation graphique de W-GFDM.

**Remarque :** Nous observons que la fenêtre rampe a réussi à diminuer l’OOB au niveau de spectre de GFDM et le facteur  $\alpha$  a joué son rôle parfaitement.

**Interprétation :** La fenêtre rampe est considérée comme la meilleure technique à utiliser pour minimiser l’émission hors bande. Grâce à sa forme qui est utilisée pour pincer les limites du bloc GFDM et enfin fournir un OOB plus bas.

**Comparaison entre un signal GFDM et un W-GFDM pour  $\alpha = 0.9$  :**

Nous avons choisie une fenêtre rampe avec les mêmes paramètres utilisés en comparaison avec le signal GFDM sans la fenêtre.



**Figure 3.16** Représentation graphique d’une modulation GFDM avec et sans fenêtre.

**Remarque :** Une différence est marquée lorsque nous avons ajouté une fenêtre (ex : rampe) d’où elle diminue l’émission hors bande d’une façon plus efficace. Nous voyons que les rayons sont affaiblis d’une valeur qui arrive jusqu’à 10 dB.

**Interprétation :** La technique GFDM fenêtrée donne des résultats favorables pour la réduction de l’émission hors bande, cela implique que le filtre RRC n’est pas suffisant sans cette technique afin d’avoir un spectre à OOB plus faible comme nous désirons l’obtenir.

**Discussion globale des résultats obtenus :** Malgré que les filtres prototypes utilisés peuvent réduire les émissions hors bande, mais on peut rajouter des fenêtres pour réduire davantage les OOB. Les figures 3.8, 3.9, illustrent les deux fenêtres utilisées comme une technique de plus pour la réduction d’OOB. Nous avons observé une amélioration en utilisant la fenêtre rampe grâce à sa transition linéaire.

**Conclusion2 :** La fenêtre rampe est un bon choix pour la réduction d’OOB.

### 3.4.2 Simulation de GS-GFDM :

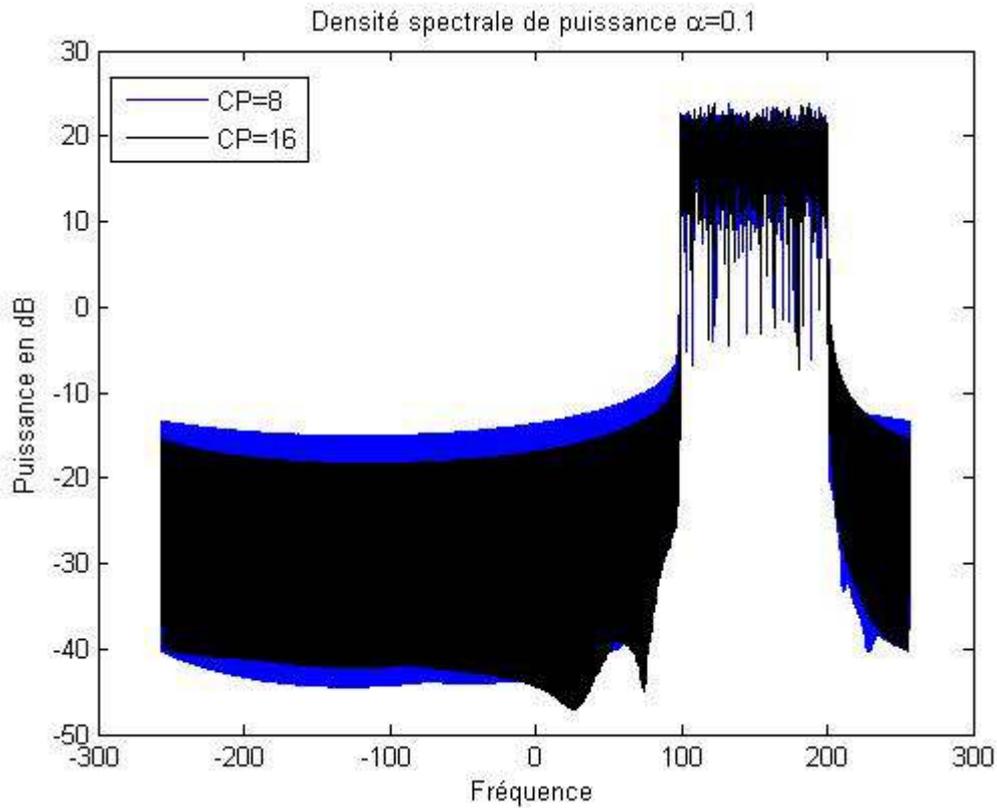
Nous allons maintenant nous focaliser sur la longueur du CP (préfixe cyclique) qui est l’intervalle de garde (GS pour garde symbole). En jouant sur sa taille ou bien en prenant une longueur entre 0 et 16, nous allons analyser l’influence du GS sur l’OOB.

Le tableau ci-dessous résume les paramètres utilisés pour lancer la simulation :

Paramètre	Valeur
Modulation	BPSK
Filtre de transmission	RRC
Facteur $\alpha$	0.1, 0.9
Nombre de sous-porteuses (K)	512
Nombre de sous-symboles (M)	15
Taille de CS ( $N_{CS}$ )	0
La taille de CP ( $N_{CP}$ )	8, 16

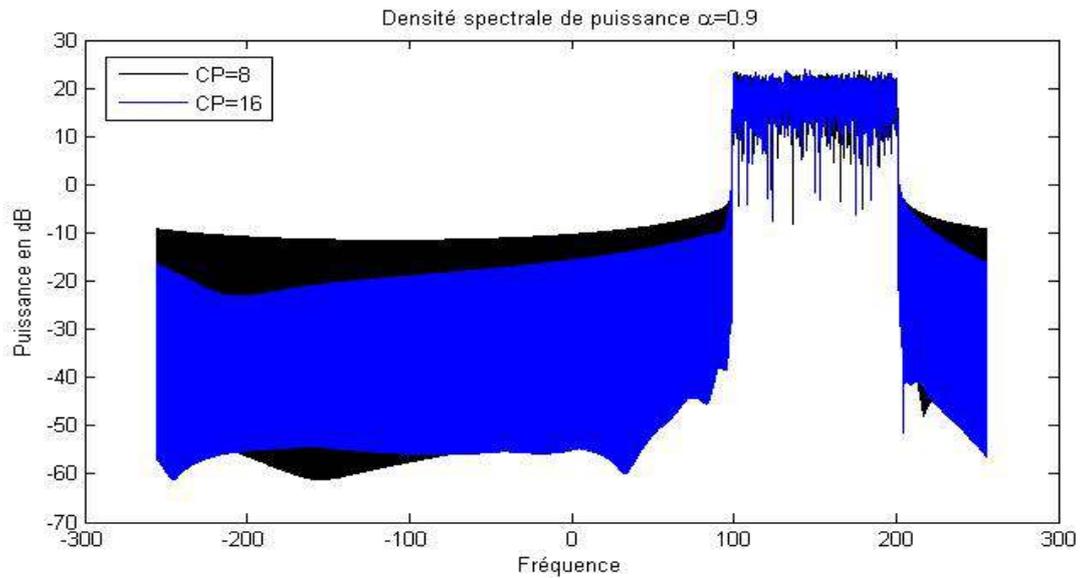
**Tableau 3.6** Paramètres utilisés pour la simulation de GS-GFDM.

**Résultat obtenu :**



**Figure 3.17.** Représentation graphique de GS-GFDM pour deux tailles différentes de CP.

**Remarque :** Nous observons que l'insertion de CP dans la modulation a un impact sur l'émission hors bande, la différence égale à peu près à 13dB.

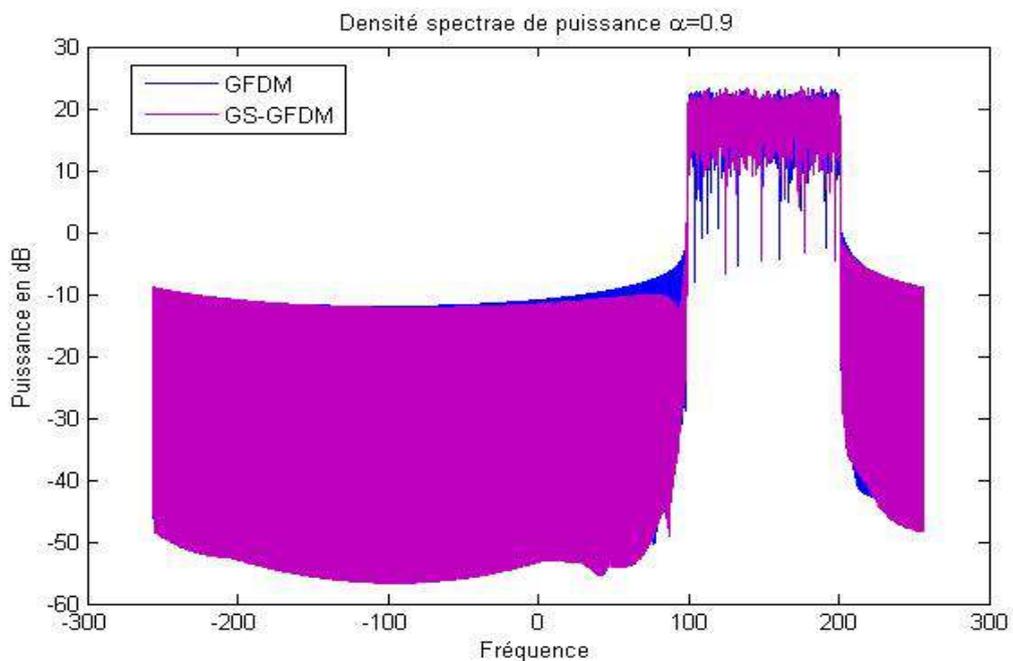


**Figure 3.18.** Représentation graphique de la modulation GS-GFDM pour deux différentes tailles de CP.

**Remarque :** une faible diminution au niveau de l'OOB en augmentant la taille du cp.

**Interprétation :** d'après les deux graphes, GS affecte un peu sur l'OOB d'où la différence ne vaille que quelques dB.

**Comparaison entre GFDM et GS-GFDM :** En prenant toujours le filtre RRC avec  $\alpha = 0.9$  :



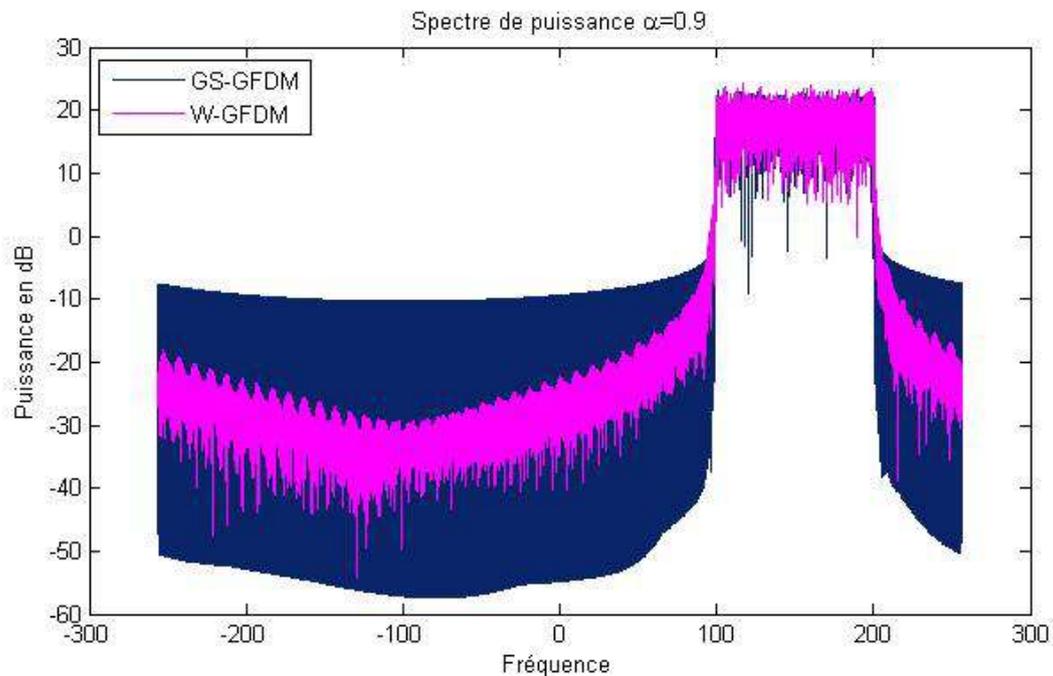
**Figure 3.19** Comparaison entre GS-GFDM et GFDM.

**Remarque :** Comme les graphes précédents, l'influence de cette technique n'est pas très importante, nous remarquons que la diminution est faible entre GS-GFDM et GFDM.

**Interprétation :** Il est nécessaire d'augmenter beaucoup plus la taille de CP pour avoir des résultats favorable, mais cette augmentation peut occuper plus d'espace de données ce qui n'est pas désirable.

#### **Comparaison entre GS-GFDM et W-GFDM :**

Nous allons simuler deux type de techniques appliquées sur GFDM, nous allons choisir un intervalle de garde de longueur 16 échantillons et une fenêtre rampe.



**Figure 3.20** Représentation graphique des spectres de GS-GFDM et W-GFDM.

**Remarque :** Une différence importante entre ces deux techniques, d'où GS-GFDM montre d'une faible diminution de l'OOB par rapport au W-GFDM.

**Interprétation :** W-GFDM et GS-GFDM peuvent avoir le même impacte sur l'OOB si on augmente la taille de CP plus en plus mais en raison de son occupation de l'espace nécessaire pour la transmission des données il est préférable d'utiliser W-GFDM.

**Discussion totale sur les résultats obtenus :** Contrairement à la technique de fenêtrage, l'insertion du GS a une faible affection sur l'OOB car il nécessite une taille plus large pour mieux performer et avoir un résultat favorable.

D'après la comparaison entre GS-GFDM et W-GFDM on peut les utiliser en même temps afin d'éviter d'agrandir la taille du CP qui peuvent provoquer des interférences et occupé plus d'espace dans la bande passante.

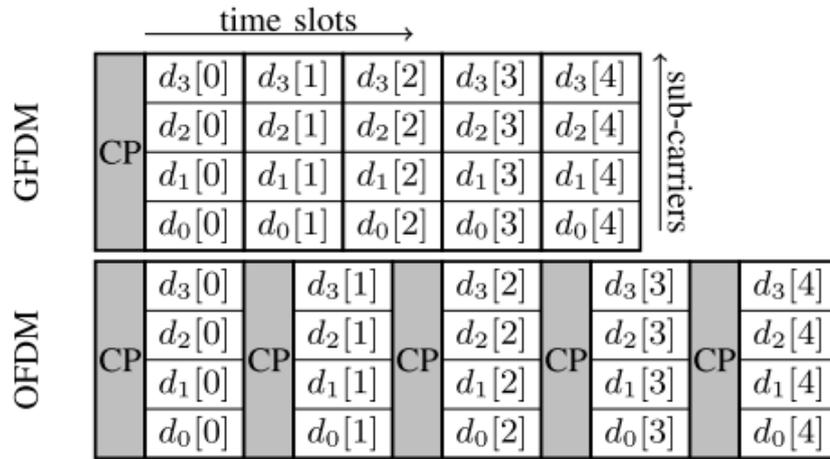
### **Conclusion 3 :**

- GS-GFDM peuvent être considéré comme une bonne technique de la réduction de l'émission hors bande à savoir l'utilisation de la modulation GFDM.
- W-GFDM est un plus pour le GS-GFDM qui peuvent ajouter plus d'efficacité au niveau de spectre.
- Le W-GFDM peut être utilisé pour obtenir une faible émission OOB tout en conservant une efficacité spectrale élevée.

## **3.5 Comparaison des spectres entre GFDM et OFDM :**

La plupart des systèmes de communication numériques actuels utilisent OFDM en tant qu'interface de couche physique, mais cette technique présente des inconvénients importants qui le rendent douteux pour les futurs systèmes sans fil comme les réseaux 5G ce qui fait la différence entre elle et la technique GFDM plus particulièrement, parmi ces inconvénients les émissions hors bande (OOB) élevées des signaux OFDM constituent un obstacle à l'utilisation de cette technologie dans les scénarios d'attribution de spectre dynamique et à spectre fragmenté, dans le système GFDM le filtre prototype utilisé sert justement à rendre ces émissions plus faible que possible.

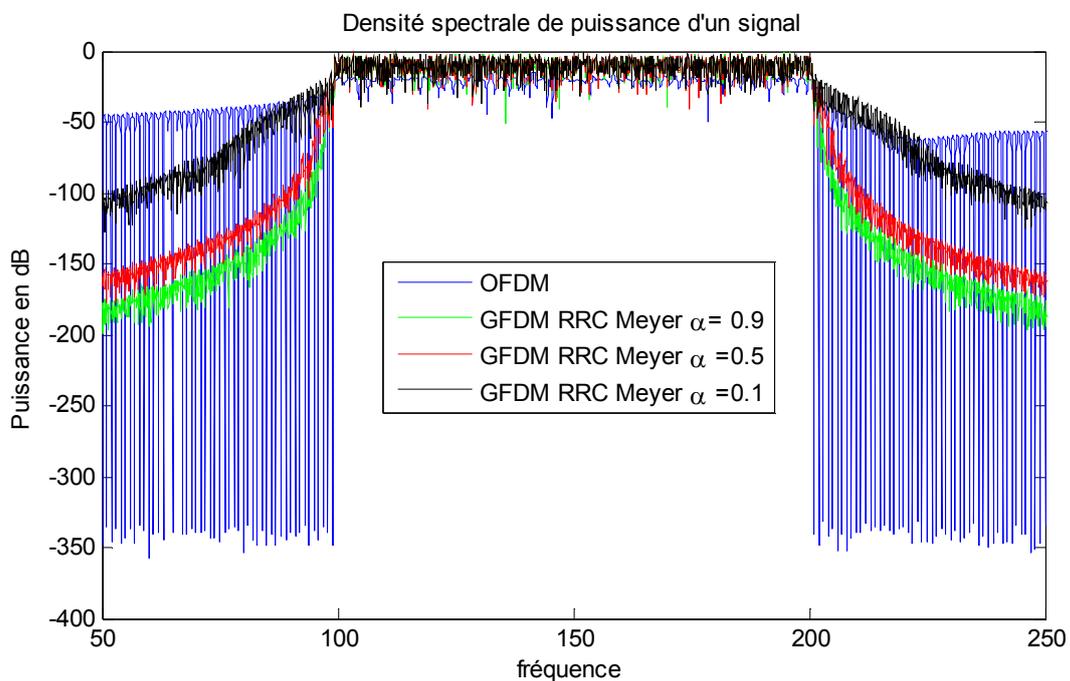
Lorsqu'OFDM et GFDM sont utilisés pour la transmission à travers des canaux multi trajets avec évanouissement avec un profil de retard de puissance exponentiel, un préfixe cyclique est ajouté pour empêcher l'ISI [10]. Les deux systèmes diffèrent par la quantité de CP insérée. Tandis que dans OFDM le CP est rajouté pour symbole OFDM entier, dans la GFDM un CP est ajouté pour chaque bloc de M symboles. La figure 3.21 montre cette différence.



**Figure 3.21** Différentes structures de blocs dans OFDM et GFDM. [76]

La différence entre OFDM et GFDM dans le domaine spectral est présentée ci-dessous en gardant le filtre RRC meyer pour GFDM avec  $\alpha = 0.1$ ,  $\alpha = 0.5$  et  $\alpha = 0.9$  :

**Résultat obtenu :**



**Figure 3.22** Représentation graphique des spectres de l'OFDM et GFDM.

**Interprétation:** l'émission hors bande de l'OFDM est plus élevée par rapport au GFDM. La densité spectrale de puissance montre que la puissance moyenne des spectres de GFDM est beaucoup plus faible que l'OFDM. Si on prend la fréquence 50, la dsp chute de -50 dB vers -100 puis presque -200 dB pour  $\alpha = 0.9$ .

**Conclusion :** L'OFDM souffre de sa faible efficacité en puissance à cause d'utilisation du cp et aussi de ses fortes émissions OOB. La modulation GFDM en utilisant les filtres prototypes RRC meyer permet de réduire considérablement les OOB par rapport à la modulation OFDM. Cela nous mène à comprendre l'avantage de la GFDM pour la future norme de communication.

### 3.6 Conclusion :

D'après les études et la simulation réalisée, nous concluons que :

- Les filtres prototypes sont les bonnes solutions à admettre pour minimiser le rayonnement hors bande.
- Le facteur  $\alpha$  affecte sur le filtre donc sur le spectre de GFDM.
- Le GS-GFDM et W-GFDM ont un impact sur l'étude de la modulation de GFDM, ils sont indépendante mais chacun peut compléter l'autre en obtenons un spectre plus efficace et à OOB plus faible.
- Le GFDM présente une meilleure technique et solution aux problèmes générés par l'OFDM en termes d'efficacité spectrale et la bande passante occupée.

## Conclusion générale

---

Un problème majeur en télécommunications, est de transmettre une énorme quantité d'information sans erreur avec une faible consommation d'énergie et aussi utiliser un spectre efficace à faible émission hors bande. Pour résoudre ce problème, des techniques basées sur la modulation multi porteuses ont été proposées. Les dernières versions des techniques multiporteuses ont été conçues pour être plus flexibles et éliminer certains problèmes observés en OFDM.

Ces techniques sont : FBMC, BFDM, UFMC et GFDM. Un énorme chemin a été effectué depuis des dizaines d'années pour qu'elles puissent voir le jour et rendre la modulation multi porteuses plus attractive pour les futures normes des télécommunications sans fil.

Ce manuscrit présente une l'implémentation de système GFDM et une analyse de ses performances surtout par rapport aux émissions OOB.

La technique GFDM a réussi à résoudre le problème des émissions hors bande provenant de la technique OFDM, et réussi à avoir plus d'espace dans la bande passante à travers l'utilisation d'un seul préfixe cyclique par paquet. Le succès de cette technique à été grâce à la flexibilité des filtres prototypes dans le domaine temporel qui minimise l'OOB dans le spectre du signal GFDM. Deux autres techniques ont été ajoutées pour plus de flexibilité et qui sont GS-GFDM et W-GFDM et éviter de s'appuyer que sur les filtres.

Nous avons comparé à l'aide des simulations en MATLAB, ces différentes techniques par rapport à leur efficacité en réduction de l'OOB et par rapport à la technique OFDM. A la base des résultats obtenus, nous pouvons dire que la technique GFDM a présenté de bons résultats qui la favorise et la positionne parmi les meilleures techniques mutiporteuses actuellement.

Nous pouvons prévoir que le développement de la technique GFDM prélude à l'ouverture de nouveaux horizons pour d'autres types d'application, dans différents environnements, telle que la nouvelle technologie de la 5<sup>ème</sup> génération.

## Bibliographie

---

- [1] Nicola Michailow, Maximilian Matthé, Ivan Gaspar, « **Generalized frequency division multiplexing for 5<sup>th</sup> generation cellular networks**», IEEE transactions on communications, "FP7 project 5GNOW", Sponsor: Union Européen, Institut national de télécommunications et conseil national pour le développement scientifique et technologique, Brésil, 2014.
- [2] Farhi Nabila, Helaimia Souhaila, « **Etude et simulation d'une transmission de type OFDM pour les communications sans fil** », Master en Réseaux et Communications, Soutenu à Tebessa, Université Larbi tebessi, juin 2016, 86 pages.
- [3] HO Anh Tai « **Application des techniques multi porteuses de types OFDM pour les futurs systèmes de télécommunications par satellite** », Soutenu à Toulouse, Institut national polytechnique de Toulouse, France, 30 mars 2009, 145 pages.
- [4] « **Alcatel et le coréen KT partenaire dans la 5G mobile** » sur [www.lechos.fr](http://www.lechos.fr), 19 mai 2015 consulté le 10 mai 2018.
- [5] Shravan Kumar Bandari, V.V.Mani, A.Drosopoulos, « **Performance analysis of GFDM invarious fading channels**», COMPEL: The international journal for computation and mathematics in electrical engineering, VOL 35, p225-244, 2015.
- [6] Iftikhar Rachid, Meisam Khalil Armandi, Moneeb Gohar et d'autres auteurs, « **Opportunities in 5G Networks** », Fei Hu, Première édition 2016, ISBN978-1-4987-3954-2.
- [7] Stefano Buzzi, Alessandro Ugolini et d'autres auteurs, « **a signal processing for 5G : Algorithms and Implementations** », Fa-Lokng lu, PhD et Charlie (Jianzhong) Zhang, Ph.D, IEEE Fellow, 2016.

[8] « **Future communication challenges 5G-scenarios** » Disponible sur : [https://www.researchgate.net/figure/Future-Communication-Challenges-5G-scenarios2\\_fig2\\_278798179](https://www.researchgate.net/figure/Future-Communication-Challenges-5G-scenarios2_fig2_278798179) consulté le 25 avril 2018.

[9] Quentin Bodinier, « **Contribution to PHY and MAC layers for GFDM in the context of cognitive radio** », Master en télécommunication, Soutenu à Gif-sur-yvette, école supérieure d'ingénieur Supélec, France, 70 pages, 18 avril 2016.

[10] Abdullah Ahmed Nadji, Ahmed Sadeq Sultan, Ahmed Saeed Hatem Abdullah et d'autres auteurs, « **Anlysis of out of band emission reduction for 5G wireless communications** », Soutenu à TAIZ, Université de TAIZ-Yemen, 2017.

[11] Maximilian Matthé, Ivan Gaspar et d'autres auteurs, « **5G mobile communications** », Wei Xiang, Kan Zhang, Xuemin(Sherman) shen, 2017, ISBN 978-3-319-34208-5.

[12] Florent Krzakala, « **Premier pas en MATLAB** », Laboratoire PCT Paris, France, disponible sur : [www.lps.ens.fr](http://www.lps.ens.fr) consulté le 01/06/2018 à 13 :15