

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté de Technologie

Département Ingénierie des Systèmes Electriques

Mémoire de Master

Présenté par

Djebili Aboubaker Anis

Filière : Télécommunications

Spécialité : Réseaux et Télécommunications

Etude et analyse des performances d'une modulation OFDM

Soutenu le/...../2021 devant le jury composé de:

Messaoudi	Noureddine	MCA	UMBB	Président
Dichou	Karima	MCA	UMBB	Examineur
Hamadouche	M'hamed	PROF	UMBB	Rapporteur

Année Universitaire : 2020/2021

Remerciement

Je tiens à remercier Allah de m'avoir donné la foi et la force afin de terminer ce projet, ma chère mère qui m'a soutenu tout le long de mes études et toute ma famille

Je tiens à exprimer mon profond respect à monsieur M'HAMED HAMADOUCHE professeure à l'Université de M'Hamed Bougera Boumerdes et le remercier d'avoir accepté d'être mon encadreur, et pour son excellent encadrement académique et scientifique, ses conseils qui m'ont guidés tout le long de ce travail, il a été le formateur que tout le monde aimerait avoir

Je souhaite exprimer toute ma reconnaissance et mon estime aux membres du jury. Je remercie Monsieur MESSAOUDI NOURDINE, chef de département génie électrique à la faculté de technologie, de m'avoir fait l'honneur de présider ce jury. Je souhaite également à remercier Madame DICHOU KARIMA, maître de conférence A à la faculté de technologie, d'avoir acceptée d'être membre du jury

Dédicaces

*À ma mère et ma grand-mère pour leur amour et le
dévouement inaltérable*

À mes sœurs et frères pour leurs soutient perpétuel

À mes amies proches

*À toute la promo 2020/2021 réseaux et télécommunication
master 2*

À tous mes enseignants

...je vous dédie

Ce modeste travail

Résumé

L'étape de la modulation est un maillon essentiel dans une chaîne de transmission et son optimisation permet de garantir un certain degré de performance. Actuellement, de plus en plus des solutions sont basées sur des schémas de transmission multi-porteuse à cause de leur excellente robustesse vis-à-vis des canaux multi trajets. Parmi ces solutions, la modulation OFDM se pose comme une modulation de référence. L'objectif de ce travail de master consiste à évaluer les performances de la modulation OFDM sur un canal AWGN.

Mots clés : Chaîne de Transmission, Transmission Multi-porteuse, Modulation OFDM,

Abstract

The phase of the modulation is an essential link in a chain of transmission and its optimization makes it possible to guarantee a certain degree of performance. Currently, more and more of the solutions are based on multi-carrier transmission schemes because of their excellent robustness vis-à-vis the multipath channel. Among these solutions, modulation OFDM is posed like a modulation of reference. The objective of this work of master consists in evaluating the performances of modulation OFDM on AWGN Channel. Keywords: Chain of Transmission, Multi-carrier Transmission, Modulation OFDM, AWGN Channel

ملخص

في هذا العمل سوف نتطرق إلى مشكلة التنبؤ بحالة القناة بهدف التقليل من التداخل بين القنوات في اتصال لاسلكي وهذه المرحلة تشكل حلقة أساسية في سلسلة الانتقال والتحسين لها ويضمن تحقيق مستوى معين من الأداء. حاليا تستند إلى حلول أكثر وأكثر على خطط نقل متعددة الناقل بسبب قوتها ممتازة وجها لوجه على قناة متعددة. من بين هذه الحلول «تعديل OFDM» الذي يطرح نفسه كمرجع تعديل و الهدف من رسالة ماستر هذه يرتكز على تحسين أداء تعديل OFDM على قناة AWGN

الكلمات الرئيسية : قناة إرسال؛ متعددة النواقل؛ قناة متعددة؛ تعديل OFDM؛ AWGN

Table des matières

Introduction générale :.....	1
------------------------------	---

Chapitre 1 : Généralités sur les communications numériques

1.1 Introduction	3
1.2 Chaîne de transmissions numérique	4
1.3 Transmission en bande de base	5
1.4 Codage de l'information	6
1.5 Choix d'un code en ligne.....	7
1.6 Les différents codes en ligne:	7
1.6.1 Codage RZ	7
1.6.2 Codage NRZ	8
1.6.3 Codage de Manchester	9
1.7 Modulation numérique	10
1.7.1 Caractéristiques d'une modulation numérique	12
1.7.2 Modulations ASK	12
1.7.3 Modulation PSK	14
1.7.4 Modulation FSK	15
1.7.5 Modulation QAM	16
1.8 Technique d'Accès multiples en communication numérique	18
1.8.1 Multiplexage	18
1.8.2 Accès multiple	18
1.8.3 Time Division Multiple Access (TDMA)	19

1.8.4 Code division multiple access (CDMA)	21
1.8.5 Frequency division multiple access (FDMA)	22
1.9 Conclusion	25

Chapitre 2 : Modulation multi porteuse OFDM

2.1 Introduction	26
2.2 Canal multi-trajets	27
2.2.1 Caractéristiques d'un canal multi-trajets	27
2.3 Notion de Modulation multi-porteuses	30
2.4 Notion d'orthogonalité	31
2.5 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)	32
2.5.1 Technique de modulation OFDM	32
2.5.2 Principe de modulation multi-porteuse OFDM	33
2.5.3 OFDM et orthogonalité	35
2.5.4 Principe de la démodulation multi-porteuses OFDM	37
2.6 La transformée de Fourier discrète	38
2.6.1 Principe du modulateur et du démodulateur utilisant les transformées de Fourier discrètes	40
2.6.2 Quelques standards OFDM à base FFT	43
2.7 OFDM et Intervalle de garde	44
2.8 caractéristiques de l'OFDM	45
2.8.1 Avantage et inconvénient	45
2.8.2 Le PAPR	46
2.8.3 Le décalage fréquentiel :	47

2.8.4 Egalisation :	47
2.8.5 Décision	48
2.9 Chaîne complète d'une transmission OFDM	49
2.10 Les différents types de techniques OFDM	50
2.11 Conclusion	51

Chapitre 3 : Analyse par simulation de l'OFDM sur Matlab/Simulink

3.1 Introduction	52
3.2 Description de la simulation sur Simulink	53
3.2.1 Emission	55
3.2.2 Canal de transmission	58
3.2.3 Réception	59
3.3 Résultats de la simulation de l'OFDM sur canal AWGN	62
3.3.1 Résultats des simulations du système OFDM avec modulation-QAM 16	62
3.3.2 Résultats des simulations d'un système OFDM avec modulation QAM-64	68
3.4 L'effet de la taille M-aire de la modulation numérique	73
3.5 Effet de l'intervalle de garde sur le BER	75
3.6 Conclusion	76
Conclusion générale et perspectives	77

Table des figures

Figure 1.1 Schéma représentant une chaîne de transmission	4
Figure 1.2: Signal coder en NRZ unipolaire et RZ unipolaire	6
Figure 1.3 Signal coder avec RZ bipolaire	8
Figure 1.4 : Signal coder avec NRZ bipolaire	9
Figure 1.5 : Signal coder avec Manchester (biphasé)	10
Figure 1.6 Graphique qui représente la qualité de transmission d'une image avec signal analogique et numérique	11
Figure 1.7 : Exemple d'une modulation ASK a deux états et sa constellation	13
Figure 1.8 : Exemple d'une modulation PSK a deux états et sa constellation.....	14
Figure 1.9 : Exemple d'une modulation 8-PSK et sa constellation	15
Figure 1.10 : Exemple d'une modulation FSK a deux états.....	16
Figure 1.11 : Allure d'un signal modulé a 16-QAM et sa constellation	17
Figure 1.12 : Représentation d'un exemple d'accès multiple	18
Figure 1.13 : Technique d'accès TDMA.....	20
Figure 1.14 Technique d'accès CDMA	21
Figure 1.15 : Technique d'accès FDMA.....	22
Figure 1.16 : Schéma représentant le découpage de la bande de fréquence en FDM..	24
Figure 2.1 : Effet doppler sur un récepteur mobile	29
Figure 2.2 : Différence entre une modulation classique et une modulation multi- porteuse	30
Figure 2.3 : Allure d'un signal OFDM	32
Figure 2.4 : Chaîne de transmission OFDM réduite	33
Figure 2.5 : Schéma du principe de la modulation OFDM	34
Figure 2.6 : Multiplexage FDM	34
Figure 2.7 : Spectre de signal de plusieurs sous-porteuse OFDM	35

Figure 2.8 Bande passante économiser en utilisant L'OFDM	36
Figure 2.9 : Spectre d'un signal OFDM	36
Figure 2.10 : Schéma du principe de la démodulation OFDM	37
Figure 2.11 : Signal carrer à fréquence d'échantillonnage f_0	40
Figure 2.12 : Signal carrer transposer de $f_0+b/2$	40
Figure 2.13 : Schéma de chaine de transmission utilisant la FFT	41
Figure 2.14 : Démodulateur en utilisant la FFT	42
Figure 2.15 : La modulation en utilisant l'IFFT	42
Figure 2.16 : Paramètre de quelque system de communication multi porteuse	43
Figure 2.17 : Insertion du préfix cyclique se le symbole OFDM	44
Figure 2.18 : Différence entre FDM et OFDM	45
Figure 2.19 : Zone de décision	48
Figure 2.20 : Chaine de transmission OFDM Complete	49
Figure 3.1 : Schéma représentant une chaine de transmission OFDM avec un canal OFDM	54
Figure 3.2 : Schéma bloc du générateur de la séquence binaire	55
Figure 3.3 : Paramètre du bloc random integer	55
Figure 3.4 : Schéma bloc du modulateur numérique QAM 16/64	56
Figure 3.5 : Paramètre du bloc modulateur numérique (QAM 16)	56
Figure 3.6: Constellation QAM 16 avec distribution de gray	57
Figure 3.7 : Schéma du bloc de modulation OFDM	57
Figure 3.8 : Block du canal AWGN	58
Figure 3.9 : Paramètre du bloc AWGN	59
Figure 3.10 : Schéma détaille du bloc démodulation OFDM.....	59
Figure 3.11 : Schéma bloc du démodulateur numérique QAM 16/64	60
Figure 3.12 : Schéma bloc de la séquence reçue.....	60
Figure 3.13 : Schéma de la partie de visualisation des resulta	61
Figure 3.14 : Schéma représentant les différent bloc de visualisation	61

Figure 3.15 : Paramètre de la simulation d'un système OFDM avec modulation QAM-16	62
Figure 3.16 : Signal OFDM avec la modulation QAM 16 avec un SNR = 5	63
Figure 3.17 : Signal OFDM avec la modulation QAM 16 avec un SNR = 15	63
Figure 3.18 : Signal OFDM avec la modulation QAM 16 avec un SNR = 60	63
Figure 3.19 : Spectre de signal OFDM avec modulation QAM 16 a SNR =5	64
Figure 3.20 : Spectre de signal OFDM avec modulation QAM 16 a SNR =15	65
Figure 3.21 : Spectre de signal OFDM avec modulation QAM 16 a SNR =60	65
Figure 3.22 : Constellation de signal OFDM avec modulation QAM 16 a SNR =5 ...	66
Figure 3.23 : Constellation de signal OFDM avec modulation QAM 16 a SNR =15 .	67
Figure 3.24 : Constellation de signal OFDM avec modulation QAM 16 a SNR =60	67
Figure 3.25 : Paramètre de la simulation d'un système OFDM avec modulation QAM 64	68
Figure 3.26 : Signal OFDM avec modulation QAM 64 a SNR =5	68
Figure 3.27 : Signal OFDM avec modulation QAM 64 a SNR =15	69
Figure 3.28 : Signal OFDM avec modulation QAM 64 a SNR =60	69
Figure 3.29 : Spectre de signal OFDM avec modulation QAM 64 a SNR =5	70
Figure 3.30 : Spectre de signal OFDM avec modulation QAM 64 a SNR =15	70
Figure 3.31 : Spectre de signal OFDM avec modulation QAM 64 a SNR =60	71
Figure 3.32 : Constellation de signal OFDM avec modulation QAM 64 a SNR =5 ...	72
Figure 3.33 : Constellation de signal OFDM avec modulation QAM 64 a SNR =15 .	72
Figure 3.34 : Constellation de signal OFDM avec modulation QAM 64 a SNR =60 .	73
Figure 3.35 : Paramètre de la simulation d'un système OFDM a déférente M-aire a modulation QAM.....	74
Figure 3.36 : Variation du BER en fonction du SNR pour différentes valeurs de la taille de modulation numérique.	74

Symboles et abréviations

ASK	Amplitude Shift Keying.
FSK	frequency shift keying
BPSK	Binary phase shift keying
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BER	Bit Error Rate
SNR	Signal to Noise Ratio.
OFDM	orthogonal frequency division multiplexing
DAB	Digital Audio Broadcasting
DVB	Digital Video Broadcasting
MIMO-OFDM	Multiple Inputs, Multiple Outputs-OFDM
C-OFDM	Coded orthogonal frequency division multiplexing
FDMA	Frequency Division Multiple Access
DFT	Discret Fourier Transform
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transform
FFT	Fast Fourier Transform
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
GSM	Global System for Mobile communication
ICI	Inter Carrier Interference
ISI	Interférences inter symboles)
LTE	Long Term Evolution
WIMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access.
3G	3ème Génération de téléphone mobile
4G	4ème Génération de téléphone mobile
S / P	Série /Parallèle

Introduction générale :

Au cours des deux dernières décennies, les systèmes de télécommunication, en particulier les systèmes de communication sans fil, ont connu un développement incroyable. Cette évolution va de pair avec l'exploit de l'électronique numérique. Les systèmes de communication sans fil sont presque partout dans nos vies. Dans nos poches, on retrouve des téléphones, des agendas électroniques, des systèmes de positionnement par satellite qui communiquent entre eux et avec le monde extérieur. Toutes les communications sans fil, impliquant liberté, disponibilité et confort, peuvent s'établir grâce au transfert d'informations par ondes hertziennes et ces évolutions visent à améliorer la qualité de service en termes de débit dans le cas d'échange de trafic temps-réel sensible au temps de latence par les abonnés et à augmenter la capacité de gestion du nombre de mobiles dans une même cellule.

Cette forte demande a induit a la nécessiter d'optimisation des technique de Transfert de donnée et l'utilisation de la bande passant , en proposant des techniques de multiplexage afin d'aboutir a une meilleure exploitation des ressources fréquentielles, parmi ces techniques figure la FDMA (frequency division multiple acesse) qu'est la méthode de partage de ressource spectrale la plus ancienne permettant à plusieurs utilisateurs de transmettre en même temps mais sur des fréquences différentes, elle permet de découper la bande de fréquence et attribue à chaque utilisateur une partie de cette bande qu'il peut utiliser a n'importe quelle moment. Cette technique a été utilisé dans la première génération de téléphonie mobile 1G dans les réseaux AMPS. il existe aussi d'autres propositions comme la CDMA (Code Division Multiple Access) qui est une technique très utilisé dans les UMTS , et la technique TDMA (Time Division Multiple Access) qu'est utilisé dans la deuxième génération GSM[14].

L'OFDM (orthogonal frequency deivision multiples) est une technique de transmission numérique qui a été introduit par Robert W.chang de BELLE LABS en 1966 [3], cette technique permet des débits élevés et supprime plusieurs inconvénients de la FDMA. Elle est basée sur l'orthogonalité des signaux qui leur permettent de se chevaucher sans

causer d'interférence et du cout de mieux consommer la bande passante. L'OFDM a été amélioré par Weinstein et Ebert en 1971 avec l'introduction d'un intervalle de garde [14]

La technique OFDM est fortement exploitée dans les applications telles que la télévision numérique (DVB-T ISDB-T) et la diffusion radio, ADSL, réseaux mobile, WIMAX, la 4G, et surtout dans la nouvelle génération 5G [15].

L'OFDMA (orthogonal frequency division multiple access) est un dérivé de L'OFDM optimisé pour l'accès multiple

Le mémoire est organisé comme suit :

Le chapitre 1. Présentation des généralités sur les transmissions numériques

Le chapitre 2. Décrit la technique de modulation multi porteuse OFDM

Le chapitre 3. Analyse des résultats par simulations de la technique OFDM

Une conclusion générale avec des perspectives pour terminer ce manuscrit.



*Chapitre 1 : Généralités sur les
communications numériques*



1.1 Introduction :

Un signal est une grandeur physique qui a pour objet de transporter l'information d'un point A (source) vers un point B(destination), les signaux véhiculés sur un canal de transmission sont de nature analogique mais leur traitement numérique présente un certain nombre d'avantage comme leur souplesse de fonctionnement et mémorisation

Les canaux de transmission sont de type filaire, optique ou hertzien.

Dans ce chapitre on expliquera comment l'information est envoyée a travers le support de transmissions depuis la source jusqu'à la destination et de quelle manière elle est véhiculé, nous présenterons la transmission en band de base et les différents codes en ligne, ainsi que les modulations numériques et les techniques d'accès multiple.

1.2 Chaîne de transmissions numérique :

Les systèmes de transmission numérique véhiculent de l'information entre une source et un destinataire à travers le canal de transmission, La source d'information à transmettre peut-être soit numérique, c'est-à-dire, prenant des valeurs discrètes dans le temps, soit d'origine analogique comme la parole ou l'image, ils doivent être convertis sous une forme numérique avant d'être transmis. La tâche du système de transmission est d'acheminer l'information de la source vers le destinataire avec plus de fiabilité possible [1]. La figure 1.1 représente un modèle d'une chaîne de transmission.

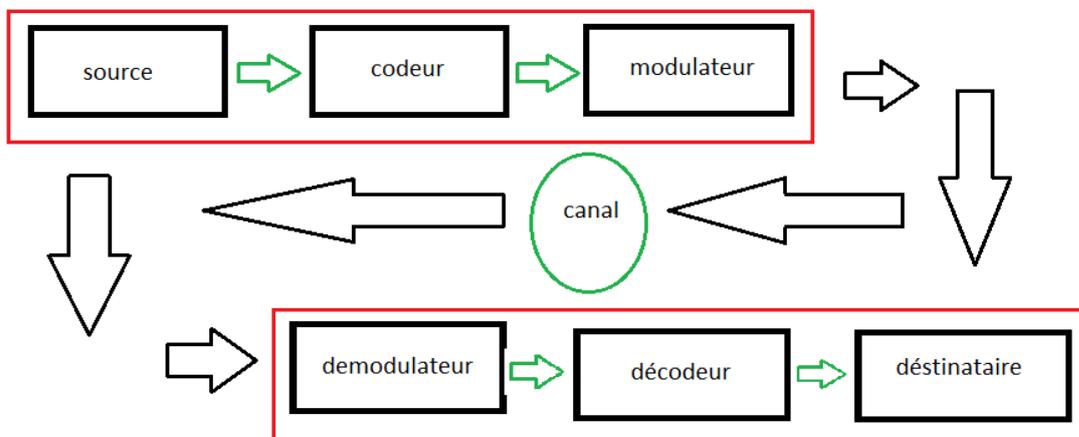


Figure 3.1 Schéma représentant une chaîne de transmission

- **Source** : Émet un message numérique sous la forme d'une suite d'éléments binaires. La source peut être une voix, une l'image, un texte, ou des données informatiques. La sortie d'une source n'est pas connue à priori par le destinataire elle est par nature aléatoire. Néanmoins certains messages déterministes, telles que les séquences pilotes, générés par l'émetteur pour servir au bon fonctionnement du récepteur
- **Codeur** : on code le signal pour que la transmissions soit optimal et fiable et on les code selon nos besoins à deux ou trois niveaux ou plus et selon le codage utilisé (RZ , NRZ, Manchester, Miller ...).
- **Modulateur** : a pour rôle d'adapter le spectre du signal au canal (milieu physique) sur lequel il sera émis. Elle agit sur les paramètres d'un signal porteur (Amplitude,

fréquence ou phase) afin de transmettre les données, le signal ne peut pas être envoyé directement sur le support de transmission car il sera très sensible aux perturbations liées au bruit et sera impossible à distinguer le message envoyé de tous les autres, néanmoins cette méthode existe et appelée transmission en bande de base ,le modulateur module le signal sur une porteuse (un signal a grande fréquence contrôlé par un signal a bas fréquence)

- **Le canal :** Le canal de transmission est le moyen physique permettant de véhiculer un signal de l'émetteur au récepteur, dans les communications sans fil, le canal est l'atmosphère, On sait que le signal émis subi des perturbations lors de sa propagation à travers le canal de transmission, l'objectif est de récupérer l'information transmise avec le moins d'erreurs possibles, Pour cela, le récepteur doit traiter le signal reçu en fonction des perturbations subies par le signal. Il existe plusieurs types de canaux de transmissions, dans cette thèse nous allons nous limiter à l'étude de d'un type de canal qu'est le canal à bruit blanc additif Gaussien (AWGN) [2]

Du côté récepteur, les fonctions de démodulation et de décodage sont les inverses respectifs des fonctions de modulation et de codage situées du côté émetteur.

1.3 Transmission en bande de base :

On parle de transmission en bande de base, lorsqu'aucune opération de modulation n'est appliquée pour la transmission d'un signal, elle est utilisée surtout dans les supports à courte distance par exemple un câble Ethernet, série, etc

Dans cette transmission le signal est directement transmis sur le support, mais n'exclut pas les modifications qui n'ont pas de rapport avec le changement direct du signal comme l'**amplification** du signal et éventuellement une **codification**, les inconvénients majeurs rencontrés dans cette transmission est la limitation de bande passante et la distance de transmission [5].

1.4 Codage de l'information :

Le codage d'information concerne le moyen de formaliser un signal numérique ou analogique en signal à différents niveaux, Il permet d'adapter la forme du signal à la ligne ou plus généralement au milieu de propagation, On fait donc correspondre à chaque niveau logique bas et haut l'état 0 ou l'état 1, la différence de tension entre deux fils et la présence/absence de courant dans un fil sont des exemples fréquents comme le codage RZ NRZ, Miller, AMI..... [6].

Le codage de symbole est dit :

- Unipolaire, si les symboles sont à valeurs positives ou nulles,
- Bipolaire, si les symboles sont de signes opposés
- différentiel ou à mémoire, si les symboles dépendent des symboles précédents

Exemple : codage du signal numérique suivant : {0 1 0 0 1 1 1 0 0}

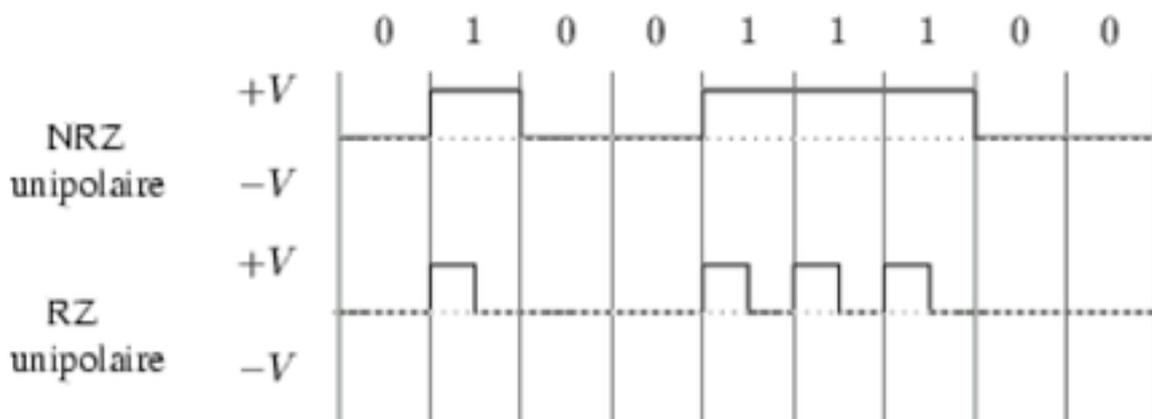


Figure 1.2: Signal coder en NRZ unipolaire et RZ unipolaire

1.5 Choix d'un code en ligne:

Pour la transmission en bande de base appelée aussi codage en ligne, les codes possibles diffèrent par le codage de symbole utilisé et le choix des signaux élémentaires associés au symbole [5]

Le choix d'un code en ligne dépend ainsi :

- De l'occupation spectral ou de la bande passante nécessaire à la transmission du code.
- De l'absence de composante continue autorisant l'utilisation de transformer de couplage.
- De la densité de transition dans le signal émis, Cette propriété permet de récupérer l'horloge afin d'assurer la synchronisation des données entre émetteur et récepteur.
- Du rapport signal sur bruit du canal limitant le nombre de bits par symbole. [5]

1.6 Les différents codes en ligne:

1.6.1 Codage RZ (return to zero):

C'est le type de codage le plus simple, il s'agit de correspondre une tension par exemple de 5v au bit 1 et une tension nulle au bit 0, le signal est ramené à l'état zéro au milieu de chaque période élémentaire T_s , même si deux bites de même valeur se suivent.

Bits	Valeur
1	5v
0	0v

Tableau 1.1 : Distribution du codage RZ unipolaire

Le codage RZ unipolaire est illustré Dans la figure (1.2).

Bipolaire : La polarité s'inverse à chaque fois qu'on a un 1

Bits	Valeur
1	5v/-5v
0	0v

Tableau 1.2 : Distribution du codage RZ unipolaire

Exemple : {0 1 0 0 1 1 1 0} :

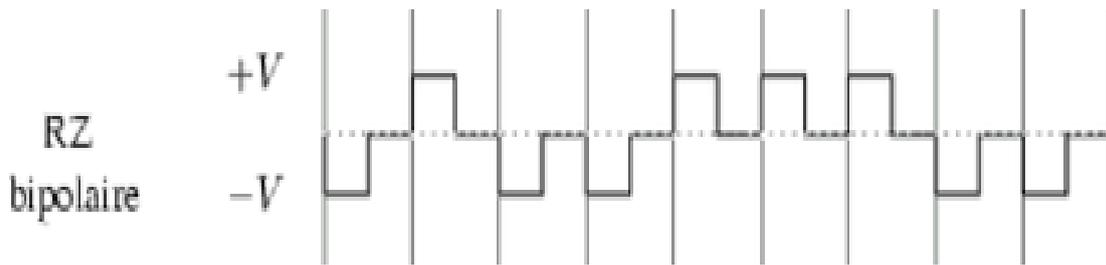


Figure 1.3 Signal coder avec RZ bipolaire

1.6.2 Codage NRZ (no return to zero):

Le principe de ce codage comme l'indique son nom est de ne pas revenir vers zéro qui veut dire que le signal, durant sa période élémentaire T_s d'un symbole, ne revient pas vers zéro.

Bits	Valeur
1	5v
0	0v

Tableau 1.4 : distribution du codage NRZ unipolaire

Le codage NRZ unipolaire est illustré Dans la figure 1.2

Bipolaire : pour le NRZ bipolaire la règle de codage de symbole est représentée par le tableau suivant :

Bits	Valeur
1	$5v/-5v$
0	0v

Tableau 1.5 : distribution du codage NRZ bipolaire

Exemple : {0 1 0 0 1 1 1 0}

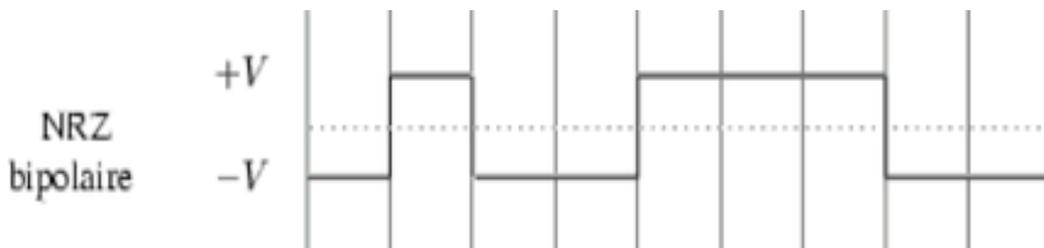


Figure 1.4 : signal coder avec NRZ bipolaire

1.6.3 Codage de Manchester :

Il consiste à faire une transition au milieu de chaque temps élémentaire. La transition positive (fronts montants) est codée par un état logique 1 et la transition négative (Fronts descendants) par un état logique 0.

Bits	Valeur
1	Front montant
0	Front descendant

Tableau 1.6 : distribution du codage Manchester

Exemple : {0 1 0 0 1 1 1 0}

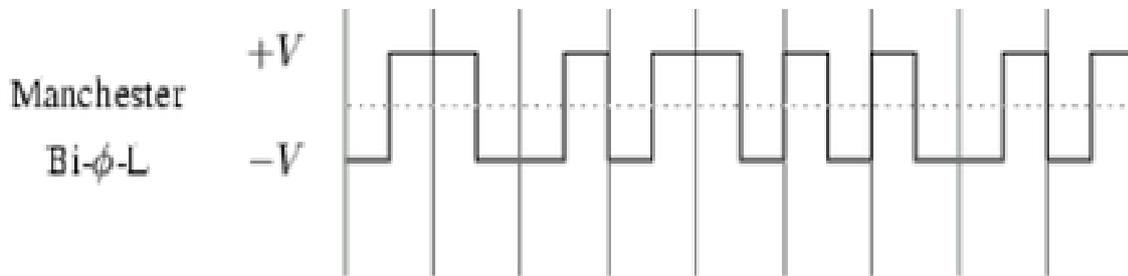


Figure 1.5 : Signal coder avec Manchester (biphasé)

1.7 Modulation numérique :

Le but de la modulation est d'adapter le signal à envoyer au canal de transmission et d'associer un signal analogique à chaque valeur de bit ou à un groupe de bits pour l'adapter au canal de communication (analogique). Cette opération consiste à modifier un ou plusieurs paramètres de la porteuse :

$$s(t) = A \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + \varphi_0)$$

On peut changer trois paramètres :

Son amplitude : A

Sa phase : φ_0

Sa fréquence : $f = \frac{\omega}{2\pi}$

Dans les procédés de modulation binaire, l'information est transmise à l'aide d'un paramètre qui ne prend que deux valeurs possibles. Dans les procédés de modulation M-aire, l'information est transmise à l'aide d'un paramètre qui prend M valeurs. Ceci permet d'associer à un état de modulation un mot de n digits binaires. Le nombre d'états est donc $M = 2^n$. Ces n digits proviennent du découpage en paquets de n digits du train binaire issu du codeur [7]

1.7.1 Caractéristiques d'une modulation numérique :

- Debit binaire: se définit comme étant le nombre de bits transmis par seconde, il sera égal ou supérieur a la rapidité de modulation $D = \frac{1}{T_b}$ bits/s
- Rapidité de modulation : se définit comme étant le nombre de changements d'états par seconde d'un ou de plusieurs paramètres modifiés simultanément : $R = \frac{1}{T}$ Baudes
- Efficacité spectrale : $\eta = \frac{D}{B} = \frac{\text{debit binaire}}{\text{band occupée autour de la porteuse}}$
- Taux d'erreur bits ou (BER) : La qualité d'une liaison est liée au taux d'erreur par bit : $TEB = \frac{\text{nombre d'éléments binaires faux}}{\text{nombre d'éléments émis}}$
- Capacité : $c = B \cdot \log_2(1 + SNR)$

1.7.2 Modulations ASK :

La modulation par déplacement d'amplitude (MDA) ou communément appelé modulation ask (*amplitude-shift keying*) est la technique de modulation numérique la plus simple, où un signal d'information binaire module directement l'amplitude d'une porteuse analogique, elle consiste à varier l'amplitude du signal mathématiquement :

$$v(t) = a(t) A_p \cos(2\pi f t + \varphi) \quad \text{avec } a(t) = \sum_k a_k \text{rect}(t - kt)$$

$a(t)$: correspondre à un codage binaire ou M-aire

$v(t)$: signal modulé

A_p : amplitude de la porteuse

- Amplitude $A(t) = A_0 = A_p/2$ pour transmettre un bit à «0»
- Amplitude $A(t) = A_1 = A_p$ pour transmettre un bit à «1»

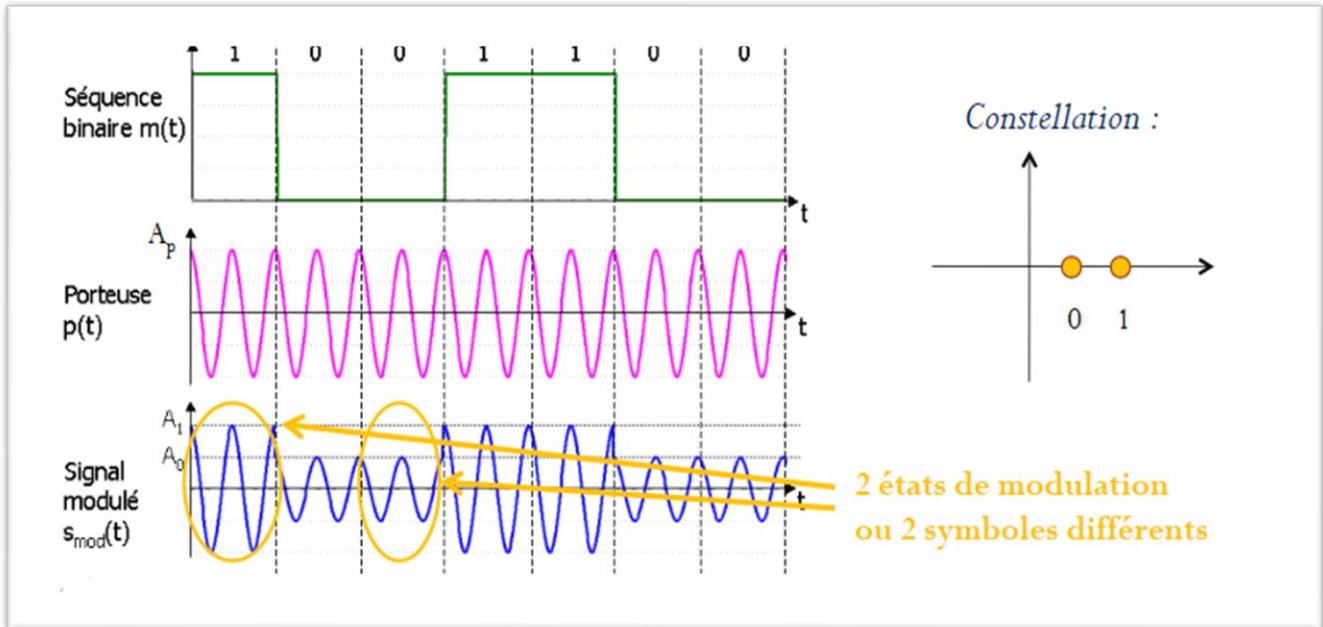


Figure 1.7 : Exemple d'une modulation ASK a deux états et sa constellation

Il faut noter que la modulation d'amplitude est la seule utilisable sur fibre optique, car les équipements utilisés actuellement ne sont pas en mesure d'appliquer une autre modulation sur les ondes lumineuses. Dans ce cas, la modulation s'effectue par tout ou rien (OOK ou ON/OFF shift keying). Par contre, elle est peu employée sur d'autres supports car elle provoque une détérioration du rapport signal sur bruit

1.7.3 Modulation PSK :

La Phase Shift Keying ou modulation par déplacement de phase consiste à varier la phase φ_n dans un signal comme suite :

$$v(t) = a(t) A_p \cos(2\pi ft + \varphi_n)$$

Ici la phase prend l'état 1 et 0 c'est à dire :

- 0 en phase avec la porteuse $\varphi_n = 0$
- 1 déphasage de π par rapport à la porteuse $\varphi_n = \pi$

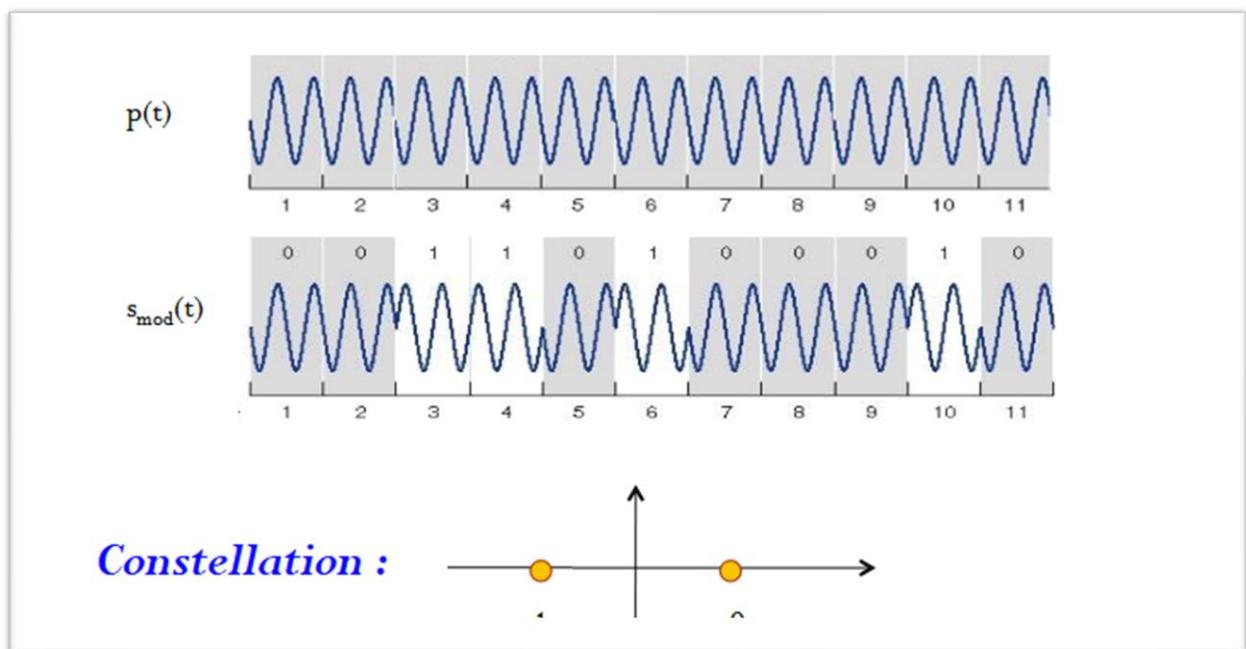


Figure 1.8 : Exemple d'une modulation PSK a deux états et sa constellation

La modulation PSK peut se faire à plusieurs états comme $M = 2^n$ M représente le nombre d'états et n le nombre de bites

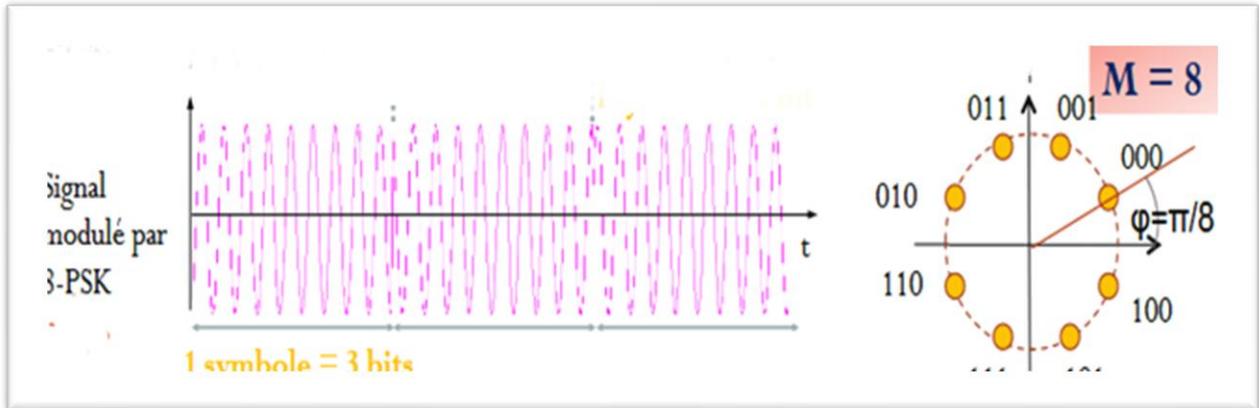


Figure 1.9 : Exemple d'une modulation 8-PSK et sa constellation

1.7.4 Modulation FSK :

Modulation par déplacement de fréquence ou *Frequency Shift Keying* est la plus couramment utilisée, elle consiste à émettre un signal à amplitude constante et associe à chaque symbole une valeur de fréquence différente (figure 1.10), il n'y a pas de diagramme de constellation, car la phase varie de manière continue, généralement en modulation numérique, on module un signal binaire appelé BFSK à phase continue.

Le signal modulé s'écrit sous la forme suivante :

$$v(t) = A_p \cos(2\pi f_p t + \varphi) \rightarrow \begin{cases} s_0 = A \cos[2\pi f_0 t + \varphi] \\ s_1 = A \cos[2\pi f_1 t + \varphi] \end{cases}$$

f_p est la fréquence centrale de la porteuse c'est à dire :

$$\begin{cases} f_0 = [f_p - \Delta f] \\ f_1 = [f_p + \Delta f] \end{cases}$$

Δf = changement de crête (décalage) dans la fréquence porteuse analogique :

- Bit 1 → fréquence f_1
- Bit 0 → fréquence f_0

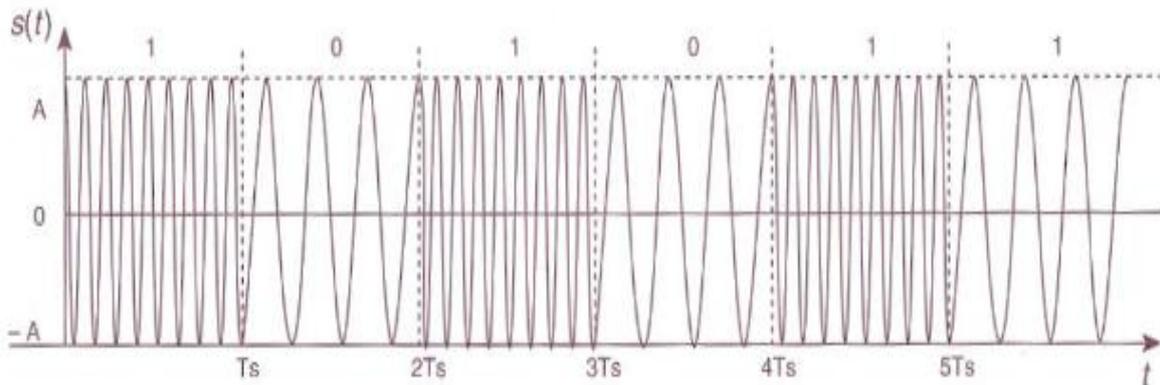


Figure 1.10 : Exemple d'une modulation FSK à deux états

1.7.5 Modulation QAM :

Les modulations QAM (Quadrature - Amplitude - Modulation) est une évolution de M-PSK ici la phase et l'amplitude d'une porteuse varient à chaque changement de symbole, Cette modulation est très utilisée dans le domaine de télévision et dans la norme DVB-T de la télévision numérique (TNT), en général sur la TNT on utilise 64-QAM cette modulation permet un débit très élevé [8]

Un exemple de la modulation QAM est la modulation QAM à seize états. La 16 QAM utilise 4 bits par symbole, 2 bits sur i et deux bits sur Q. La valeur de i peut être une des 4 amplitudes possibles. Il en est de même pour la valeur de Q. La constellation comporte 16 points ($2^4=16$).

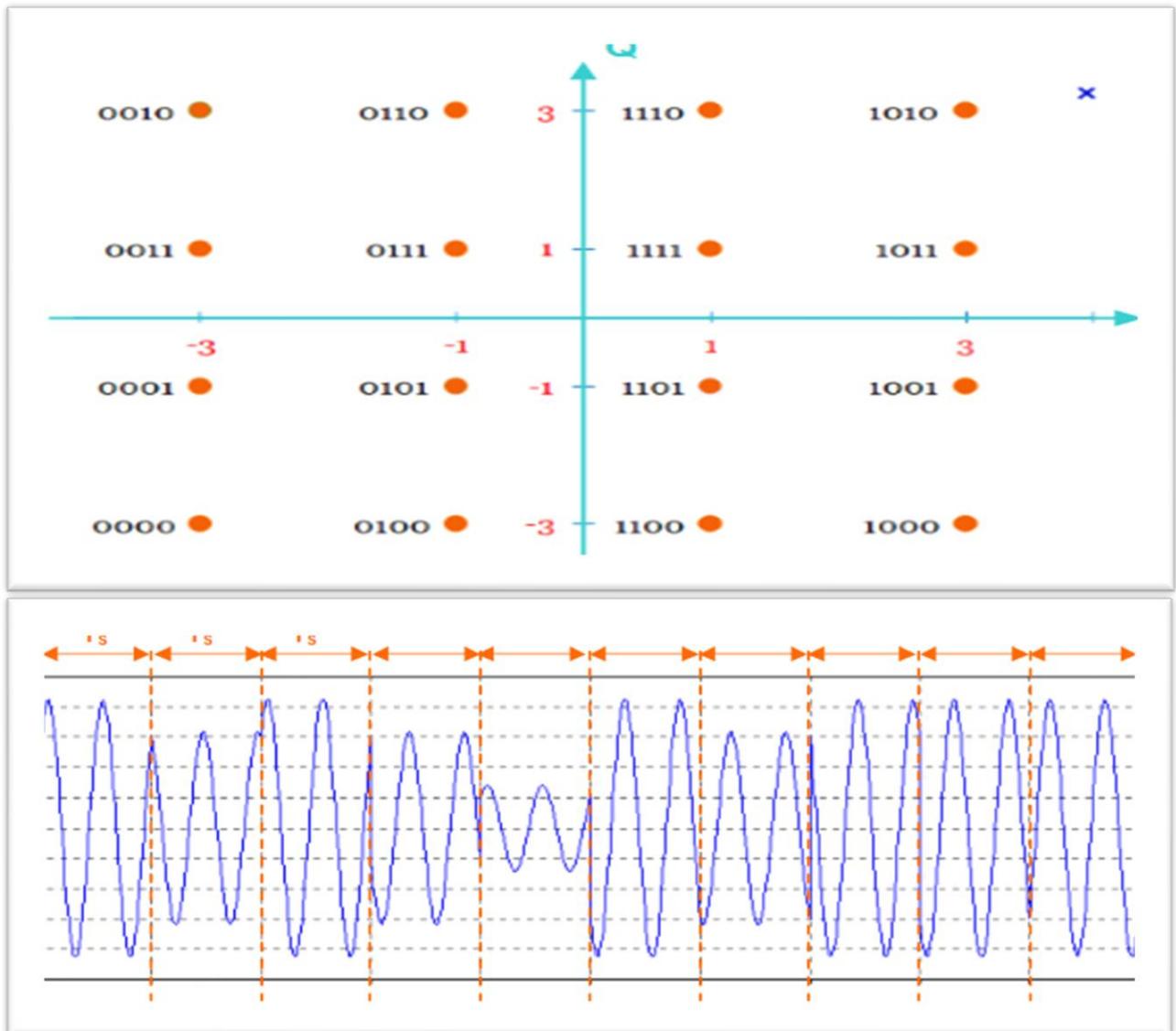


Figure 1.11 : Allure d'un signal modulé a 16-QAM et sa constellation

L'intérêt majeur des techniques de modulations numériques, réside dans la possibilité de leur insertion harmonieuse dans les réseaux intégrés numériques qui se développent de jour en jour. Un autre avantage réside dans la possibilité de conserver l'intégrité de l'information à transmettre, ce qui est tout à fait impossible avec une transmission analogique. Les systèmes modernes de communication numérique sont complexes et requièrent des circuits de modulation et de démodulation de plus en plus sophistiqués.

1.8 Technique d'Accès multiples en communication numérique :

Le principal problème de transmission en téléphonie mobile est le partage de l'espace des canaux de transmission. En effet, l'environnement est le même pour tous les utilisateurs, l'espace des fréquences disponibles est restreint et de plus le milieu est bruité. Pour une utilisation efficace des ressources disponibles, les utilisateurs des systèmes de communication sont amenés à y accéder en même temps. Ceci pose le problème d'accès multiples qui consiste à examiner comment organiser l'accès d'un nombre important d'utilisateurs à une ressource commune. Les techniques d'accès multiples se répartissent en trois grandes catégories :

- Accès multiple par une répartition de fréquences (Frequency Division Multiple Access : FDMA).
- Accès multiple par une répartition dans le temps (Time Division Multiple Access : TDMA).
- Accès multiple par une répartition des codes (Code Division Multiple Access : CDMA)

1.8.1 Multiplexage

C'est un moyen d'envoyer simultanément plusieurs signaux ou flux d'informations sur une même liaison de communication, sous la forme d'un signal unique et complexe. Le récepteur récupère alors les signaux multiples séparément, processus appelé *démultiplexage* (ou *demuxing*).[11]

1.8.2 Accès multiple

Dès lors qu'il y a multiplexage et donc partage des ressources, il convient de définir des moyens techniques pour permettre à diverses unités d'accéder à ces ressources individuelles. On parle de méthodes d'accès telles que la FDMA, TDMA, CDMA, des

stratégies pour disposer du canal. C'est par le biais des stratégies qu'on espère atteindre en haut de la performance (haut débit, faible délai, faible taux de congestion.)[11]

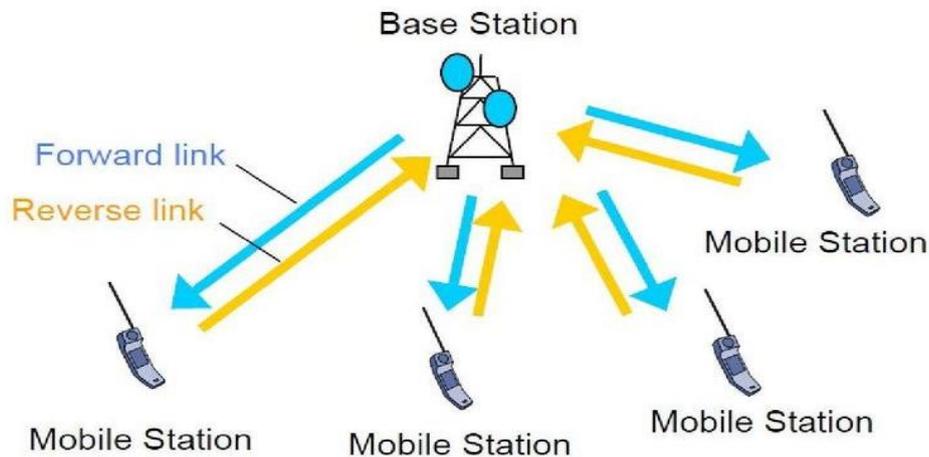


Figure 1.12 : Représentation d'un exemple d'accès multiple

1.8.3 Time Division Multiple Access (TDMA) :

L'accès Multiple à Répartition de temp (AMRT),est une technique qui permet à plusieurs utilisateurs d'occuper la même bande de fréquences mais durant un intervalle de temps précis appelé 'time Slot', chaque utilisateur se voie donc attribuer un Time slot d'une durée T_s pendant lequel il peut transmettre ses données [6], cette technique permet d'avoir une capacité satisfaisante en matière d'utilisateurs, Ce mode oblige les machines à être synchronisées (à avoir un temps global) jusqu'au dernier utilisateur et la même stratégie se répète, ce qui forme un cycle synchronisé et offre un débit selon le nombre d'utilisateurs et l'absence total de collision

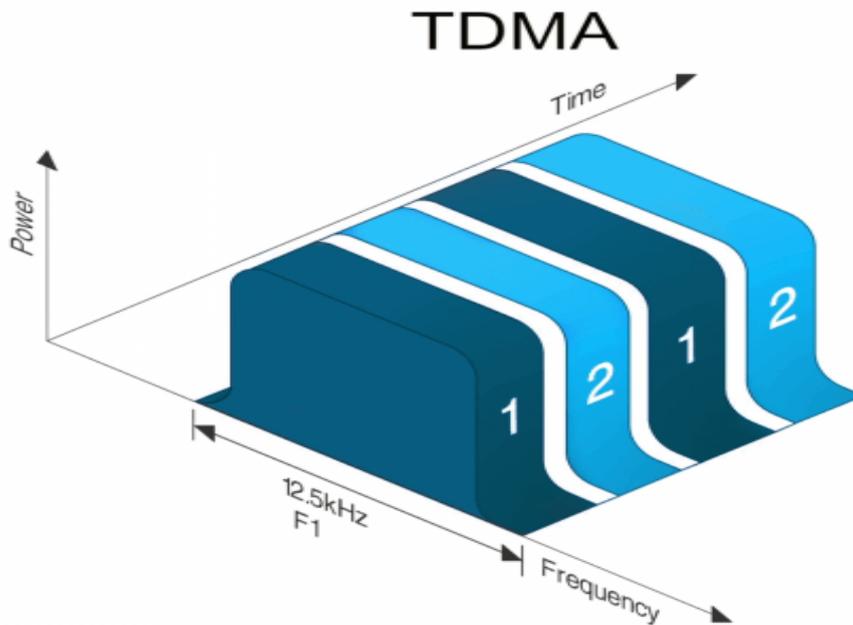


Figure 1.13 : Technique d'accès TDMA

De nombreux systèmes de communication numérique, tels que le système mondial européen de communications mobiles (GSM), utilisent l'accès multiple par répartition dans le temps (TDMA). Cette technologie est également incluse dans le deuxième système de communication cellulaire japonais (JPDC) standard largement utilisé. En raison de la rareté des ressources spectrales, deux technologies sont généralement combinées TDMA/FDMA.

Les caractéristiques de la stratégie TDMA sont :

- Fréquence porteuse unique avec plusieurs utilisateurs.
- Non-transmission continue, transfert plus simple.
- Le slot peut être attribué sur demande de la TDMA dynamique.
- Diminution des interférences intra cellulaires.
- TDMA ne nécessite pas de réduction de puissance.
- Un utilisateur occupe la presque totalité de la bande passante.
- La légalisation avancée est nécessaire pour les hauts débits

1.8.4 Code division multiple access (CDMA):

La CDMA permet à tous les utilisateurs de transmettre simultanément dans une même bande de fréquence au cours du temps. Ainsi, toute la bande de fréquence est exploitée de manière optimale et chaque utilisateur a un code d'étalement spécifique à lui pour qu'on puisse l'identifier à la réception.

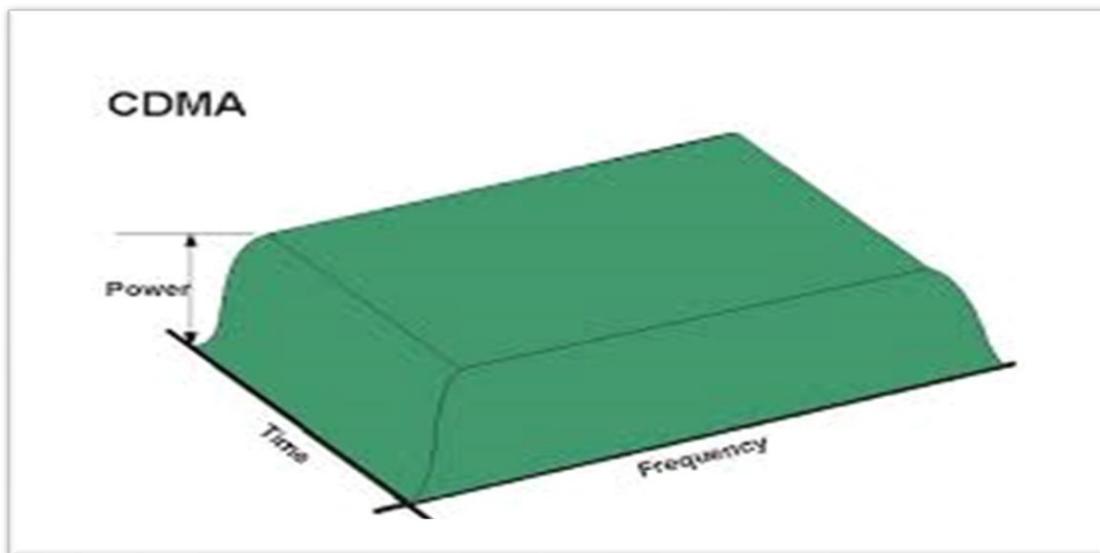


Figure 1.14 Technique d'accès CDMA

Pour que la technique d'étalement de spectre soit possible, il faut que les signaux émis par les différents utilisateurs disposent d'une certaine propriété permettant de les dissocier, alors chaque utilisateur se voit attribuer pendant la durée de la communication un code spécifique, contrairement à d'autres techniques, la capacité d'un nombre d'utilisateurs n'est pas définie par les ressources temporelles ou fréquentielles, le nombre d'utilisateurs en CDMA est défini par les propriétés des codes d'étalement utilisés.

Dans les systèmes CDMA afin de restituer correctement les informations relatives à chaque utilisateur, il est important que les signaux des différents usagers soient le plus décorrélés possible les uns des autres, pour cela on a choisi judicieusement les codes

d'étalement qui seront attribués au différent utilisateur en fonction des caractéristiques de la communication , ainsi pour un canal BBAG non sélectif , les performances optimales sont atteintes en utilisant des codes orthogonaux (des code qui ne contiennent aucune corrélation entre eux), afin d'éviter toute interférence, tels que les code de Walsh-Hadamard ou les codes de type Ovsf (orthogonal variable spreading factor) ,par contre en présence d'un canal sélectif en fréquence ou en temps, ont utilisé d'autre famille de code qui permet de se rapprocher des performances optimales ,par exemple les codes de gold ,kasami ,zadoff-chu [20]

1.8.5 Frequency division multiple access (FDMA):

Accès Multiple à Répartition de Fréquence (AMRF) consiste à diviser le spectre disponible en bandes de fréquences et à les allouer à des communications sur toute leur durée. Chaque bande de fréquence ainsi créée est allouée à un utilisateur du système. C'est Ainsi de diviser la bande passante du support de communication en bande de fréquence distinctes. On émettra les données du canal A dans la bande 1, celles du canal B dans la bande 2 (figure 1.15), tous les terminaux peuvent émettre en même temps. C'est sur cette technique que sont basés les systèmes de communications analogiques de la première génération de téléphones mobiles tels que l'AMPS (Advanced Mobile Phone Services) Le spectre disponible sera divisé comme l'illustre l'image suivante :

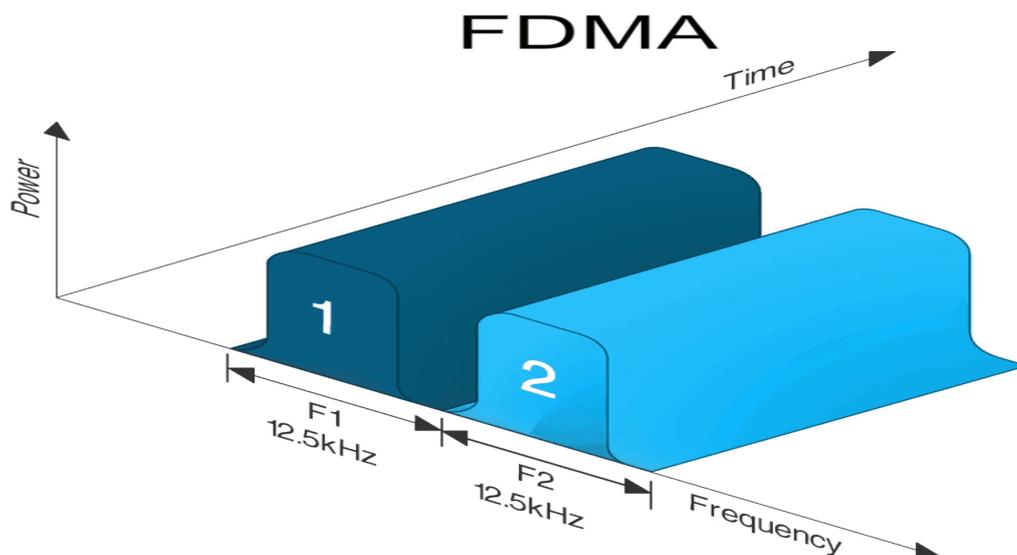


Figure 1.15 : Technique d'accès FDMA

La FDMA attribue un canal individuel à chaque utilisateur sur la bande passante acquise, chaque utilisateur peut utiliser une partie du spectre en même temps que les autres et sans les affecter, La FDMA est utilisée par les systèmes analogiques tels que AMPS, NMT ou Radiocom 2000. Les avantages de la FDMA [10] sont les suivants :

- La complexité des systèmes FDMA est inférieure à celle des systèmes TDMA et CDMA, bien que cette situation change à mesure que les méthodes de traitement numérique des signaux s'améliorent pour la TDMA et la CDMA.
- C'est techniquement simple à mettre en œuvre
- Une augmentation de capacité peut être obtenue en réduisant le débit binaire de l'information et en utilisant des codes numériques efficaces.
- Étant donné que la FDMA est un système de transmission continue, il faut moins de bits pour les frais généraux que la TDMA.

La FDMA a aussi des inconvénients que on va essayer de résoudre à travers ce mémoire, parmi ceux-ci, nous distinguons :

- Seules de modestes améliorations de la capacité pourraient être attendues d'une attribution de spectre donnée.
- La FDMA gaspille de la bande passante. Si un canal de la FDMA n'est pas utilisé, il reste inactif et ne peut pas être utilisé par d'autres utilisateurs pour augmenter ou partager la capacité
- Les systèmes FDMA coûtent plus cher que les systèmes TDMA en raison de la nécessité d'utiliser des filtres passe-bande coûteux pour éliminer les rayonnements parasites à la station de base.
- L'unité mobile FDMA utilise des duplexeurs puisque l'émetteur et le récepteur fonctionnent en même temps. Un duplexeur ajoute du poids, de la taille et des coûts à un émetteur radio et peut limiter la taille minimale d'une unité d'abonné.

- Le FDMA nécessite un filtrage RF serré pour minimiser les interférences des canaux adjacents.
- La FDMA utilise un système de guard band qui sépare chaque canal sur la bande passante (spectre) d'un autre pour que les deux canaux n'interfèrent pas entre eux comme le montre la figure 1.16.

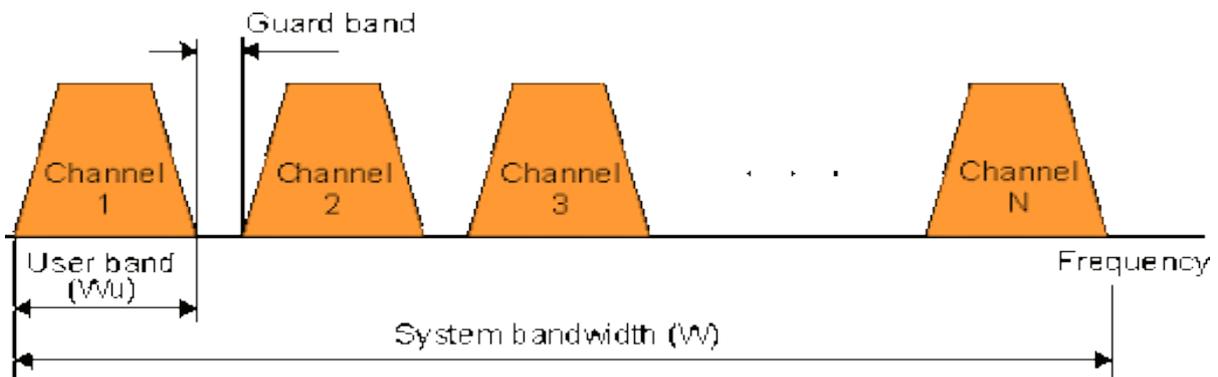


Figure 1.16 : Schéma représentant le découpage de la bande de fréquence en FDMA

Il existe un gaspillage non négligeable dans la bande passante, la Guard band qui est réservée pour que les canaux (channel) n'interfèrent pas entre eux, il s'agit d'une gamme de fréquences étroite utilisée pour séparer deux gammes de fréquences plus larges afin d'assurer que les deux utilisateurs peuvent transmettre simultanément sans interférence, le problème du gaspillage dans la bande de fréquences peut être évité par l'utilisation de la modulation multi porteuse OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

1.9 Conclusion :

Nous avons présenté, dans ce chapitre, la chaîne représentative d'une transmission numérique et l'intérêt de la modulation dans la transmission d'un signal sur un canal de transmission, on a présenté, également, les prérequis sur un système de transmission à savoir les différents équipements et étapes que doit emprunter une information qui transite par un canal de transmission, ensuite, on a montré les différents codages en ligne relatifs à l'envoi d'une information ainsi que les différents types de modulation ASK, FSK, PSK et QAM.

On a introduit le principe du multiplexage et d'accès multiple tels que TDMA, CDMA, FDMA, dans cette dernière on a évoqué plusieurs problèmes, plus particulièrement le problème de la Guard band, comment les résoudre par l'OFDM qui va faire l'objet du chapitre 2



*Chapitre 2 : Modulation multi
porteuse OFDM*



2.1 Introduction :

La technique d'Accès Multiple à Répartition de Fréquence (FDMA) est la plus ancienne des technique elle est simple à mettre en œuvre et moins complexe comparer à d'autre technique , on 'a aussi vu la technique d'Accès multiple a répartition dans le Temp et on 'a dit que généralement ces deux technique son combiner pour optimiser la consommation de la chaque canal , néanmoins comme on la vue dans le chapitre 1 elle a plusieurs inconvenient, principalement la guard band qui est une source de gaspillage de bande passante , L'OFDM a été introduit dans les années 1950 mais a été mis en œuvre dans les années 1960 pour pallier aux problème de la FDMA. Il a été initialement développé à partir des techniques de modulation multi-porteuse utilisée dans les radios militaires en haute fréquence.

L'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) est une technique de multiplexage dont le principe est basé sur la modulation multi-porteuse pour transmettre en parallèle plusieurs symboles, l'OFDM est une réalisation efficace de la communication par modulation multi-porteuse qui satisfasse les conditions d'orthogonalité permettant a plusieurs signaux de se chevaucher sans pour autant interféré entre eux qui de cela enlève complètement la nécessiter d'une guard band dans la bande passante, L'OFDMA et SC-FDMA sont des technique tirée à partir de l'OFDM qui sont très utiliser dans les réseaux de téléphonie mobile de 4eme et 5eme génération, 5g new radio, wimax ,LTE advanced [10]

L'utilisation effective généralisée de l'OFDM a commencé après la transformée de Fourier discrète inverse (IDFT) et transformée de Fourier discrète (DFT), dans ce chapitre 2 en expliquera le fonctionnement de cette technique.

2.2 Canal multi-trajets :

Le effet multi-trajets ou multipath est un phénomène en télécommunication des réseaux sans fils très courant qui se produit entre l'émetteur et le récepteur qui consiste à ce que le signal émis se propage dans différentes trajectoire qui seront récupère par le récepteur , au moment de l'émission les onde qui se propage dans différente direction subisse de nombreuse réflexions en particulier dans un milieu urbain et le récepteur reçoit une série d'échos d'amplitude variables et ce qui conduit aussi à l'introduction de retards entre chaque échos variable cette problématique est critique dans un canal radio mobile [12].

2.2.1 Caractéristiques d'un canal multi-trajets :

a- Fonction de Transfert du canal :

Supposons un signal qui s'écrit comme suivant :

$$s(t) = Re[s_1(t). e^{2j\pi f_c t}]$$

- f_c est la fréquence de la porteuse
- $S_1(t)$ sont les différents signaux issus des chemins
- $S(t)$ le signal réel transposé en fréquence

Le signal qui doit être reçu par le récepteur doit être la somme de tous les signaux échos résultants de l'effet multi-trajet qui s'écrit comme suite :

$$R(t) = \sum A_n (t). s(t - \tau_n(t))$$

- A_n est l'amplitude
- τ_n est le retard variant

Chaque chemin provoque alors une atténuation A_n et un retard τ_n qui varie selon chaque chemin par rapport au temp, la fonction peut s'écrire aussi sous la forme de [12] :

$$R(t) = Re[\sum [a_n(t) \cdot e^{-2j\pi f_c \tau_n(t)} s(t - \tau_n(t))] e^{2j\pi f_c \tau_n(t)}]$$

Cette dernière expression montre qu'en plus des atténuations de A_n et de retard τ_n , elle subit aussi des déphasages tous liés au temp

A partir de cette expression on peut définir sa fonction de Transfer comme suite :

$$h(t, \tau) = \sum A_n(t) \cdot e^{-2j\pi f_c \tau_n(t)} \delta(t - \tau_n(t))$$

b- L'étalement des retards :

Lors d'une transmission sur le canal multi-trajets des atténuations ou évanouissements affectent la puissance du signal, ce dernier ayant emprunté plusieurs trajectoires, arrive au récepteur de différents chemins à temp de retard variés, l'étalement temporel T_m est définie par la différence entre le retard le plus long T_{max} et le retard le plus court T_{min} de sorte que $T_m = (T_{max} - T_{min})$ [10].

Cet intervalle de $[T_{min}, T_{max}]$ correspond au temp pendant le quelle la réponse impulsionnelle n'est pas nulle.

A la réception en comparant l'étalement du retard avec la durée T_s d'un symbole on peut alors déterminer si il y'aura interférence entre symboles, si $T_s \gg T_m$ le retard sera négligeable sur ce symbole si $T_s = T_m$ alors il y'aura interférence entre symboles et plus T_s sera de même ordre que T_m ou inférieur plus les interférences seront importantes [12].

c- L'effet Doppler :

Dans les réseaux mobiles souvent l'émetteur et le récepteur sont en mouvement, ce qui fait qu'il est caractérisé par une vitesse angulaire constante ou variable, on suppose constante, alors le signal émis subit un décalage constant de fréquence due à la vitesse de déplacement par rapport au milieu statique on appelle ce phénomène l'effet doppler qui sera proportionnel à la vitesse et la fréquence de la porteuse, ce cas est présent couramment pour le récepteur mobile [12].

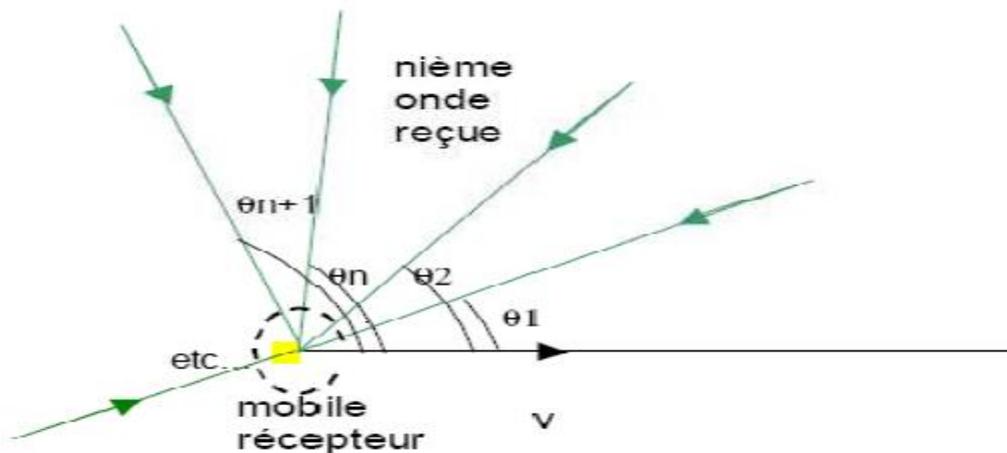


Figure 4.1 Effet doppler sur un récepteur mobile

Pour un récepteur l'onde qui subit un effet doppler il lui parviendra avec une porteuse sous différentes fréquences décalées d'une valeur dépendante de l'angle de réception et la vitesse du mobile

2.3 Notion de Modulation multi-porteuses :

Le principe de modulation multi-poteuse est d'envoyer simultanément plusieurs symboles en parallèle, L'implémentation de la modulation et de la démodulation se fait à l'aide de la transformée de Fourier rapide FFT (Fast Fourier Transforme)

Single carrier : la modulation classique

Multi carrier : modulation a multi-porteuse

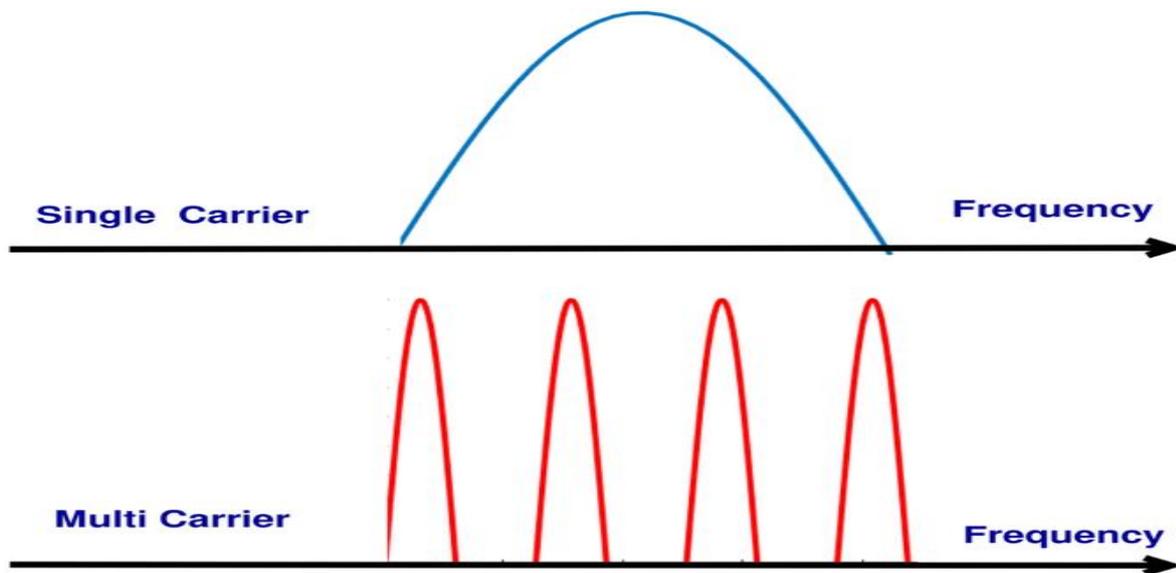


Figure 2.2 : Différence entre une modulation classique et une modulation multi-porteuse

Le principe des modulations multi-porteuses est de transmettre simultanément plusieurs symboles en parallèle. La technique simple de multiplexage par division de fréquence (FDM) à deux inconvénients principaux, le premier étant une basse efficacité spectrale et le second étant une difficulté technologique de mettre en application un grand nombre de filtres assortis (un pour chaque fréquence porteuse), Par conséquent, pour éviter le premier inconvénient, nous utilisons une autre solution qui consiste à tolérer un chevauchement entre les spectres des signaux émis, à condition que l'orthogonalité entre les sous porteuses soit satisfaite, ce qui garantit l'absence d'interférence entre les différentes porteuses. Pour que le signal modulé ait une grande efficacité spectrale, il faut que les fréquences des porteuses soient les plus proches possibles, tout en

garantissant que le récepteur soit capable de les séparer et de retrouver le symbole numérique émis sur chacune d'entre elles, d'où la nécessité d'utiliser des porteuses *orthogonales*. L'OFDM est une réalisation efficace de communication en modulation multi-porteuse, dans lequel les sous-porteuses satisfont à cette condition d'orthogonalité. Comparé à d'autres modulations multi-porteuses OFDM économiser la bande passante en permettant le spectre de sous-porteuse à se chevaucher, comparer a d'autre technique l OFDM optimise au maximum la consommation du spectre sans pour autant crée des interférences Dans cette étude nous nous intéresseront à cette technique.

2.4 Notion d'orthogonalité :

L'orthogonalité est un mot qui s'applique sur deux entités qui veut dire qu'une entité A est indépendante d'une entité B, en d'autre terme, il n'existe pas une quelconque corrélation entre c'est deux entités. En géométrie l'orthogonalité est liée à l'existence de deux droites qui sont perpendiculaires entre elles dans le même plan.

L'orthogonalité est un outil puissant dans de nombreux domaines comme la télécommunication, on utilise les signaux orthogonaux pour éviter toute interférences, ce résultat est obtenu en laissant un écart de fréquence entre chaque signal égal à la fréquence des symboles.

On définit mathématiquement l'orthogonalité de deux fonctions $s_1(t)$ et $s_2(t)$ dans l'intervalle $[a,b]$ par la relation suivante :

$$\int_b^a s_1(t).s_2(t)dt = 0$$

Cela signifie qu'entre $s_1(t)$ et $s_2(t)$ il n'existe aucune corrélation

2.5 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) :

2.5.1 Technique de modulation OFDM :

L'OFDM est basée sur le principe de la modulation à multi porteuse qui consiste à répartir un signal numérique que on veut transmettre sur un très grand nombre de sous porteuse orthogonales, les sous-porteuse orthogonal offrent un avantage considérable en les rapprochant le près possible est ainsi les chevaucher sans pour autant crée d'interférence comme le montre la figure 2.3 , on utilise les porteuse orthogonales dans le but de transmettre un maximum d'information sur une bande de fréquence et de limiter le gaspillage de du spectre

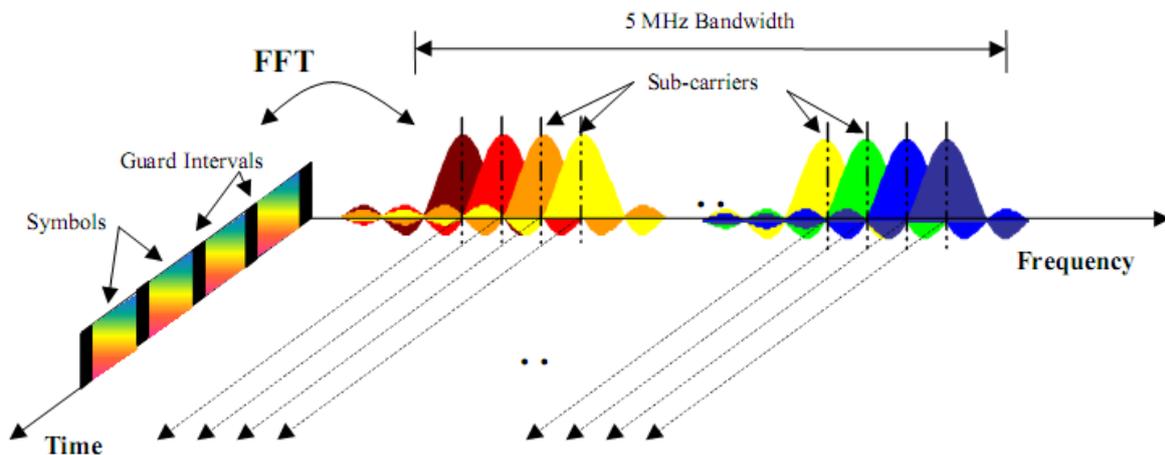


Figure 2.3 : Allure d'un signal OFDM

Le synoptique de la figure 2.4 illustre les différents modules qui composent la chaîne de transmission OFDM. Le modulateur transforme les données binaires b_i de durée T_b en symboles complexes X_k de durée T_q . Le convertisseur série-parallèle dispose les symboles X_k en groupes (trames) de N symboles, la durée d'une trame T_u est N fois plus grande que la durée d'un symbole en série T_q . Par conséquent, l'effet de canal devient moins nuisible. En appliquant ensuite une transformée de Fourier inverse, on obtient la trame (symbole) OFDM. L'IFFT est utilisée afin de transformer le spectre du signal OFDM au domaine temporel pour la transmission à travers le canal. Un préfixe cyclique de durée T_g copie les N_g derniers symboles de la trame OFDM, et les ajoute

ensuite au début de la trame. Après conversion parallèle-série, on obtient enfin le symbole OFDM, qui contient $N_s = N + N_g$ symboles de durée totale $T_s = T_u + T_g$ que l'on transmet à travers un canal

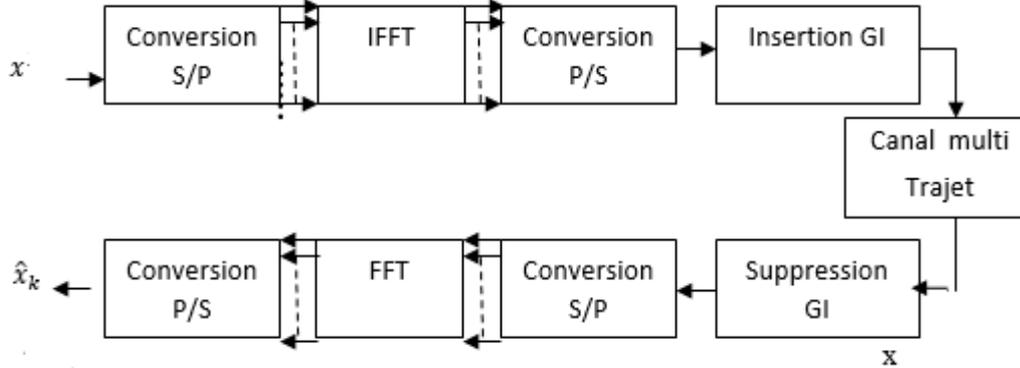


Figure 2.4 : Chaîne de transmission OFDM réduite

2.5.2 Principe de modulation multi-porteuse OFDM :

Le principe du multiplexage en fréquence est de regrouper un ensemble de données numériques par groupe de N que l'on appellera symbole OFDM et de moduler chaque symbole par une porteuse différente de l'autre en même temps (multi carrier)

Prenons un exemple une séquence de données $N = \{C_1, C_2, \dots, C_{N-1}\}$

Appelons T_s la durée du symbole qui est la durée qui sépare deux symboles

Alors chaque signal individuel s'écrit sous la forme : $c_k e^{2j\pi f_k t}$

Le signal total $S(t)$ est la somme de tous les signaux individuels de chaque C_k (symbole OFDM) qui s'écrit comme suit :

$$S(t) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{2j\pi f_k t}$$

Le multiplexage est dit orthogonal si l'espace entre les fréquences est de $1/T_s$:

$$f_k = f_0 + \frac{k}{T_s} \text{ et } S(t) = e^{2j\pi f_0 t} \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{2j\pi \frac{kt}{T_s} t}$$

Schéma qui représente le principe de la modulation :

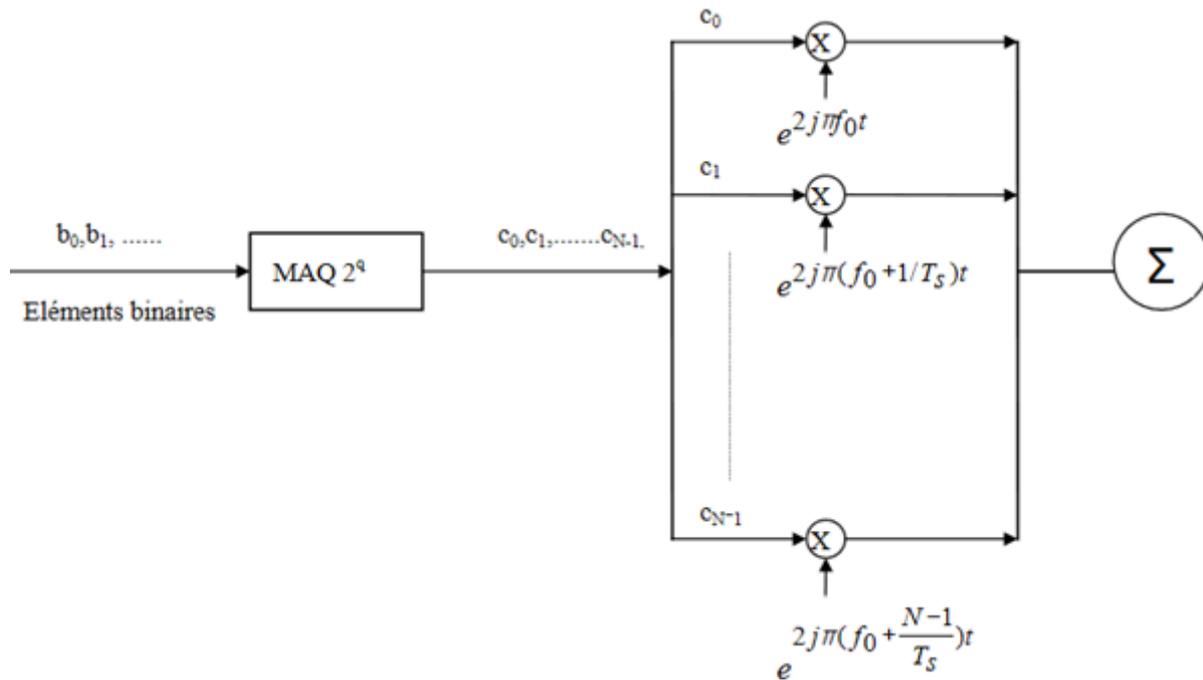


Figure 2.5 : Schéma du principe de la modulation OFDM

Les données numériques C_k sont des nombres complexes par les éléments d'une constellation de modulation QAM ou BPSK à plusieurs états (4, 16, ... en général 2^n) ces données sont des symboles M-aires (que nous évoquerons dans le chapitre 1), formés par un groupement de m bits à ne pas confondre avec les symboles OFDM qui est un regroupement de N symboles numériques de N portuses.

Les systèmes à portuses multiples, tels que le multiplexage en fréquence (FDM), modulent les différentes sous-portuses de symboles spectralement distinctes pour éviter les interférences portuses, au prix d'une perte de bande passante.

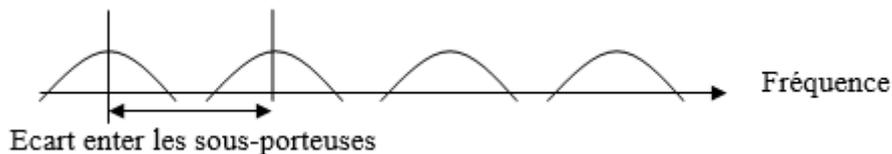


Figure 2.6 : Multiplexage FDM

2.5.3 OFDM et orthogonalité :

En déterminant le spectre de signal de chaque porteuse on obtient ;

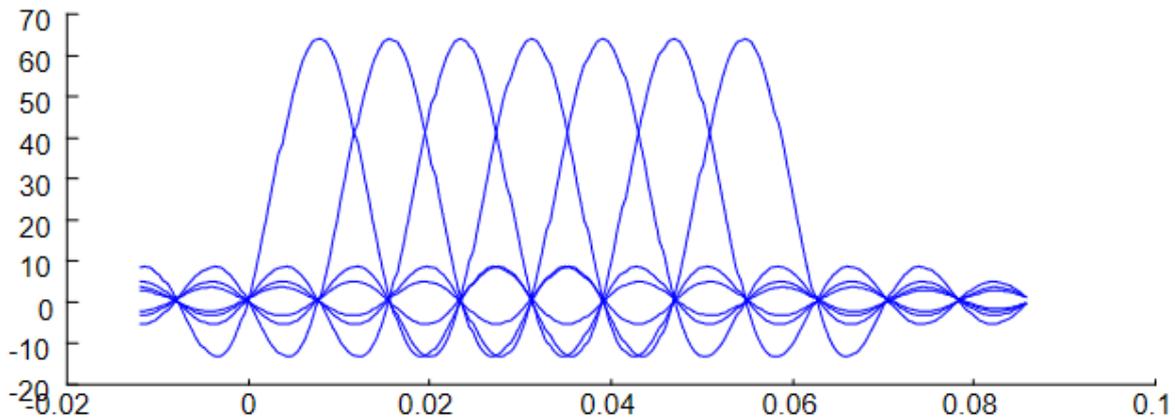


Figure 2.7 : Spectre de signal de plusieurs sous-porteuses OFDM

Chaque porteuse modulant une donnée pendant une fenêtre de durée T_s , son spectre est la transformée de Fourier de la fenêtre, comme nous le montre la figure 2.7 permet, lorsque le spectre d'une sous-porteuse est maximal, d'annuler le spectre de toutes les autres c'est la condition d'orthogonalité. (Orthogonal de OFDM). qui peut s'exprimer de la sorte :

$$\int_0^{T_s} \varphi_p(t) \varphi_q^* dt = \int_0^{T_s} e^{2\pi j f_p t} e^{-2\pi j f_q t} dt = \begin{cases} 0 & \text{si } p \neq q \\ 1 & \text{si } p = q \end{cases}$$

Cette condition d'orthogonalité permet un chevauchement entre les spectres de fréquences des différentes sous-porteuses et d'éviter toute interférence entre les sous-porteuses si l'échantillonnage se fait à la fréquence de la sous-porteuse, un autre avantage est de permettre d'économiser la bande passante en chevauchant les sous porteuses comme le démontre la figure 2.8 suivante :

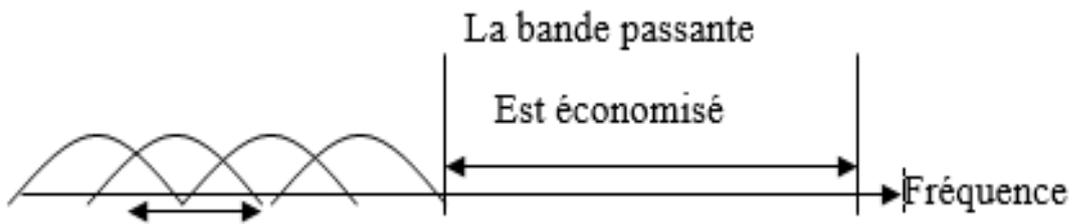


Figure 2.8 Bande passante économiser en utilisant L'OFDM

On peut aussi remarquer que chaque lobe secondaire d'une sous-porteuse annule le lobe secondaire d'une autre ainsi de suite

En sommant tous les spectres des sous-porteuse on obtient le signal final de l'OFDM, comme montre la figure suivante :

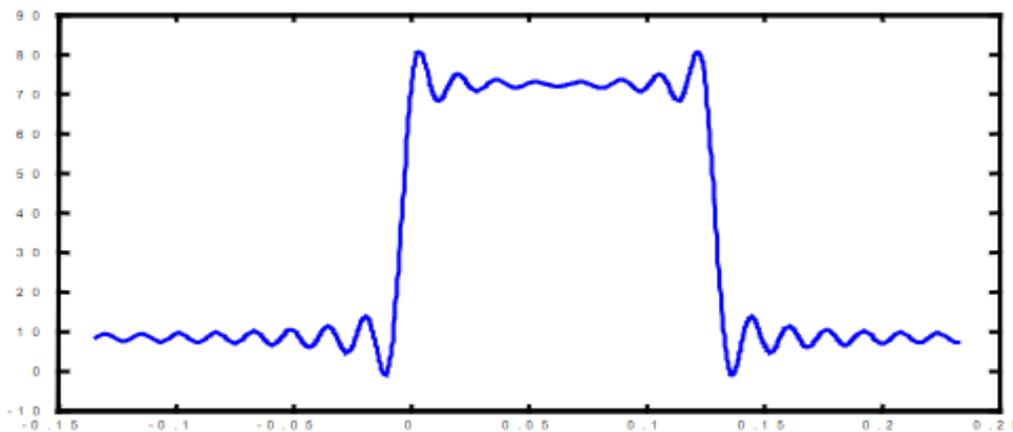


Figure 2.9 : Spectre d'un signal OFDM

La figure 2.9 montre le sommage de tous les spectres des sous porteuses, on voit que la bande de fréquence est occupé de façon optimum le spectre est presque plat sur la bande de fréquence, la bande occuper est presque $B=N/T_s$ (en retirant les lobes secondaire) chaque sous-porteuse occupe $1/T_s$ du spectre de fréquence.

2.5.4 Principe de la démodulation multi-porteuses OFDM :

Le signal reçu qui a traversé le canal s'écrit sous la forme :

$$y(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k H_k(t) e^{2j\pi f_k t}$$

- H_k est la fonction de Transfer du canal autour de la fréquence F_k a temp t La démodulation de ce signal consiste à démoduler le signal suivant N sous-porteuse :

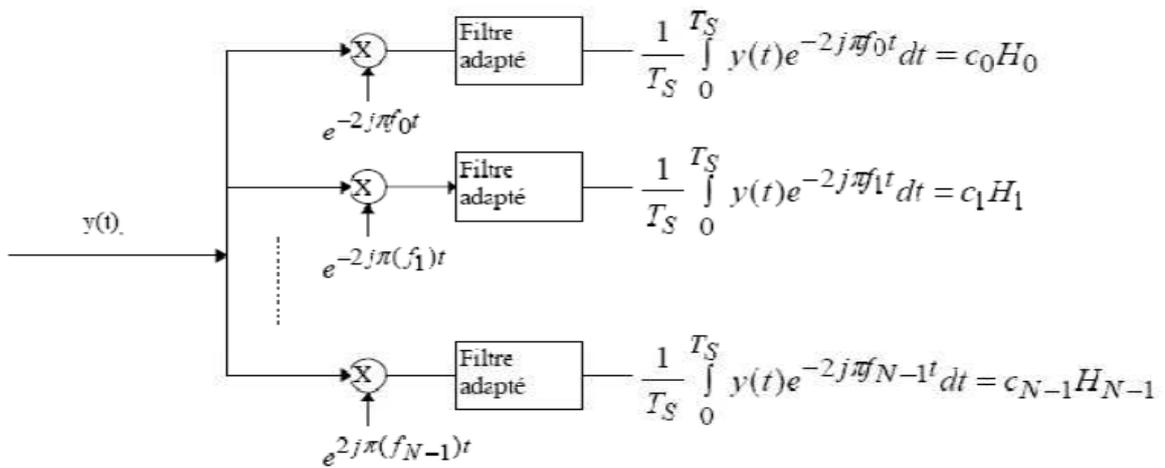


Figure 2.10 : : Schéma du principe de la démodulation OFDM

L'orthogonalité nous montre que :

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

Car :

$$\frac{1}{T_S} \int_0^{T_S} e^{2j\pi(f_k - f_i) t / T_S} dt = \begin{cases} 0 & \text{si } f_k \neq f_i \\ 1 & \text{si } f_k = f_i \end{cases}$$

2.6 La transformée de Fourier discrète :

Au tout début de l'utilisation des systèmes parallèles, les opérations de modulation et de démodulation nécessitaient plusieurs banques d'oscillateurs pour générer les fréquences porteuses nécessaires pour la transmission des sous-porteuses. Puisque cela s'est avéré difficile à accomplir, la représentation a été considérée comme infaisable.

Grâce aux travaux de Weinstein et Ebert [15], la transformée de Fourier, en particulier l'algorithme de la transformée de Fourier discrète, a éliminé la complexité initiale du schéma OFDM. La transformée de Fourier et son inverse sont utilisés pour mettre en application les processus de modulation et de démodulation des systèmes OFDM.

Un signal numérique dans le temps peut être transformé dans le domaine fréquentiel au moyen de la transformée en Z ou de la transformée de Fourier, De manière générale, un signal périodique $x(t)$ peut se représenter sous la forme fréquentielle, appelée également transformée de Fourier Inverse :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t)e^{j2\pi ft} df$$

- $X(f)$ représente un nombre complexe qui définit l'amplitude et la phase de chaque composante fréquentielle, il constitue la transformer de fourrier du signal temporelle de $X(t)$, son équation est définie par :

$$X(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f)e^{-j2\pi ft} df$$

Dans les systèmes numériques, la forme traditionnelle de la transformée de Fourier est remplacée par la transformée de Fourier discrète (DFT). La DFT d'un signal $x(n)$ est définie comme suit :

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi k \frac{n}{N}} \quad , \quad 0 \leq k \leq N$$

- $X[k]$ (vecteur fréquentiel) est la DTF de $x(n)$ (vecteur temporelle)
- N est une puissance de 2, représente les valeurs discrètes des valeur n et k , sont inverse est associe à la transformer de fourrier discret inverse IDFT (du domaine fréquentiel a domaine temporelle) :

$$X[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k)e^{j2\pi n \frac{k}{N}} \quad , \quad 0 \leq n \leq N$$

- $X[n]$ (vecteur temporelle) est la IDTF de $x(k)$ (vecteur fréquentiel)
- $\frac{1}{N}$ Est le facteur de pondération utiliser dans l'expression de la IDTF

La matrice de la DFT est composée d'exponentielles complexes. Elle est définie comme suit :

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & e^{-j2\pi/N} & e^{-j2\pi 2/N} & \dots & e^{-j2\pi(N-1)/N} \\ 1 & e^{-j2\pi 2/N} & e^{-j2\pi 4/N} & \dots & e^{-j2\pi 2(N-1)/N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & e^{-j2\pi(N-1)/N} & e^{-j2\pi 2(N-1)/N} & \dots & e^{-j2\pi(N-1)(N-1)/N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(0) \\ x(1) \\ x(2) \\ \vdots \\ x(N-1) \end{bmatrix}$$

Cependant, pour les systèmes OFDM, une autre forme de la DFT est utilisée, appelée la transformée de Fourier rapide (FFT), qui est un algorithme de DFT développé en 1965 [16]. Cette transformée rapide réduit considérablement le temps de calcul les algorithmes de FFT/IFFT ont révolutionné le traitement numérique de signal (Digital

Signal Processing : DSP). Leur efficacité réside dans la réduction du nombre d'opérations nécessaires, en particulier le nombre des multiplications ce qui réduit davantage le temps d'exécution. Tous ces algorithmes sont basés sur un même principe qui consiste à décomposer le calcul de la DFT en plusieurs sous ensemble de DFT de longueur plus petite. La mise en œuvre de ce principe conduit à différentes méthodes.

2.6.1 Principe du modulateur et du démodulateur utilisant les transformées de Fourier discrètes :

Afin de discréditer, on doit choisir tout une fréquence d'échantillonnage

Le signal occupe la bande passante B autour de la fréquence d'échantillonnage f_0 comme le montre le schéma suivant :



Figure 2.11 : Signal carrer à fréquence d'échantillonnage f_0

Pour démoduler on effectue une translation de $f_0+b/2$ sur la fréquence médiane a fin de transposer le signal en band de base, le spectre occupera Alor la bande $[-B/2 : B/2]$

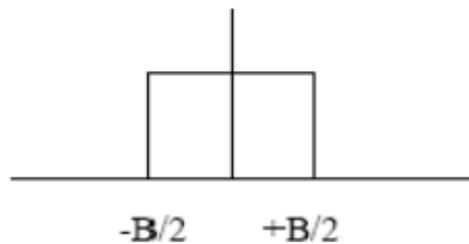


Figure 2.12 : Signal carrer transposer de $f_0+b/2$

bande passante du signal est de $B/2=N/2T_s$, et la frequence d'échantillonnage doit etre superieur ou égale a $2B/2$ soit N/T_s , L'échantillonnage se fera aux temp $t_n = nT_s/N$

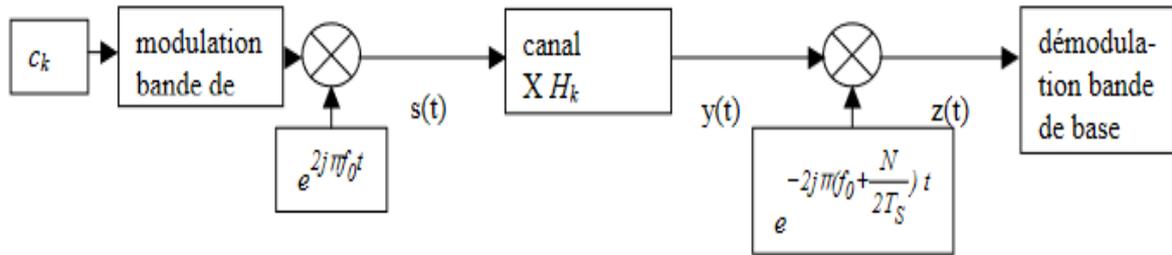


Figure 2.13 : Schéma de chaîne de transmission utilisant la FFT

Le signal reçu en bande de base après le décalage en fréquence de $f_0+B/2$ s'écrit alors :

$$z(t) = y(t)e^{-2j\pi(f_0 + \frac{N}{2T_s})t} = \sum_{k=0}^{N-1} C_k H_k e^{2j\pi(\frac{k-N}{T_s})t}$$

Après échantillonnage :

$$z(Tn) = z\left(\frac{nT_s}{N}\right) = Z_n = (-1)^n \sum_{k=0}^{N-1} C_k H_k e^{2j\pi\frac{Kn}{N}}$$

Z_n étant la transformée de fourrier discret inverse de $C_k H_k$, la démodulation se fait en appliquant une transformer de fourrier direct discrète, l'intérêt de cette discrétisation est d'appliquer l'algorithme de la FFT/IFFT qui est une alternative a la DFT avec l'avantage de la rapidité

On suppose que les échantillonné du signal sont en band de base et discréditer

Le schéma de principe du modulateur est le suivant :

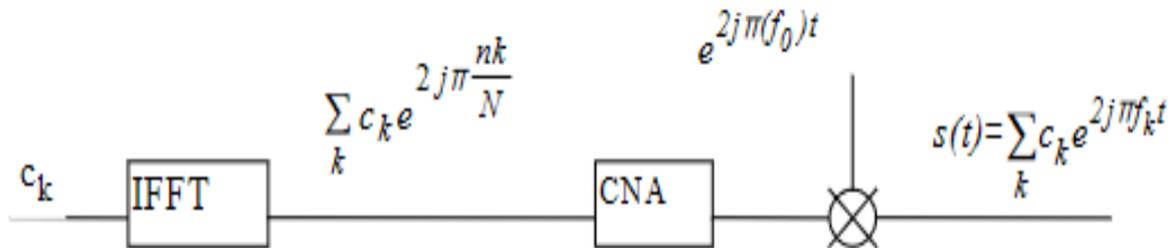


Figure 2.14 : Démodulateur en utilisant la FFT

Le schéma de principes du démodulateur est le suivant :

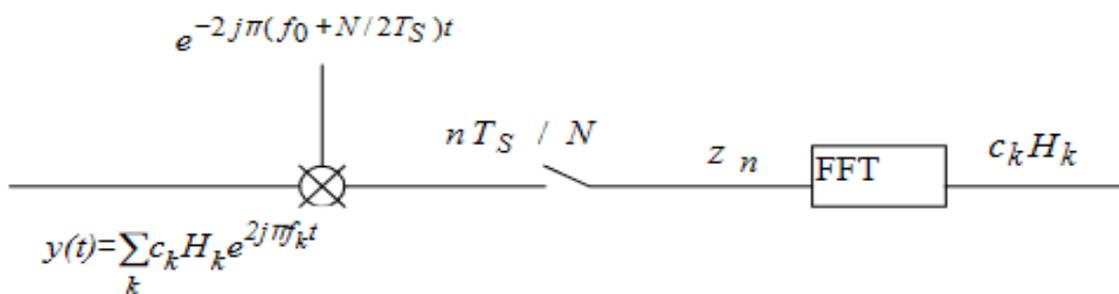


Figure 2.15 : La modulation en utilisant l'IFFT

Physiquement, les symboles numériques c_k sont les données dans l'espace fréquentiel, les échantillons du signal z_n sont les données dans l'espace temporel puisqu'on passe des premières aux secondes par une transformée de Fourier inverse. Le spectre du signal OFDM est formé des c_k placés aux fréquences f_k , autour de ces données le spectre s'élargit suivant un sinus cardinal à cause du spectre de la fenêtre temporelle T_S . [12]

2.6.2 Quelque standards OFDM à base FFT :

La technique de modulation OFDM est une bonne solution contre la sélectivité des fréquences et le bruit impulsif, ce qui donne des débits élevés, l'OFDM est devenu très utile dans les domaines de communication sans fils tel que les 3G++ LTE, WIMAX, la télévision numérique DVB, les communications acoustiques sous-marine [15].

Un résumer des paramètres de quelque système de communication multi-porteuse :

Technologie	Taille de la FFT	Taux d'échantillonnage (MHz)
DVB-T/H	2048-8192	9
802.11a	64	20
802.11n	64-128	40
UWB (MB-OFDM)	128	40
802.16 ^e (OFDM)	256	32.7
802.16 ^e (OFDMA)	128-2048	20
3GPP-LTE	128-2048	30.7
802.20	512-2048	20

Figure 2.16 : Paramètre de quelque system de communication multi porteuse.

2.7 OFDM et Intervalle de garde :

Le canal multi trajets entraine des interfaces entre les symbole OFDM , le signal reçu peut être affecter par le canal multi trajet entrainant des retard , ce qui fait que le retard d' un signal peut être de mem grandeur que la durée d'un symbole et la condition d'orthogonalité ne peut pas être toujours vérifier, ce que conduit à des interférence entre les sous-porteuse , pour éviter ce problème on insère un intervalle de garde Δ ou une trame OFDM , dans la duree T_g sera supérieure a la duree de retar maximum $\Delta > T_m$ sur le canal , cette interval est insere entre chaque symbole OFDM ce qui faite que $T_s = T_u + T_g$. L'intervalle de garde Δ est constitué des D derniers échantillons $x_{N-D} \dots x_{N-1}$ du symbole OFDM et sont recopié dans l'intervalle de garde, ce groupe d'échantillons est appelé préfixe cyclique

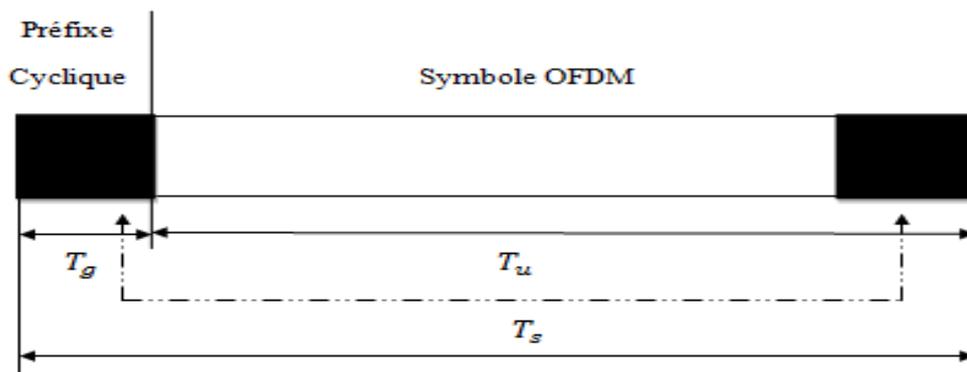


Figure 2.17 : Insertion du préfix cyclique se le symbole OFDM

L'insertion du préfixe cyclique permet de de préserver l'orthogonalité entre sous porteuse et d'éliminer les interférences intersymbole (ISI).A la démodulation il suffit juste de supprimer le préfixe cyclique pour récupérer le signal utile.[24]

2.8 caractéristiques de l'OFDM :

2.8.1 avantage et inconvénient

Le développement de l'OFDM a apporter des avantage et des inconvénient, la performance d'une technique se mesure selon son rapport cout/performance, la principale utilisation de L'OFDM est dans les réseaux communication mobile elle offre un avantage considerable, parmi les autre avantage [15] :

- Une haute efficacité spectrale et une grande robustesse à l'évanouissement sélectif en fréquence.

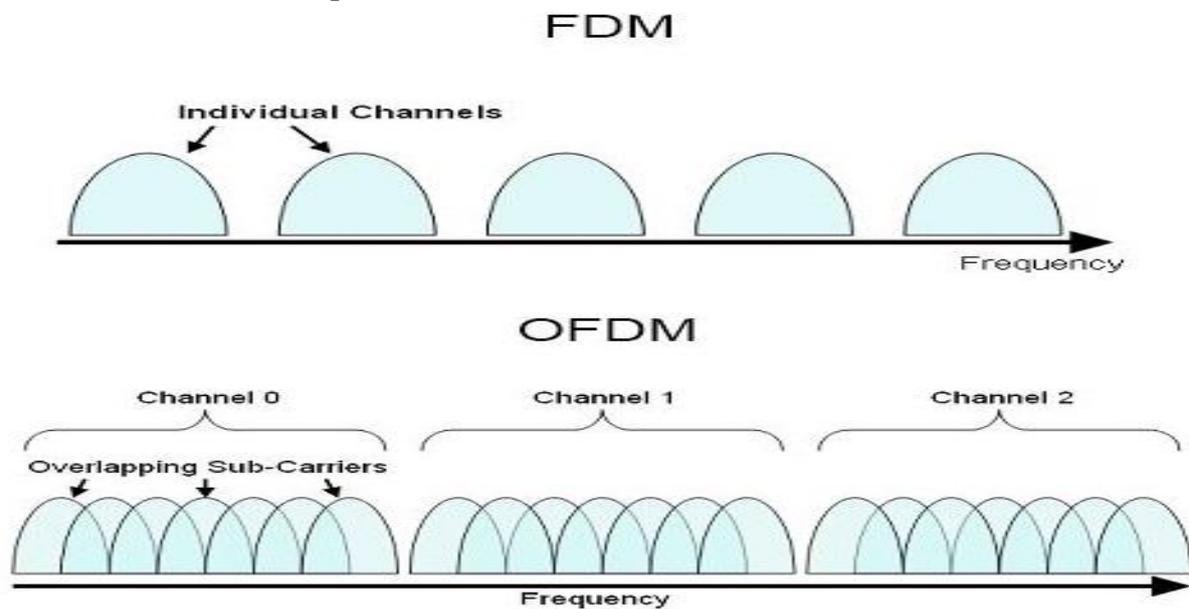


Figure 2.18 : Différence entre FDM et OFDM

- Une réalisation numérique simple par utilisation d'IFFT/FFT. Cela a conduit à son utilisation massive dans plusieurs standards
- Réduction de la complexité des récepteurs évitant les ISI et ICI grâce à l'ajout d'un intervalle de garde.
- L'OFDM permet une égalisation simple grâce à l'ajout du préfixe cyclique, même en présence de canaux multi trajets denses.

Le système OFDM n'est pas parfait comme on la dit il pressante des inconvénients, parmi eux :

- Les signaux multi porteuses ont un coefficient PAPR élevé (Peak to Average Power ratio) élevé, ce qui nécessite l'utilisation des amplificateurs à haute linéarité.
- La perte dans l'efficacité spectrale due à l'addition d'un intervalle de garde
- La sensibilité à l'effet Doppler : quand le récepteur est en mouvement relatif par rapport à la source, la fréquence du signal reçu ne sera pas la même que celle du signal émit. La fréquence du récepteur est supérieure à celle de l'émetteur et diminue au fur et à mesure qu'ils se rapprochent entre eux. Ceci s'appelle « l'effet Doppler »
- Si le récepteur OFDM est mal synchronisé temporellement, un phénomène d'interférence entre symboles OFDM peut intervenir dégradant considérablement les performances du système global.

2.8.2 Le PAPR :

Un point qui peut être critique dans les systèmes OFDM est la variation importante de l'amplitude du signal en fonction des symboles à transmettre. En effet, si l'addition des porteuses se fait de manière cohérente, le PAPR peut être très important, Habituellement ce rapport est défini comme suit :

$$PAPR(x(t)) = \frac{\max_{0 \leq t \leq T} |x(t)|^2}{E\left[\frac{1}{T} \int_0^T |x(t)|^2 dt\right]}$$

Pour transmettre ces pics sans écrêtage, non seulement le convertisseur doit posséder un nombre de bits suffisant pour les coder, mais l'amplificateur de puissance doit rester linéaire sur toute la plage de l'amplitude. Ceci se traduit généralement par un coût plus élevé du système et une forte consommation de puissance. Différentes techniques ont été proposées pour réduire le PAPR [7], tels que le chpping, le peakwindowing, le peak cancellation, le scrambling, etc.

2.8.3 Le décalage fréquentiel :

Le décalage fréquentiel résulte de la différence entre l'oscillateur de l'émetteur et celui du récepteur. En plus, le bruit de phase de l'oscillateur du récepteur peut être lui aussi considéré comme une source du décalage fréquentiel. Le récepteur doit estimer et corriger le décalage fréquentiel responsable de l'interférence entre porteuses. Le décalage fréquentiel cause de l'interférence entre porteuses ce qui mène à une perte de l'orthogonalité entre les sous-canaux. Pollet et Al.[23] Ont démontré que les systèmes multi-porteuses sont beaucoup plus sensibles aux décalages fréquents que les systèmes mono-porteuses. Ils ont donné une relation qui détermine la dégradation en termes de SNR :[25]

$$D \approx \left[\frac{101}{\text{Ln } 10^{1/3}} \left(\frac{\pi N \Delta F}{R} \right) \right]^2 * \frac{E_s}{N_o}$$

Où ΔF est le décalage fréquentiel normalisé par l'écart entre les porteuses $\Delta f = R/N$, R est le taux de symbole qui est égal à N / T_s , et E_s/N_o est le rapport entre l'énergie par symbole et la densité spectrale de bruit. La sensibilité est donc d'autant plus importante que les porteuses sont proches.

2.8.4 Egalisation :

L'égalisation permet de corriger le signal qui transite sur le canal qui introduit des distorsions sur le signal, son principe de base est l'amplification ou l'atténuation de certaines fréquences du signal, l'égalisation est employée dans le domaine de la télécommunication pour amplifier les fréquences du signal qui auraient été atténuées par la sélectivité en fréquence du canal, pour l'OFDM l'égalisateur est formé de N multiplieurs dont les coefficients peuvent être obtenus à l'aide d'une séquence d'entraînement contenue dans le préambule de la trame physique.

2.8.5 Décision :

Cette étape consiste à déterminer le bit correspondant au symbole reçu d_k après le filtre de réception. En raison des interférences introduites par le canal, le symbole peut être différent du symbole transmis (c_k).

La détection avec le plus grand degré de similitude vraie est le meilleur critère pour déterminer le symbole à envoyer avec la plus grande probabilité. Pour cela, le point de constellation le plus proche du symbole reçu est sélectionné, et le bit associé à ce point de constellation est le bit qui a été transmis avec la plus grande similitude vraie.

Le plan complexe est ainsi partitionné en zones de décision, chacune correspondant à un symbole de la constellation, et donc à un ensemble de bits particulier. Sur une constellation particulière, on peut représenter les limites de ces zones par des traits pointillés (on suppose que tous les symboles sont équiprobables).

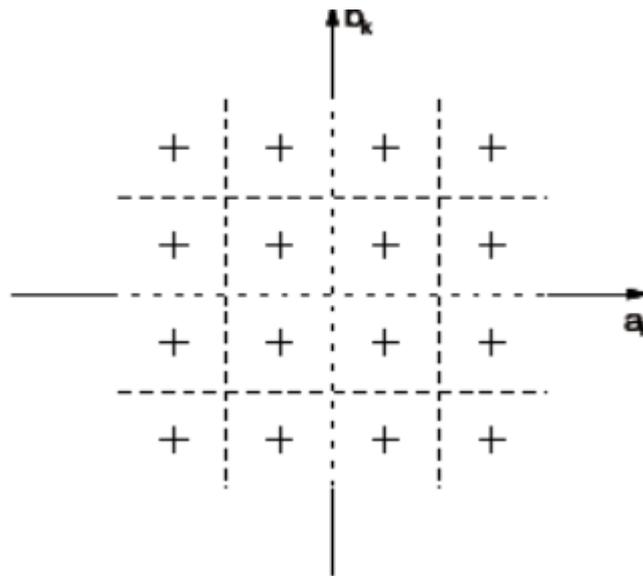


Figure 2.19 : Zone de décision

Le signal décidé (au sens du critère de maximum de vraisemblance), sous forme binaire, sera décodé grâce au décodeur canal. Ce décodeur correspond au codeur canal qui a été utilisé dans l'émetteur pour ajouter de la redondance aux informations transmises.

2.9 Chaîne complète d'une transmission OFDM :

Le synoptique de la figure 2.19 suivante illustre les différents traitements qui ont été exposés précédemment et présente donc les modules de la chaîne d'émission et de la réception OFDM.

Émetteur

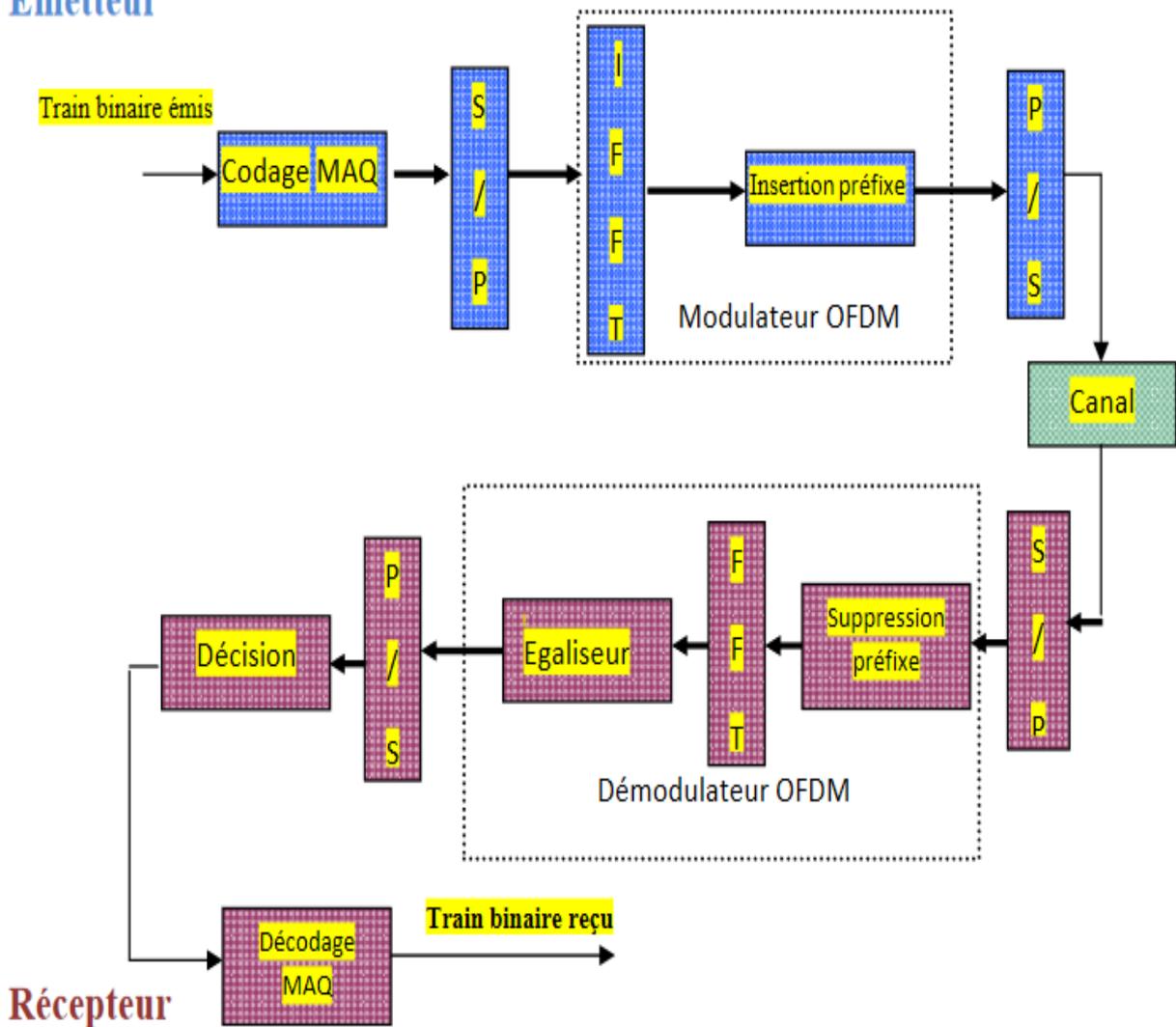


Figure 2.20 : Chaîne de transmission OFDM Complete

2.10 Les différents types de technique OFDM [20] :

La technique de modulation multi-porteuse OFDM a permis de développer plusieurs autres types de technique en partant sur le mem principe initial de l'OFDM pour en citer quelqu'une :

- 1- C-OFDM (Coded - OFDM) : offre un réel avantage en la présence de signaux d'interférence à bande étroite isolées.
- 2- MIMO-OFDM (Multiple Inputs, Multiple Outputs-OFDM) : Utilise plusieurs antennes pour transmettre et recevoir des signaux radio.
- 3- V-OFDM (Vector -OFDM) :
 - Développé par CISCO.
 - Augmente la couverture de l'abonné.
 - Réduit le coût de provisionnement et le déploiement des infrastructures.
 - Emploie la fréquence et la diversité spatiale.
 - Crée une technique de traitement robuste pour trajets multiples et les interférences à bande étroite.
- 4- W-OFDM (Wideband OFDM):
 - Inventé par Wi-LAN.
 - Grand écart entre les transporteurs.
- 5- Flash-OFDM :
 - La technologie à étalement de spectre large bande
 - Évite les compromis inhérents à d'autres systèmes de données mobiles.

2.11 Conclusion :

dans ce chapitre, le principe de base des modulations multi-porteuses à fréquences orthogonales a été expliqué ,nous avons introduit la modulation OFDM , expliquer son principe de fonctionnement , ce qui permis de mettre en évidence ses nombreux avantages, on peut citer par exemple : l'utilisation efficace des ressources fréquentielles en composant avec les solutions classiques de multiplexage fréquentiel, ceci est due au fait que dans l'OFDM les canaux se chevauchent tout en gardant une bonne orthogonalité. De plus, une égalisation numérique et un décodage simple et optimal sont réalisés grâce à l'insertion de l'intervalle de garde.

Dans le prochain chapitre nous tenteront de mettre en œuvre cette technique en la simulant sur un logiciel appeler MATLAB pour voir concrètement le comportement d'un signal OFDM sur un canal AWGN



***Chapitre 3 : Analyse par simulation
de l'OFDM sur Matlab/Simulink***



3.1 Introduction :

Les performances d'un système de transmission sont évaluées à leur aptitude à résister aux perturbations présente dans la chaine de transmission, c'est à dire d'assurer un BER (bit error rate) ou TEB (taux d'erreur par bit) le plus faible possible , et de réussir à acheminer le plus d'informations utiles possibles et préserver l'intégrité du signal , ce qui revient à maximiser la capacité ou son efficacité spectrale , dans ce chapitre nous nous intéressons a l'analyse des performances par simulation sur le logiciel de programmation MATLAB 2021 | SIMULINK en évaluons et traçons les courbes du taux d'erreur par bits BER en fonction du rapport signal sur bruit ,et visualiser les effets direct des perturbations sur le signal.

3.2 Description de la simulation sur Simulink :

Pour ce travail, nous avons utilisé le logiciel de simulation SIMULINK de Matlab 2021, Simulink est l'extension graphique de Matlab qui permet de représenter les fonctions mathématiques et les systèmes sous forme de diagramme en bloc, Les modèles qui représentent le système de communication est construit à partir des blocs extraits d'une banque de Communications Blockset (bibliothèques spécialisées), fournie avec le logiciel de simulation. Les blocs sont affichés à l'écran et raccordés graphiquement les uns aux autres pour produire le modèle de simulation, qui prend la forme d'un diagramme-bloc [27].

Notre travail consiste à simuler la chaîne de transmission OFDM en simulant un système d'émission et réception basée sur la modulation multi-porteuse OFDM voir figure (3.1).

A l'émission, en générera des nombres entiers aléatoires qui représentent l'information à envoyer qui seront modules par un modulateur 16/64 QAM, le signal a la sortie de l'émetteur OFDM sera appliqué à l'entrée d'un canal de transmission AWGN.

En réception, les opérations inverses de celles d'émission sont utilisées afin de récupérer le signal message transmis.

Des blocs de calcul, de mesure et de visualisation seront introduits dans le modelé permettant de calculer le nombre de bits reçu, bits erronés, le taux paquet perdu, et d'observer les constellations et le spectre du signal pendant la simulation

Notre modèle se compose de trois parties :

- Emission
- Canal de transmission
- Réception

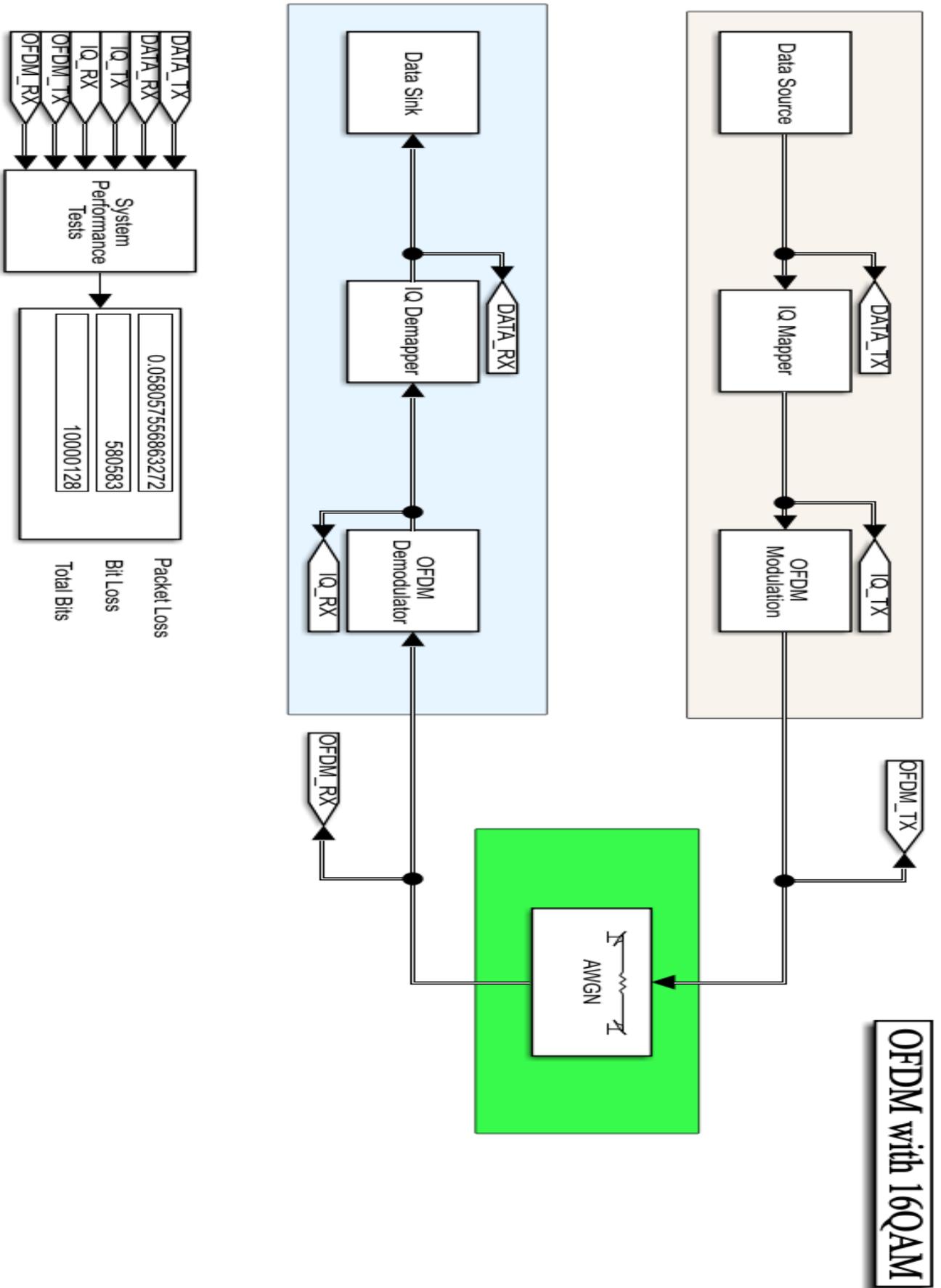


Figure 3.1 : Schéma représentant une chaîne de transmission OFDM avec un canal AWGN.

3.2.1 Emission :

Cette partie contient les blocs de traitement de données, de la génération du signal en passant par la modulation et à l'émission du signal vers le canal de transmission, elle se divise en trois parties ; le générateur de séquences, le modulateur numérique, et le modulateur OFDM

- Data source (générateur de séquence binaire) :

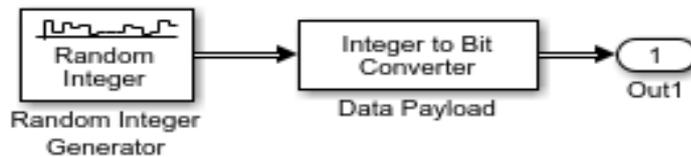


Figure 3.2 : Schéma bloc du générateur de la séquence binaire

Cette partie contient un générateur de nombres entiers aléatoires qui représentent le signal message à transmettre après échantillonnage et quantification, on choisit le nombre d'échantillons et on peut fixer la période d'échantillonnage (sampler time).

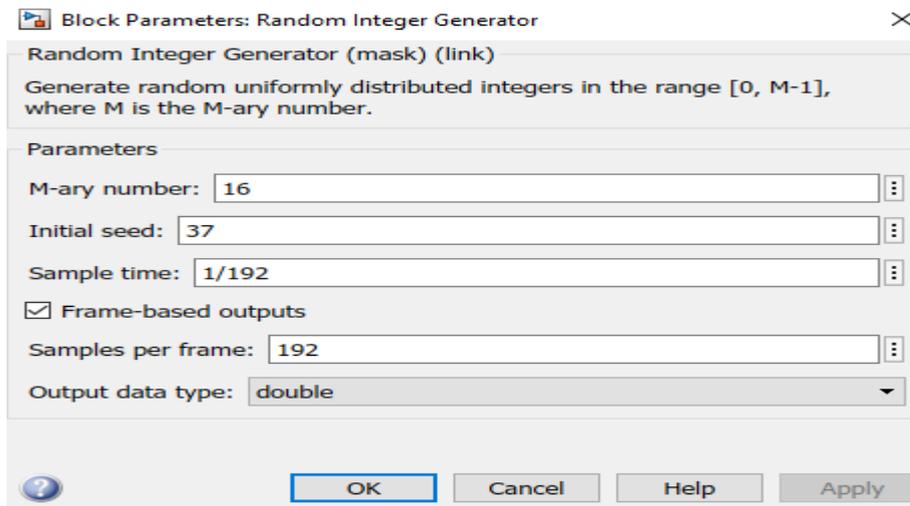


Figure 3.3 : Paramètre du bloc random integer

Dans cette première simulation, en utilisera la modulation QAM 16, le nombre de M-array est de 16 et qui représente le nombre de bits à étudier, ce nombre doit être entre $[0 - M]$, Le deuxième bloc représente un convertisseur de nombre entier en bit

- Modulateur numérique (IQ Mapper) :

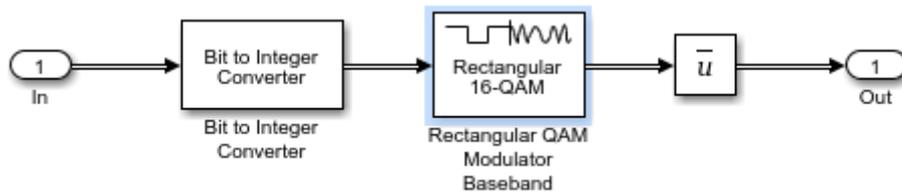


Figure 3.4 : Schéma bloc du modulateur numérique QAM 16/64

Ce bloc réalise la modulation numérique en QAM16/QAM64, ainsi que la distance minimale entre les symboles, et la méthode de remplissage de la constellation (dans notre simulation on remplit par codage de Gray).

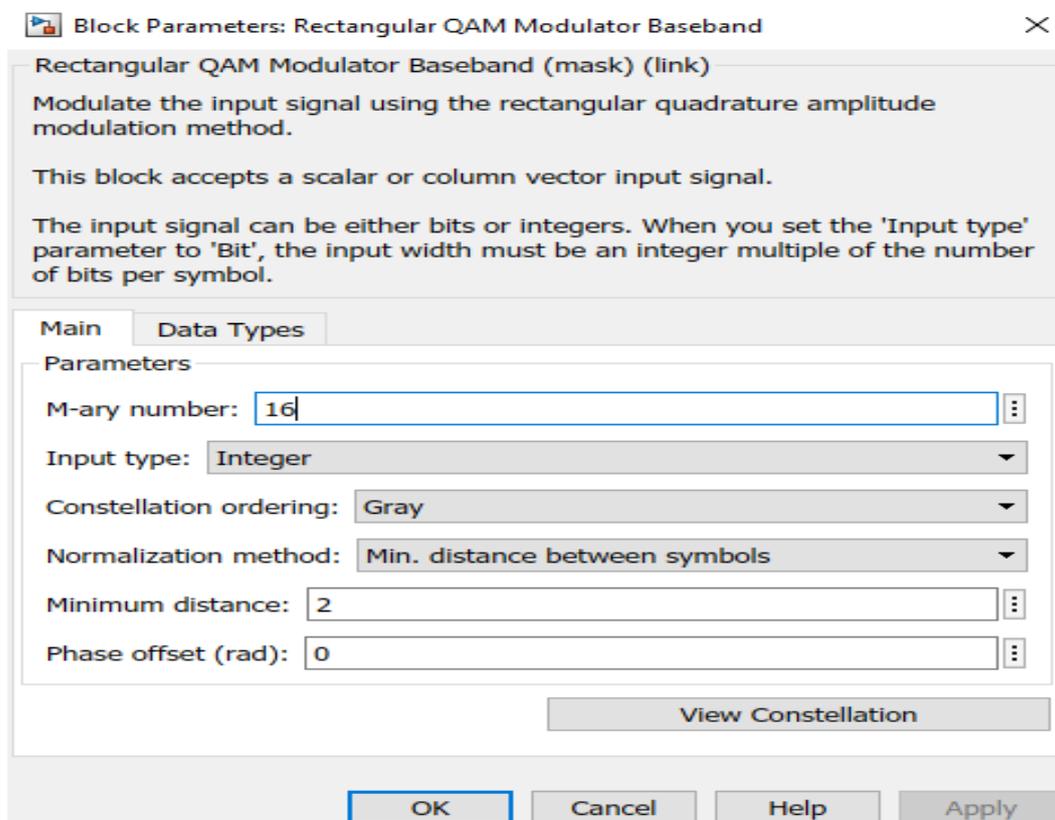


Figure 3.5 : Paramètre du bloc modulateur numérique (QAM 16)

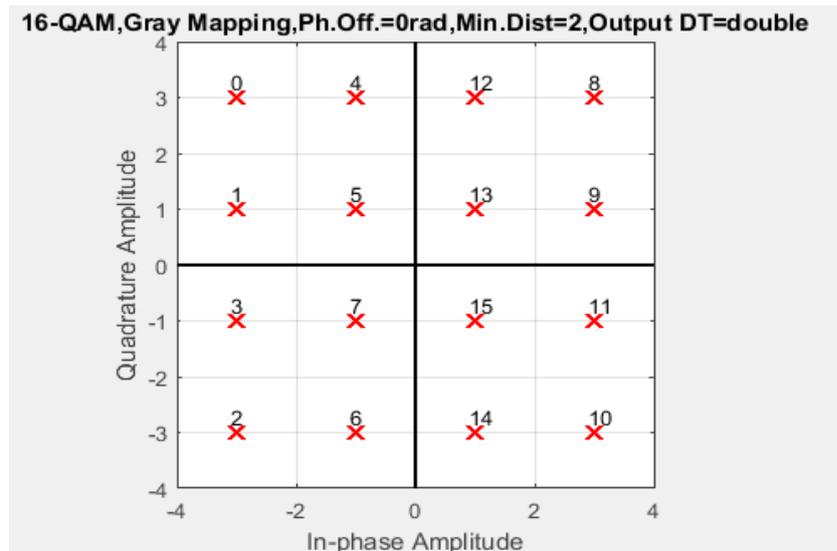


Figure 3.6: Constellation QAM 16 avec distribution de gray

- Modulateur OFDM :

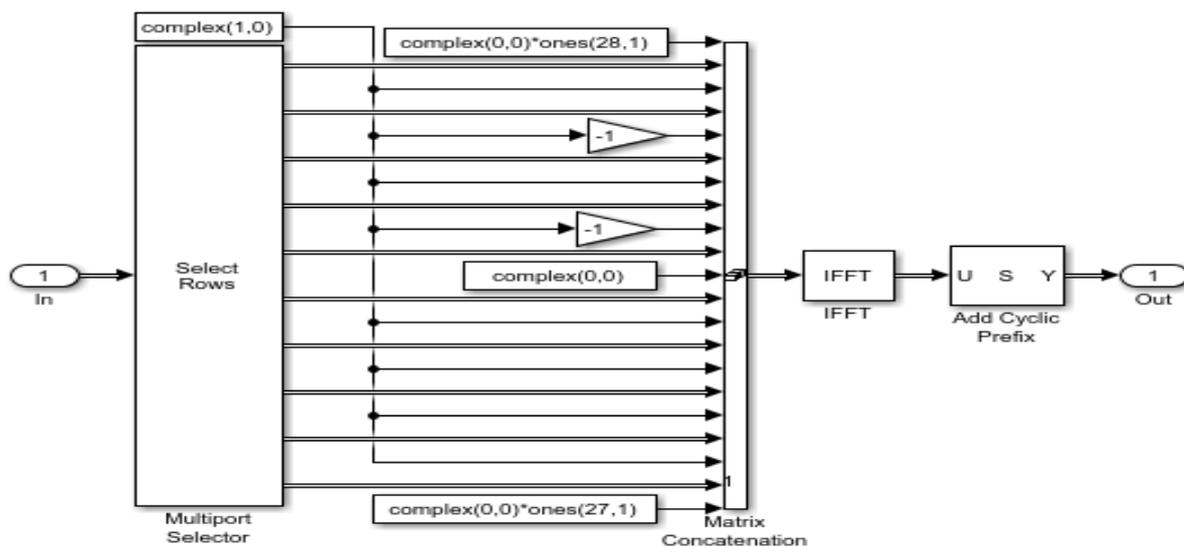


Figure 3.7 : Schéma du bloc de modulation OFDM

Il est divisé en trois bloc :

- **IFFT** : transformé de Fourier rapide inverse ; ce bloc génère les porteuses du signal OFDM et le passage au domaine temporel ;
- **Add cyclic prefix** : ce module sert à augmenter la longueur des lignes de la matrice par redondance, cela dans le but de mieux protéger l'information des interférences entre symboles

- **Trame OFDM** : ce module sert à convertir la matrice de trame OFDM en un vecteur colonne

3.2.2 Canal de transmission :

- **Bruit additif blanc gaussien** :

Additive White Gaussian Noise (AWGN), ou le bruit additif blanc gaussien est un modèle de bruit utilisé dans la théorie de l'information pour simuler de nombreux processus aléatoires qui se produisent dans la nature, Ce bruit s'ajoute au bruit intrinsèque du système et sa puissance est uniforme sur la bande de fréquences du système, il a une distribution normale dans le domaine temporel avec une moyenne nulle ; ce bruit peut être dû aux vibrations thermiques des atomes, Ce bruit est la base des perturbations naturelles que peut rencontrer un signal transmis sur un canal , pour la plupart des liaisons radio terrestre, il est gérable a moins d'être complété par des modèles de trajets multiples ou des effets de sol ou encore de L'auto-brouillage.

- **Canal AWGN** :

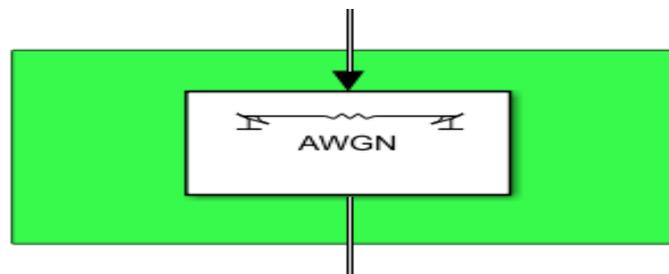


Figure 3.8 : block du canal AWGN

Le bloc AWGN représente le canal a bruit gaussien a travers le quelle l'information est transmise, il a pour but de simuler les perturbations qu'on trouve généralement dans la nature comme le plus courant est le bruit additif gaussien, Dans notre simulation le bloc a pour fonction d'ajouter des échantillons de bruit au signal , le rapport signal sur bruit (SNR) qui est une caractéristique de tout signal numérique est le paramètre à introduire dans ce bloc pour préciser l'intensité de l'ajout d'échantillon sur le signal transmit.

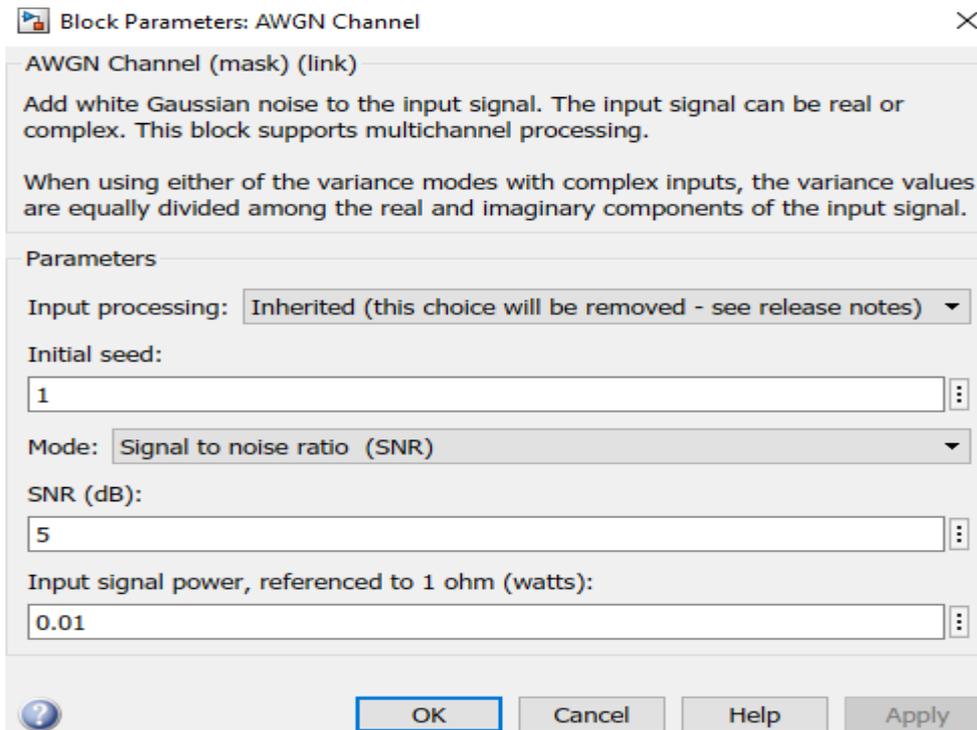


Figure 3.9 : Paramètre du bloc AWGN

Au début de notre simulation on essayera avec SNR=5 et augmentera au fur et à mesure des simulations, on appliquera deux modulation QAM 16 et QAM 64

3.2.3 Réception :

Cette section décrit les blocs nécessaires au niveau de la réception :

- OFDM démodulation :

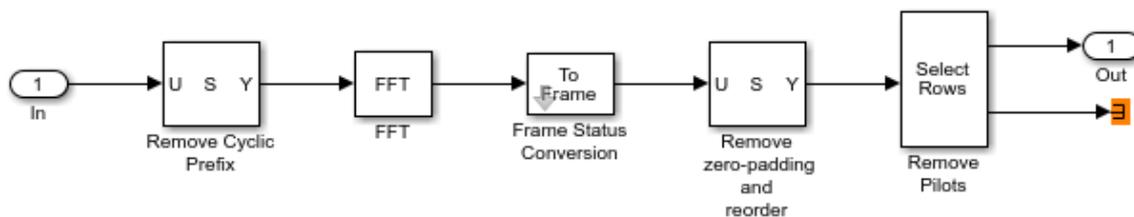


Figure 3.10 : Schéma détaillé du bloc démodulation OFDM

Ce bloc se constitue de plusieurs sous blocs :

- 1- **Remove cyclic prefix** : son but est d'effectuer l'inverse du bloc d'ajout de préfix cyclique et de retrouver la matrice obtenue à la sortie du bloc IFFT
- 2- **FFT** : ce module permet le passage du domaine temporel au domaine fréquentiel

- 3- **Frame status conversion** : ce module sert a transformer le vecteur signal reçu en matrice OFDM
- 4- **Remove zero-padding and reorder** : il sert a retirer la matrice trame contenant les informations nécessaires ainsi que les séquences de formation
- 5- **Remove pilots** :ce bloc sert a supprimer les séquences pilotes et transformer le symbole OFDM

- Démodulation numérique (IQ Demapper) :

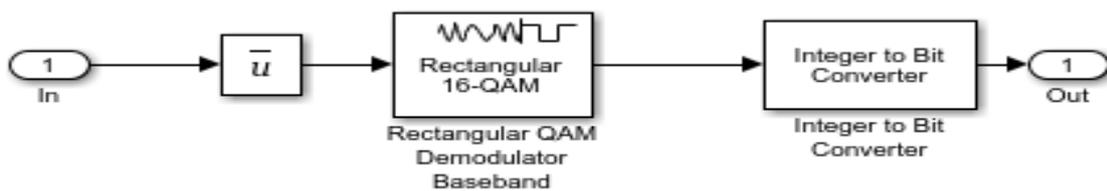


Figure 3.11 : Schéma bloc du démodulateur numérique QAM 16/64

Ce bloc réalise la démodulation numérique en bande de base. On doit également préciser le nombre des états, la distance minimale entre les symboles et la méthode de remplissage de la constellation.

- Séquence reçue (data sink) :

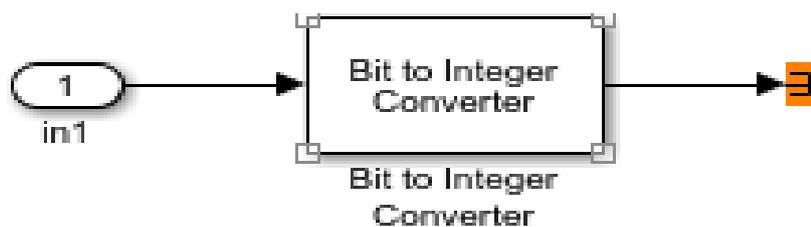


Figure 3.12 : Schéma bloc de la séquence reçue.

Ce bloc consiste à reconvertir les données de l'Etat bits à l'Etat entier pour retrouver l'information utile.

Terminator : Le bloc orange, est un bloc de terminaison est utilisé pour fermer des blocs dont les ports de sortie ne sont pas connectés à d'autres blocs.

- Visualisation des signaux :

Le bloc de system performance test a pour but de calculer de visualiser les signaux sur la chaine de transmission

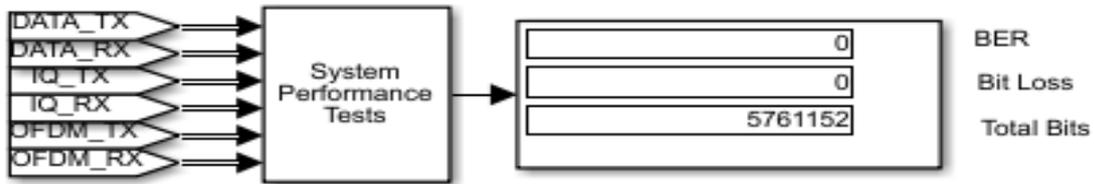


Figure 3.13 : Schéma de la partie de visualisation des résultats

Le bloc de system performance test contient lui aussi plusieurs sous bloc :

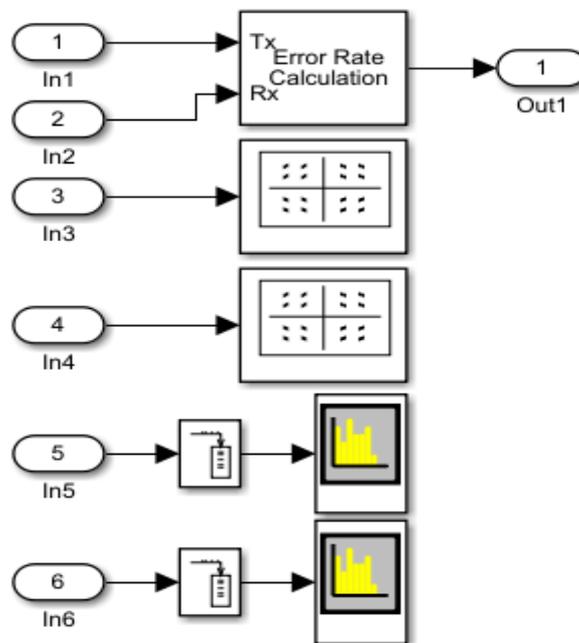


Figure 3.14 : Schéma représentant les différents blocs de visualisation

Les premiers in1 et in2 représentent les données à l'émission avant la modulation numérique et après la démodulation numérique, le but est de calculer à quel point le message a été déformé et d'obtenir le taux d'erreur par bit BER. Ce travail sera effectué par le sous bloc error rate calculateur qui donnera le résultat sur l'afficheur.

Les in3 et in4 représentent la constellation du signal après la modulation numérique et avant la démodulation numérique pour constater à quel point les bits sont affectés par le bruit gaussien

Les in_5 et in_6 représentent le signal OFDM avant et après le passage sur le canal AWGN pour voir les effets du bruit gaussien directement sur le signal

3.3 Résultats de la simulation de l'OFDM sur canal AWGN :

Après avoir expliqué le rôle de chaque bloc de simulation et choisi les bons paramètres pour notre simulation, on lance notre simulation, on fera varier le SNR (dans notre simulation le SNR aura trois valeurs 5 15 60) pour chaque modulation QAM 16 et QAM 64 pour constater les effets du bruit gaussien sur le signal OFDM et voir l'aptitude de ce dernier à résister aux perturbations d'un canal AWGN, Chaque simulation sera caractérisée par :

- BER
- Nombre de bits perdu
- Le nombre de bits total

Ces résultats varient selon la modulation utilisée et le SNR

3.3.1 Résultats des simulations du système OFDM avec modulation-QAM 16 :

Cette simulation sera basée sur une chaîne de transmission OFDM illustrée dans la figure 3.1 avec une modulation QAM 16 à $SNR = [5 \ 15 \ 60] \text{ dB}$, Les paramètres de cette simulation sont donnés par le tableau (figure 3.15)

Paramètre	Valeur
Nombre de sous porteuse	16
La durée d'un symbole	1/192 s
Intervalle de garde	4
Type de modulation	16-QAM
Taille de constellation	16

Figure 3.15 : Paramètre de la simulation d'un système OFDM avec modulation QAM 16

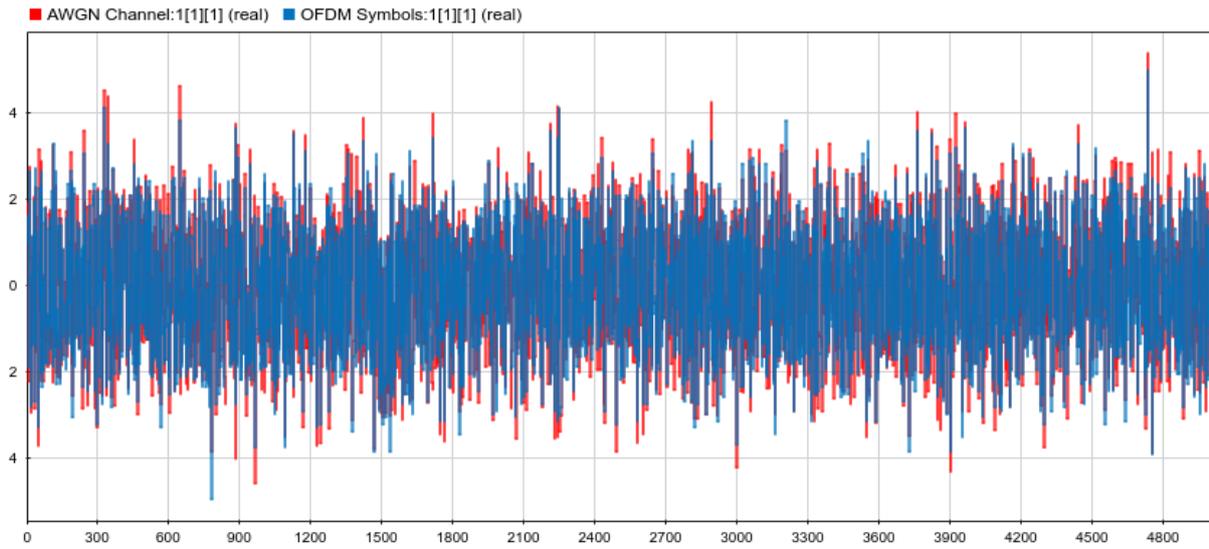


Figure 3.16 : Signal OFDM avec la modulation QAM 16 avec un SNR = 5dB

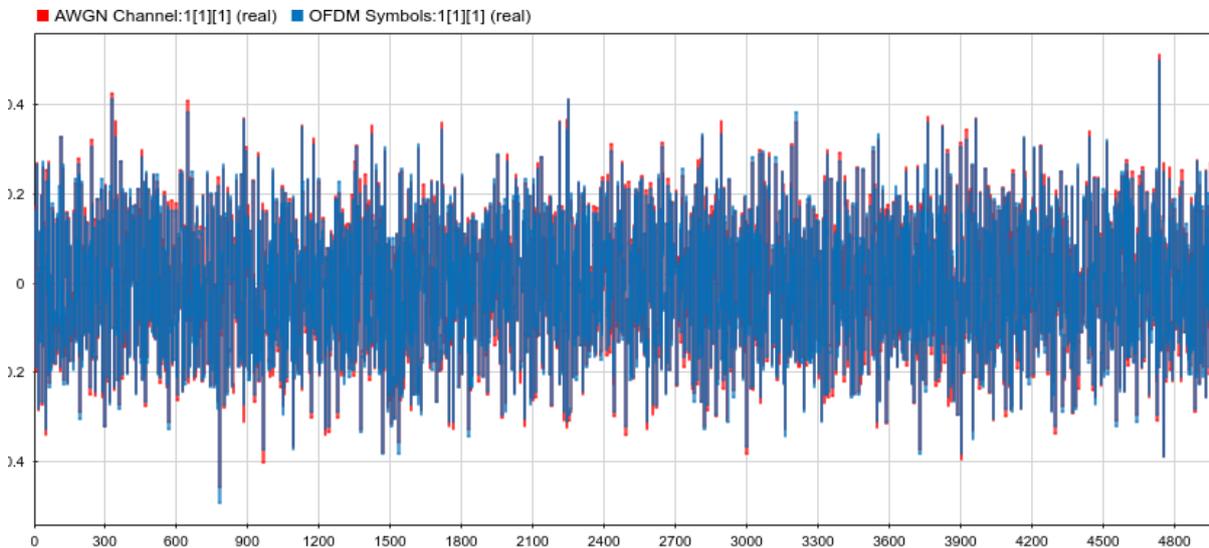


Figure 3.17 : Signal OFDM avec la modulation QAM 16 avec un SNR = 15dB

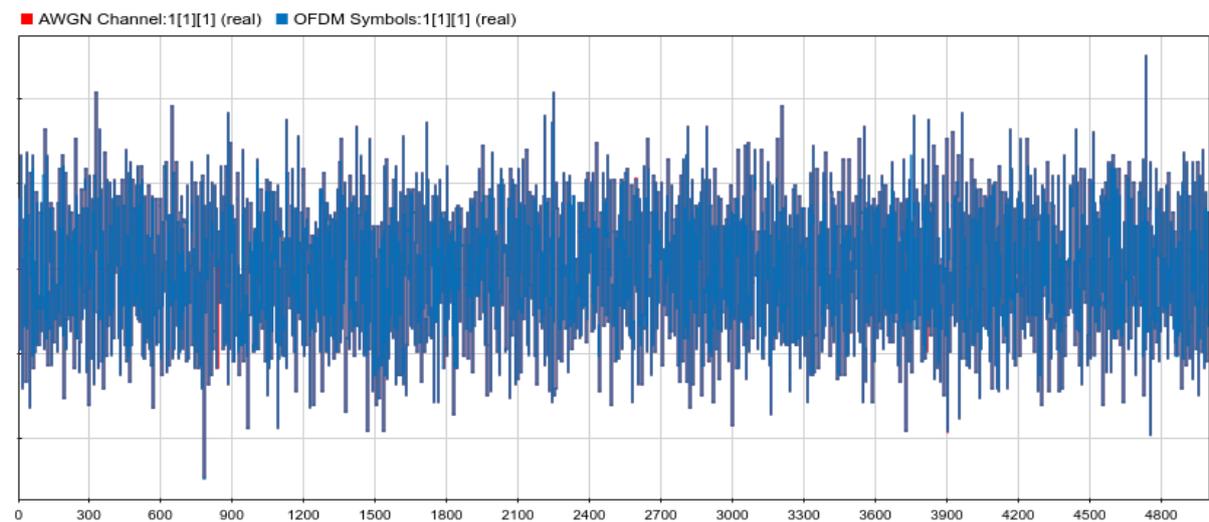
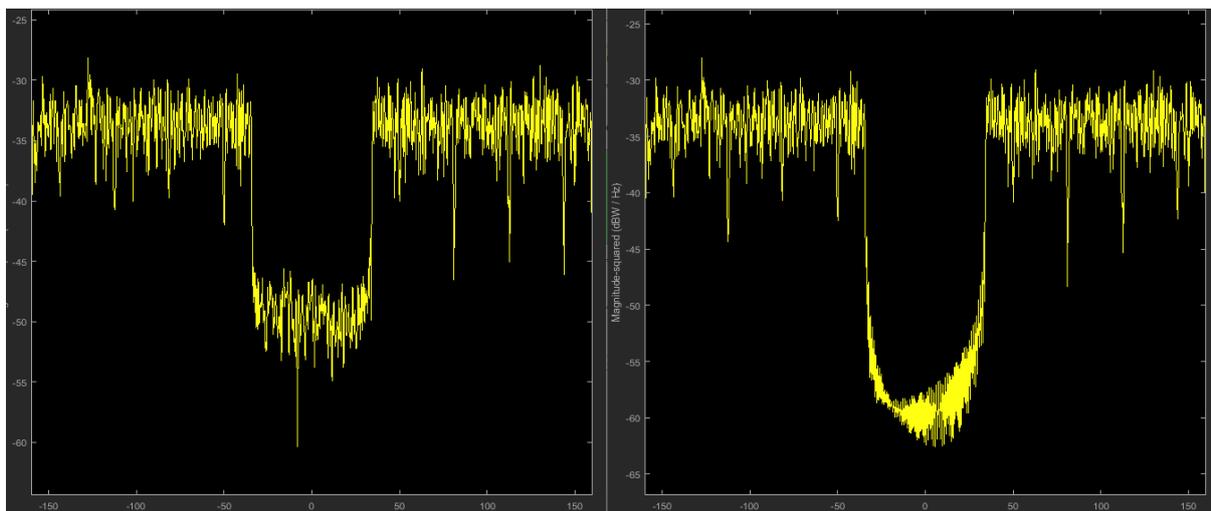


Figure 3.18 : Signal OFDM avec la modulation QAM 16 avec un SNR = 60dB

Le signal en bleu représente le signal avant l'entrée au canal AWGN et le signal en rouge représente le signal après passage sur le canal AWGN, on remarque dans la figure 3.16 qu'il existe une différence entre le signal en bleu (avant le passage sur le canal) et le signal en rouge (après passage sur le canal). Aussi on remarque que le signal n'est pas totalement le même car il y a des augmentations et des évanouissements des pics de signal à cause des perturbations du canal à bruit additif blanc gaussien ; par contre plus le SNR augmente plus on voit que le signal rouge est le même que le signal bleu (figure 3.17, 3.18) ils se superposent parfaitement quand le SNR augmente.

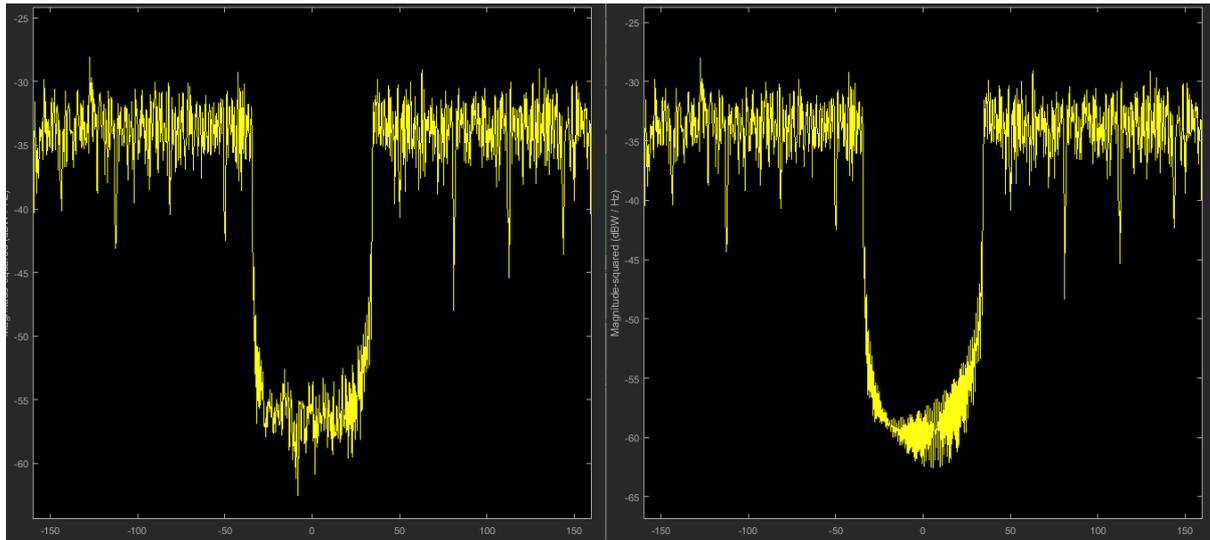
Pour plus se rendre compte sur l'influence du bruit sur le signal on visualise également les spectres du signal à avant et après le passage sur le canal AWGN



Après le passage

Avant le passage

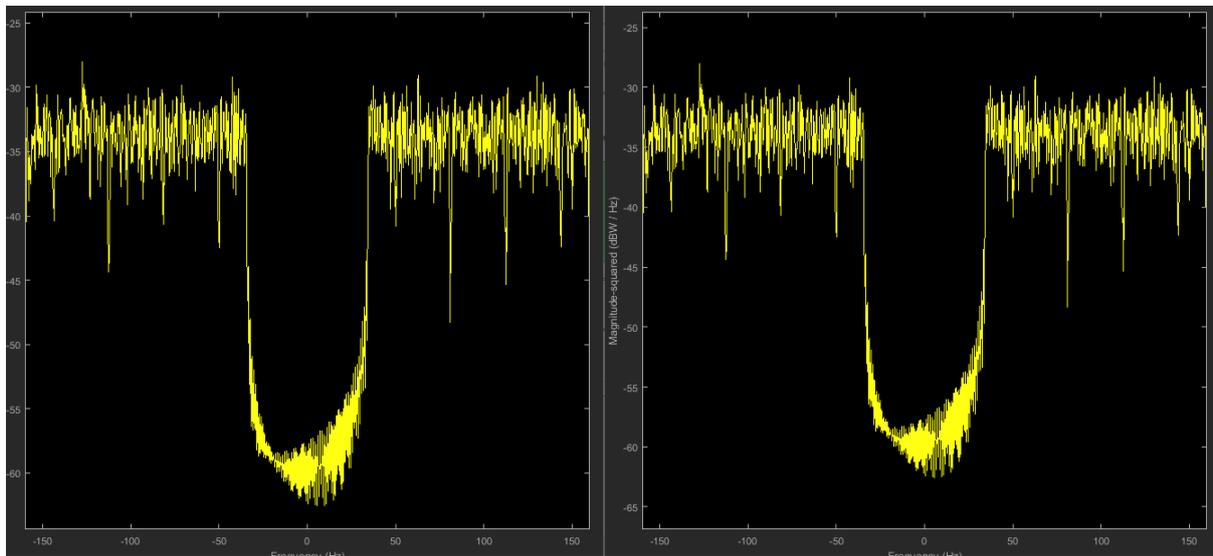
Figure 3.19 : Spectre de signal OFDM avec modulation QAM 16 a SNR = 5 dB



Après le passage

Avant le passage

Figure 3.20 : Spectre de signal OFDM avec modulation QAM 16 a SNR = 15dB



Après le passage

Avant le passage

Figure 3.21 : Spectre de signal OFDM avec modulation QAM 16 a SNR = 60 dB

Les résultats de calcul du taux d'erreur par bit et le nombre de bits perdu, le nombre total de bit sont affichés comme suit :

- Pour un SNR = 5dB

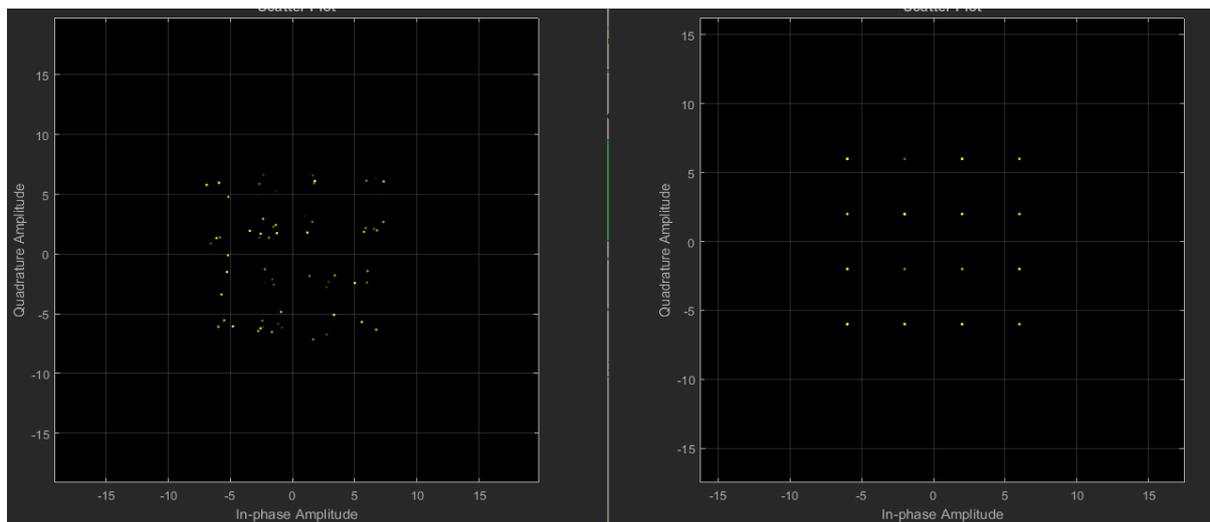
- BER= 0.057996
- Nombre de bits perdu = 222750
- Nombre de bits total = 3840768

- pour un SNR = 15dB
 - BER = 2.6036×10^{-4}
 - Nombre de bits perdu = 1
 - Le nombre de bits total = 3840768
- pour un SNR = 60dB
 - BER = 0
 - Nombre de bits perdu = 0
 - Le nombre de bits total = 3840768

Interprétation : on remarque bien dans les figure 3.19 3.20 3.21 représentant les spectres de signaux, que quand le SNR augmente, le signal OFDM a modulation QAM-16 est efficace, et la qualité de transmission est bonne, cela est évident car plus le bruit diminue plus le SNR augmente et le BER diminue, et la transmission se stabilise a 3840768 bits transmis et au-delà de SNR = 15 le BER tend vers zéro et aucun bits n'est perdu.

- Influence du bruit sur le diagramme de constellation :

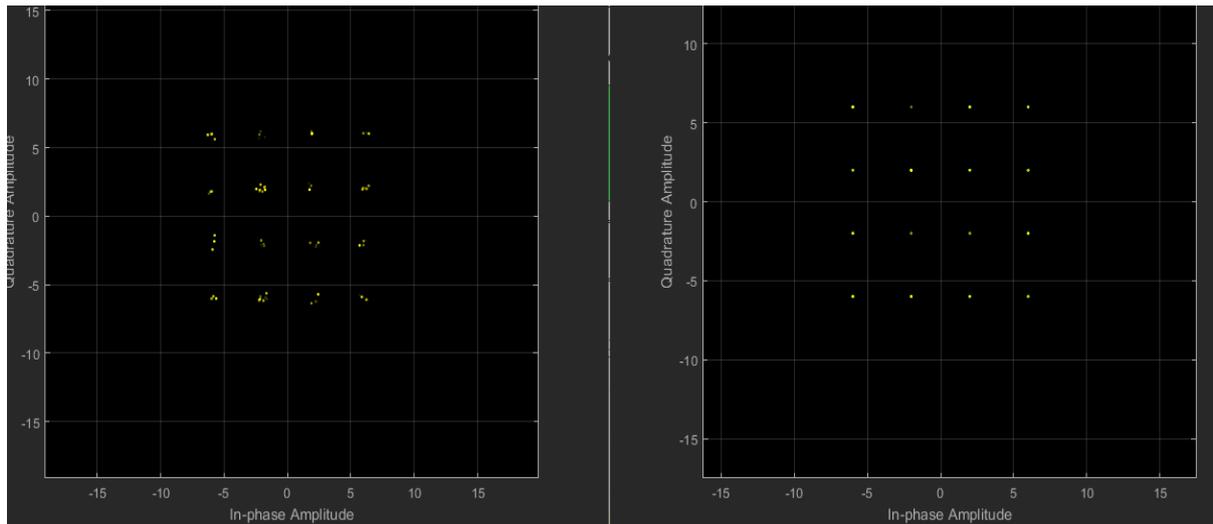
Les constellation suivante sont prelever avant et apre le passage sur le canal AWGN



Après le passage

Avant le passage

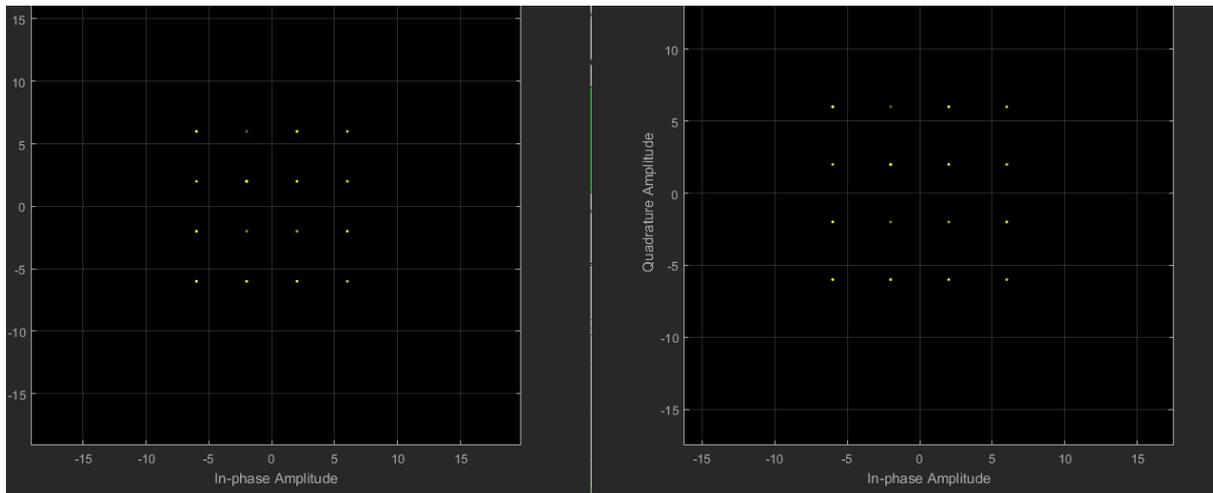
Figure 3.22 : Constellation de signal OFDM avec modulation QAM 16 a SNR = 5dB



Après le passage

Avant le passage

Figure 3.23 : Constellation de signal OFDM avec modulation QAM 16 a SNR = 15dB



Après le passage

Avant le passage

Figure 3.24 : Constellation de signal OFDM avec modulation QAM 16 a SNR = 60dB

Dans la figure 3.23, on remarque un nuage de points autour du point principal a l'après passage sur le canal AWGN cela est dû aux perturbations du bruit qui fait que les bits se trouvent augmentes ou diminues de leur amplitude et phase à cause du bruit additif blanc gaussien

3.3.2 Résultats des simulations d'un système OFDM avec modulation QAM-64 :

Cette simulation reprend le même système OFDM et la même chaine de transmission dans la figure 3.1, on change uniquement la modulation qui est une modulation QAM-64, et exactement comme dans la simulation précédente, on variera le rapport signal/bruit SNR = [5 15 60] et on analyse les résultats.

Les paramètre de cette simulation son illustrer dans le tableau (figure 3.25) :

Paramètre	Valeur
Nombre de sous porteuse	64
La durée d'un symbole	1/192 s
Intervalle de garde	4
Type de modulation	64QAM
Taille de constellation	64

Figure 3.25 : Paramètre de la simulation d'un système OFDM avec modulation QAM 64

Dans un premier temps on visualise d'abord le signal OFDM a la sortie et l'entrée du canal AWGN

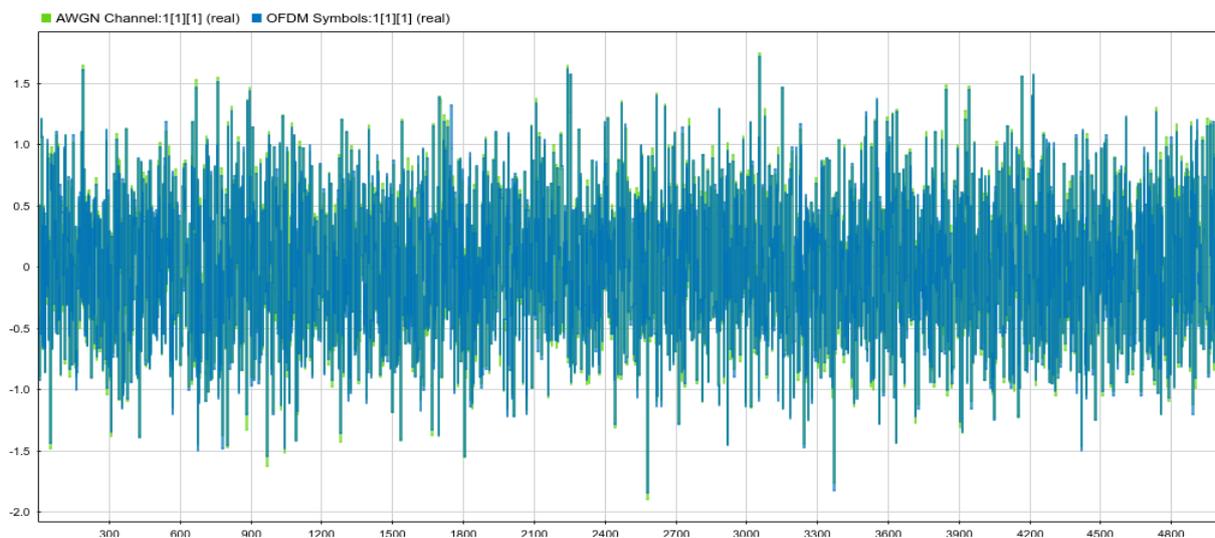


Figure 3.26 : Signal OFDM avec modulation QAM 64 a SNR =5dB

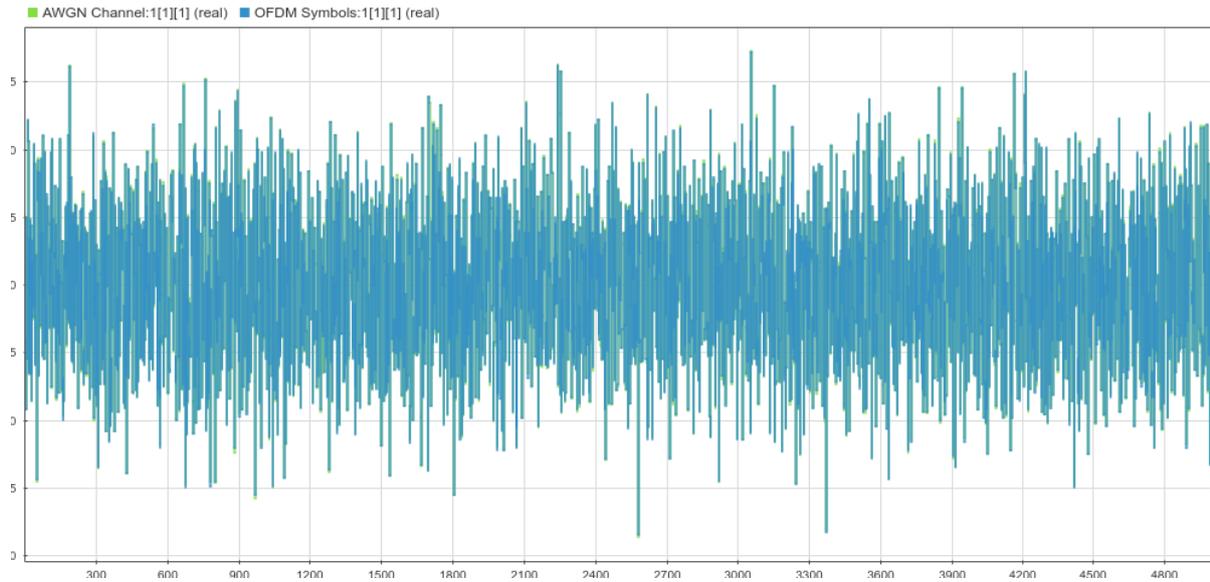


Figure 3.27 : signal OFDM avec modulation QAM 64 a SNR = 15dB

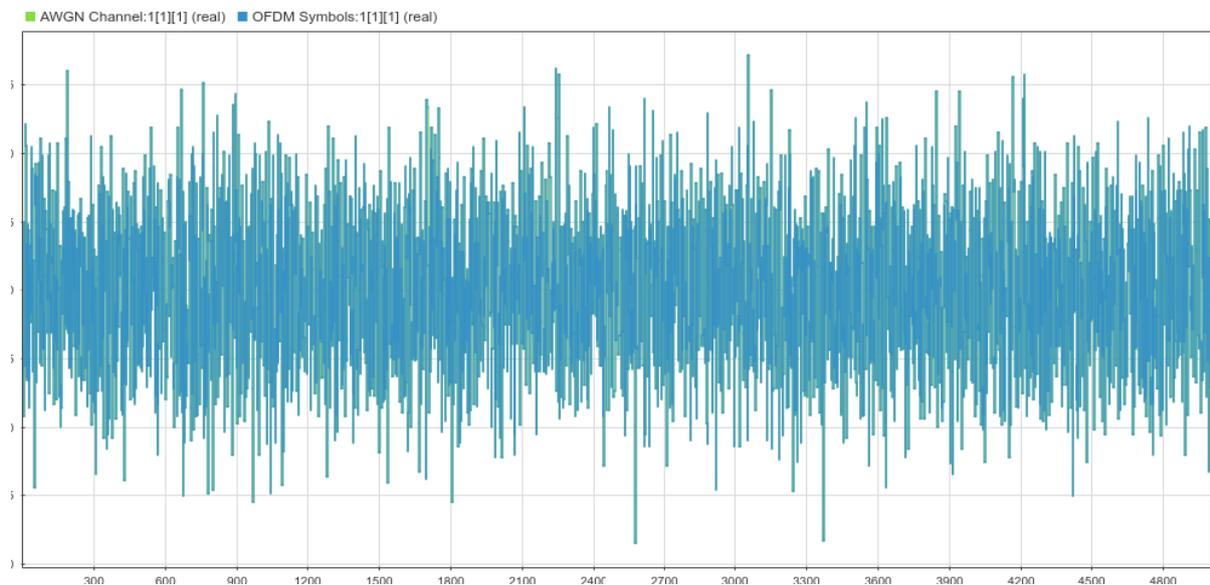
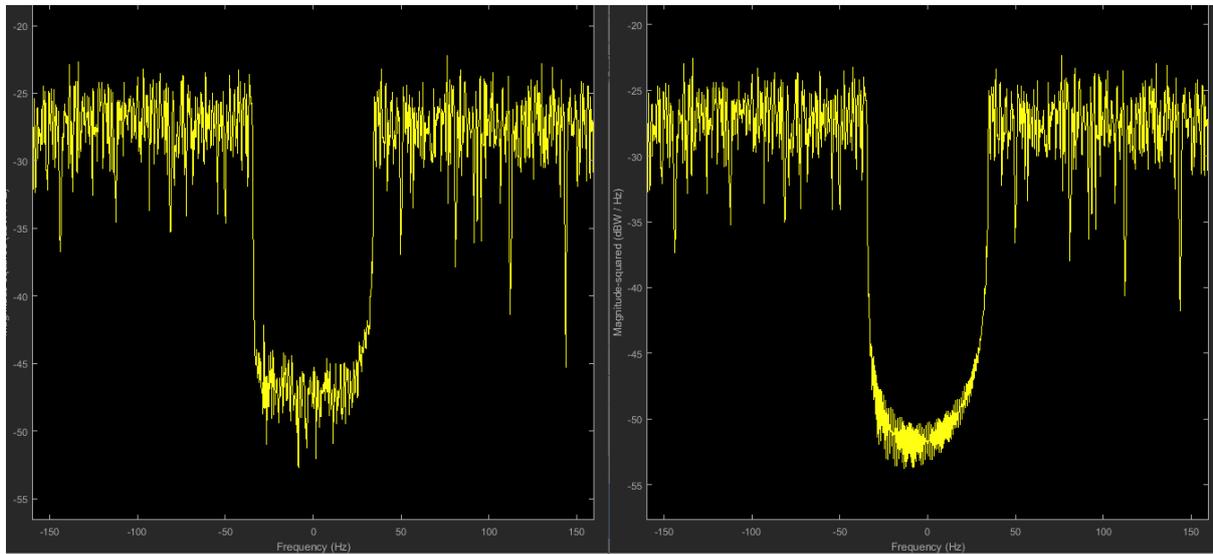


Figure 3.28 : Signal OFDM avec modulation QAM 64 a SNR = 60dB

Dans cette simulation, on constate les mêmes effets et résultats que pour la simulation avec QAM 16, plus le rapport signal/bruit SNR est élevé plus le signal avant le passage sur le canal correspond au signal après le passage sur le canal AWGN.

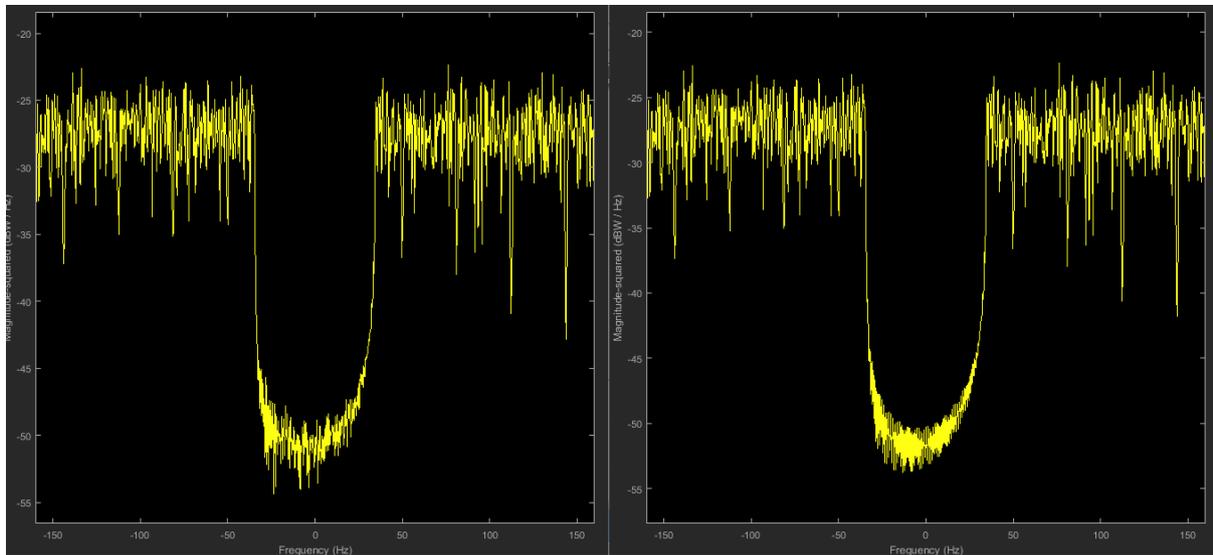
Comme dans la simulation précédente on visualisera les résultats des spectres de signal pour avant et après le passage sur le canal :



Après le passage

Avant le passage

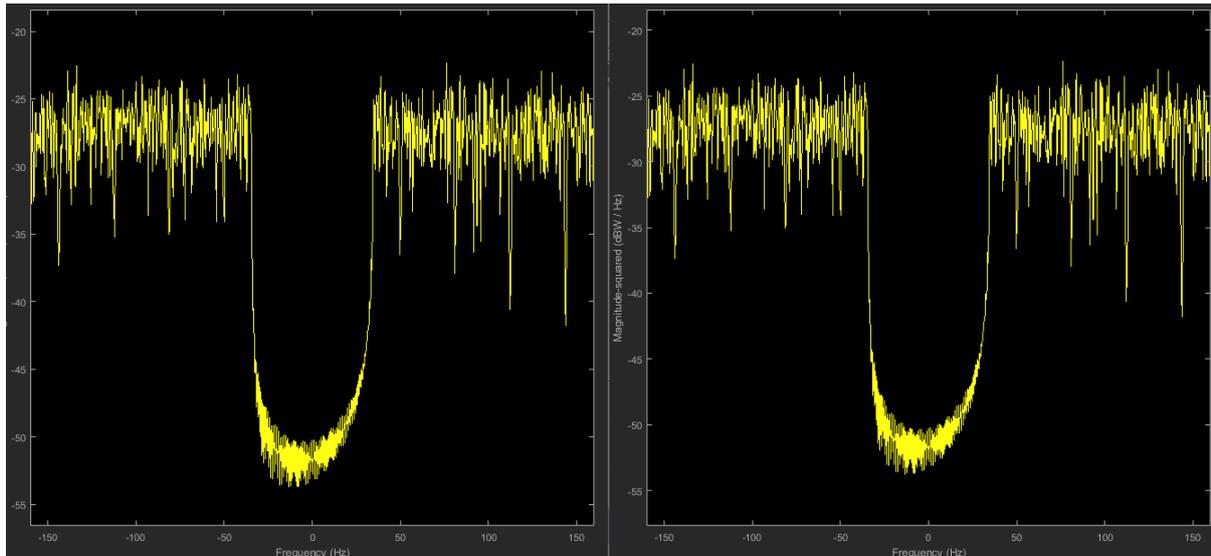
Figure 3.29 : Spectre de signal OFDM avec modulation QAM 64 a SNR = 5dB



Après le passage

Avant le passage

Figure 3.30 : Spectre de signal OFDM avec modulation QAM 64 a SNR = 15dB



Après le passage

Avant le passage

Figure 3.31 : spectre de signal OFDM avec modulation QAM 64 a SNR = 60dB

Les résultats affichés pour les trois simulations sont :

- pour un SNR = 5dB

- BER= 0.3443299
- Nombre de bits perdu = 1983737
- Nombre de bits total = 5761152

- pour un SNR = 15dB

- BER= 0.1347029
- Nombre de bits perdu = 776044
- Nombre de bits total = 5761152

- pour un SNR = 60dB

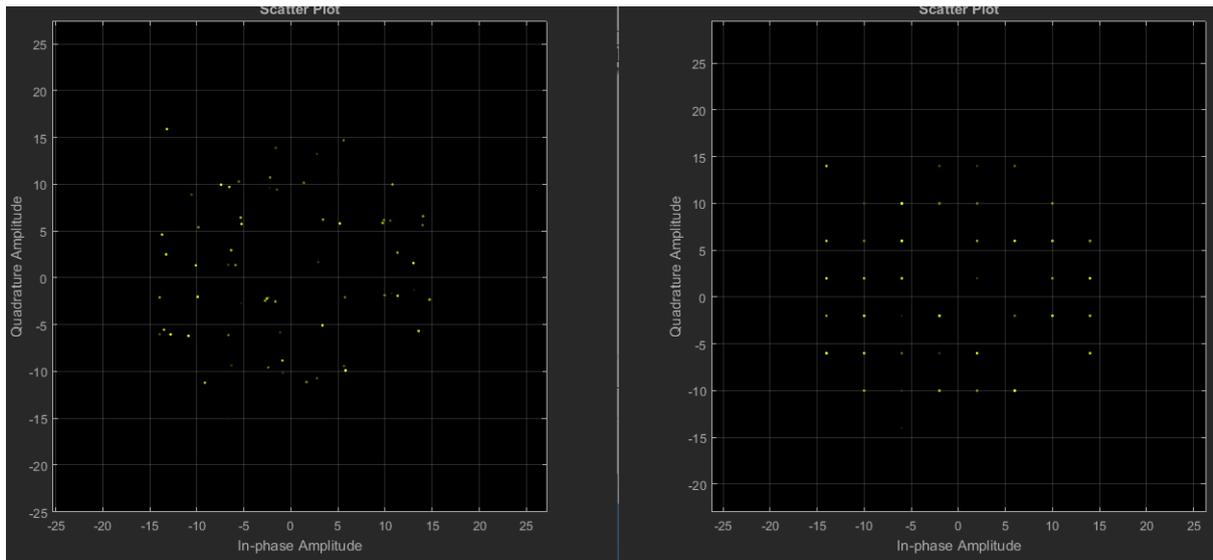
- BER= 0
- Nombre de bits perdu =0
- Nombre de bits total = 5761152

Interprétation : on constate que le spectre a subi des modifications sur les deux premiers tests a SNR = 5, 15, pour le troisième test, le spectre d'avant le passage sur le canal correspond au spectre après son passage. A cet effet nous aurons la même allure

du signal modulé en OFDM avant et après l'ajout du bruit AWGN avec une petite atténuation du spectre aux basses fréquences. En termes de qualité de transmission, on remarque bien que l'avantage de L'OFDM est que pour les 5761152 bits transmis, aucun bit n'est perdu, et un BER qui tend vers 0 sur un canal AWGN a $SNR = 60dB$.

-Influence du bruit sur le diagramme de constellation :

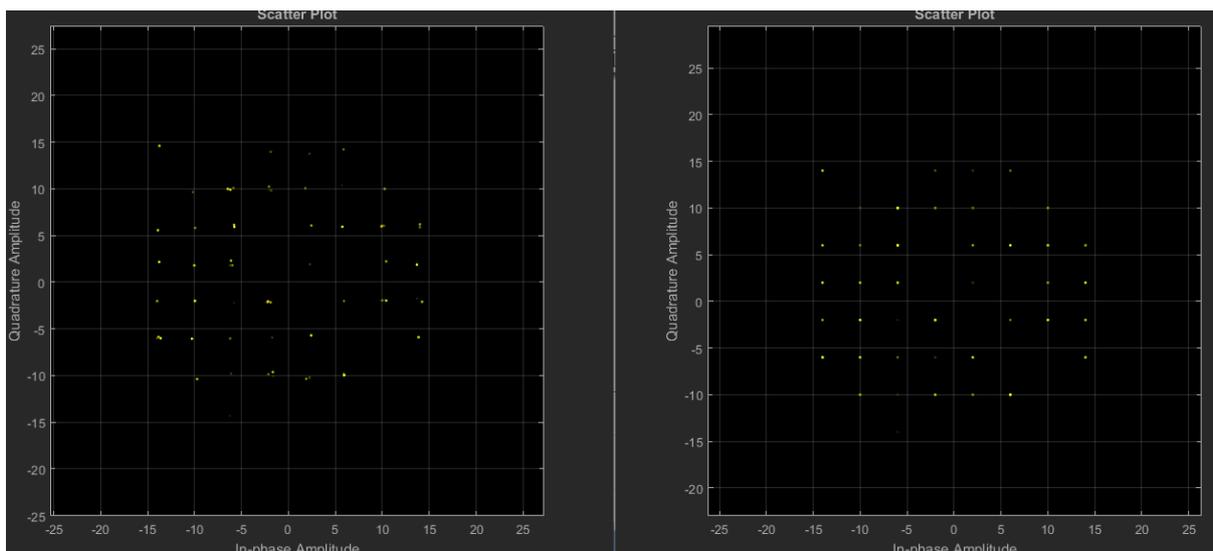
Les constellations suivantes sont prélever avant et après le passage sur canal AWGN



Après le passage

Avant le passage

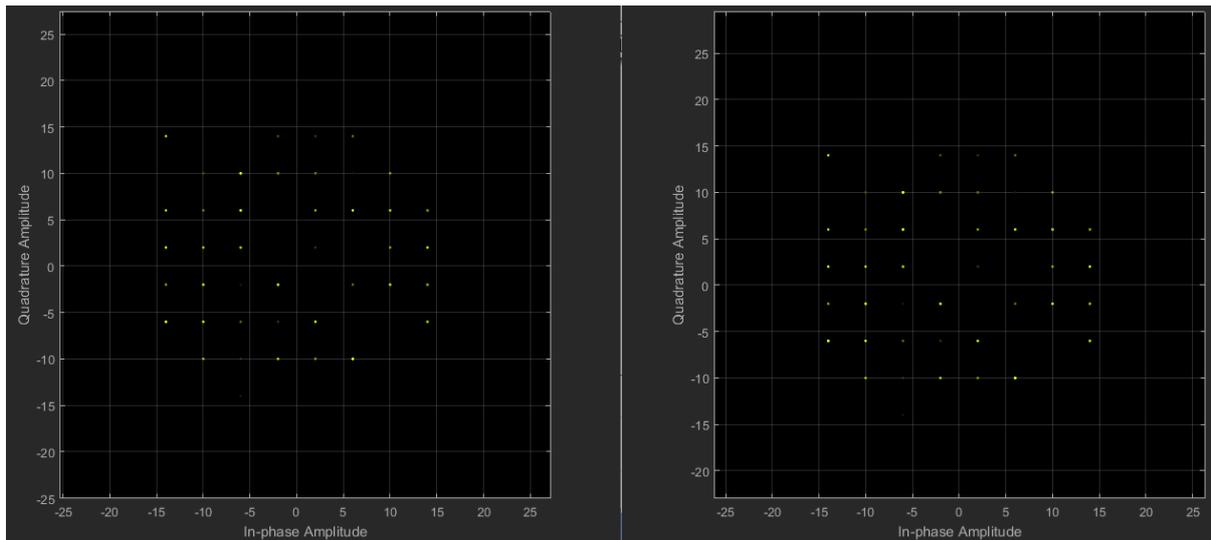
Figure 3.32 : Constellation de signal OFDM avec modulation QAM 64 a $SNR = 5dB$



Après le passage

Avant le passage

Figure 3.33 : Constellation de signal OFDM avec modulation QAM 64 a $SNR = 15dB$



Après le passage

Avant le passage

Figure 3.34 : Constellation de signal OFDM avec modulation QAM 64 a SNR = 60dB

On constate dans la figure 3.32 que presque le mem nuage de point autour du point principal sur la constellation qui est due aux effets du bruit blanc gaussien, dans ce cas-là que le système OFDM prend une décision de garder ou de supprimer le bit par le billet de la méthode la plus utiliser et de distance minimale entre le point reçue et le point principal, une limite de distance minimal est fixée.

3.4 L'effet de la taille M-aire de la modulation numérique :

Nous utilisons la même méthode pour générer une modulation OFDM, mais nous faisons varier la taille de la constellation de la modulation QAM, Nous traçons la courbe de variation BER en fonction SNR de chaque constellation. La figure 3.36 montre les courbes de performances d'un système OFDM pour les différentes valeurs de la taille de constellation M.

PARAMETRE	VALEUR
La durée de la simulation	100 s
La durée d'un symbole	1/192 s
Type de modulation	QAM
Taille de constellation	4, 8, 16, 64
Canal	AWGN

Figure 3.35 : Paramètre de la simulation d'un système OFDM a déférente M-aire a modulation QAM

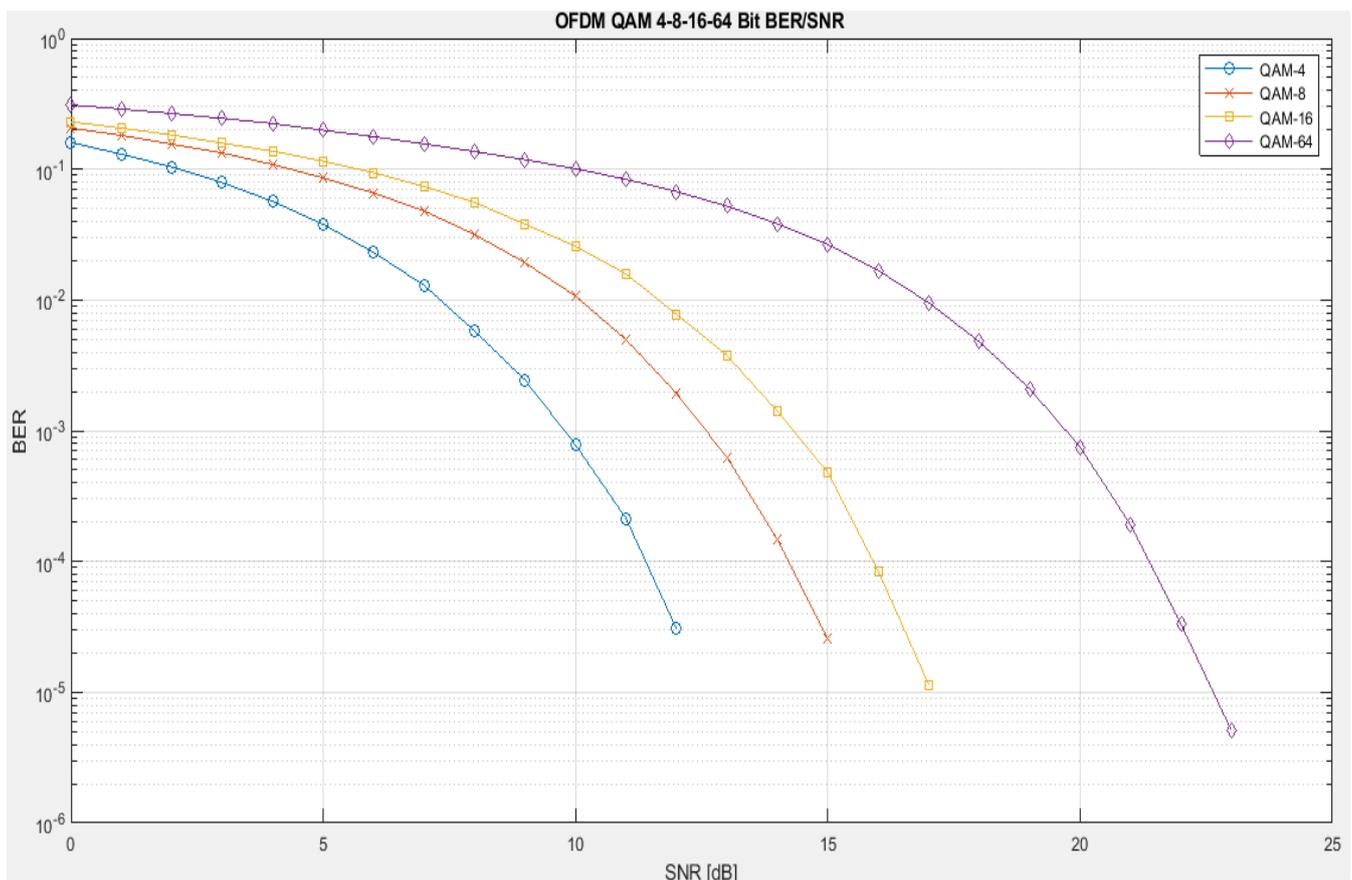


Figure 3.36 : Variation du BER en fonction du SNR pour différentes valeurs de la taille de modulation numérique.

Cette variation est due à l'interférence entre les symboles au niveau du récepteur. La figure 3.36 montre bien que le taux d'erreur binaire pour une modulation 64QAM est plus grand que celui des modulations 4QAM, 8QAM et 16QAM. Ceci peut être expliqué

par la différence de distances entre les symboles, et qu'évidemment plus la capacité augmente (nombre de transmission de bit) plus l'erreur par bit augmente

3.5 Effet de l'intervalle de garde sur le BER :

Pour constater l'impact de l'intervalle de garde, on reproduira la même simulation mais cette fois on retirera l'intervalle de garde dont le rôle est d'ajouter un préfixe cyclique entre les symboles OFDM.

Dans cette simulation on retirera les blocs add cyclic prefix présent dans le bloc de modulation OFDM, et le bloc remove cyclic prefix présent dans le bloc de démodulation OFDM, et on lance la simulation :

-QAM 16 a SNR = 60dB

- BER= 0.49990626
- Nombre de bits perdu = 1220348
- Nombre de bits total = 3840768

-QAM 64 a SNR = 60dB

- BER= 0.4999498
- Nombre de bits perdu = 2680287
- Nombre de bits total = 5761152

On remarque que le BER et le nombre de bits perdus est complètement différent quand on retire l'intervalle de garde même à SNR = 60dB , cela est dû aux interférences entre les symboles qui s'ajoutent aux perturbations du bruit.

Cette dernière manipulation nous a montré l'importance de l'intervalle de Garde entre les symboles (le préfix cyclique) pour améliorer la transmission et avoir une meilleure aptitude à résister au bruit

3.6 Conclusion :

Le dernier chapitre nous a permis de montrer concrètement un système de transmission OFDM à travers les simulations sur MATLAB | SIMULINK. On 'a reproduit une chaîne de transmission OFDM et expliqué le fonctionnement de chaque bloc, on a également vu que le bruit additif blanc gaussien AWGN a des effets sur la transmission OFDM. On 'a aussi étudié le taux d'erreur par bit (BER) sur chaque transmission en variant le SNR avec une modulation QAM-16/64.

Les résultats obtenus sur les deux simulations de signal OFDM à modulation QAM 16 et QAM 64 démontrent la bonne aptitude d'un signal OFDM à résister au bruit. On notera que le BER été faible dans nos simulations quand le SNR été au-dessus de 15dB, ce qui montre que la transmission OFDM est résistante à ce type de bruit, mais dès que l'on a annulé le préfix cyclique dans notre dernière simulation, on a constaté une grande augmentation du BER, d'où l'importance de l'intervalle de garde entre symboles dans l'aptitude a résisté aux perturbations.

Conclusion general

Le travail mené dans ce mémoire nous a permis d'étudier les performances des modulations multi-porteuses OFDM dans un canal AWGN. Ce projet réalise une étude théorique et une validation par simulation des performances de l'OFDM. Les performances sont données en matière de taux d'erreur binaire (BER), et par visualisation du signal et de sa constellation

Dans un premier temps, nous avons décrit la chaîne de transmission numérique et ces différents blocs qui la constitue, ainsi que la transmission en bande de base et les différents codages en ligne. Nous avons présenté les modulations numériques usuelles et plus précisément la modulation d'amplitude en quadrature, utilisée dans la majeure partie de nos études. Les différentes techniques d'accès multiple, leurs avantages et inconvénients et précisément la FDMA et son inconvénient majeure de Guard Band.

Le deuxième chapitre de ce document a été consacré à la présentation de l'OFDM, le principe de base de la modulation multi porteuse OFDM et démodulation, nous avons présenté la transformée de Fourier discrète (DFT) et sa dérivée optimale qui est la transformée de Fourier rapide (FFT) et son importance dans la version de l'OFDM numérique, on a exposé les avantages de l'OFDM par rapport à la technique FDM. Ainsi que ses inconvénients.

Dans le chapitre 3 nous avons simulé une chaîne de transmission OFDM à travers un canal AWGN et exposé en détail nos résultats de simulation suivis par des interprétations. Nous avons commencé par l'étude et l'évaluation des performances d'un système OFDM à modulation QAM-16 et puis à modulation QAM-64 à l'aide du module Simulink de MATLAB. À travers les résultats on a remarqué que l'OFDM est simple à implémenter avec de bonnes performances en termes de taux d'erreur binaire (BER). Les modulations multi-porteuses étant utilisées le plus souvent pour combattre les nuisances dues aux canaux multi-trajets,

Aujourd'hui, plusieurs standards reposent sur la modulation OFDM en particulier en raison de la simplicité de l'égalisation du canal ceci permet de transmettre avec plus d'efficacité des données sur des canaux multi trajets.

Perspectives Et Futures Travaux

Notre étude a aussi ouvert quelques perspectives. Ainsi, de nombreux travaux restent à mener pour pouvoir aboutir à des chaînes de transmission complètes de type OFDM suréchantillonnée. La difficulté étant d'améliorer notablement les performances, sans trop accroître la complexité. Ainsi, la recherche de systèmes simples et efficaces en termes d'égalisation et de synchronisation reste d'actualité. Il est aussi nécessaire de pouvoir régler, avec ces nouvelles modulations, les problèmes liés aux techniques d'accès par code ainsi qu'à l'augmentation de débit par des techniques MIMO. Aussi, on peut proposer d'implémenter et simuler la modulation OFDM dans le système WIMAX. Enfin la dernière perspective est d'utiliser ce type de système dans la transmission des signaux audio et vidéo.

Bibliographie

[1] W. Webb, *The Complete Wireless Communications Professional : A Guide for Engineers and Managers*. Boston: Artech House Publishers, 1999.

[2] S. Benedetto E. Biglieri, *Principle of digital transmission with wireless applications*,.Kluwer Academic, 1999

[3] R. W. Chang, "Synthesis of Band-limited Orthogonal Signals for Multichannel Data Transmission," *The Bell System Technical Journal*, pp. 1775–1796, December 1966.

[4] D. Divsalar, M. K. Simon et D. Raphaeli, Improved parallel interference cancellation for CDMA, *IEEE Trans. on Communications*, vol. 46, n2, pp. 258-268, F´ ev . 1998.

[5] s.gautier & A.margollé , *traitement du signal numerique ,optique, photométrie colorimetrie vuilbert-* aut 2016 5 allée de la 2eme DB 75015 paris

[6] Bases de transmissions numériques auteurs-ENSEIRB
-BASES DE TRANSMISSIONS NUMERIQUES Les modulations numériques

[7] BAOUNI ABDELKHALEK, « Estimation du Canal et Elimination des Interférences ICI dans les Communications Mobiles avec Modulation OFDM », MEMOIRE Présenté pour obtenir le diplôme de Magister, UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE

[8] Xu Zhang: «Modeling & Performance Analysis of QAM-based COFDM System », University of Toledo August 2011

[9] MORI, Y. « *Electronique pour le traitement du signal, volume 2-Notions de signal et de bruit* », . Edition: Hermes, Lavoisier, Paris, 2006.

[10] Mémoire de fin d'études, Thème Application d'un réseau de neurones pour la réduction des distorsions de non linéarités dans une transmission multi porteuses O.F.D.M, Melle Nacer bey Ghania Melle Guezoui Zahia.

[11]http://www.telecom.ulg.ac.be/teaching/notes/multimedia/node63_mn.html

20/05/2021

[12] 1MODULATIONS MULTIPORTEUSES Annick Le Glaunec

[13] H. Sari, G. Karam, I.JeanClaude IEEE Communications Magazine Feb 1995 p100
-Data Transmission by Frequency Division Multiplexing using the Discrete Fourier Transform

[14] MEMOIRE DE MASTER, Etude de performances des modulations multi porteuses OFDM dans un canal radio mobile SOLTANI Samira juin 2012

[15] Mémoire présenté à l'université du québec à trois-rivières, présenté à l'université du québec à trois-rivières, optimisation de la fft à virgule fixe basée sur les algorithmes génétiques, KHALED A TOUB, novembre 2013

[16] C.Berrou, Y. Saouter, C.Douillard, S.Kerouedanet M.Jezzequel, "Designing good permutations for turbo-codes: towards a single model", IEEE Communications Society, pp.341-345, 2004

[17] A. A. Hutter: "Design of OFDM Systems for frequency-selective and time-variant channels", Broadband Communications. 2002 International Zurich Seminar on Access, Transmission, Networking.

[18] Gurve AC, Wasnik SS, Yerlekar ABAS, Chide N. « Study of OFDM Variants and Implementation of OFDM Using fft/IFFT. » .International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering Vol. 3, Issue 7, July 2014

[19] Manjushree Bhardwaj «A Review on OFDM: Concept, Scope and its Applications», Department of electronics and instrumentation disponible sur: www.iosrjournals.org

[20] Jean-Louis VERNEUIL, « Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s », Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2003, disponible sur :<http://epublications.unilim.fr/theses/>

[21] Les modulations numériques dans les systèmes de communication Jean-Philippe MULLER, Décembre 2000

[23] S. Zhou, Y. Li, M. Zhao, X. Xu, J.Wang, and Y. Yao, “Novel techniques to improve downlink multiple access capacity for B3G,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 43, pp. 61-69, Jan. 2005.

[24] E. H. Dinan et B. Jabbari, .Spreading codes for direct sequence CDMA and wideband CDMA cellular networks., *IEEE Commun. Magazine*, vol. 36, n_ 9., pp. 48-54, Sept 1998.

[25] Application des techniques multiporteuses de type OFDM pour les futurs systèmes de télécommunications par satellite DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE Institut National Polytechnique de Toulouse Spécialité Réseaux, Télécommunication, Système et Architecture présentée et soutenue par :HO Anh Tai

[26] Mrutyunjay Panda, Dr. Sarat K.Patra, Simulation study of OFDM, COFDM, MIMO-OFDM Systems, *Sensors and Transducer Journal*, Vol 106, Issue 7, July 2009

[27] OFDM SIMULATION in MATLAB A Senior Project Presented to the Faculty of California Polytechnic State University San Luis Obispo By Paul Guanming Lin June 2010

[28] Proakis, J.G. (2008) Digital Communications 5/E, McGraw-Hill, New York.

[29] C.Thorpe, OFDM Wireless Systems Simulation using SIMULINK®, International DSP Conference, Stuttgart, May,1998

