

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université A.MIRA-BEJAIA



Faculté de Technologie  
Département de Génie Electrique

# Mémoire fin d'études

*En vue de l'obtention du diplôme de Master en Télécommunication*

*Spécialité : Télécommunication*

## ***THÈME***

---

**Simulation et performances d'algorithmes pour  
l'accès aux ressources à base de F-OFDM**

---

**Réalisé par:**

ALLAOU safia

SADAOUI kaissa

**Devant le jury composé de :**

*M<sup>em</sup>*. BENDJELLOUL

M. MOKRANI karim

M. AZNI Mohamed

**Présidente.**

**Examineur.**

**Encadreur.**

**Année Universitaire : 2019/2020**

# *Remerciement*

*On tient tout d'abord à témoigner notre vive reconnaissance à Mr AZNI MOHAMED pour avoir accepté de nous encadrer et de guider cette étude avec son ouverture d'esprit, sa rigueur et son enthousiasme.*

*Nos sincères remerciements et gratitudeux Aux Président et membres du jury pour avoir accepté de présider et de faire partie de notre jury malgré vos multiples occupations, veuillez trouver ici notre hautes considérations.*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail effectué avec toute ma motivation à :*

*A mes très chers parents qui ont su m'inculquer le sens aigu du travail bien fait et la place de la connaissance dans la vie d'une femme.*

*A l'une des personnes les plus chères à mes yeux AYMEN*

*A mes deux chers frères WALID et HASSEN*

*A mes adorables sœurs YASMINE, RANIA, KAMIR, MANEL, KAISSA, THIZIRI et LIZA*

*A toute les personnes que j'aime profondément*

*Puisse dieu vous donne santé, bonheur*

Safia

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*A toute ma famille de plus petit au plus grand membre qui m'ont toujours soutenu que dieu les bénisse*

*A toute les personnes que j'aime.*

kaissa

## Table des matières

Introduction.....	1
Chapitre 1 : Principes de L'OFDM .....	3
1.1 Introduction.....	4
1.2 Historique.....	4
1.3 Canal multi-trajets .....	4
1.3.1 Caractéristique d'un canal à trajets multiples.....	6
1.4 Notion d'orthogonalité .....	6
1.4.1 L'orthogonalité temporelle .....	7
1.4.2 L'orthogonalité fréquentielle .....	7
1.5 Principe et fonctionnement de l'OFDM .....	9
1.5.1 Modulation OFDM.....	10
1.5.2 Démodulation .....	12
1.6 Problème des interférences.....	13
1.6.1 Interférence entre symboles (ISI).....	13
1.6.2 Interférence entre sous porteuses (ICI) .....	13
1.7 Intervalle de garde .....	14
1.8 Préfixe cyclique.....	14
1.9 Avantages et inconvénients de l'OFDM.....	15
1.9.1 Avantages.....	15
1.9.2 Inconvénients.....	16
1.10 Les systèmes utilisant OFDM.....	16
1.11 Techniques d'accès multiple.....	16
1.11.1 OFDMA (OFD-Multiple Access).....	17
1.12 Conclusion.....	19
Chapitre 2 : F-OFDM pour les réseaux 5G .....	20
2.1 Introduction.....	21
2.2 La 5ème génération .....	21
2.3 Applications de la 5g .....	21
2.5 Modulation .....	24
2.6 F-OFDM.....	24
2.7 Caractéristiques générales de F-OFDM.....	24
2.8 Structure de l'émetteur-récepteur F-OFDM.....	27
2.9 Conception du filtre pour F-OFDM.....	29
2.9.1 Filtre FIR (Finite Impulse Response) .....	30
2.9.1.1 Le filtre FIR basé sur le fenêtrage.....	30

2.10 Conclusion.....	33
Chapitre 3 : Simulation et discussion des résultats .....	34
3.1 Introduction.....	35
3.2 Schéma synoptique.....	35
3.3 Structure du programme de simulation.....	35
3.4.1 Comparaison des DSP d’OFDM et F-OFDM.....	36
3.4.2 Comparaison du TEB d’OFDM et F-OFDM.....	39
3.5 Conclusion .....	42
Conclusion.....	44

Liste des figures

Figure 1.1: Schéma de principe de trajets multiples.....	5
Figure 1.2:Exemple d'une base orthogonale.....	7
Figure 1.3:Principe d'orthogonalité des sous-porteuses en OFDM.....	8
Figure 1.4: Spectre du signal OFDM pour 16 sous-porteuse.....	9
Figure 1.5: Répartition fréquentielle et temporelle.....	10
Figure 1.6 : Schémas de principe d'un modulateur OFDM.....	11
Figure 1.7: Spectre du signal en sortie du modulateur OFDM.....	12
Figure 1.8: Schémas du principe d'un démodulateur OFDM.....	13
Figure 1.9: Interférence inter-porteuse (ICI) en OFDM dans le domaine temporelle.....	14
Figure 1.10: Illustration de l'effet de l'intervalle de garde.....	15
Figure 1.11: Préfixe cyclique.....	16
Figure 1.12: Nombre de sous-porteuses pour différentes bandes spectrale.....	18
Figure 1.13: Espacement entre sous-porteuse.....	19
Figure 1.14: Différence entre OFDM et OFDMA.....	19
Figure 1.15: Les porteuses de l'OFDMA.....	20
Figure 2.1: comparaison 4G et 5G.....	25
Figure 2.2: Conception de filtre sous-bande.....	26
Figure 2.3: Flexibilité et coexistence des formes d'onde.....	27
Figure 2.4: Structure de l'émetteur de système F-OFDM.....	29
Figure 2.5: Structure de récepteur de système F-OFDM.....	30
Figure 2.6: Méthode de fenêtrage dans le domaine fréquentiel.....	31
Figure 2.7: Réponse impulsionnelle du filtre passe bas.....	33
Figure 3.1: Chaîne de transmission F-OFDM.....	34
Figure 3.2: DSP en bande de base du signal F-OFDM proposé par apport à l'OFDM.....	37
Figure 3.3: Densité spectrale de puissance pour F-OFDM avec un filtre L=513.....	39
Figure 3.4: Densité spectrale de puissance pour F-OFDM avec un filtre L=1025.....	40
Figure 3.5: Densité spectrale de puissance pour F-OFDM avec un filtre L=2049.....	40
Figure 3.6: Comparaison entre le BER d'OFDM et F-OFDM pour la modulation QPSK.....	41
Figure 3.7: Comparaison entre le BER d'OFDM et F-OFDM pour la modulation QAM.....	42
Figure 3.8: Comparaison entre le BER d'OFDM et F-OFDM pour la modulation 16QAM.....	43
Figure 3.9: Comparaison entre le BER d'OFDM et F-OFDM pour la modulation 64QAM.....	43

## Liste des tableaux

Tableaux 2.1 : Comparaisons entre 4G et 5G au niveau des huit indicateurs de Performance.....	23
Tableau 3.1 : Paramètres de simulation.....	36
Tableau 3.2 : Paramètres de simulation.....	39



### Abréviation

<b>3GPP :</b>	The 3rd Generation Partnership Project
<b>4G :</b>	Quatrième Génération
<b>5G :</b>	Cinquième Génération
<b>AWGN :</b>	Additive White Gaussian Noise
<b>BER :</b>	Bit Error Rate
<b>CP :</b>	Cyclic Préfixe
<b>CP- OFDM :</b>	Cyclic Préfixe Orthogonal Frequency Division Multiplexing
<b>DAB :</b>	Digital Audio Broadcasting
<b>DSL :</b>	Digital Subscriber Line
<b>DSP :</b>	Power Spectral Density
<b>DVB :</b>	Digital Video Broadcasting
<b>eMMB :</b>	Enhanced Mobile Broadband
<b>EQM :</b>	Erreur Quadratique Moyenne
<b>ETSI :</b>	European Telecommunications Standards Institute
<b>FBMC :</b>	Filter Bank Based Multicarrier
<b>FFT :</b>	Fast Fourier Transform
<b>FIR :</b>	Finite Impulse Response
<b>F-OFDM :</b>	Filtered-Orthogonal Frequency Division Multiplexing
<b>GFMD :</b>	Generalized Frequency Division Multiplexing
<b>ICI :</b>	Inter-Carrier Interference
<b>IES :</b>	Interférence Entre Symboles
<b>IEP :</b>	Interférence Entre Porteuse
<b>IFDT :</b>	Inverse Discrete Fourier Transformation
<b>IFFT :</b>	Inverse Fast Fourier Transform
<b>IMT-2020 :</b>	International Mobile Telecommunication-2020
<b>IOT :</b>	Internet Of Things
<b>ISI :</b>	Inter-Symbol Interference
<b>ITU :</b>	International Telecommunication Union
<b>KPI :</b>	Key Performance Indicator
<b>LTE :</b>	Long Term Evolution

<b>MAQ :</b>	Modulation Amplitude Quadrature
<b>mMTC :</b>	Massive Machine Type Communication
<b>OFDM :</b>	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
<b>OFDMA :</b>	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
<b>OOB :</b>	Out Of Band
<b>QAM :</b>	Quadrature Amplitude Modulation
<b>QPSK :</b>	Quadrature Phase Shift Keying
<b>RCR :</b>	RaisedCosineRoots
<b>RSB :</b>	Rapport Signal sur Bruit
<b>SNR :</b>	Signal to Noise Ratio
<b>TDMA :</b>	Time-Division Multiple Access
<b>TEB :</b>	Taux d'erreur Binaire
<b>TFDD :</b>	Transformée Directe
<b>TTI :</b>	Transmission Time Interval
<b>UFMC :</b>	UniversalFiltered Multi Carrier
<b>URLLC :</b>	Ultra Reliable Low Latency Communications
<b>WIFI :</b>	Wireless Fidelity
<b>WiMax :</b>	Worldwide Interoperability for Microwave Access

# **Introduction**

### Introduction

Les technologies de l'information sont devenues une partie intégrante dans notre vie quotidienne. Avec l'essor de nouveaux services dans les réseaux sans fils, la demande de transmission à débit de plus en plus élevés s'accroît davantage.

L'évolution des anciens systèmes mobiles fait généralement référence à un changement de nature de système, de vitesse, de technologie, de fréquence, de capacité de donnée, de latence...etc. Le réseau de communication mobile de première génération (1G) était analogique et utilisé uniquement pour les appels vocaux. La deuxième génération (2G) est une technologie numérique qui prend en charge la messagerie texte. La technologie mobile de troisième génération (3G), qui est basée sur la technique d'accès CDMA (Code Division Multiple Access), offre un taux de transmission de données plus élevé, une capacité accrue et un support pour les communications multimédia. La quatrième génération (4G) intègre la 3G avec internet fixe pour soutenir l'internet mobile. Les systèmes de 4G sont apparus pour enlever la sélectivité fréquentielle et pour obtenir un débit élevé à l'aide des modulations OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).

L'OFDM est une technique de modulation multi-porteuse la plus répandue. Un signal OFDM a sa bande passante qui est divisée en plusieurs sous-porteuses chacune définissant ainsi une sous-bande étroite. Son principe est de transmettre l'information sur plusieurs sous-porteuses orthogonales entre elles. La grande popularité de l'OFDM vient principalement de son implémentation numérique facile et efficace en utilisant l'algorithme de la transformée de Fourier rapide (FFT).

Nous assistons actuellement au début d'une révolution intelligente sans précédent sous l'impulsion de la dernière-née des technologies numériques et mobiles évolués : la 5G qui regroupe plusieurs techniques parmi lesquelles figure la technique F-OFDM (Filtered OFDM) est considérée comme un nouveau candidat pour remplacer la technique OFDM et surmonter ces limites.

L'objectif de ce mémoire est de faire une étude théorique de la modulation F-OFDM. F-OFDM est une version filtrée de l'OFDM conventionnelle. Dans F-OFDM, une bande de fréquences peut être divisée en plusieurs sous bandes. Chaque sous

bande est traitée exactement comme l'OFDM puis elle est filtrée. Grâce à ces filtres l'OOB (Out Of Band) du système F-OFDM est réduit, et le rendement spectral s'améliore.

Le présent mémoire est organisé en 3 chapitres.

Dans le premier chapitre, nous allons présenter les principes de la technique de modulation OFDM. Nous discuterons de ses avantages et de ses inconvénients dans un premier temps, puis nous introduirons la notion de partage des ressources dans le cas général conduisant ainsi aux techniques d'accès multiples. Dans ce cadre, nous étudierons alors le principe de base de l'accès multiple OFDMA.

Dans le deuxième chapitre, nous allons nous intéresser à l'évolution des systèmes radio mobiles vers les technologies de cinquième génération 5G. Nous allons déterminer les indicateurs de performances de ce standard, ainsi qu'une étude de la nouvelle technique F- OFDM qui y est introduite. Les principales caractéristiques seront décrites.

Le troisième chapitre sera consacré aux résultats pratiques qui ont été obtenu par simulation. Les simulations concernent les aspects techniques des modulations OFDM et F- OFDM. Une comparaison est de ces dernières est alors proposée.

Le mémoire est clôturé une conclusion générale, où quelques perspectives seront proposées.

# **Chapitre 1**

## **Principes de L'OFDM**

## 1.1 Introduction

L'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) est une technique de modulation numérique qui joue sur l'efficacité et la rentabilité de transmission dans le canal radio mobile pour un environnement multi-trajet. Ce chapitre sera dédié pour l'étude de la technique OFDM qui trouve son application dans des standards comme ETSI hiperLANII et IEEE 802.11a/g de la famille WIFI (WirelessFidelity). Dans un premier temps, nous aborderons les origines et l'évolution de cette modulation multi-porteuse avec ses applications. Ensuite, nous présenterons ce procédé de modulation dans les détails en parlant de son principe, les caractéristiques du signal OFDM, de ses avantages et de ses inconvénients. A la fin du chapitre, nous abordons la technique d'accès OFDMA et son principe.

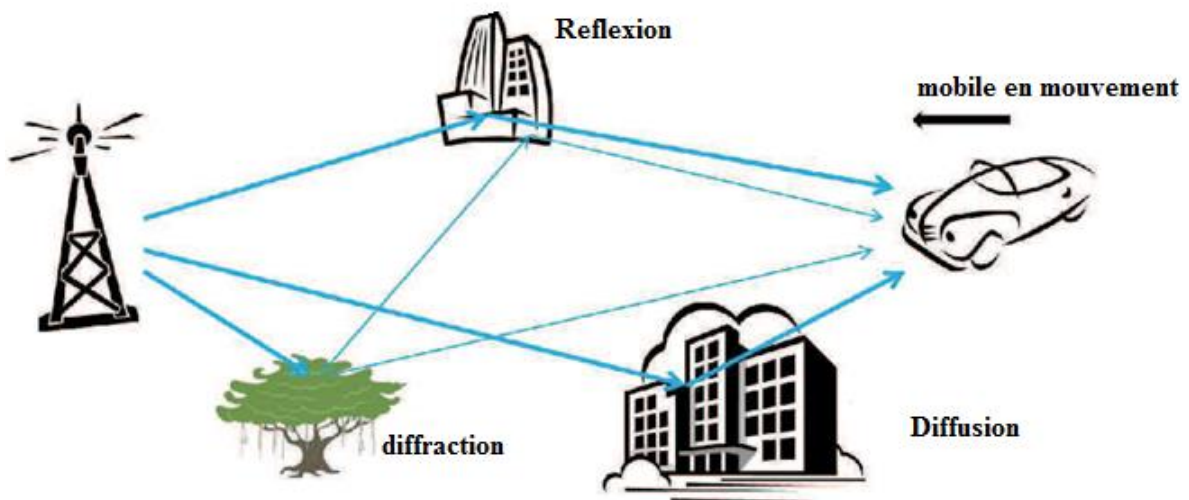
## 1.2 Historique

La modulation multi-porteuse a été introduite à la fin des années 1950, on voulait un système robuste qui pouvait remédier aux problèmes liés au multi-trajet. Quelques années plus tard elle a été améliorée avec l'apparition du concept des signaux orthogonaux à bandelimitée, concept que l'on appellera par la suite OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). La mise en œuvre de l'OFDM à l'époque consistait à utiliser des filtres de Nyquist. Du fait de la complexité de calcul, l'OFDM n'a pas tout de suite intéressé les industriels civils. Vingt ans plus tard, le schéma de modulation-démodulation a été simplifié avec l'utilisation de la Transformée de Fourier Discrète Inverse (TFDI) à l'émission et de la (TFD) au niveau du récepteur, ce qui rend facile son implémentation numérique. En 1991, l'ETSI retient l'OFDM comme modulation standard pour le DAB [1]. Durant cette dernière décennie l'OFDM est adoptée pour une large gamme d'applications, telles que DVB, DSL, Home Plug, Wi-Fi, WiMaX, ainsi que les applications de communication sans fil de 4<sup>ème</sup> génération, notamment LTE (Long Term Evolution).

## 1.3 Canal multi-trajets

Avant d'exposer le principe des modulations multi-porteuses OFDM, nous allons donner quelques caractéristiques du canal radio mobile pour lequel ce type de modulations est intéressant.

Dans un système de communication sans fil, les signaux de transmission interfèrent les uns avec les autres à cause de différents mécanismes. Le récepteur peut recevoir un signal sous plusieurs versions à travers des trajets multiples. On appelle ce phénomène l'effet multi-trajet. En effet, il existe cinq phénomènes principaux: la réflexion, la réfraction, la diffraction, la diffusion et le guidage d'onde qui ont un impact direct sur la propagation du signal. Les ondes émises lors de la communication radio subissent généralement une combinaison de ces divers phénomènes. Par conséquent, le signal reçu est une somme de tous les signaux arrivants au récepteur sur les différents trajets, et cette somme peut s'effectuer d'une manière constructive ou destructive. Les obstacles peuvent être considérés comme un avantage ou un inconvénient pour la transmission.



**Figure 1.1:** Schéma de principe de trajets multiples.

De façon générale, supposons le signal émis s'écrive :

$$S(t) = \text{Re}[S_1(t) \cdot e^{2j\pi f_k t}] \quad (1.1)$$

Tel que  $f_k$  est la fréquence de la porteuse.

$S_1(t)$  est un signal électrique émis.

Le signal reçu et la somme des signaux issus des différents chemins :

$$x(t) = \sum \alpha_n(t) s(t - \tau_n(t)) \quad (1.2)$$

Chaque chemin provoque une atténuation  $\alpha_n$  et un retard  $\tau_n$  qui varient en fonction du temps[2].



### 1.3.1 Caractéristique d'un canal à trajets multiples

L'évaluation des systèmes de transmission est faite selon deux caractéristiques : la qualité de la transmission et la complexité de calcul liée aux opérations de modulation/démodulation. Les grandeurs permettant de quantifier la qualité de la transmission sont :

- **Le taux d'erreur binaire (TEB)** : permet de mesurer la fréquence à laquelle les erreurs se produisent, il correspond au rapport entre le nombre de bits erronés et le nombre total des bits émis.
- **Erreur quadratique moyenne (EQM)** : détermine l'écart moyen de puissance entre les symboles émis et les symboles reçus.
- **L'efficacité spectrale** : mesure le débit binaire par unité de fréquence pour une transmission de  $q$  bits sur une durée  $T_s$  et une largeur de bande  $B$  allouée à la transmission. Le débit binaire étant donné par le rapport  $q/T_s$ , l'efficacité spectrale est exprimée donc par le rapport  $q/BT_s$ .
- **Le rapport signal sur bruit (RSB)** : est généralement adopté en transmission numérique comme paramètre d'entrée du récepteur pour lequel on va évaluer la qualité du message numérique restitué, il permet ainsi de qualifier la sensibilité du récepteur aux perturbations subies par le signal lors de sa propagation dans le canal. Le RSB est déterminé par le rapport  $E_b/N_0$  avec  $N_0$  la densité spectrale de puissance du bruit blanc à l'entrée du récepteur et  $E_b$  l'énergie moyenne par bit du signal modulé.
- **La bande de cohérence** : est une mesure statistique de la bande de fréquence dans laquelle le canal peut être considéré comme plat [3].

## 1.4 Notion d'orthogonalité

On définit l'orthogonalité de deux fonction  $f(t)$  et  $g(t)$  dans l'intervalle  $[a, b]$  par la relation suivante :

$$\int_a^b f(t) \cdot g(t) = 0 \quad (1.3)$$

Cela signifie que ces deux fonctions sont disjointes sur le segment  $[a, b]$ . Pour réaliser une base orthogonale à  $N$  dimensions, il suffit de trouver  $N$  fonctions orthogonales (deux à deux). Comme le montre la figure 1.2, un ensemble de  $N$  fenêtres rectangulaires régulièrement espacées d'un intervalle  $\Delta$  sur l'axe des temps constitue une base orthogonale

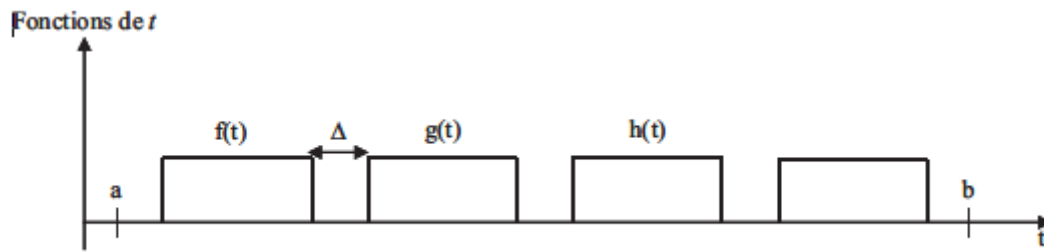


Figure 1.2 : Exemple d'une base orthogonale.

L'orthogonalité est la propriété fondamentale qui permet de transmettre des signaux d'informations multiples dans un même canal et de les détecter sans interférence.

### 1.4.1 L'orthogonalité temporelle

Envisagions tout d'abord des signaux continus, donc non encore échantillonnés. Dans ce cas, un signal OFDM est composé d'une somme de  $N$  sinusoides de fréquences respectives  $f_k$ , transmises durant une durée  $T_u$ ,  $k$  variant de 1 à  $N$ , et définie par  $f_k = \frac{k}{T_u}$ , cette condition permettant d'avoir un nombre entier de sinusoides sur chaque sous-porteuse durant  $T_u$ .

Chaque sous-porteuse  $s_k(t)$  réelle et non modulée peut se mettre sous la forme :

$$s_k(t) = \begin{cases} \sin(2\pi \frac{k}{T_u} t), & 0 < t < T_u \\ 0, & \text{ailleurs} \end{cases} \text{ Pour } k \in [1, N] \quad (1.4)$$

Deux sous-porteuse  $s_1(t)$  et  $s_2(t)$  de fréquences  $f_1$  et  $f_2$ , définies par l'équation (1.4), sont orthogonales sur l'intervalle  $[0, T_u]$ , puisqu'elles vérifient l'équation (1.3).

### 1.4.2 L'orthogonalité fréquentielle

On peut percevoir la notion d'orthogonalité du signal OFDM dans le domaine fréquentiel. Chaque sous-porteuse OFDM a une réponse en fréquence en sinus cardinal :

$$\text{Sinc}(f) = \frac{\sin(f)}{\pi f}.$$

La figure 1.3 montre que l'espace entre chaque sous-porteuse  $\frac{1}{T_u}$  permet, lorsque le spectre d'une sous-porteuse est maximal, d'annuler le spectre de toutes les autres : C'est la condition d'orthogonalité. Cette condition permet ainsi d'avoir une occupation spectrale idéale et d'éviter les interférences entre sous-porteuses si l'échantillonnage est fait précisément à la fréquence d'une sous-porteuse.

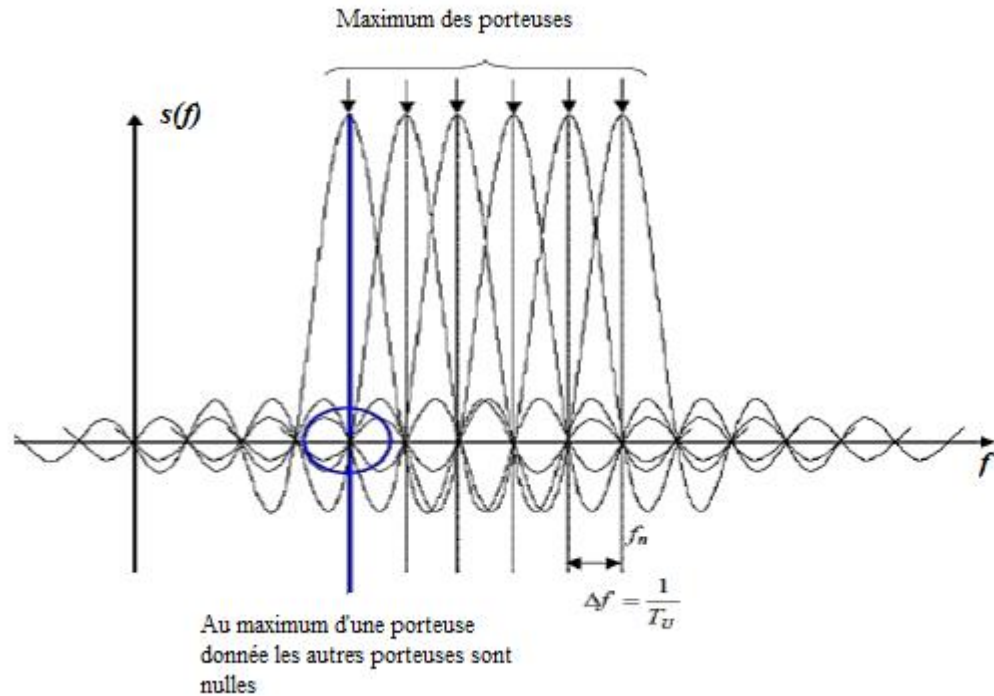


Figure : 1.3 : Principe d'orthogonalité des sous-porteuses en OFDM [3].

Tous les symboles  $C_k$  sont envoyés pendant la durée de symbole  $T_u$ , donc le spectre total est la somme des spectres individuelle comme indique la figure 1.4.

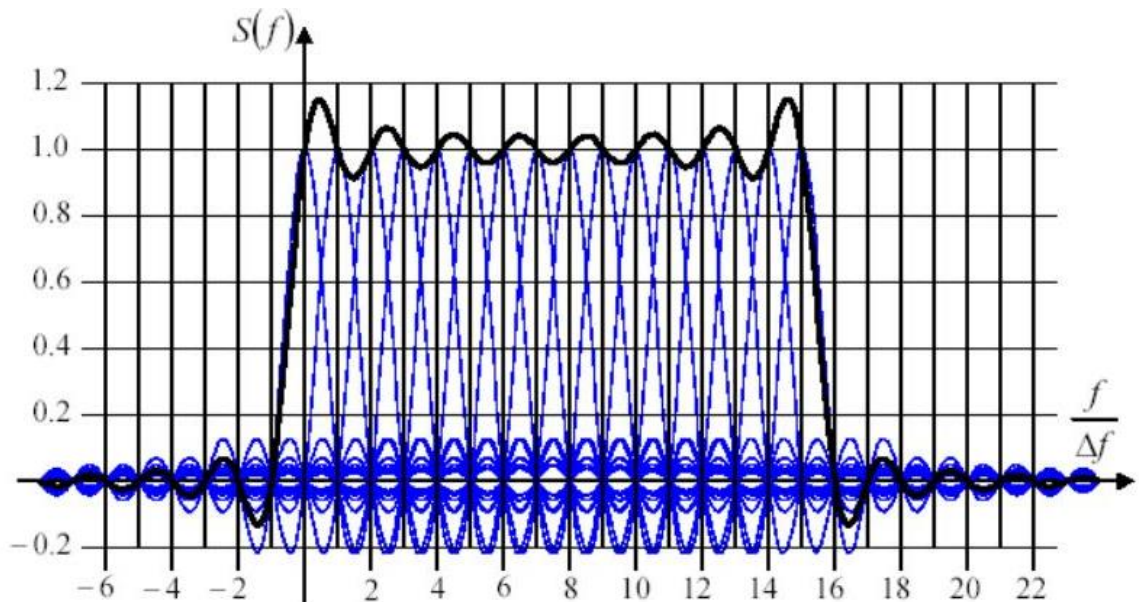


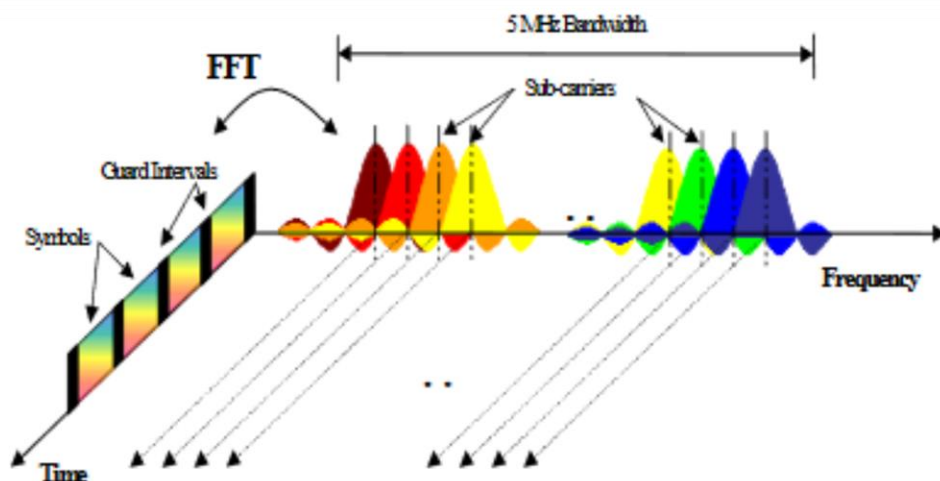
Figure 1.4 : Spectre du signal OFDM pour 16 sous-porteuses.

La figure 1.4 montre qu'alors, la bande de fréquences est occupée de façon optimum puisque le spectre est presque plat dans cette bande.

La bande occupée est à peu près  $B = \frac{k}{T_u}$  (en excluant les lobes secondaires de part et d'autre de la bande) [3].

## 1.5 Principe et fonctionnement de l'OFDM

La modulation OFDM est un type particulier de transmissions multi-porteuses dont l'originalité est de multiplexer l'information. Le principe de l'OFDM est de transmettre les informations sur plusieurs porteuses orthogonales entre elles, ainsi le spectre du signal présente une occupation optimale de la bande allouée. Comme le montre la figure 1.5 l'OFDM découpe le canal en cellule selon les axes du temps et des fréquences. A chaque cellule fréquence/temps est attribuée une porteuse dédiée. L'information à transmettre est répartie sur l'ensemble de ces porteuses, modulée chacune à faible débit par une modulation du type QPSK ou QAM. Un symbole OFDM comprend l'ensemble des informations contenues dans l'ensemble des porteuses à un instant  $t$  [4].



**Figure 1.5 :** Répartition fréquentielle et temporelle d'un signal OFDM.

L'OFDM se caractérise par une simple implémentation au niveau de la transmission et la réception, ceci grâce à l'utilisation de la TFD (transformée de Fourier discrète) : la TFDI (transformée inverse) à l'émission et la TFDD (transformée directe) à la réception. Pour implémenter efficacement la TFD, un algorithme moins complexe et plus simple est utilisé. On parle des algorithmes de transformée rapide FFT.

### 1.5.1 Modulation OFDM

Comme nous venons de le voir, le signal OFDM se compose de  $N$  sous-porteuses de fréquence  $f_k$ , avec  $k \in [0, \dots, N - 1]$  utilisées pour la transmission en parallèle de  $N$  symboles, Ces symboles notés  $c_k$ . L'expression du signal OFDM en bande de base généré durant l'intervalle  $[0, T_u]$  est donnée par :

$$S(t) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{i2\pi f_k t} \quad (1.5)$$

Les données numériques  $c_k$  sont des nombres complexes définis à partir d'éléments binaires par une constellation de modulation d'amplitude en quadrature QAM à plusieurs états (4, 16, 64, de façon générale à  $2^q$  états). Ces données sont des symboles  $q$ -aires formés par groupement de  $q$  bits. On les appelle symboles numériques.

Le multiplexage est orthogonal si l'espace entre les fréquences est  $1/T_u$  alors :

$$f_k = f_0 + \frac{k}{T_u} \quad (1.6)$$

Et l'expression (1.5) peut s'écrire :

$$S(t) = e^{i2\pi f_0 t} \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{i2\pi \frac{kt}{T_u}} \quad (1.7)$$

L'équation (1.7) représente la transformée de Fourier inverse des symboles  $c_k$  déduis de la constellation QPSK ou QAM, donc il suffit d'appliquer l'algorithme de la IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) sur ces symboles  $c_k$  pour réaliser la modulation OFDM. Voici le schéma de principe de la modulation OFDM

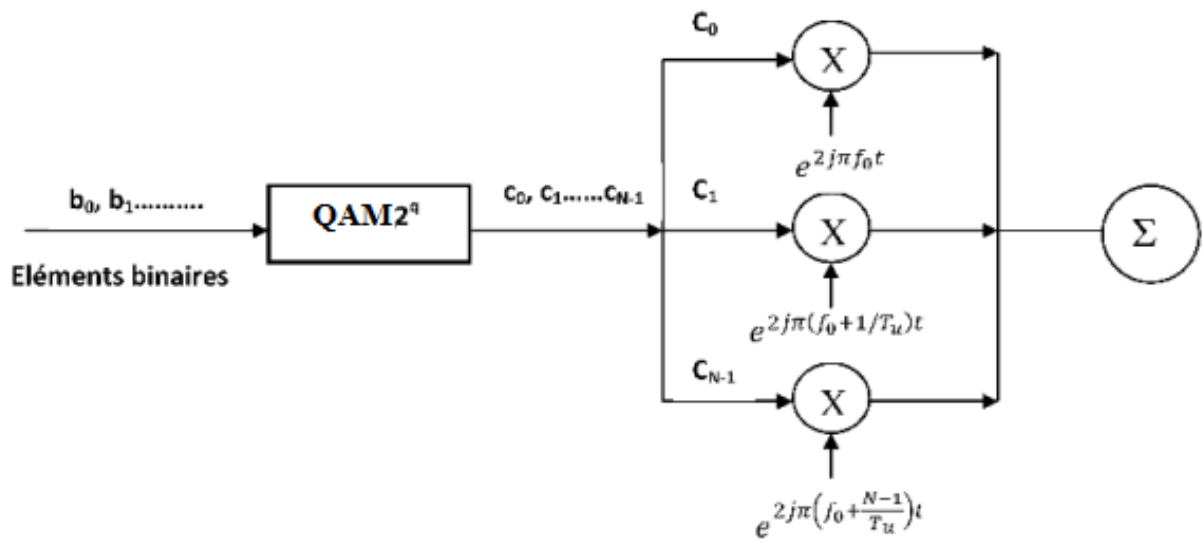


Figure 1.6 : Schéma de principe d'un modulateur OFDM.

Les spectres des différentes porteuses sont présentés sur la figure 1.7. Le spectre d'un signal OFDM est la somme de tous ces spectres.

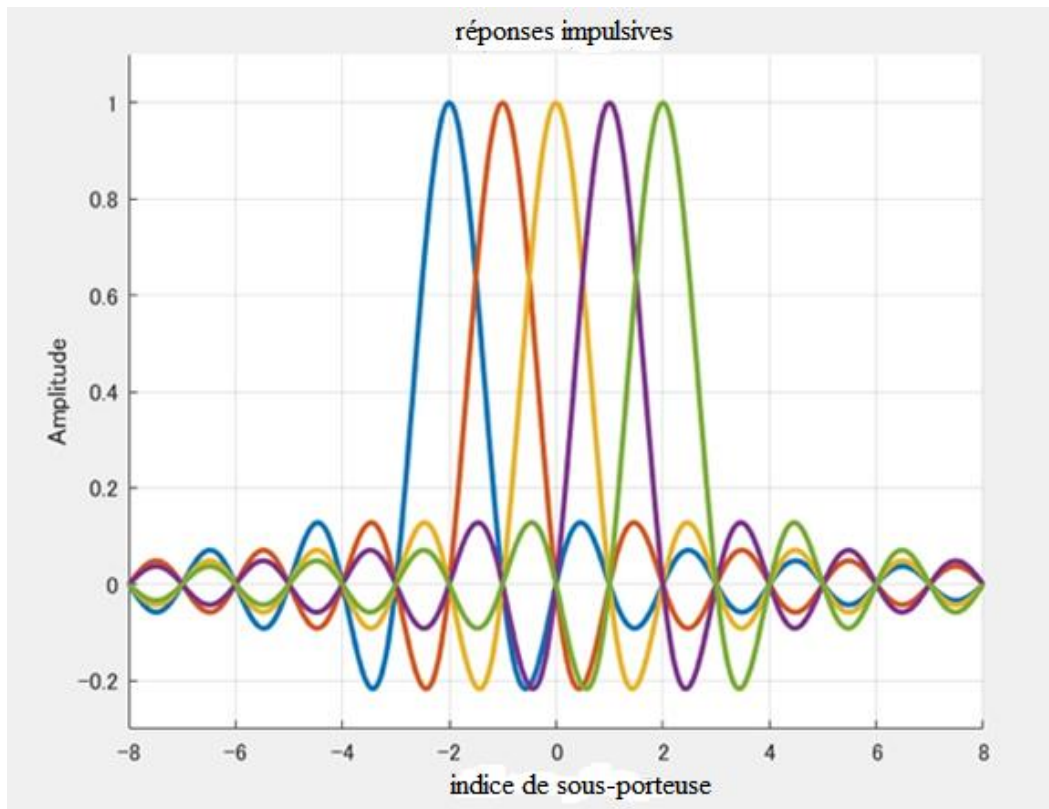


Figure 1.7 : Spectre du signal en sortie du modulateur OFDM

1.5.2 Démodulation

Le signal parvenant au récepteur s'écrit, sur une durée symbole  $T_u$  :

$$y(t) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k H_k(t) e^{2j\pi(f_0 + \frac{k}{T_u})t} \quad (1.8)$$

$H_k(t)$  est la réponse impulsionnelle du canal au niveau de la sous-porteuse. La démodulation classique consisterait à démoduler les  $N$  sous-porteuses suivant le schéma classique :

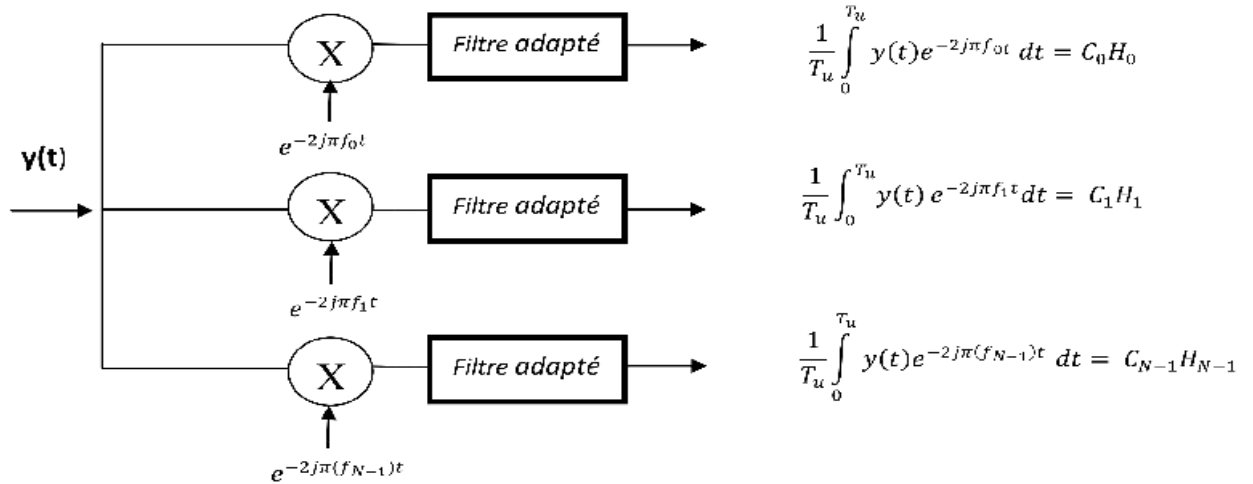


Figure 1.8 : Schéma du principe d'un démodulateur OFDM.

En pratique, comme pour le modulateur, le démodulateur est basé sur la transformée de Fourier directe (FFT) comme une opération inverse [5].

La condition d'orthogonalité nous montre que :

$$\frac{1}{T_u} \int_0^{T_u} y(t) e^{-2j\pi f_i t} dt = \frac{1}{T_u} \sum_{k=0}^{N-1} \int_0^{T_u} C_k H_k e^{2j\pi(k-i)\frac{1}{T_u} t} dt = C_i H_i \quad (1.9)$$

Par ce que :

$$\frac{1}{T_u} \int_0^{T_u} e^{2j\pi(k-1)\frac{t}{T_u}} dt = 0 \text{ si } k \neq i \quad (1.10)$$

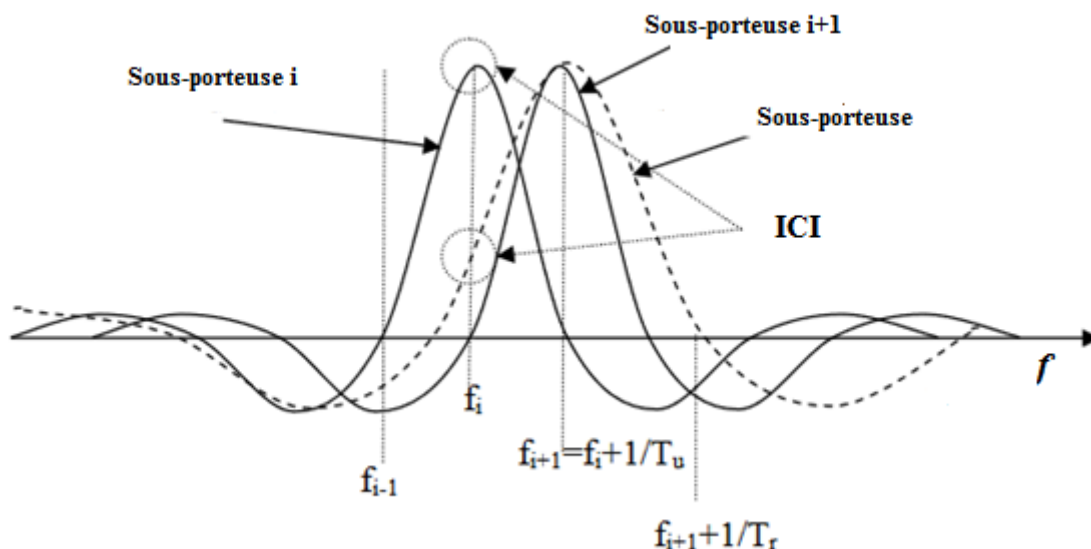
## 1.6 Problème des interférences

### 1.6.1 Interférence entre symboles (ISI)

Les signaux OFDM sont transmis à des intervalles égaux, et ils doivent parcourir un certain trajet pour atteindre le récepteur. Dans le cas d'un canal multi-trajets, un symbole transmis prend différents retards pour arriver au récepteur à cause des différents chemins de propagation, ce qui cause des étalements temporels différents. La prolongation de la durée des symboles fait chevaucher les symboles entre eux, ce qui donne naissance à l'interférence entre symboles (IES) [6].

### 1.6.2 Interférence entre sous porteuses (ICI)

L'orthogonalité dans un système OFDM signifie qu'au maximum de chaque spectre d'une sous porteuse, tous les spectres des autres sous porteuses s'annulent, ainsi les spectres des sous-porteuses se recouvrent mais demeurent orthogonaux entre eux. L'interférence entre porteuse (IEP) est causée par une perte d'orthogonalité fréquentielle suite à un décalage fréquentiel ce qui se traduit par la présence des symboles de données des sous-porteuses adjacentes dans la sous-porteuse actuelle [6].

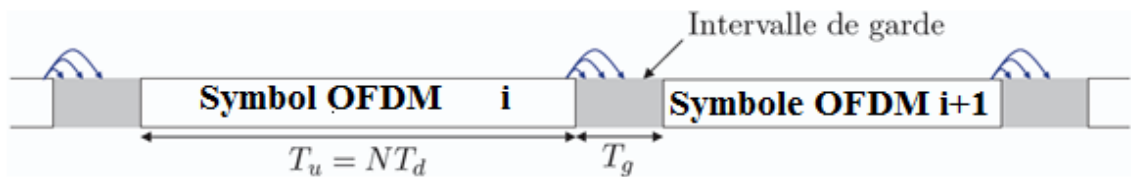


**Figure 1.9 :** Interférence inter-porteuse (ICI) en OFDM dans le domaine fréquentiel.



### 1.7 Intervalle de garde

Les symboles subissent des échos et un symbole émis parvient au récepteur sous forme de plusieurs symboles atténués et retardés. Un symbole émis lors d'une période  $iT_s$  peut se superposer à un écho provenant du symbole émis à la période  $(i-1)T_u$ , il se produit alors des interférences entre les symboles. Pour éviter ces interférences, on ajoute un intervalle de garde d'une durée  $T_g$ . Chaque symbole est précédé par une extension périodique du signal lui-même, la durée du symbole totale transmis est alors  $T_s = T_u + T_g$ , afin que les interférences soient éliminées



**Figure 1.10 :** Illustration de l'effet de l'intervalle de garde précédent chaque symbole OFDM.

Avec :

$T_u$ : La durée de la partie utile de chaque symbole OFDM.

$1/T_d$ : le débit de la modulation mono-porteuse initiale.

$T_g$  : La durée de l'intervalle de garde.

$T_s = T_g + T_u$ : la durée de chaque symbole

### 1.8 Préfixe cyclique

Est une technique qui consiste à insérer une copie d'un bloc d'information à transmettre en amont de ce bloc. Plus clairement, il s'agit de récupérer une partie des informations à transmettre et d'insérer ces informations en début du bloc, on appelle ce mécanisme Préfixe Cyclique (CP-OFDM).

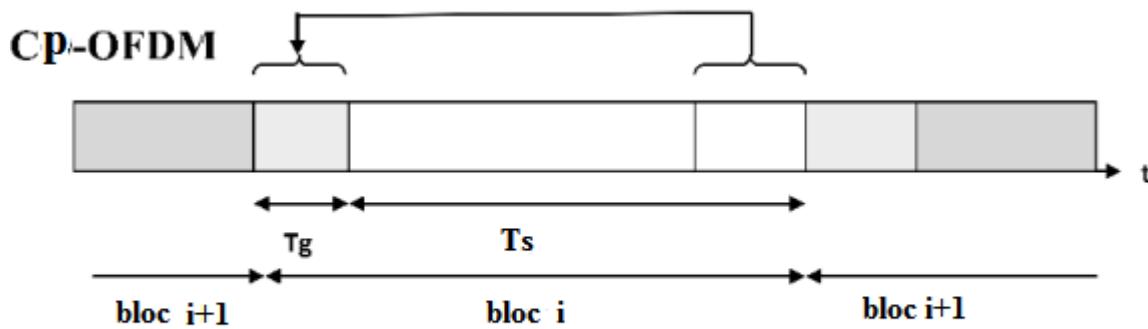


Figure 1.11 : Préfixe cyclique.

Ainsi, le préfixe cyclique permet d'éviter les interférences causées par les effets des trajets multiples et maintenir l'orthogonalité temporelle entre les symboles.

## 1.9 Avantages et inconvénients de l'OFDM

### 1.9.1 Avantages

Un des grands avantages des schémas de transmission OFDM est d'avoir partagé la complexité de l'égalisation entre l'émetteur et le récepteur, contrairement aux schémas de transmissions mono-porteuses. Ceci permet d'avoir des récepteurs simples et peu coûteux. Les avantages des différentes variantes de l'OFDM sont nombreux :

- Une utilisation efficace des ressources fréquentielles en comparaison avec les solutions classiques de multiplexage fréquentiel. Ceci est dû au fait que dans l'OFDM, les canaux se chevauchent tout en gardant une orthogonalité parfaite.
- Une égalisation numérique et un décodage simple et optimal grâce à l'utilisation de l'intervalle de garde (au prix d'une diminution du débit).
- Les techniques multi-porteuses sont robustes au bruit impulsif puisque chaque porteuse est affectée d'un bruit indépendant des autres porteuses.
- Les techniques OFDM ont également une très grande flexibilité dans l'allocation de bit/débit dans des contextes multiutilisateurs.

### **1.9.2 Inconvénients**

Les principaux inconvénients sont les suivants :

- L'intervalle de garde induit une perte d'efficacité spectrale.
- L'OFDM est très délicate aux problèmes de synchronisation. Les erreurs de synchronisation induisent un déphasage sur les symboles reçus.
- La performance de l'OFDM est beaucoup moins satisfaisante dans un scénario de communication à grande mobilité, ou l'effet doppler joue un rôle important.
- Plus les perturbations s'amplifient, plus la technologie perd de son intérêt car il faut alors mettre en place des méthodes de filtrages ou de codages qui réduisent grandement les débits.
- L'OFDM est également très vulnérable aux problèmes de décalage en fréquence (Frequency offset) et de synchronisation.

### **1.10 Les systèmes utilisant OFDM**

- DAB : DAB - OFDM constitue la base pour la diffusion audio numérique (DAB) standard dans le marché européen. Diffusion audio numérique (DAB) à l'aide de l'OFDM a été normalisée en Europe et constitue la prochaine étape de l'évolution au-delà de la radiodiffusion FM offrant transmission sans interférence.
- HDTV.
- Les réseaux LAN sans fil.
- IEEE 802.11g.
- IEEE 802.16 Système d'accès sans fil à large bande.
- Système de transmission ATM sans fil.
- IEEE 802.11a.
- ADSL : Asymétrique Digital subscriber line.
- PLC : Power line communication.

### **1.11 Techniques d'accès multiple**

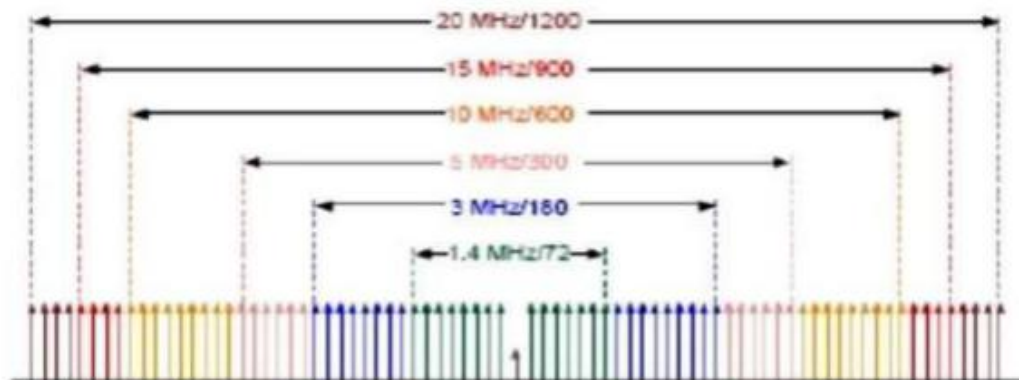
Les techniques d'accès multiple permettent aux utilisateurs de partager le médium de transmission. Chaque utilisateur reçoit une fraction des ressources disponibles. Lorsque l'on

considère des systèmes multi-porteuses, les principales techniques à accès multiple sont l'OFDM-TDMA, l'OFDMA et le MC-CDMA. L'OFDM-TDMA est une technique hybride entre l'OFDM et le TDMA (Time Division Multiple Access). L'OFDMA est une technique hybride entre l'OFDM, le TDMA et le FDMA (Frequency Division Multiple Access). Dans un même symbole OFDM, plusieurs utilisateurs reçoivent des parties distinctes de la bande fréquentielle. Le MC-CDMA signifie Multi Carrier Code Division Multiple Access. Les bits sont étalés grâce à un code pour obtenir des chips. Les chips sont envoyées grâce à la modulation OFDM appliquée sur toutes les sous porteuses.

Dans la suite de notre travail nous allons nous intéresser à l'OFDMA.

### 1.11.1 OFDMA (OFD-Multiple Access)

OFDMA est une extension de la technique de modulation OFDM pour permettre à plusieurs utilisateurs de transmettre simultanément sur un seul symbole OFDM. Cette technique d'accès est largement demandée dans les réseaux sans fils à large bande car elle résout le problème de sélectivité en fréquence du canal, en le découpant en sous canaux de largeur inférieure à la bande de cohérence. Ainsi, l'information est transmise via plusieurs sous porteuses orthogonales. Ces sous-porteuses sont générées grâce à l'IFFT, et leur nombre total qui dépend de la bande spectrale voir la figure 1.12 [7].



**Figure 1.12 :** Nombre de sous-porteuses pour différentes bandes spectrales.

L'espacement entre sous-porteuses en LTE est fixé à 15 KHz, et le symbole OFDM est celui constitué de la totalité des symboles d'informations transmis via les sous porteuses (voir la figure 1.13).

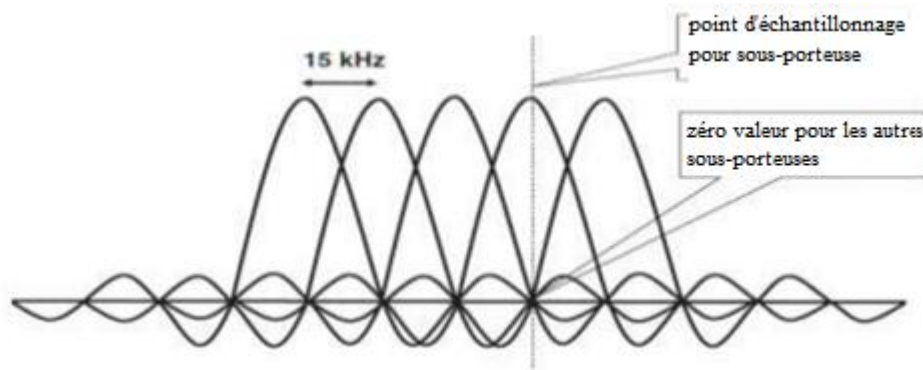


Figure 1.13 : Espacement entre sous porteuse

### 1.11.1.1 Principe

OFDMA est une technique qui dérive de l'OFDM en utilisant le même principe de division de la bande passante en plusieurs sous- porteuses.

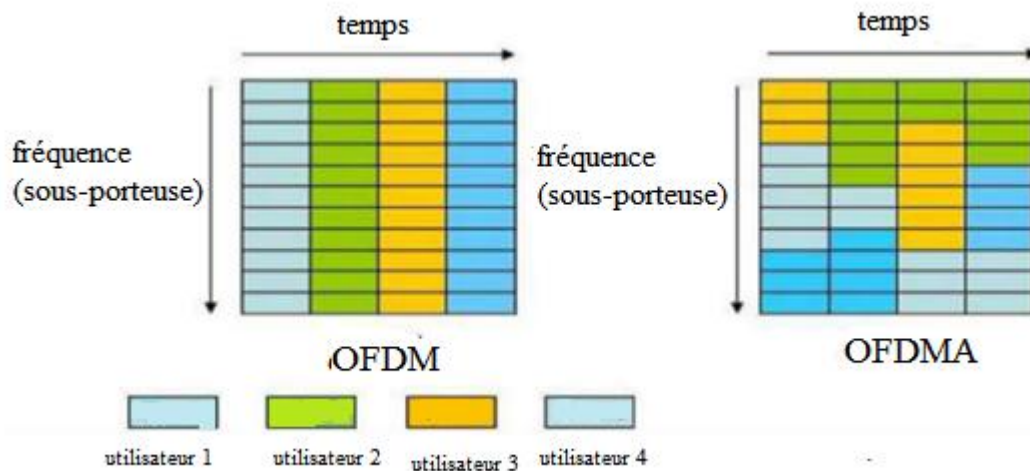
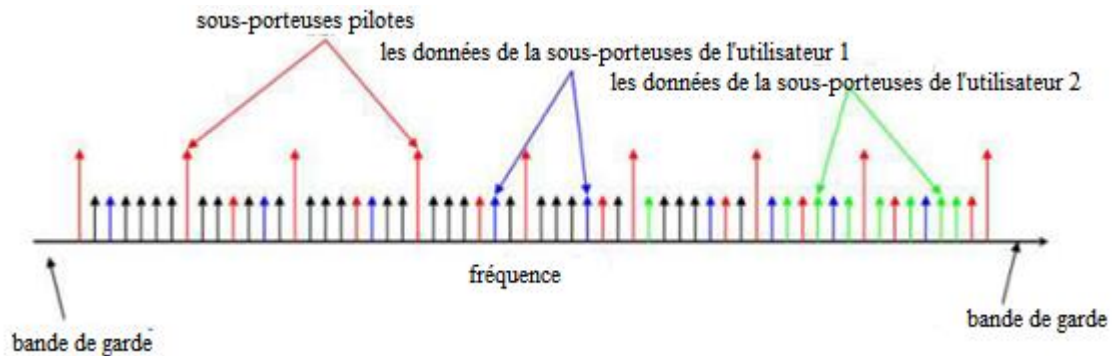


Figure 1.14 : Différence entre OFDM et OFDMA.

La différence entre l'OFDM et l'OFDMA est que la première servira un usager dans un intervalle de temps, par contre OFDMA, elle peut servir plusieurs usagers dans un même intervalle de temps, comme montré dans la figure 1.14. Le principe de l'OFDMA est de répartir sur un grand nombre de sous-porteuses le signal numérique que l'on veut transmettre ce qui permet, pour un même débit global d'avoir sur chaque canal un débit plus faible et donc un temps d'émission de chaque symbole plus long cela limite les problèmes d'interférences inter-symboles et de fading liés aux trajets multiples de propagation qui existent dans les liaisons radios de moyenne et longue portée. OFDMA fournit une facilité et extensibilité de la bande passante par la configuration du nombre de sous-porteuses. Ceci permet à la station de base d'ajuster dynamiquement l'utilisation de la bande passante en fonction des exigences du

système. La figure 1.15 décrit l'utilisation des sous porteuses : celles en noir, en vert et en bleu (les plus nombreuses) transportent les données des utilisateurs, celles en rouge, les informations de synchronisation et de signalisation entre les deux extrémités de la liaison radio [7].



**Figure 1.15 :** Les porteuses de l'OFDMA.

Un filtrage pour séparer chaque sous-porteuse n'est pas nécessaire pour le décodage dans le terminal récepteur, une FFT est suffisante pour séparer les sous-porteuses l'une de l'autre (dans le cas du LTE, il y a jusqu'à 1200 porteuses indépendantes).

## 1.12 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de présenter la modulation multi-porteuse OFDM et son évolution. Nous avons commencé par une description du canal multi-trajet et ses caractéristiques, suivies par une explication de la notion d'orthogonalité qui permet d'améliorer l'efficacité spectrale. Nous avons par la suite présenté le principe de base de l'OFDM du côté de l'émission (modulation) et du côté de la réception (démodulation). Ensuite nous avons vu l'utilisation du préfixe cyclique et l'insertion de l'intervalle de garde et leurs efficacités pour combattre les interférences inter-symbole. Nous avons aussi présenté la technique d'accès OFDMA.

Dans le prochain chapitre, nous allons considérer la technique F-OFDM, une version filtrée de OFDM et qui prometteuse avec son utilisation dans les réseaux 5G.

## **Chapitre 2**

# **F-OFDM pour les réseaux 5G**

## 2.1 Introduction

D'après ce que nous avons vu lors du premier chapitre, la technique OFDM a plusieurs avantages qui ont permis son succès et sa réputation dans le standard 4G. Néanmoins, elle présente quelques inconvénients majeurs comme l'insertion de l'intervalle de garde, un niveau très élevé de lobes latéraux entraînant une fuite de puissance entre les différentes sous-porteuses. La technique OFDM va alors être moins utilisée au profit des techniques multi-porteuses alternatives adaptées au standard 5G. Le nouveau schéma de modulation doit principalement atteindre une efficacité spectrale plus élevée que son prédécesseur, le principal candidat du 3GPP est une nouvelle version de OFDM appelée F-OFDM (filtered OFDM). Dans ce chapitre nous allons donner une brève définition de la cinquième génération 5G et nous allons déterminer les indicateurs de performances de ce standard ainsi qu'une étude de la nouvelle technique F-OFDM.

## 2.2 La 5ème génération

La 5G est la dernière génération de communications mobiles cellulaires. Elle succédera à la 4G, qui est toujours en cours de déploiement. Les performances 5G visent un débit binaire élevé (2 ordres de grandeur de la 4G), un temps de latence plus faible, des économies d'énergie, une réduction des coûts, une capacité système accrue et une connectivité massive des périphériques. La technologie 5G offre certaines capacités de spectre uniques, dont la possibilité d'utiliser des bandes autorisées et non autorisées et de partager un spectre, permettant ainsi d'améliorer l'utilisation des bandes à haute fréquence (plus de 24 GHz), des bandes intermédiaires (1 à 6GHz), et des sous-bandes ou bandes à faible fréquence.

## 2.3 Applications de la 5g

La nouvelle architecture 5G rendra possible un certain nombre de nouvelles applications. On pourra bénéficier de vidéos en ligne avec une bonne qualité de réception, même dans des zones à forte densité d'utilisateurs comme durant un événement sportif important où chaque spectateur utilise un dispositif connecté. Un haut niveau de service (accès à haut débit d'une moyenne de 50 *Mbps* minimum) est garanti sur tout site géographique (y compris en milieu rural) tant sur des équipements fixes que mobiles et y compris au cours de déplacements rapides comme dans les trains à grande vitesse. L'Internet des objets (IoT) connectera des milliards



d'appareils et de capteurs. Le temps de latence (délai) des données dans les réseaux 5G ne sera que d'une milliseconde (ms), comparé aux 10 à 20 ms pour les systèmes actuels. Ceci est important parce qu'une latence minimisée rendra possible des communications quasiment en temps réel, comme par exemple entre deux véhicules sans pilote qui se déplacent en tandem à des vitesses relativement élevées ou pour une réalité virtuelle appliquée. Les drones navigueront en 5G, notamment dans les cas où les autorités devront faire face à une catastrophe naturelle. La 5G promet des communications suffisamment fiables pour être utilisées dans le domaine de la santé, y compris pour relier à distance des médecins à des robots chirurgicaux, afin d'aider des patients en urgence. Le nombre d'applications potentielles est absolument incroyable, et tout cela est rendu possible grâce à la très grande vitesse des « longueurs d'ondes millimétriques » (mm Waves) et leur temps de réponse.

Les nouveaux services prévus en 5G et leurs exigences associées peuvent être résumées comme suit :

- URLLC (communications ultra fiables à faible latence): nécessite une faible latence et une fiabilité élevée.
- eMBB (Enhanced Mobile Broadband): nécessite une faible latence, une efficacité spectrale élevée et un débit de données élevé,
- mMTC (communication massive de type de machine): nécessite faible consommation d'énergie, faible complexité de l'appareil et amélioration du budget de liaison[8].

## 2.4 Indicateurs de performance

Huit indicateurs de performance (KPI – Key Performance Indicators) ont été établis par l'UIT pour préciser, quantifier et mesurer les caractéristiques de systèmes IMT-2020 (5G) [9] :

- Débit crête par utilisateur (Gbit/s)
- Débit moyen perçu par l'utilisateur (Mbit/s)
- Efficacité spectrale (bit/Hz)
- Vitesse maximale des terminaux (km/h)
- Latence (ms)
- Nombre d'objets connectés sur une zone (quantité d'objets/km<sup>2</sup>)
- Efficacité énergétique du réseau
- Débit sur une zone (Mbit/s/m<sup>2</sup>)

En addition à ces huit classes, 5 nouveaux indicateurs ont été définis et sont en cours d'étude : fiabilité, temps d'interruption de la mobilité, largeur de bande, efficacité spectrale maximale, 5ème percentile d'efficacité spectrale [9].

Le tableau 2.1 ainsi que la figure 2.1 représentent une comparaison des variations des KPI entre la 4G et la 5G.

Performance / Génération	4G	5G
Débit maximal (Gbit/s)	1	20
Débit aperçu par l'utilisateur (Mbit/s)	10	100
Efficacité spectrale	1 ×	3 ×
Vitesse(Km/h)	350	500
Latence(ms)	10	1
Nombre d'objet connectés sur une zone (quantité d'objets/Km <sup>2</sup> )	10 <sup>5</sup>	10 <sup>6</sup>
Efficacité énergétique du réseau	1 ×	100 ×
Débit sur une zone (Mbit/s/m <sup>2</sup> )	0.1	10

Tableaux 2.1 : Comparaisons entre 4G et 5G au niveau des huit indicateurs De Performance.

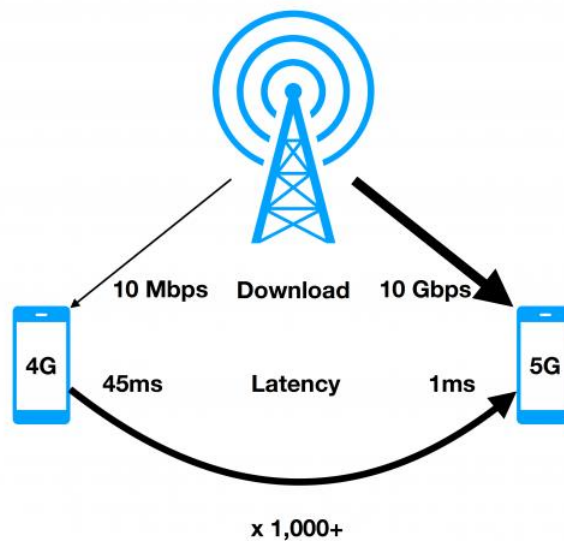


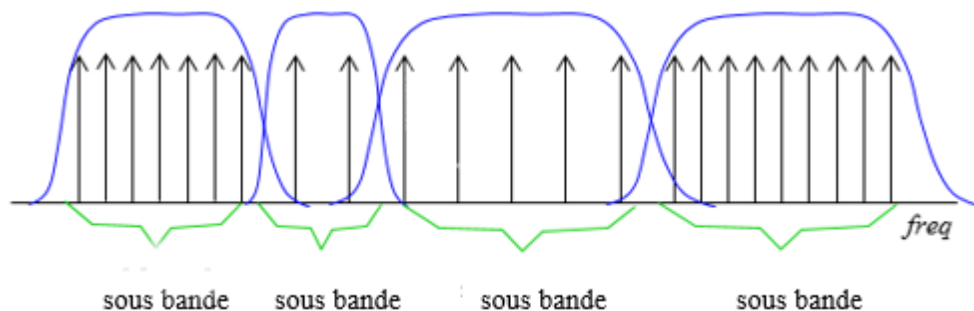
Figure 2.1: Comparaison entre 4G et 5G.

## 2.5 Modulation

La 4G utilise la modulation d'amplitude en quadrature (**QAM**). Cette modulation peut atteindre **QAM-64**, c'est-à-dire qu'à chaque instant, 6 bits d'information sont transmis. Grâce à l'amélioration du bilan de liaison de la 5G, via des technologies antennaires ou de traitement de signal, la modulation atteindra l'ordre **QAM-256** (8 bits d'informations), ces modulations offrent une excellente efficacité spectrale et ont permis de réaliser des débits de données très élevés.

## 2.6 F-OFDM

La vraie signification de F-OFDM peut être illustrée ci-dessous. Comme nous pouvons le voir dans la Figure 2.2, dans F-OFDM, une bande de fréquences peut être divisée en plusieurs sous-bandes. Chaque sous-bande peut avoir une bande passante différente. Il convient également de noter que chaque sous-bande est composée de plusieurs sous-porteuses et que l'espacement des fréquences entre les sous-porteuses peut différer d'un pays à l'autre. En combinant ces flexibilités de sous-bande et de sous-porteuse, nous pouvons créer une structure très flexible de sous-trame pouvant transporter les différents types de données de service dans la même sous-trame.



**Figure 2.2 :** Conception du filtre sous bande

## 2.7 Caractéristiques générales de F-OFDM

En 5G, des largeurs de bandes beaucoup plus élevées, comprises entre 100 MHz et 200 MHz, devraient être utilisées. Pour de telles largeurs de bande, F-OFDM est un bon candidat pour la forme d'onde, qui exploite efficacement la bande passante disponible en la divisant en

plusieurs sous-bandes et en utilisant l'OFDM avec différents paramètres de forme d'onde en fonction des besoins des services à fournir. Contrairement à OFDM, F-OFDM dispose de la flexibilité en termes de temps et de fréquence pour prendre en charge différents types de services dans la même bande passante donnée. La figure 2.3 illustre la flexibilité temporelle et fréquentielle du système F-OFDM pour une largeur de bande donnée. Par exemple, dans le cas de la technologie IoT (internet of thing), un système de modulation à porteuse unique avec un intervalle de temps de transmission (TTI) peut être utilisé à la place d'un système OFDM classique [10].

D'autre part, dans un environnement de communication véhicule à véhicule (V2V), qui nécessite beaucoup moins de latence, un schéma OFDM de base avec un très grand espacement des sous-porteuses peut être utilisé, de sorte qu'une TTI soit beaucoup plus courte pour être fournie [11]. Par conséquent, avec le système F-OFDM, différents types de modulations avec différentes numérogies peuvent être intégrées en fonction des besoins des services et des types de canaux sans fil disponibles [12].

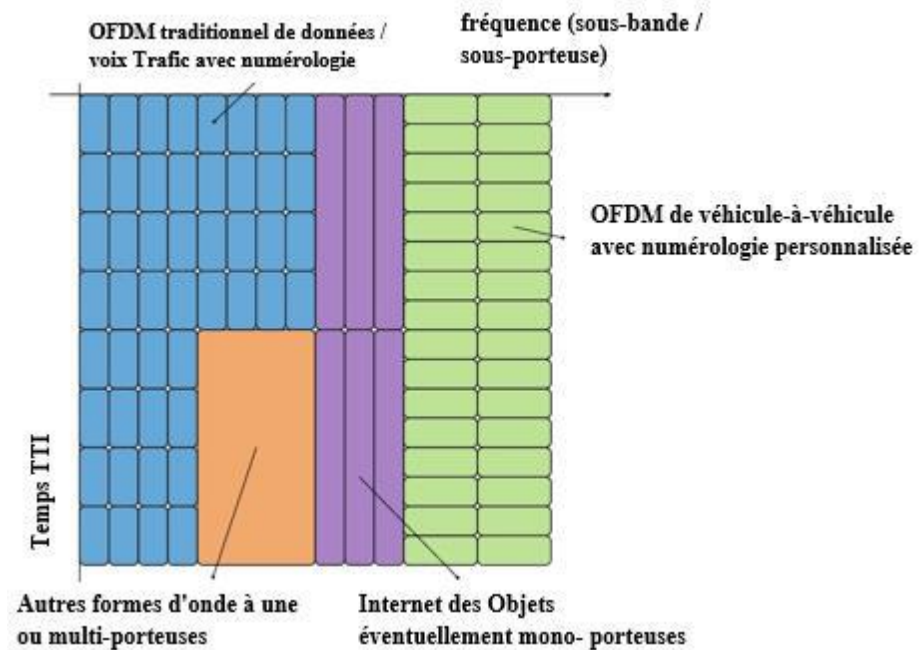


Figure 2.3 : Flexibilité et coexistence des formes d'onde permises par F-OFDM [12].

F-OFDM est un système modifié d'OFDM utilisant le filtrage par sous-bande. Le filtrage a été généralement utilisé dans les systèmes OFDM pour améliorer la localisation du spectre.

À l'exception de l'OFDM et du F-OFDM, les candidats de la forme d'onde 5G les plus discutés comprennent : Multiplexage généralisé par division de fréquence (GFDM), Les modulations multiporteuses à base de bancs de filtre (FBMC), et Support universel filtré multi(UFMC). Les motivations de ces formes d'ondes sont similaires à F-OFDM, c'est-à-dire

pour réduire les émissions hors bande(OOBE) ou assouplir l'exigence de synchronisation. Les filtres sont appliqués par toutes ces formes d'onde, mais avec une méthodologie et des performances différentes. Une comparaison entre F-OFDM et ces candidats de forme d'onde 5G est donnée comme suit :

- F-OFDM vs FBMC : à la recherche de la localisation en temps et en fréquence, la longueur du filtre dans FBMC est généralement très longue (par exemple, plus de 3 fois la durée du symbole) et consomme donc beaucoup de ressources, par rapport aux filtres dans F-OFDM. De plus, la transmission par antenne massive a été reconnue comme la pierre angulaire de la 5G. Par conséquent, la difficulté de combiner FBMC avec une transmission multi-antennes a limité ses applications. Au contraire, le F-OFDM peut être combiné avec une transmission multi-antennes sans aucun traitement spécial [12].
- F-OFDM vs UFMC : Pour éviter l'ISI entre symboles OFDM consécutifs, la longueur du filtre de l'UFMC est généralement limitée par la longueur de CP utilisée dans OFDM, avec laquelle l'OOBE rapproché pourrait être insatisfaisant. En revanche, en utilisant une longueur de filtre jusqu'à une demi-durée de symbole, F-OFDM donne intentionnellement l'orthogonalité entre les symboles OFDM consécutifs. Avec des filtres correctement conçus (par exemple, avec une diffusion d'énergie limitée), la dégradation des performances résultant de l'augmentation de la longueur du filtre est presque négligeable, par rapport aux économies sur la consommation de bande de garde [12].
- F-OFDM vs GFDM : Les sous-porteuses de GFDM sont disposées à proximité et ne sont pas mutuellement orthogonales, pour supprimer les interférences inter-sous-porteuses. En outre, une pré-annulation ou une annulation d'interférence successive est également nécessaire pour atténuer l'interférence inter-sous-porteuse qui existe toujours après le filtrage. A l'opposé, les sous-porteuses dans chaque sous-bande de F-OFDM sont encore quasi-orthogonales, la longueur de filtre de f-OFDM est comparativement courte [12].

En générale F-OFDM apparait comme la plus prometteuse forme d'onde candidat pour la 5G, offrant non seulement les avantages de l'OFDM :

- Multiplexage de fréquence flexible

- Simple égalisation des canaux
- Combinaison facile avec transmission multi-antenne

Mais aussi de nombreux nouveaux avantages :

- Des services sur mesure à différents besoins
- Utilisation efficace de spectre
- Complexité de calcul abordable
- Possibilité pour incorporer d'autres formes d'onde
- Faible OOB

## 2.8 Structure de l'émetteur-récepteur F-OFDM

Fondamentalement, un signal F-OFDM est obtenu à partir de plusieurs signaux OFDM par une méthode de filtrage appropriée. Les structures tant émettrices que réceptrices sont décrites aux figures 2.4 et 2.5, respectivement.

Comme l'indique la figure 2.4 de l'émetteur F-OFDM, une largeur de bande disponible donnée est divisée en plusieurs sous-bandes et chaque sous-bande passe par le schéma OFDM avec des paramètres identiques ou différents.

Un signal F-OFDM dans la  $g^{\text{ème}}$  sous-bande,  $x_g(k)$  est obtenu en filtrant le signal CP-OFDM résultant [13],  $x(k)$ , avec un filtre approprié,  $f(k)$ .  $x_g(t)$  peut être exprimé comme suit [14] :

$$x_g(k) = x(k) * f(k) \quad (2.1)$$

Tel que  $f(k)$  est centré en fréquence aux sous-porteuses attribuées, sa bande passante est égale à la largeur de fréquence totale des sous-porteuses, sa durée temporelle est une partie d'une durée du symbole OFDM [13].

Du fait que l'ajout de CP dans le signal OFDM transforme la convolution linéaire en convolution circulaire, le processus de convolution dans le domaine temporel peut prendre la méthode alternative dans le domaine fréquentiel multiplication en sens inverse. Par conséquent, le processus de filtrage dans le domaine fréquentiel peut s'écrire comme une simple multiplication de la transformée de Fourier de  $X(n)$  et  $F(n)$  [14] :

$$X_g(e^{j2\pi f}) = \mathbf{X}(e^{j2\pi f}) \cdot (e^{j2\pi f}) \quad (2.2)$$

Où “.” représente la multiplication élément par élément

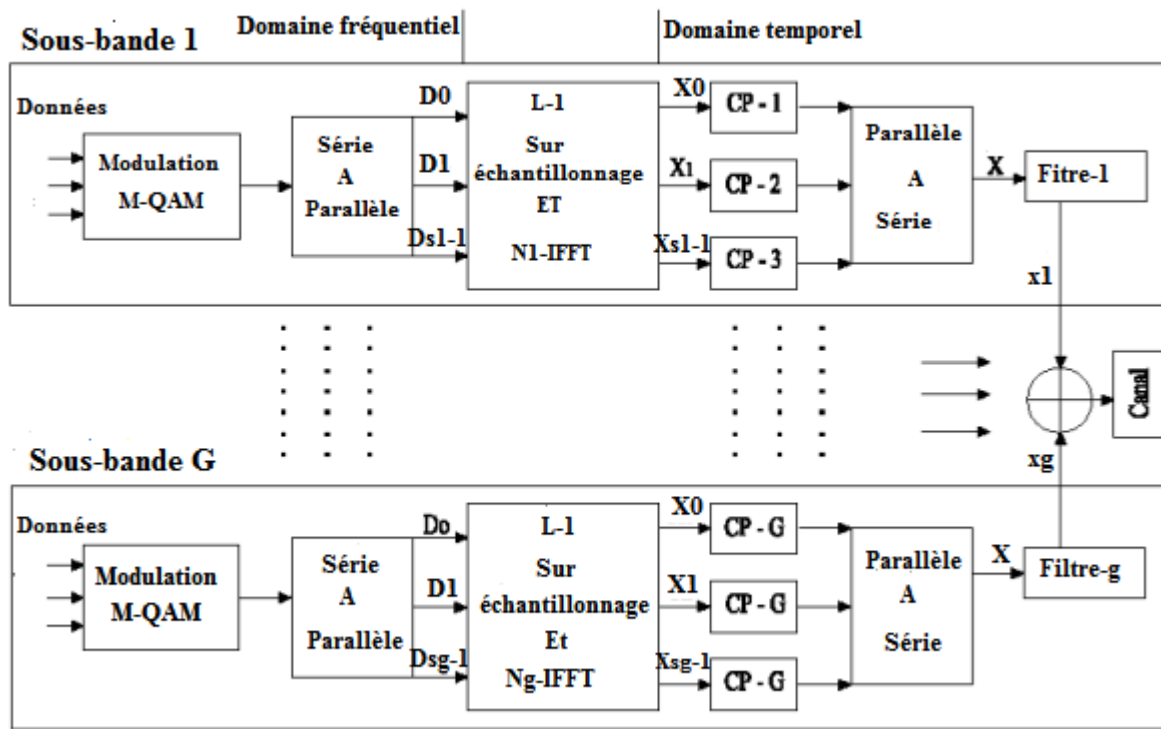


Figure 2.4 : Structure de l'émetteur du système F-OFDM.

Tous les signaux F-OFDM dans différentes sous-bandes sont ensuite concaténés et transmis via un canal sans fil. Au niveau du récepteur, un filtre adapté du filtre de l'émetteur respectif,  $f^*(-k)$ , est appliqué au signal reçu afin que le signal à la sous-bande souhaitée puisse être récupéré. Le signal filtré reçu dans la  $g^{ème}$  sous-bande,  $r_g(k)$ , peut être écrit ainsi [13] :

$$r_g(k) = ((x_g(k) * c(k)) + b(k)) * f^*(-k) \quad (2.3)$$

Où  $c(k)$  et  $b(k)$  sont respectivement une réponse impulsionnelle de canal sans fil et un bruit AWGN.

Le rôle du filtrage est double : d'une part il rejette les contributions des autres équipements utilisateurs, cela garantit que le récepteur OFDM, c'est-à-dire la combinaison de la suppression ultérieure du CP et des blocs FFT dans la chaîne, ne capte aucune interférence des équipements utilisateurs voisins. D'autre part, il maximise le SNR (le rapport signal sur bruit) reçu [13].

Ensuite, le signal filtré est divisé en symboles OFDM, suivi du bloc de suppression du CP de chaque symbole pour obtenir les symboles OFDM, et du bloc N-FFT. Ensuite, une estimation et une égalisation de canal sont effectuées sur le signal résultant pour compenser l'effet des deux

filtres et du canal. Enfin, les symboles de données sont sélectionnés parmi les sous-porteuses égalisées, puis démodulés en un flux binaire. La structure du récepteur du système F-OFDM est illustrée à la figure 2.5.

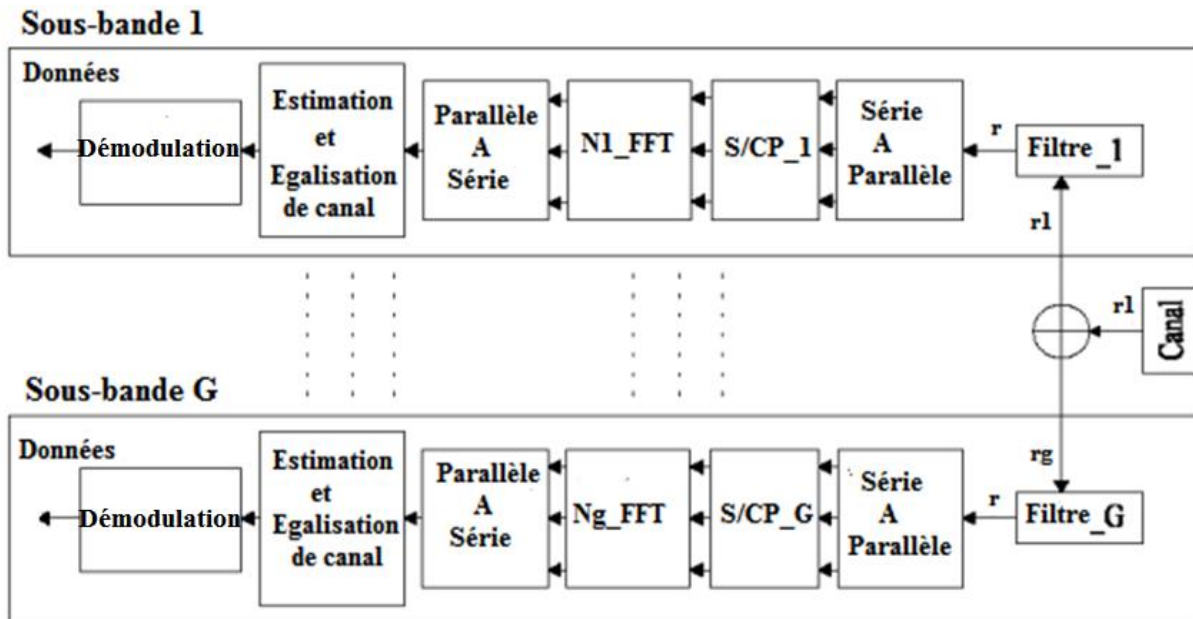


Figure 2.5 : Structure de récepteur du système F-OFDM.

## 2.9 Conception du filtre pour F-OFDM

Pour activer le filtrage basé sur les sous-bandes et ainsi profiter des avantages promis par le F-OFDM, des filtres correctement conçus sont nécessaires. En général, la conception du filtre implique le compromis entre les caractéristiques du domaine temporel et fréquentiel, et est également fondée sur la complexité de la mise en œuvre. L'énergie diffusée dans le domaine temporel doit être contenue pour limiter les interférences entre symboles (ISI), et la netteté de la région de transition dans le domaine fréquentiel vaut également la peine d'être étudiée. Par souci de complexité, il est recommandé de mettre en œuvre les filtres dans le domaine fréquentiel en utilisant la méthode de sauvegarde de chevauchement, avec laquelle les avantages de la transformée de Fourier rapide (FFT) peut être exploitée. En outre, pour parvenir à une réallocation flexible de sous-bandes, une approche systématique et pratique qui permet la génération en ligne de filtres pour toutes les exigences de spectre données est également souhaitable.

La structure de filtre passe-bas de l'émetteur est très importante pour réduire les émissions OOB et d'éventuelles interférences. Idéalement, nous voulons un filtre parfaitement plat en



bande passante et nul en dehors de cette bande, avec des bandes de transition nulles. Ce filtre est physiquement irréalisable mais peut être approché en traquant et fenêtrant la réponse impulsionnelle idéale *sinc* [13].

### 2.9.1 Filtre FIR (Finite Impulse Response)

La condition d'une transmission et d'un filtrage sans distorsion est que la réponse en amplitude du système doit être constante dans la plage spectrale effective du signal, et la réponse de phase doit être une fonction linéaire de la fréquence (c'est-à-dire, phase linéaire). Le filtre prototype doit avoir une caractéristique de phase linéaire dans les applications de communication sans fil. Le filtre FIR a la capacité de réaliser un filtrage de phase linéaire. De plus, les structures matérielles et logicielles du filtre FIR pourraient être établies sans tenir compte du problème de stabilité. Par conséquent, les filtres FIR ont été largement utilisés dans le domaine des communications sans fil [14].

Il existe certains critères de conception pour personnaliser les performances de FIR. Ainsi, il doit exister des méthodes spécifiques de conception de FIR correspondant à ces critères. Les méthodes de conception des filtres sont divisées en trois grandes catégories : les méthodes d'échantillonnage de fréquence, les méthodes basées sur le fenêtrage et les méthodes basées sur l'optimisation [14].

Dans ce qui suit, nous nous intéressons à la méthode de la fonction de fenêtre pour concevoir le filtre FIR.

#### 2.9.1.1 Le filtre FIR basé sur le fenêtrage

Dans la méthode de fenêtrage, comme le montre la figure 2.6, la largeur de la bande de transition du filtre résultant dépend de la largeur du lobe principal,  $\Delta fm$ , de la transformée de Fourier de la fenêtre et des ondulations de la bande passante et de la bande passante des lobes latéraux du filtre de Fourier. La transformée de la fenêtre, par conséquent, la largeur  $\delta$  de la fenêtre du lobe principal et du lobe latéral de pic doit être petite pour obtenir une petite bande de transition et moins de rides [15].

Ici  $W(e^{j2\pi f})$ ,  $H(e^{j2\pi f})$  et  $F(e^{j2\pi f})$  correspondent respectivement à la transformation de Fourier de la fonction de fenêtrage, à la réponse souhaitée et à la réponse fenêtrée résultante.

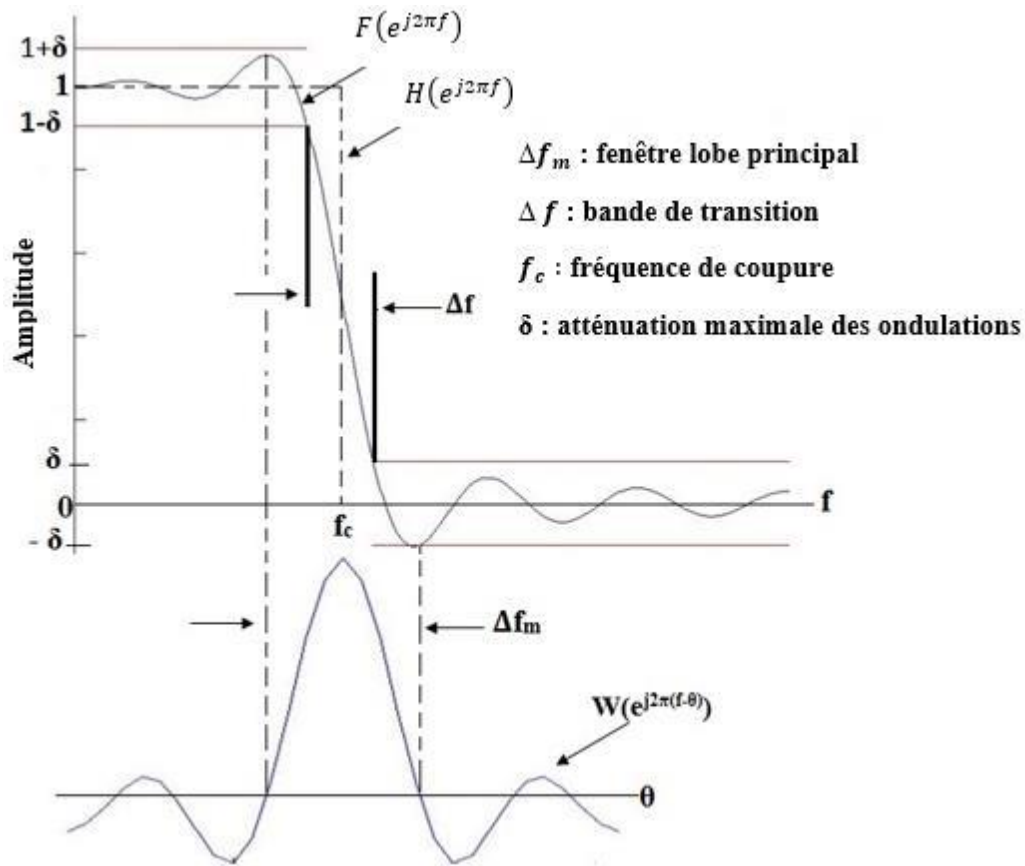


Figure 2.6 : Méthode de fenêtrage dans le domaine fréquentiel [15].

La réponse en fréquence du filtre passe-bas idéal est une fonction rectangulaire, et la réponse impulsionnelle est une fonction *sinc*. Par conséquent, la fonction *sinc* est tronquée avec une fonction de fenêtrage appropriée en multipliant dans le domaine temporel comme suit [15] [12] :

$$f(k) = w(k) \cdot h(k) \quad (2.4)$$

Où  $h(k)$  qui est la réponse impulsionnelle du filtre *sinc* est définie par :

$$h(k) = 2f_c \text{sinc}(2f_c k) \quad (2.5)$$

Où  $f_c$  est la fréquence de coupure.

$w(k)$  une fonction de fenêtrage, qu'est une fonction nulle en dehors d'un intervalle. Il existe une grande variété de ces fonctions, réglées pour différentes propriétés.

Prenons par exemple, la fenêtrage de Hann. Il est défini comme (pour  $N$  points) :

$$w(k) = 0.5 - 0.5 \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right), 0 \leq k \leq N \quad (2.6)$$

Le filtre final est alors simplement, comme suit :

$$f(k) = (2f_c \text{sinc}(2f_c k)) \left(0.5 - 0.5 \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right)\right) \quad (2.7)$$

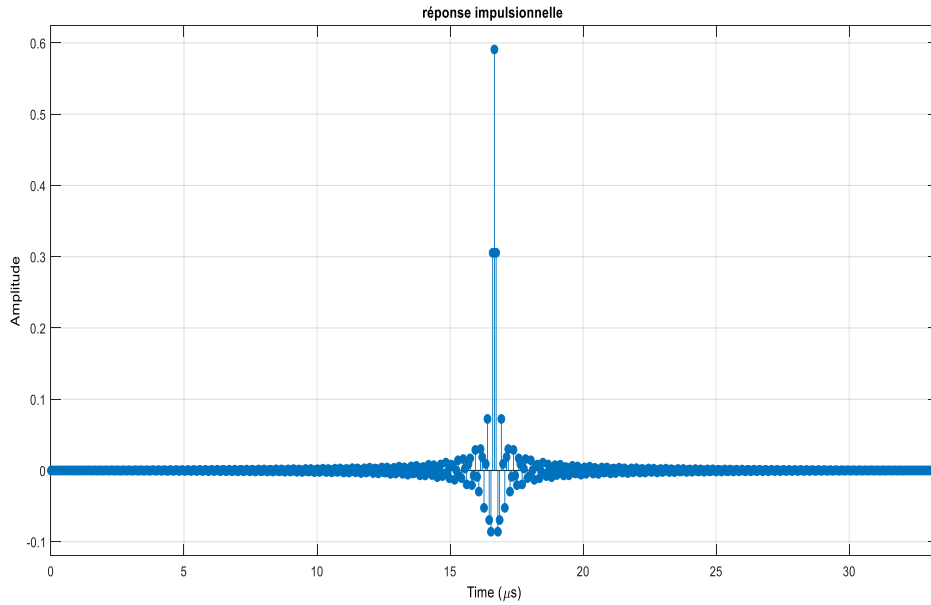


Figure 2.7 : Réponse impulsionnelle du filtre passe bas.

Les fenêtres les plus couramment utilisées sont :

- **Hamming :**

$$w(k) = 0.54 - 0.46\cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) \quad 0 \leq k \leq N \quad (2.8)$$

- **Gaussian:**

$$w(k) = e^{\frac{-1}{2}\left(\alpha\frac{k}{(N-1)/2}\right)^2} \quad \frac{-(N-1)}{2} \leq k \leq \frac{(N-1)}{2} \quad (2.9)$$

Où  $\alpha = \frac{(N-1)}{2\sigma}$ , et  $\sigma$  est l'écart type d'une variable aléatoire gaussienne.

- **Blackman :**

$$w(k) = 0.42 - 0.5\cos\left(\frac{2\pi k}{N-1}\right) + 0.8\cos\left(\frac{4\pi k}{N-1}\right) \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (2.10)$$

- **Blackman-Harris:**

$$w(k) = 0.35875 - 0.48829\cos\left(\frac{2\pi k}{N-1}\right) + 0.14128\cos\left(\frac{4\pi k}{N-1}\right) - 0.01168\cos\left(\frac{6\pi k}{N-1}\right) \quad (2.11)$$

$$0 \leq k \leq N-1$$

## **2.10 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté l'OFDM filtré, un facilitateur de forme d'onde flexible, conçu pour répondre aux attentes des réseaux cellulaires 5G. Après avoir décrit le cadre général et la méthodologie du F-OFDM, une comparaison entre les candidats de forme d'onde 5G a été fournie pour illustrer les avantages du F-OFDM. F-OFDM apparaît comme le candidat de forme d'onde 5G le plus prometteur.

Le prochain chapitre sera consacré aux résultats pratiques obtenus par simulation.

# **Chapitre 3**

**Simulation et discussion des résultats**

### 3.1 Introduction

Ce chapitre est consacré aux résultats obtenus lors de nos simulations. Nous proposons dans le cadre de cette simulation l'utilisation du langage MATLAB. Dans la première partie nous allons décrire l'organisation et les principales fonctions du programme. Dans la partie qui suit, nous allons étudier la modulation F-OFDM et simuler pour obtenir des résultats comparables avec les résultats de la modulation OFDM, puis nous allons établir la simulation de la technique F-OFDM avec calcul des performances en termes de  $BER = f(SNR)$ , et nous allons terminer par une conclusion.

### 3.2 Schéma synoptique

Le modèle de simulation de la technique F-OFDM est présenté sur Figure 3.1. Il montre les principales fonctions qui doivent être programmées et l'échange d'informations entre elles. La grande majorité de ces fonctions sont en fait disponibles dans la bibliothèque de MATLAB et sont directement utilisables par simple appel. Seul donc l'échange d'information doit être mis en œuvre.

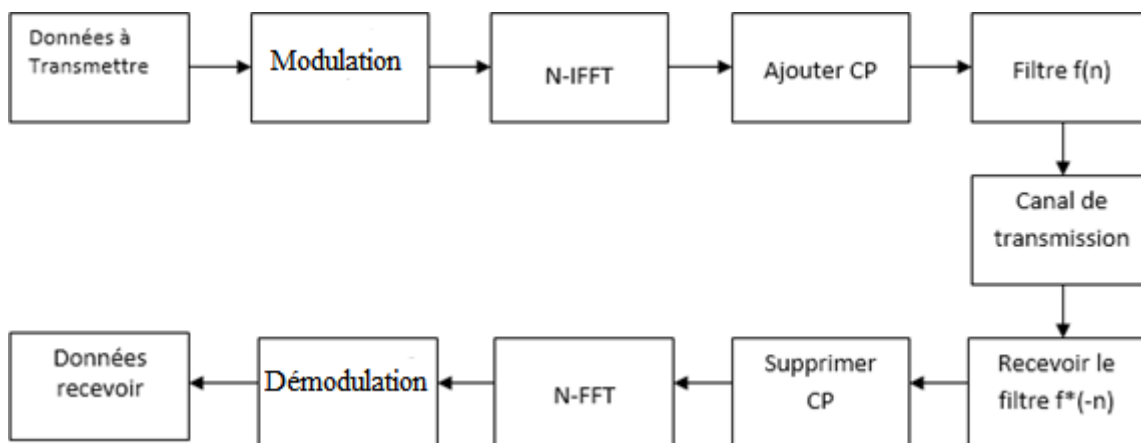


Figure 3.1 : Chaîne de transmission F-OFDM.

### 3.3 Structure du programme de simulation

Le programme MATLAB, développé pour la simulation F-OFDM suit naturellement l'échange d'information qui est montré sur la figure 3.1. Il est nécessaire toutefois de prêter particulièrement attention aux paramètres d'entrées qui doivent être spécifiés.

Certaines variables sont saisies par l'utilisateur. Le reste est soit fixe, soit dérivé des variables d'entrée utilisateur et fixes. Les variables d'entrée utilisateur comprennent, par exemple, le nombre de point FFT, le nombre de bloc de ressources à utiliser, le nombre de sous porteuses par bloc de ressource, la longueur du préfixe cyclique et la modulation à utiliser (QPSK, 16QAM, etc...). Les paramètres du filtre F-OFDM sont aussi indispensables pour une simulation donnée. Un filtre passe bas est réalisé à l'aide d'une fenêtre, qui tronque efficacement la réponse impulsionnelle. Durant le traitement de la transmission en utilisant F-OFDM, chaque signal OFDM d'une sous-bande donnée passe à travers le filtre conçu.

À titre de comparaison, nous prenons comme référence la technique de modulation OFDM existante, qui utilise la bande passante complète avec le même préfixe cyclique. Aucun canal d'évanouissement n'est considéré mais du bruit AWGN est ajouté au signal reçu pour obtenir le SNR souhaité. Au niveau du récepteur, le signal reçu, composé du signal utile et du bruit passe à travers un filtre adapté dont la sortie constitue l'entrée d'un récepteur OFDM normal. Il tient compte à la fois de la montée en puissance du filtrage et de la latence avant l'opération FFT.

### 3.4 Résultats de simulations

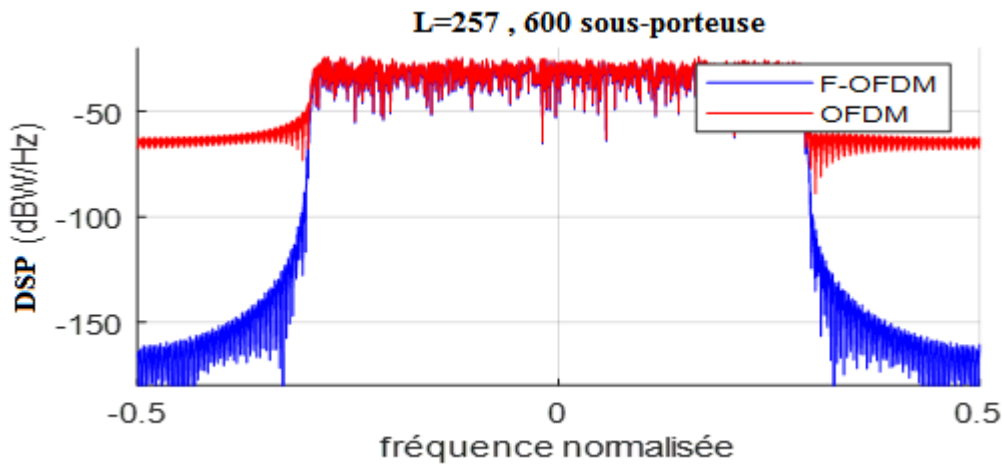
#### 3.4.1 Comparaison des DSP d'OFDM et F-OFDM

Dans cette première partie de la simulation nous allons comparer la DSP de l'OFDM et de F-OFDM, en variant la longueur du filtre. Nous exprimons les résultats en termes de densité spectral de puissance [dB] en fonction de la fréquence [Hz]. Le tableau 3.1 montre les paramètres de simulations utilisés.

PARAMETRES	VALEURS
Nombre de sous porteuse	12
Nombre de points FFT	1024
Modulation	64 QAM
Nombre de bloc de ressource	50
Longueur du préfixe cyclique	72
Longueur du filtre	257,513, 1025, 2049

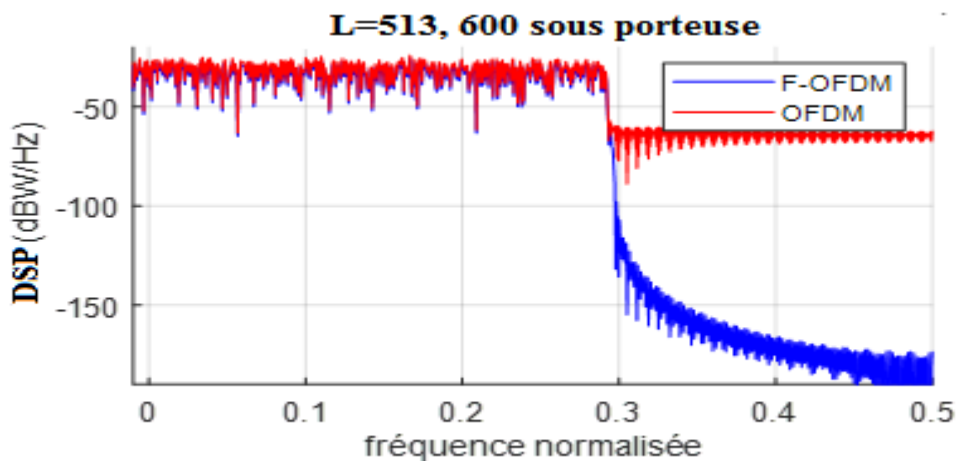
**Tableau 3.1** : Paramètres de simulation utilisés.

La figure 3.2 montre les densités spectrales de puissance (DSP) de F-OFDM et de l'OFDM en bande de base pour une longueur de filtre  $L=257$ . Nous pouvons voir que F-OFDM a une très faible émission hors bande qui peut atteindre 100 à 180 dB de moins que l'OFDM, par conséquent l'F-OFDM est plus avantageuse par rapport à OFDM en termes d'efficacité spectrale.



**Figure 3.2 :** DSP en bande de base du signal F-OFDM proposé par rapport à l'OFDM.

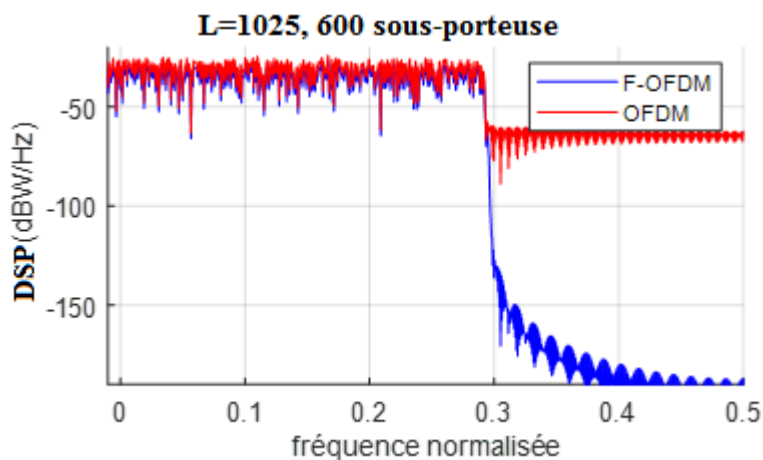
La figure 3.3 montre que les spectres F-OFDM et OFDM pour une longueur de filtre  $L=513$ . Comme nous pouvons le constater, les deux techniques présentent des lobes latéraux mais OFDM présente une augmentation des lobes latéraux donc une grande fuite spectrale.



**Figure 3.3 :** Densité spectrale de puissance pour F-OFDM avec un filtre  $L=513$ .

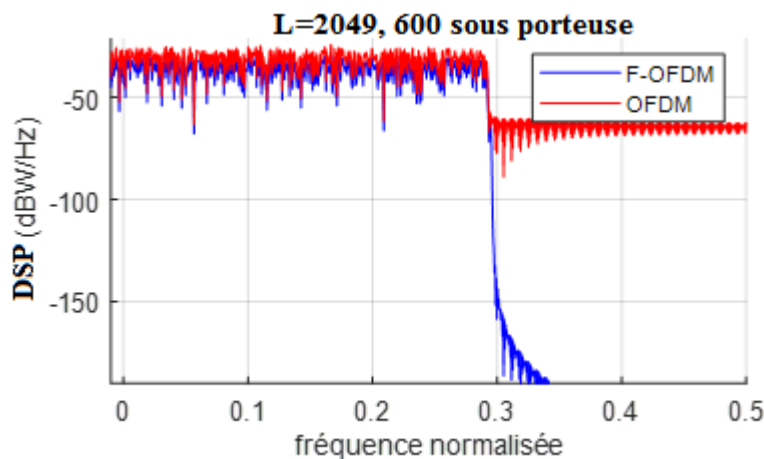


La figure 3.4 montre les que les spectres F-OFDM et OFDM pour une longueur de filtre  $L=1025$ . Avec cette longueur du filtre, la figure montre clairement une grande diminution de fuite spectrale et des lobes latéraux en la comparant avec la figure 3.3.



**Figure 3.4** : Densité spectrale de puissance pour F-OFDM avec un filtre  $L=1025$ .

Dans la figure 3.5, la fuite spectrale et les lobes latéraux secondaires ont presque disparus. Ces résultats ont été obtenus avec une longueur du filtre  $L=2049$ .



**Figure 3.5** : densité spectrale de puissance pour F-OFDM avec une longueur de filtre  $L=2049$

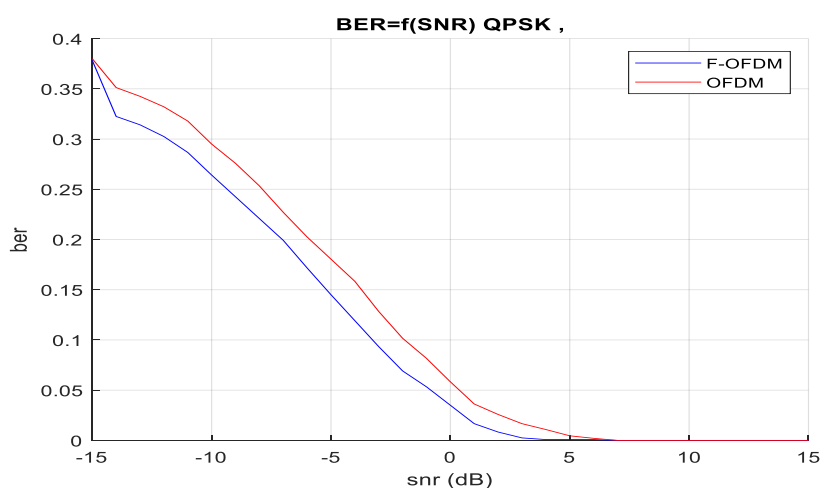
L'analyse des résultats qui sont montrés par les figures 3.3 jusqu'à 3.5, nous montre clairement l'influence de la longueur du filtre sur l'efficacité spectrale. Nous constatons que plus la longueur de filtre augmente plus l'efficacité spectrale de F-OFDM augmente, ce qui conduit à une réduction des fuites spectrales.

### 3.4.2 Comparaison du TEB d'OFDM et F-OFDM

Dans la deuxième partie des simulations, nous comparons les performances des techniques F-OFDM et OFDM en considérant le type de modulation employé. Nous considérons les modulations QPSK, 4QAM, 16QAM, et 64QAM. Nous exprimons les performances en termes de Taux d'Erreur Binaire, ou BER (Bit Error Rate) en anglais, en fonction du SNR. L'amélioration des performances du schéma F-OFDM est clairement observée sur les figures 3.6, 3.7, 3.8 et 3.9. Les simulations ont été obtenues pour une longueur du filtre  $L=1025$ . Le tableau 3.2 résume les paramètres de simulation.

PARAMETRES	VALEURS
Nombre e sous porteuse	12
Nombre de points FFT	1024
Nombre de bloc de ressource	50
Longueur de préfixe cyclique	72
Longueur de filtre	1025
Modulation	QPSK, 4QAM, 16QAM, 64QAM

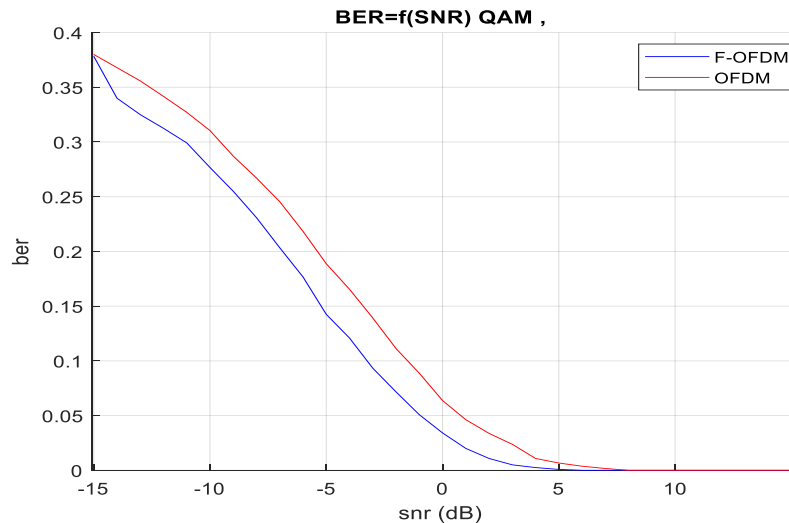
**Tableau 3.2** : Paramètres de simulation.



**Figure 3.6** : comparaison entre le BER d'OFDM et F-OFDM pour la modulation QPSK.

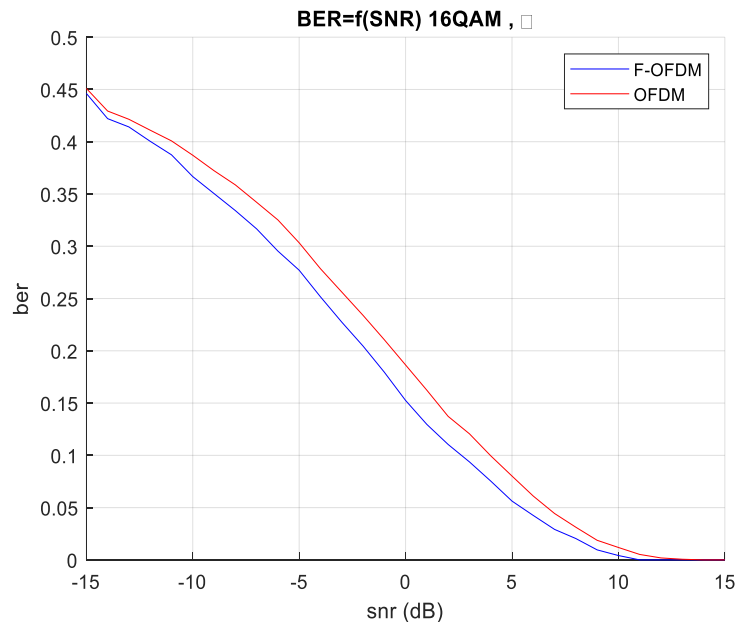
La figure 3.6 représente le BER pour la modulation QPSK en présence d'un bruit AWGN. Puisque le bruit généré agit sur le signal, il a un effet direct comme nous pouvons le voir sur la figure 3.6 pour les faibles SNR, ce qui nous donne un BER élevé ( $BER < 0.4$ ) et il diminue

progressivement pour des SNR croissants. Comme on peut le voir aussi, le BER est plus faible lors de l'utilisation de la modulation f-OFDM pour ordres de filtre considérés. À partir de là, on remarque que F-OFDM présente une meilleure performance en termes de BER, que l'OFDM.



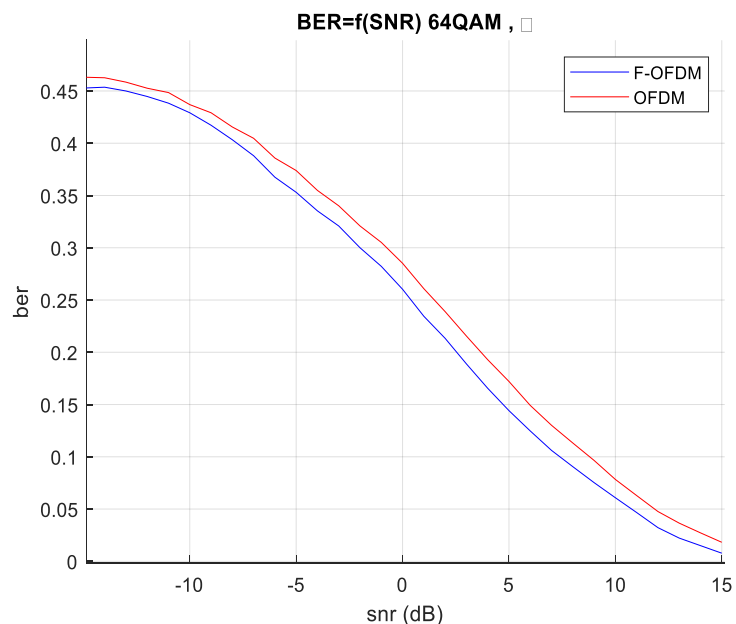
**Figure 3.7 :** comparaison entre le BER d'OFDM et F-OFDM pour la modulation QAM.

La figure 3.7 représente le BER pour la modulation QAM. De même, le signal est affecté par les évanouissements du bruit blanc gaussien AWGN pour les faibles SNR, ce qui nous donne un BER élevé ( $BER > 0,4$ ) et il diminue progressivement pour des SNR croissants. QAM semble avoir les mêmes résultats que QPSK. BER est plus faible lors de l'utilisation de la modulation f-OFDM pour les ordres de filtre considérés. À partir de là, on remarque que F-OFDM présente une meilleure performance, en termes de BER, que l'OFDM.



**Figure 3.8 :** Comparaison entre le BER d'OFDM et F-OFDM pour la modulation 16QAM.

La figure 3.8 représente le BER pour la modulation 16QAM. Le signal est affecté par les évanouissements du bruit blanc gaussien AWGN pour les faibles SNR ce qui nous donne un BER élevé (BER = 0.4) et il diminue progressivement pour des SNR croissants. Le BER est plus faible lors de l'utilisation de la modulation F-OFDM.



**Figure 3.9 :** comparaison entre le BER d'OFDM et F-OFDM pour la modulation 64QAM.

La figures 3.9 représente le BER pour la modulation 64QAM. Le signal est affecté par les évanouissements du bruit blanc gaussien AWGN. Nous remarquons également un effet direct pour les

faibles SNR, ce qui nous donne un BER élevé ( $BER > 0.4$ ) et il diminue progressivement pour des SNR croissants. BER est plus faible lors de l'utilisation de la modulation f-OFDM.

On constate que pour chaque modulation et chaque fois que les valeurs du SNR augmente le BER diminue, la croissance d'ordre de modulation provoque la croissance de BER.

### **3.5 Conclusion**

L'OFDM et F-OFDM ont été simulés à l'aide de MATLAB et leurs performances sont vérifiées en termes de densité spectrale de puissance (DSP) et de taux d'erreur binaire (BER). Nous avons conclu que les résultats de la simulation des performances du système F-OFDM ont montré qu'une minimisation considérable de l'émission hors bande (OOB) a eu lieu.

# **CONCLUSION**

### Conclusion

Le travail que nous avons réalisé dans ce mémoire rentre dans le cadre de l'étude des techniques d'accès utilisant les modulations multi-porteuses. Nous avons considéré un thème d'actualité relevant du domaine de la transmission numérique dans les réseaux mobiles 5G à base de la technique F-OFDM (Filtered-Orthogonal Frequency Division Multiplexing).

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les aspects essentiels de la technique de modulation OFDM qui est employé dans les réseaux 4G actuels. Son corollaire, la technique d'accès OFDMA a été ensuite étudiée.

Dans le deuxième chapitre nous avons considéré F-OFDMA qui est dérivée de F-OFDM, et qui est en phase d'être incluse dans le prochain standard 5G. F-OFDM est basée sur le filtrage du signal CP-OFDM pour minimiser l'émission OOB (Out Of Band), ou émission hors bande. Les principales caractéristiques de F-OFDMA ont été présentées.

Le troisième chapitre a été consacré aux simulations des performances. La structure d'un programme MATLAB servant de support aux simulations a été présentée. Des résultats de simulation ont été obtenus, présentés et commentés. Nous avons comparé les performances de F-OFDM et de OFDM afin de montrer les améliorations apportées par la technique F-OFDM. Les performances ont été comparées en considérant le TEB où la longueur du filtre a été prise comme paramètre. Les résultats obtenus ont montré que F-OFDM est supérieure à OFDM du fait qu'une minimisation considérable de l'OOB a eu lieu.

### Bibliographie

- [1] Salvatore RAGUSA. « Écrêtage Inversible pour l'Amplification Non-Linéaire des Signaux OFDM dans les Terminaux Mobiles ». Université Joseph Fourier. 16 juin 2016.
- [2] Annick Le Glaunec. « Modulations Multi porteuses ».
- [3] Dégardin Virginie. « Analyse de la faisabilité d'une transmission de données haut débit sur le réseau électrique basse tension ». Thèse Doctorat en électronique, Université Lille 1, décembre en 2002.
- [4] Helmi BEN HNIA, Abdennaceur KACHOURI, Ossama BEN BELGHITH, Lotfi KAMOOUN. « Etude des performances de la modulation OFDM pour l'utilisation dans les systèmes de communication sans fils de la 4G ». International Conference: Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications, Tunisie, 15-20 Mars 2004.
- [5] Pierre GRUYER, Simon PAILLARD. « Modélisation d'un modulateur et démodulateur OFDM », 12 décembre 2005.
- [6] Samir Arab. « Une étude sur la réduction du PAPR dans un système OFDM », Mémoire du grade de Maître et science (M. Se.), Université Laval, Canada, 2010.
- [7] Carle Lengoumbi. « Accès multiple OFDMA pour les systèmes cellulaires post 3G : allocation de ressources et ordonnancement ». Ecole nationale supérieure des télécommunications de Paris, 14 Mars 2008.
- [8] Francesco Di Stasio, Marina Mondin, Fred Daneshgaran. « Multirate 5G Downlink Performance Comparison for f-OFDM and w-OFDM Schemes with Different Numerologies ». ECE, Université California Los Angeles. 26 juillet 2018.
- [9] Cour « Les enjeux de la 5G », Autorité de régulation des communications électroniques et des postes, mars 2017.
- [10] J. Santa, A. F. Gomez-Skarmeta, and M. Sanchez-Artigas. « Architecture and evaluation of a unified V2V and V2I communication system based on cellular networks », Elsevier Computer Commun, Jul. 2008
- [11] Xi Zhang, Ming Jia, Lei Chen, Jianglei Ma, Jing Qiu. « Filtered-OFDM-enabler for flexible waveform in the 5th generation cellular networks ». In Global Communications Conference (GLOBECOM), pages 1–6. IEEE, 2015.



- [12] Javad Abdoli, Ming Jia, and Jianglei Ma. « Filtered OFDM: A new waveform for future wireless systems». In *Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*. Pages 66–70. 2015.
- [13] X. Cheng, Y. He, B. Ge, and C. He. «A filtered OFDM using FIR filter based on window function method». In *Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2016 IEEE 83rd*, pages 1–5. IEEE, 2016
- [14] Lei Jian, Haijian Zhang, Shuai Cheng, HengwieLv, Pandong Li. « An Overview of FIR Filter Design in Future Multicarrier Communication Systems». *Signal Processing Laboratory, School of Electronic Information, Wuhan University, China*. 2020.
- [15] Oppenheim. «Discrete-Time Signal Processing». Pearson Education India, 1999.