

République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

N° : STLC17



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE

FILIERE : TELECOMMUNICATION

Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de master

Option : système de télécommunication (STLC)

Par : Bentaleb Nacereddine

Benatia Djelloule

Intitulé

Etude des performances de la technique OFDM pour les communications sans fil

Soutenu devant le jury composé de:

Président :	Dr.S. BENMAHMOUD	Université de M'sila
Rapporteur:	Dr.Z. ZERDOUMI	Université de M'sila
Examineur:	Dr.M.E. Ketfi	Université de M'sila

Année Universitaire : 2018-2019

Dédicace

Nous dédions ce modeste travail À nos parents
Aucun mot ne saurait exprimer nos respects et
nos amours éternel.

À nos familles Vos présences et vos soutiens tout
au long de nos cursus étaient nos honneurs. Nos
souhails pour vous Que du bonheur et de santé.

À nos familles ainsi que tous nos amis, nous vous
aimons tous.

Nasser et djelloule

Remerciements

Nous remercions ALLAH le Tout-Puissant qui nous a donné le courage pour élaborer ce modeste travail. Ce travail a été accompli à l'aide de plusieurs personnes que nous tenons à

Remercier absolument.

Nous remercions tout d'abord notre encadreur M^{me}: Zerdoumi Zahra de nous avoir apporté ses valeureux conseils et soutiens durant la réalisation de ce mémoire. Nous remercions également les membres de jury de nous avoir fait l'honneur en acceptant

d'examiner et de juger notre travail.

Nos remerciements vont aussi à tous nos enseignants et toutes les personnes qui nous ont soutenus jusqu'au bout, et qui n'ont pas cessé de nous donner des conseils précieux.

Finalement, nous remercions tous ceux qui ont participé de prêt ou de loin dans l'élaboration de ce travail.

Résumé

Les besoins accrues des services de télécommunications sans fil à grande vitesse, ont abouti à un regain d'intérêt aux modulation multi-porteuses, plus explicitement la technique OFDM. Cette dernière a suscité des intérêts majeurs en raison de sa robustesse aux évanouissements par trajets multiples et sa capacité à réaliser une efficacité élevée de transmission. Les excellentes performances de l'OFDM ont incité son adoption dans de nombreux standards des systèmes sans fil actuels et futurs.

Notre travail est concerné à la conception, simulation et l'étude des performances d'un système OFDM à base de la transformée de Fourier discrète utilisant, différents types de modulations. La transformée en ondelette discrète DWT (Discret Wavelet Transform) constitue une amélioration à l'analyse de Fourier, nous avons étudié l'impacte de l'utilisation de cette technique sur les performances du système de transmission OFDM. Les deux approches à savoir l'OFDM-FFT et l'OFDM-DWT sont implémentées à l'aide de SIMULINK, leurs performances respectives sont misent en valeurs. Les simulations que nous avons réalisées nous ont permis de mettre en relief les améliorations obtenues par l'OFDM-DWT du point de vue du taux d'erreur binaire et rapport signal à bruit relativement à l'OFDM-FFT.

Mots -clés : *Communications sans fil, canaux à trajets multiples, Modulation multi-porteuses, OFDM, FFT, DWT*

Abstract

The increased need for high-speed wireless telecommunications services has led to a renewed attention to multi-carrier modulation, more explicitly the OFDM technique. The latter has attracted major interest because of its robustness to multipath fading and its ability to achieve high transmission efficiency. The excellent performance of the OFDM has led to its adoption in many standards of current and future wireless systems.

Our work is concerned with the design, simulation and performance study of an OFDM system based on the discrete Fourier transform using different types of modulations. DWT (Discrete Wavelet Transform) is an improvement to Fourier analysis, we have studied the impact of the use of this techniques on the performance of the OFDM transmission system. The two approaches namely OFDM-FFT and OFDM-DWT are implemented using SIMULINK, their performances respective are highlighted. The simulations we carried out allowed us to highlight the improvements obtained by the OFDM-DWT in term of the bit error rate and signal-to-noise ratio relatively to the OFDM-FFT.

Keywords: Wireless communications, multipath channels, Multi-carrier modulation, OFDM, FFT, DWT.

ملخص

أدت الحاجة المتزايدة لخدمات الاتصالات اللاسلكية عالية السرعة إلى تجدد الاهتمام بتعديل الموجات الحاملة المتعددة ، وبشكل أوضح تقنية OFDM . وقد اجتذبت هذه الأخيرة اهتماماً كبيراً بسبب متانتها في الإرسال عبر مسيرات متعددة وقدرتها على تحقيق كفاءة نقل عالية. أدى الأداء الممتاز لنظام OFDM إلى اعتماده في العديد من معايير الأنظمة اللاسلكية.

يهتم عملنا بتصميم ومحاكاة ودراسة أداء نظام OFDM استناداً إلى تحويل فورييه المنفصل باستخدام أنواع مختلفة من التشكيلات. يعد تحويل الموجات المنفصلة (DWT) تحسناً لتحليل فورييه ، وقد درسنا تأثير استخدام هذه التقنية على أداء نظام نقل OFDM. طبقنا نهج OFDM-FFT و OFDM-DWT باستخدام SIMULINK ، و سلطنا الضوء على أدائهما. سمحت لنا المحاكاة التي أجريناها بتسليط الضوء على التحسينات التي حصل عليها OFDM-DWT من وجهة نظر معدل الخطأ في البتات ونسبة الإشارة إلى الضوضاء بالنسبة إلى OFDM-FFT.

الكلمات المفتاحية: الاتصالات اللاسلكية ، قنوات متعددة المسارات ، تعديل متعدد الموجات ، OFDM ، FFT ، DWT

TABLE DES MATIERES

Dédicace.....	I
Remerciements.....	II
Résumé.....	III
Table des matières	VI
Liste des figures	IX
Liste des Tableaux	XII
Liste des Acronymes	XIII
Introduction Générale.....	1

Chapitre 01 : Généralité sur les télécommunications

1.1 Introduction.....	3
1.2 Les Réseaux sans Fil	3
1.2.1. Classification selon la zone de couverture	4
1.2.1.1. Les réseaux personnels sans fil (WPAN) :.....	5
1.2.1.2. Réseaux locaux sans fil (WLAN) :	5
1.2.1.3. Réseaux métropolitains sans fil (WMAN) :.....	5
1.2.1.4. Réseaux étendus sans fil (WWAN) :	5
1.2.2. Classification selon l'infrastructure [5]	6
1.2.2.1 Réseaux cellulaires (avec infrastructure) :.....	6
1.2.2.2 Réseaux ad hoc (sans infrastructure) :	7
1.3 .Réseau WIMAX	8
1.4 .Les avantages et les inconvénients des réseaux sans fil	9
1.4.1 Les avantages du déploiement d'un réseau sans fil	9
1.4.2 Les inconvénients des réseaux sans fils	9
1.5 . Les techniques de Multiplexage	10
1.5.1. Accès multiple par répartition en fréquence FDMA	10
1.5.2 L'accès multiple par répartition dans le temps (TDMA)	11
1.5.3. Code Division Multiple Access (CDMA)	13
1.5.4. L'accès multiple à division de longueur d'onde WDM	13

TABLE DES MATIERES

1.6	. Modèles des canaux de communications.....	14
1.6.1	Canal à bruit blanc additif gaussien (AWGN).....	14
1.6.2	Canal à filtre linéaire et bruit blanc additif gaussien	15
1.6.3	Canal de propagation multi trajet.....	15
1.6.4	Canal à distribution de Rayleigh.....	18
1.6.5	Canal à distribution de Rice.....	18
1.7	La probabilité d'erreur et le taux d'erreur	19
1.8	Rapport signal sur bruit (SNR)	19
1.9	Conclusion	20

Chapitre 02 : La technique OFDM: de la transformée de Fourier à la transformée en ondelette

2.1	Introduction.....	21
2.2	Historique de la technique OFDM.....	21
2.3	Modulations multi-porteuses	22
2.4	Modulation de chaque sous-porteuse du signal OFDM.....	24
2.4.1	Modulation QPSK.....	25
2.4.2	Modulation QAM	25
2.5	Technique de modulation OFDM	26
2.5.1	Principe de l'OFDM	26
2.5.2	Porteuses orthogonales	27
2.6	Système OFDM basé sur la transformée de Fourier discrète	29
2.6.1	Principe de la modulation dans un système OFDM	30
2.6.2	Principe de la démodulation dans un système OFDM.....	31
2.6.3	Intervalles de gardes	32
2.6.3.1	Remplissage par des zéros	33
2.6.3.2	Préfixe cyclique	33
2.6.3.3	Suffixe cyclique	34
2.7	Parentèse sur les ondelettes.....	35

TABLE DES MATIERES

2.8 Motivation pour l'utilisation des ondelettes	35
2.9 Système OFDM basé sur la transformée en ondelette discrète	36
2.10 Application des ondelettes en télécommunications	38
2.11 Avantages OFDM	39
2.12 Conclusion	39

CHAPITRE 3: Résultats de simulation de la technique OFDM

3.1 Introduction.....	40
3.2 Présentation du Simulink	40
3.3 Chaîne de transmission OFDM à base de FFT	41
3.3.1 Blocs d'émission OFDM-FFT	42
3.3.2 Blocs de réception OFDM-FFT	49
3.3.3 Comparaison des performances de l'OFDM-FFT	53
3.3.3.1 Constellation de l'OFDM-FFT, modulation BPSK.....	53
3.3.3.2 Constellation de l'OFDM-FFT, la modulation QPSK.....	54
3.3.3.3 Constellation de l'OFDM-FFT, la modulation 16-QAM	55
3.3.3.4 Taux d'erreur de l'OFDM-FFT	56
3.4 Chaîne de transmission OFDM à base de DWT.....	58
3.4.1 Blocs d'émission OFDM-DWT :	59
3.4.2 Blocs de réception OFDM-DWT:.....	60
3.4.3 Comparaison des performances de l'OFDM-DWT	61
3.4.3.1 Constellation de l'OFDM-DWT, modulation BPSK.....	61
3.4.3.2 Constellation de l'OFDM-DWT, modulation QPSK	62
3.4.3.3 Constellation de l'OFDM-DWT, la modulation 16-QAM.....	63
3.3.3.4 Taux d'erreur de l'OFDM-DWT	64
3.5 Comparaison entre l'OFDM-FFT et l'OFDM-DWT en BER	65
3.6 Conclusion	67
Conclusion Générale.....	68
Bibliographie	69

Liste des figures

Figure 1.1: Classification des réseaux sans fil	4
Figure 1.2: réseaux sans fil selon la zone de couverture.....	4
Figure 1.3 : Le modèle des réseaux mobiles avec infrastructure	7
Figure 1.4 : Réseau en mode ad hoc.	7
Figure 1.5 : réseau WIMAX	8
Figure 1.6. Multiplexage des possibilités d'accès à un canal.	10
Figure 1.7: La technique de multiplexage FDM.....	11
Figure 1.8: Répartition des périodes dans le cas d'un multiplexage TDM.....	12
Figure 1.9: Représentation d'un multiplex TDM (4 voies vers 1).....	12
Figure 1.10 : La technique de multiplexage CDMA.....	13
Figure 1.11 : La technique de multiplexage WDM	14
Figure 1.12 : Modèle d'un canal à bruit additif Gaussien.....	15
Figure 1.13 : Modèle d'un canal à filtre linéaire et bruit additif.....	15
Figure 1.14 : Propagation par multi-trajets	16
Figure 1.15: Pas de ligne de vue (propagation NLOS) : canal de Rayleigh	16
Figure 1.16 : Existence d'une ligne de vue (propagation LOS) : canal de Rice.....	17
Figure 2.1 Modulations multi-porteuses	23
Figure 2. 2 Comparaison de la bande passante de l'OFDM et FDM (a) Sous	24
Figure 2.3: Constellation de la modulation de phase QPSK.....	25
Figure 2.4 Modulation QAM.	26
Figure 2.5: Représentation fréquentielle et temporelle d'un signal OFDM	27
Figure 2.6 : Spectre en sortie du modulateur OFDM.....	28
Figure 2.7: Schéma bloc d'un système OFDM-FFT	29
Figure 2.8: Schéma de principe du modulateur OFDM.....	30
Figure 2.9 : Schéma de principe du démodulateur OFDM.....	32
Figure 2.10 Les intervalles de gardes dans un symbole OFDM	33
Figure 2.11 : Insertion du préfixe cyclique.	34

Liste des figures

Figure 2.12 Schéma bloc d'un système OFDM -DWT	37
Figure 2.13 Applications des ondelettes en télécommunications	38
Figure 3.1 : Schéma bloc d'une chaîne de transmission OFDM-FFT en Simulink.....	41
Figure 3.2: Schéma bloc d'émission OFDM-FFT	42
Figure 3.3: Parameters du bloc Random Integer Generator	43
Figure 3.4 :Parameters du bloc Integer to bit converter.....	43
Figure 3.5: Paramètres du bloc Bit to integer Converter	44
Figure 3.6: Paramètres du bloc QPSK Modulator	44
Figure 3.7: Paramètres du bloc QAM Modulator	45
Figure 3.8: <i>Insertion des sous-porteuses</i> :	46
Figure 3.9 :Paramètres du bloc Multiplexeur Séléctor	47
Figure 3.10 :Paramètres du bloc IFFT	47
Figure 3.11 : <i>Paramètres du bloc Add Cyclic Prefix</i>	48
Figure 3.12 : Paramètres du bloc AWGN.....	49
Figure 3.13: <i>Schéma bloc d'un récepteur OFDM-FFT</i>	49
Figure 3.14:Paramètres du bloc Remove Cyclic Prefix.....	50
Figure 3.15 : <i>Paramètres du bloc FFT</i>	50
Figure 3.16:Paramètres du bloc Frame Conversion.....	51
Figure 3.17 :Paramètres du bloc zéro-padding	51
Figure 3.18: Paramètres du bloc Remove Pilots.....	52
Figure 3.19: Paramètres du bloc Error Rate Calculation	53
Figure 3.20: Symboles BPSK, (a) Symboles transmis, (b) Symboles reçus	54
Figure 3.21: Symboles QPSK, (a) Symboles transmis	55
Figure 3.22: Symboles 16 QAM, (a) Symboles transmis	56
Figure 3.23: Taux d'erreur de l'OFDM-FFT, BPSK QPSK, QAM	57
Figure 3.24 : Schéma bloc OFDM à base de DWT sous Simulink.	58
Figure 3.25 : Schéma bloc d'émission de l'OFDM à base de DWT.	59
Figure 3.26: Bloc IDWT	59
Figure 3.27: Schéma bloc en réception de l' OFDM-DWT.....	60

Liste des figures

Figure 3.28: Bloc DWT	60
Figure 3.29: Bloc transpose	61
Figure 3.30: Symboles BPSK, (a) Symboles transmis,	62
Figure 3.31: Symboles QPSK, (a) Symboles transmis, (b) Symboles reçus	63
Figure 3.32: Symboles 16 QAM, (a) Symboles transmis	64
Figure 3.33: Taux d'erreur de l'OFDM-DWT.....	65
Figure 3.34: BER de l'OFDM- FFT et l'OFDM-DWT, BPSK	66
Figure 3.35: BER de l'OFDM- FFT et l'OFDM-DWT, QPSK.....	66
Figure 3.36: BER de l'OFDM- FFT et l'OFDM-DWT .QAM-16	67

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Classification des réseaux sans fil	6
---	---

Liste des acronymes

Liste des Acronymes

AWGN: Additive White Gaussian Noise.

ADSL : Assymetric Digital Subscriber Line

BER : le taux d'erreur binaire (Bit Error Rate)

BBAG : Bruit Blanc Additif Gaussien.

CP: Cyclic Prefix

DAB: Digital Audio Broadcasting.

DVB-T: Digital Video Broadcasting Terrestrial

DWT: transformée par ondelettes discrète

FDM: Frequency Division Multiplexing.

FDMA: Frequency Division Multiple Access.

FFT: Fast Fourier Transform.

FSK: Frequency Shift keying.

GPRS: General Packet Radio Service.

GSM: Global System for Mobile communications.

HiperLan: High Performance LAN.

ISI : interferences inter symbol

ICI: Inter Carrier Interference.

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineer.

IES : Interférences Entre Symboles.

LOS: Line Of Sight.

MAN: Metropolitan Area Network.

Liste des acronymes

MAQ : Modulation d'Amplitude en Quadrature.

NLOS: None Line Of Sight.

OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing.

PSK: Phase Shift Keying.

QAM : quadrature amplitude modulation

QPSK: quadrature Phase Shift Keying.

RF: Radio Frequency.

SNR: Signal to Noise Ratio.

TDM: Time Division Multiplexing.

TDMA: Time Division Multiple Access.

TFD: Transformée de Fourier Discrète.

TFDI: Transformée de Fourier Discrète Inverse.

UMTS : Universal Mobile Telecommunications System.

WDM: Wavelength Division Multiplex.

WIFI: Wireless Fidelity.

WIMAX: Worldwide Interoperability for Microwave Access.

WLAN: Wireless Local Area Network.

WMAN: Wireless Metropololitan Area Network.

W-OFDM: Wideband OFDM.

WPAN: Wireless Personal Area Network.

WWAN: Wireless Wide Area Network.

Introduction Générale

Les systèmes de communications ont beaucoup évolué ces dernières années, surtout les systèmes sans fil, de plus en plus la nécessité d'utilisation d'une grande vitesse de transmission de données s'impose. Toutefois la technologie existante a des contraintes pour suivre la progression de la vitesse de transmission; plusieurs méthodes et techniques ont vu le jour pour soulever ces contraintes. Afin d'arriver à des performances élevées dans l'environnement à trajets multiples, les réseaux sans fils s'appuient sur la modulation multi-porteuses OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) qui permet d'augmenter le débit binaire et par conséquent l'efficacité spectrale sans compromettre la largeur de bande [1].

La transmission OFDM consiste à répartir l'information sur un grand nombre de sous porteuses, créant ainsi des sous-canaux très étroits. Elle convient à des types de propagation par trajets multiples. La répartition des symboles sur plusieurs sous porteuses est la propriété la plus attrayante de la transmission OFDM. Cette dernière est robuste relativement au délai d'étalement et par conséquent réduit le taux de transmission par sous-porteuse [2].

Ce mémoire est concerné par la conception, simulation et étude des performances d'un système OFDM à base de la transformée de Fourier discrète utilisant différents types de modulations. Les transformées en ondelettes discrètes DWT (Discreet Wavelet Transform) constituent une amélioration à l'analyse de Fourier, nous allons étudier l'impacte de l'utilisation de ces techniques sur les performances du système de transmission OFDM.

Les deux techniques à savoir l'OFDM-FFT et l'OFDM-DWT seront implémentées à l'aide de l'outil de simulation SIMULINK de MATLAB. Leurs performances respectives seront misent en valeurs à travers des simulations extensives, pour mettre en relief l'intérêt et l'apport de l'une relativement à l'autre. Les mesures des performances pour les deux approches seront fournies

au moyen des diagrammes de constellations des différentes modulations des sous-porteuses, ainsi que les courbes du tau d'erreur par bit BER (Bit Error Rate).

Le présent manuscrit est structuré en trois chapitres plus une introduction générale et une conclusion générale:

Le chapitre 01 présente des généralités sur les télécommunications et les catégories des réseaux sans fils, leurs différentes architectures et normes. L'étude des différentes techniques de multiplexages sera aussi abordée, un intérêt particulier est accordé à la FDM (Frequency Division Multiple Access) qui constitue la base de la technique de transmission OFDM.

Le chapitre 02 concerne l'histoire de l'OFDM, ainsi que sa description générale, ses avantages et ses inconvénients. Les systèmes de transmission à base de la FFT et de la DFT seront présentés et explicités.

Le chapitre 03 se consacre à l'implémentation des systèmes OFDM-FFT et OFDM-DWT sous SIMULINK de MATLAB pour un canal à bruit blanc Gaussien. Nous comparons les performances des deux systèmes à travers des simulations extensives pour différents types de modulation.

A la fin, une conclusion générale récapitule les apports essentiels des travaux accomplis dans ce mémoire, ainsi que des horizons pour des futurs travaux.

Chapitre 01 :

Généralité sur les télécommunications

Chapitre 01 : Généralités sur les télécommunications

1.1 Introduction

En télécommunications, les signaux transportant une information doivent passer par un moyen de transmission entre un émetteur et un récepteur.

Ces dernières années ont été marquées par la montée en puissance d'une véritable révolution des réseaux informatique : celles des systèmes sans-fil. En alliant connectivité et mobilité, ces nouvelles technologies sont en passe de modifier en profondeur les systèmes d'information et leurs infrastructures. Dans ce chapitre nous décrivons de façon générale les différentes architectures des systèmes de télécommunications sans fil ainsi que les principales techniques de multiplexage. Nous rappelons aussi les différents modèles des canaux de transmission ainsi que les mesures de performances utilisées pour évaluer la qualité de la transmission.

1.2 Les Réseaux sans Fil [4]

Un réseau sans fil (Wireless Network) est un réseau où au moins deux nœuds peuvent avoir une communication sans liaison filaire. Ces réseaux de communications permettent aux utilisateurs de profiter de tous les services traditionnels des réseaux indépendamment de leurs positions géographiques. Les réseaux sans fil peuvent avoir une classification selon deux critères. Le premier est la zone de couverture du réseau. Au vu de ce critère il existe quatre catégories : les réseaux personnels, les réseaux locaux, le réseau métropolitain et les réseaux étendus. Le second critère est l'infrastructure ainsi que le modèle adopté. Par rapport à ce critère on peut diviser les réseaux sans fils en : réseaux avec infrastructures et réseaux sans infrastructure, comme on le voit dans l'illustration de la figure 1.1

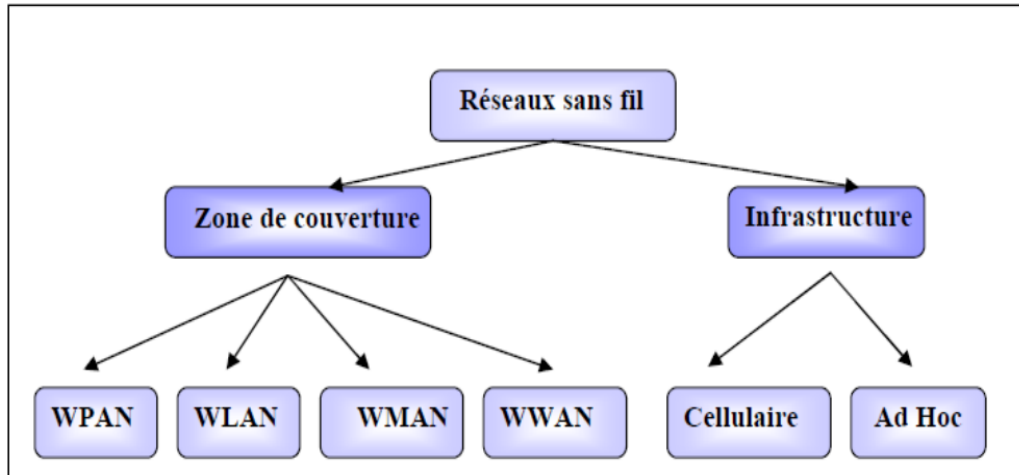


Figure1.1: Classification des réseaux sans fil

1.2.1. Classification selon la zone de couverture [5]

Chaque solution correspond à un usage différent, en fonction de ses caractéristiques (vitesse de transmission, débit maximum, coût de l'infrastructure, coût de l'équipement connecté, sécurité, souplesse d'installation et d'usage, consommation électrique et autonomie...).

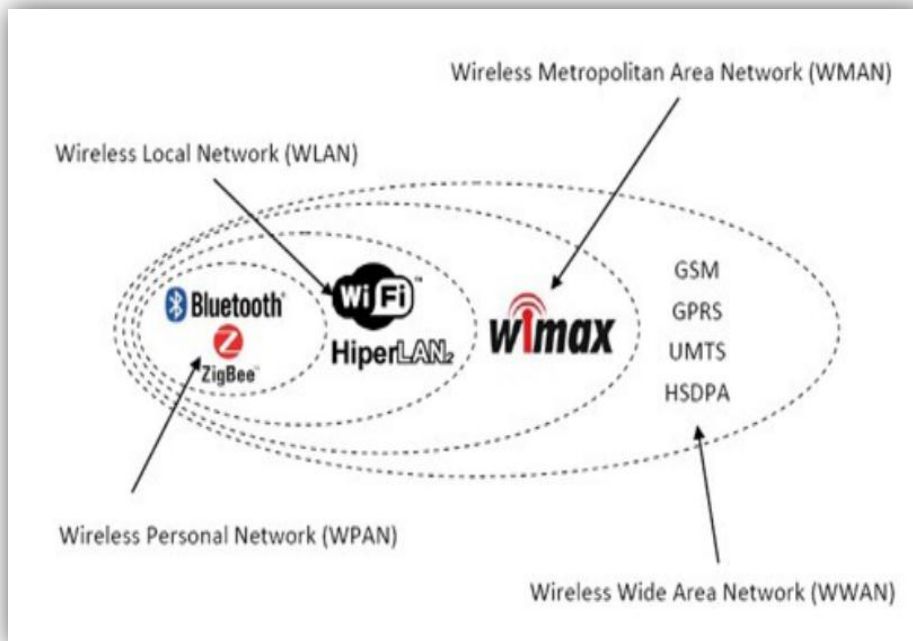


Figure 1.2: réseaux sans fil selon la zone de couverture

On distingue quatre catégories selon le périmètre géographique offrant une connexion (appelé Zone de couverture).

1.2.1.1. Les réseaux personnels sans fil (WPAN) :

Le réseau personnel sans fil ou réseau domestique sans fil dénommé WPAN pour (Wireless Personal Area Network) concerne les réseaux sans fil dont portée est de quelques dizaines de mètres. Ce type de réseau sert généralement à relier des périphériques tels que l'imprimante, téléphone portable, appareils domestiques, ou un assistant personnel à un ordinateur sans liaison filaire ou bien à permettre la liaison sans fil entre deux machines très peu distantes. Il existe plusieurs technologies utilisées pour les WPAN, on cite : le Bluetooth, l'HomeRF, ZigBee, Liaisons Infra rouge

1.2.1.2. Réseaux locaux sans fil (WLAN) :

Le réseau local sans fil nommé WLAN pour (Wireless Local Area Network) est un réseau permettant de couvrir l'équivalent d'un réseau local d'entreprise, soit une portée d'environ une centaine de mètres. Il permet de relier les terminaux présents dans la zone de couverture. Il existe plusieurs catégories concurrentes on cite : Le WIFI et le HiperLAN2

1.2.1.3. Réseaux métropolitains sans fil (WMAN) :

Le réseau métropolitain sans fil appelé WMAN pour (Wireless Metropolitan Area Network) est connu aussi sous le nom de Boucle Locale Radio (BLR). Les WMAN sont basés sur la norme IEEE 802.16. La boucle locale radio offre un débit utile de 1 à 10 Mbit/s pour une portée de 4 à 10 kilomètres, ce qui destine principalement cette technologie aux opérateurs de télécommunication

1.2.1.4. Réseaux étendus sans fil (WWAN) :

Le réseau étendu sans fil désigné WWAN pour (Wireless Wide Area Network) est également connu sous le nom de réseau cellulaire mobile. Il s'agit des réseaux sans fil les plus répandus puisque tous les téléphones mobiles sont connectés à un réseau étendu sans fil. Les principales technologies sont les suivantes :

- ❖ GSM (Global System for Mobile Communication ou en français Groupe Spécial Mobile),
- ❖ GPRS (General Packet Radio Service),
- ❖ UMTS (universal Mobil Telecommunication System).

Cat.	Portée max	Débit	Usages	Normes
WPAN	Qqs m	1 Mbit/s	Réseau particulier	IEEE 802.15 (Bluetooth), NFC, ETSI HyperPan
WLAN	500 m	+ de 50 Mbit/s	Réseaux internes, propres à un bâtiment (soit comme réseau d'entreprise, soit comme réseau domestique).	IEEE 802.11 (a,b,c,...) ETSI HyperLan
WMAN	4 à 10 kilomètres	de 1 à 10 Mbit/s	Ville, Campus, ... Interconnecte plusieurs WLAN	IEEE 802.16 WiMax ETSI HyperMan
WWAN	Plusieurs centaines de kms	de 1 à 10 Mbit/s	Régional, National Interconnecte plusieurs villes	Basé sur des technologies cellulaires

Tableau 1.1 : Classification des réseaux sans fil

1.2.2. Classification selon l'infrastructure [5]

Les environnements mobiles sont des systèmes composés de sites mobiles et qui permettent à leurs utilisateurs d'accéder à l'information indépendamment de leurs positions géographiques. Les réseaux mobiles ou sans fil, peuvent être classés en deux classes : les réseaux avec infrastructure et les réseaux sans infrastructure

1.2.2.1 Réseaux cellulaires (avec infrastructure) :

Ce type de réseaux regroupe les sites fixes du réseau filaire et les sites mobiles des réseaux sans fils. Certains sites fixes, appelés stations de base (SB) sont munis d'une interface de communication sans fil pour la communication directe avec les sites mobiles localisés dans une zone géographique limitée, appelée cellule comme le montre la figure (1.3) suivante.

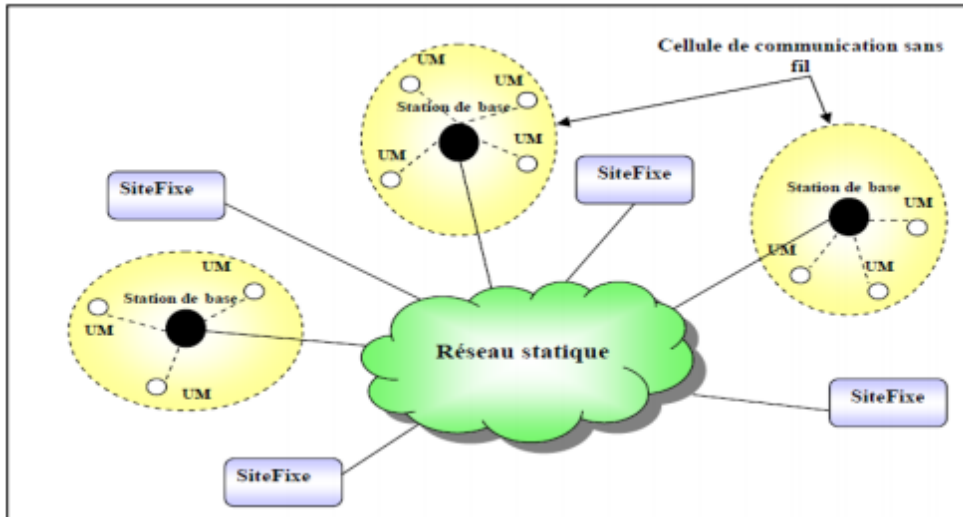


Figure1.3 : Le modèle des réseaux mobiles avec infrastructure

A chaque station de base correspond une cellule à partir de laquelle des unités mobiles peuvent émettre et recevoir des messages. Alors que les sites fixes sont interconnectés entre eux à travers un réseau de communication filaire. Une unité mobile ne peut être, à un instant donné, directement connectée qu'à une seule station de base. Elle peut communiquer avec les autres sites à travers la station à laquelle elle est directement rattachée.

1.2.2.2 Réseaux ad hoc (sans infrastructure) :

Un réseau ad hoc, connu sous le nom de MANET (Mobile Ad hoc Network), est un réseau dont la topologie ne bénéficie d'aucune infrastructure fixe préexistante ou administration topologie ne bénéficie d'aucune infrastructure fixe préexistante ou administration centralisé

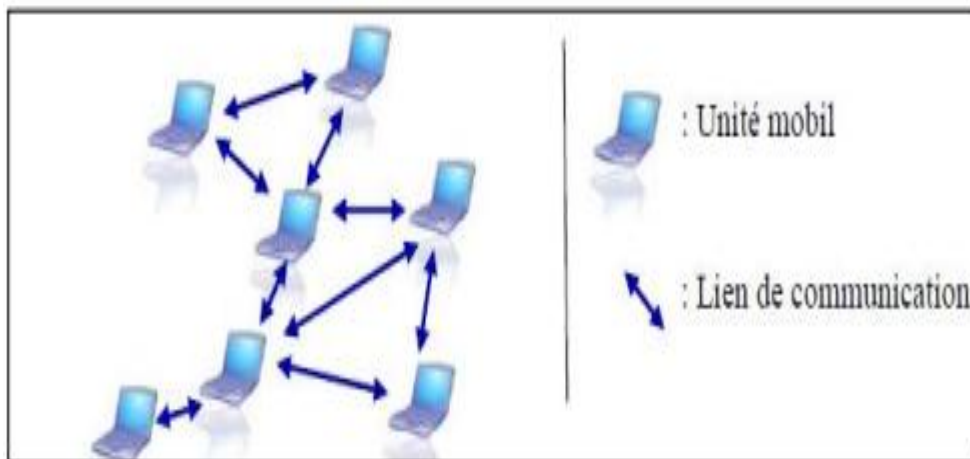


Figure1.4 : Réseau en mode ad hoc

1.3.Réseau WIMAX [6]

Le WiMax c'est l'abréviation de (World Wide Interoperability for Microwave Access). Il a été créé pour assurer la convergence et l'interopérabilité entre deux standards de réseaux sans fils auparavant indépendants. Le réseau WiMax constitue un ensemble de standards et techniques du monde des réseaux métropolitains sans fil WMAN (Wireless Metropolitan Area Network). Le standard IEEE 802.16, ou WiMax permet le raccordement sans fil d'entreprises ou de particuliers sur de longues distances à haut débit. Ce réseau apporte une réponse appropriée pour certaines zones rurales ou difficilement accessibles.

Cette technologie vise ainsi à introduire une solution complémentaire au DSL (Digital Subscriber Line) et aux réseaux câblés d'une part, et à interconnecter des hot spots WiFi d'autre part. La topologie du réseau WiMax est principalement une topologie en étoile bien que la topologie maillée soit possible. La communication peut être réalisée en ligne de vue (LOS : Line Of Sight) ou non (NLOS). Le WiMax est plus efficace que le WiFi, il permet un meilleur confort d'utilisation, autorisant l'accès Internet en fixe ou en mobile.

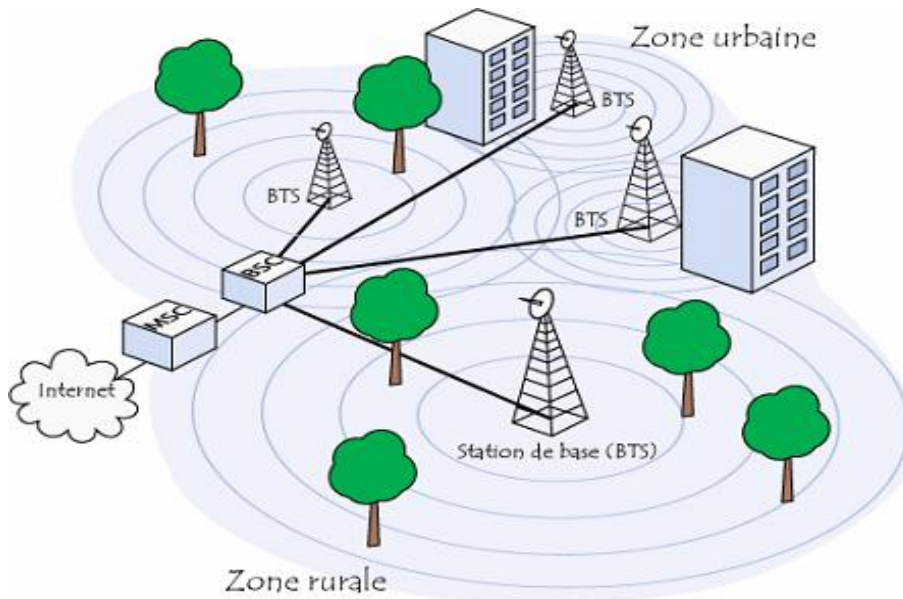


Figure1.5 : Réseau WIMAX

Les ondes du réseau WiMax sont diffusées depuis une station de base baptisée BTS reliée au réseau de fibre optique. Chaque abonné peut accéder au réseau en installant une antenne sur son toit, et en la dirigeant en direction de la station de base. Du fait la puissance des ondes WiMax, l'utilisateur n'a pas besoin de posséder une ligne de vue directe sur la station. Celle-ci doit simplement se trouver dans un certain rayon, de l'ordre

de 20 ou 30 kilomètres, du domicile de l'abonné. Toutefois, certains obstacles, comme des montagnes ou une forte densité d'immeubles, peuvent significativement réduire la portée du signal.

1.4. Les avantages et les inconvénients des réseaux sans fil [7]

1.4.1 Les avantages du déploiement d'un réseau sans fil

- la portabilité : un ordinateur portable ou un ordinateur de poche suffit pour se connecter.
- Choix du lieu de connexion, sous condition d'être sous la couverture du réseau.
- La flexibilité : la connexion est indépendante de la marque ou des caractéristiques techniques des appareils connectés. Seules les cartes réseaux doivent garantir une compatibilité avec la norme à laquelle elles font référence.
- La facilité : pas de câble donc moins d'encombrement. Les nouveaux appareils tendent à se connecter automatiquement.
- La mobilité : les utilisateurs peuvent se déplacer sans couper la connexion au réseau.
- Les prix : tendent à baisser suivant l'évolution du marché.

1.4.2 Les inconvénients des réseaux sans fils

- Débit souvent plus faible qu'un réseau câblé.
- Une atténuation rapide du signal en fonction de la distance
- Les interférences qui peuvent être de natures diverses à savoir des émetteurs travaillant à des fréquences trop proches; des bruits parasites dus à l'environnement; des phénomènes d'atténuation, de réflexion et de chemins multiples dus à l'environnement...
- Limitations de la puissance du signal par des réglementations strictes en vigueur.

1.5. Les techniques de Multiplexage [8]

Le multiplexage est l'opération qui consiste à grouper plusieurs voies, attribuées chacune à une communication, de façon à les transmettre simultanément sur le même support physique (câble, liaison radioélectrique, satellite, ...) sans qu'elles se mélangent ou se perturbent mutuellement.

A la réception, un démultiplexage aussi parfait que possible doit permettre de séparer ces voies et de les restituer sous leur forme originale. Ce partage des ressources disponibles nécessite que chacune d'entre elles soit isolée des autres, il faut donc s'assurer de l'orthogonalité des ressources.

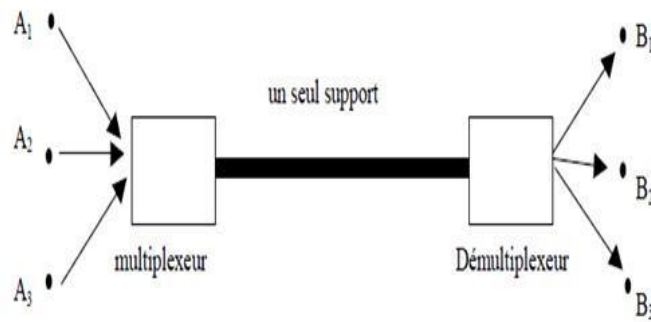


Figure 1.6. *Multiplexage des possibilités d'accès à un canal.*

Il existe essentiellement trois formes de multiplexage dans la gamme radiofréquence et hyperfréquence : le multiplexage fréquentiel ou spectral FDMA pour (Frequency Division Frequency Division Multiple Access) ; le multiplexage temporel TDMA pour (Time Division Multiple Access) et le multiplexage de code (CDMA) pour (Code Division Multiple Access).

Une nouvelle forme de multiplexage, spécifique à la propagation sur des fibres optiques, s'est dernièrement développée à savoir le WDM (Wavelength Division Multiplex). On partage alors des fenêtres optiques disponibles sur une même (fibre)

1.5.1. Accès multiple par répartition en fréquence FDMA [8]

Le multiplexage fréquentiel est un multiplexage dans lequel des signaux indépendants occupent des bandes de fréquences distinctes dans le signal composite. La (figure 1.7) donne un exemple de multiplexage fréquentiel 4 vers 1.

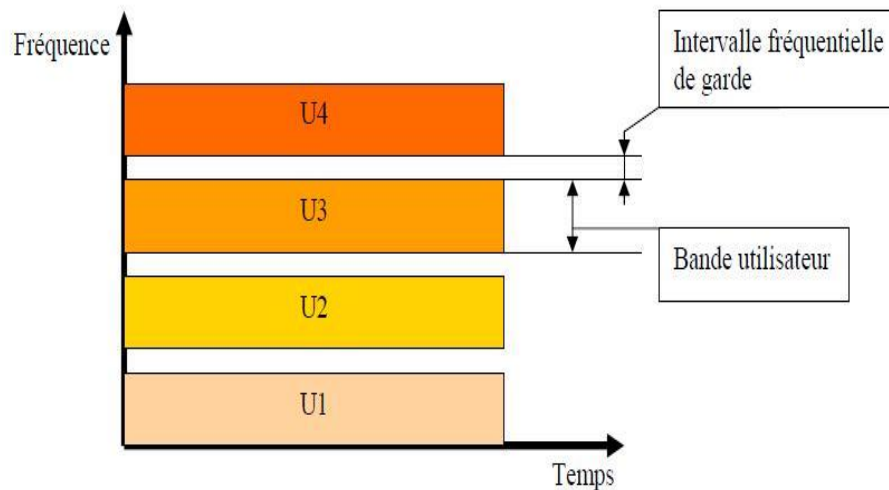


Figure 1.7: *La technique de multiplexage FDM*

L'opération de multiplexage commence par générer N porteuses espacées fréquemment, d'au moins deux fois la bande utile des signaux à multiplexer. On multiplie ensuite une porteuse avec un signal, afin de transposer tous les signaux à des fréquences différentes. On somme le tout pour obtenir le signal composite. Il est intéressant de percevoir que les opérateurs sont les mêmes que pour le multiplexage temporel.

L'opération de démultiplexage multiplie chaque porteuse par le signal composite, puis assure un filtrage passe bas autour de la bande utile pour retrouver le signal dé-multiplexé. Le filtrage est essentiel car la représentation temporelle du signal dé-multiplexé ne permet pas de reconnaître le signal d'origine. Les éléments essentiels du multiplexage FDMA sont les opérations de génération précise des porteuses et la modulation.

1.5.2 L'accès multiple par répartition dans le temps (TDMA) [8]

Le multiplexage TDM consiste à affecter à un utilisateur unique la totalité de la bande passante pendant un court instant, ceci à tour de rôle pour chaque utilisateur (Figure 1.7). L'allocation de cette bande passante se fait en divisant l'axe du temps en périodes de durée fixe, et chaque utilisateur ne va transmettre que pendant une de ces périodes déterminée (Figure 1.8). Un intervalle de temps fixe (IT) est successivement assigné à une source.

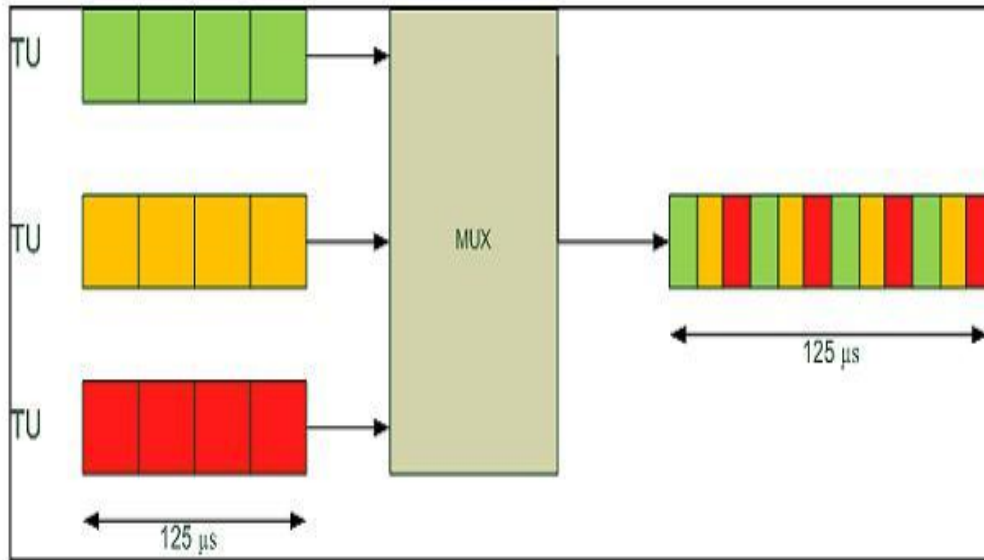


Figure 1.8: Répartition des périodes dans le cas d'un multiplexage TDMA.

Le multiplexage TDMA permet alors de regrouper plusieurs canaux de communications à bas débits sur un seul canal à débit plus élevé (par exemple, conception d'un débit 40 Gbits/s, à partir de 4 séquences à 10 Gbits/s).

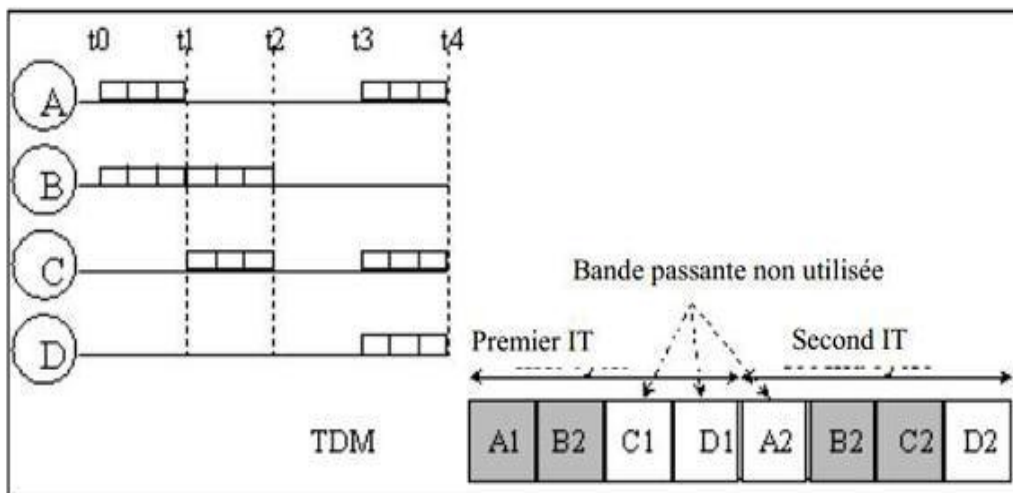


Figure 1.9: Représentation d'un multiplex TDMA(4 voies vers 1)

Dans la plupart des cas, l'ensemble du système de bande passante pour un créneau horaire n'est pas assignée à une seule station, mais la fréquence système est subdivisé en sous bandes, et TDMA et employée pour accès multiples à chaque sous bande .Les sous bandes sont connues comme fréquences porteuse ; et le système mobile à l'aide de la technique sont désignés comme les systèmes d'opérateurs multiples.

1.5.3. Code Division Multiple Access (CDMA)

Le principe de base du CDMA est que différents codes sont utilisés pour faire la distinction entre les différents utilisateurs. Généralement des formes de modulation d'étalement du spectre en séquence directe (DS-SS-CDMA) sont utilisées.

Un signal généré qui s'étale sur une large bande passante, un code connu sous le nom de code d'étalement est utilisée pour exécuter cette action. En utilisant un groupe de codes, qui sont orthogonaux les uns par rapport aux autres, il est possible de choisir un signal avec un code donné en la présence de nombreux autres signaux, comme lustré sur la figure 1.10.

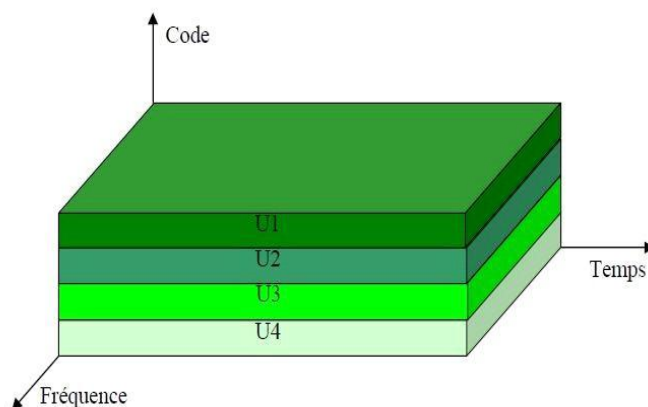


Figure 1.10 : *La technique de multiplexage CDMA*

1.5.4. L'accès multiple à division de longueur d'onde WDM [9]

La technologie WDM repose sur le principe du multiplexage optique. Le principe consiste à transporter plusieurs signaux sur un brin de fibre optique. Chaque signal est coloré, c'est-à-dire placé sur une longueur donnée grâce à un transpondeur. Puis via un multiplexeur optique, toutes les longueurs d'ondes sont envoyées sur le même brin de fibre optique. A l'autre extrémité, un démultiplexeur va séparer les longueurs d'onde les unes des autres, puis un transpondeur va reconvertir le signal en canal gris.

L'avantage de la technique WDM est qu'elle n'est pas dépendante de la vitesse des équipements électroniques. Cependant le nombre de longueurs d'onde qu'une fibre peut transporter est limité. D'un nombre d'environ une dizaine de longueurs d'ondes il y a quelques années, on est passé à plusieurs centaines aujourd'hui.

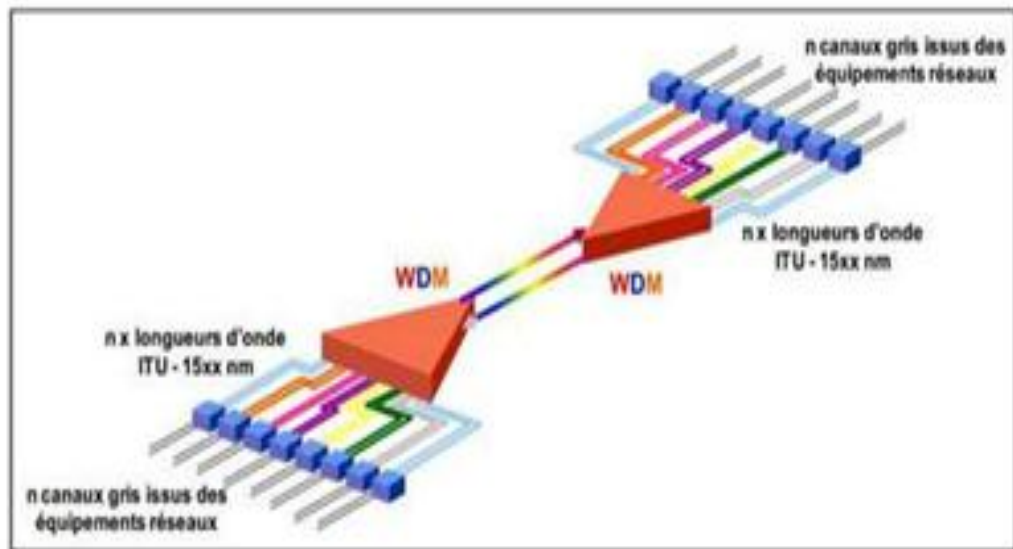


Figure 1.11 : La technique de multiplexage WDM

En WDM, un seul amplificateur optique se substitue aux N régénérateurs en chaque site de ligne, procurant ainsi une économie d'équipements croissante avec la longueur de liaison et le nombre de canaux.

1.6. Modèles des canaux de communications [10]

Dans la conception des systèmes de télécommunications, il est nécessaire de construire les modèles mathématiques qui caractérisent le milieu de propagation. Nous allons présenter les principaux modèles de canaux utilisés dans les télécommunications sans.

1.6.1 Canal à bruit blanc additif gaussien (AWGN)

Le canal à bruit blanc additif gaussien AWGN pour (Aditive White Gaussian Noise), est le modèle fréquemment utilisé car il décrit souvent bien la transmission dans un milieu physique ce canal engendre un bruit de nature aléatoire qui s'ajoute au signal utile.

En effet, selon le théorème de la limite centrale, lorsqu'un phénomène correspond à la somme d'un grand nombre de causes aléatoires, la distribution statistique de ce phénomène suit une distribution gaussienne. Le bruit blanc possède une densité spectrale de puissance constante en fonction de la fréquence.

Le bruit est souvent modélisé par un processus stochastique blanc gaussien de moyenne nulle et de variance σ_n^2 sa densité de probabilité est donnée par l'équation 1.1.

$$p(n) = \frac{1}{\sigma_n \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{n^2}{2\sigma_n^2}} \quad (1.1)$$

La figure 1.12 illustre le modèle d'un canal AWGN.

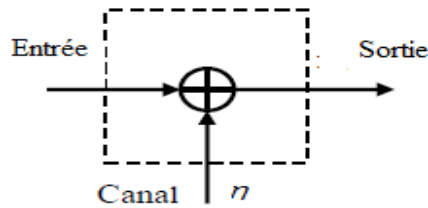


Figure 1.12: Modèle d'un canal à bruit additif Gaussien

1.6.2 Canal à filtre linéaire et bruit blanc additif gaussien

Le canal est caractérisé par une fonction de transfert ou une réponse impulsionnelle, qui décrivent le comportement soit fréquentiel soit temporel du canal. Les perturbations externes et le bruit se couplent au canal et sont ajoutés au signal transmis comme c'est illustré à la figure 1.13.

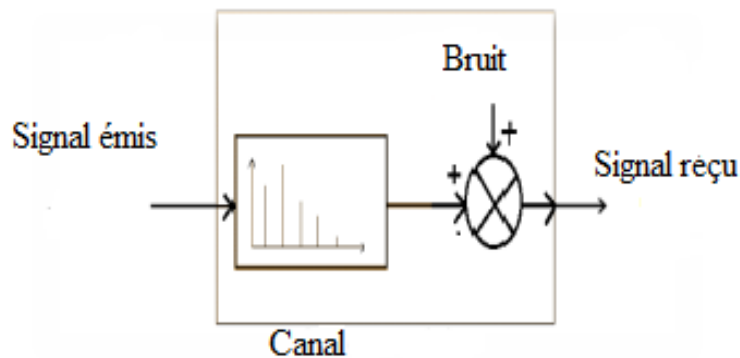


Figure 1.13 : Modèle d'un canal à filtre linéaire et bruit additif

1.6.3 Canal de propagation multi trajet [11]

La propagation en espace libre représente un cas idéal. Mais en réalité, le canal de propagation est l'endroit de multi trajets à cause des obstacles qui entourent l'émetteur et le récepteur (figure 1.13) Dans ce cas, plusieurs répliques du signal émis arrivent au récepteur

à travers plusieurs trajets qui possèdent différents états d'atténuation, de déphasage et des retards dus à la longueur du trajet.

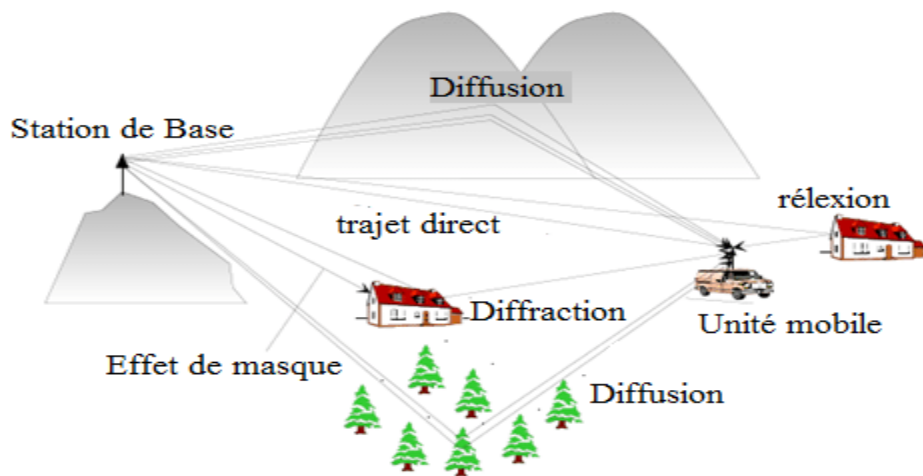


Figure1.14 : Propagation par multi-trajets

Lors de la propagation multi-trajets, deux situations de propagation sont généralement distinguées. La première est désignée par le terme NLOS (None Line Of Sight) où il n'y a pas de visibilité directe entre l'émetteur et le récepteur. Dans ce cas, la densité de probabilité de l'amplitude d'évanouissement du signal total reçu suit la loi de Rayleigh (Figure1.15)

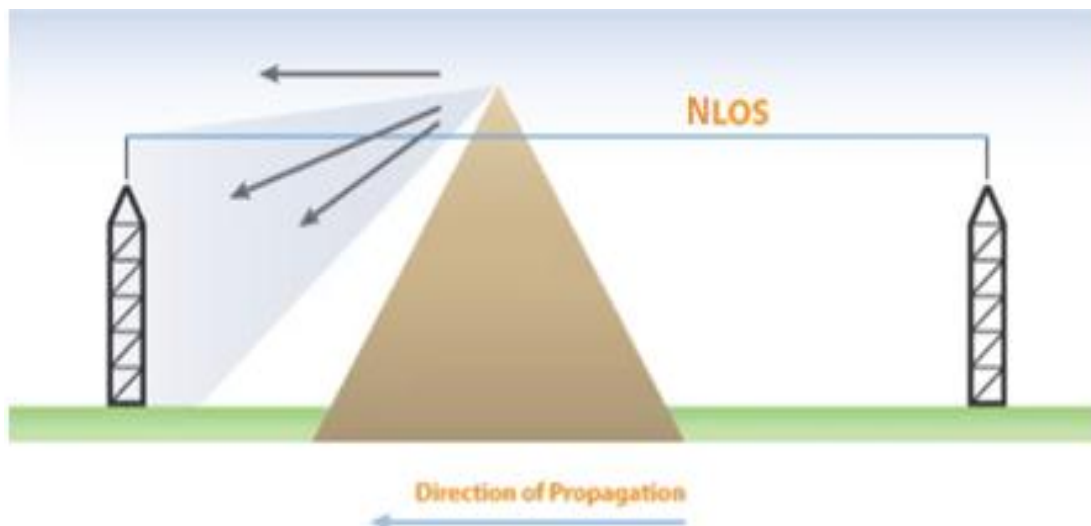


Figure1.15: Pas de ligne de vue (propagation NLOS) : canal de Rayleigh

La deuxième situation aura lieu lorsqu'il existe un trajet direct prépondérant nommé LOS pour (Line Of Sight,) et par conséquent l'amplitude d'évanouissement est caractérisée par la distribution de Rice (figure 1.16)

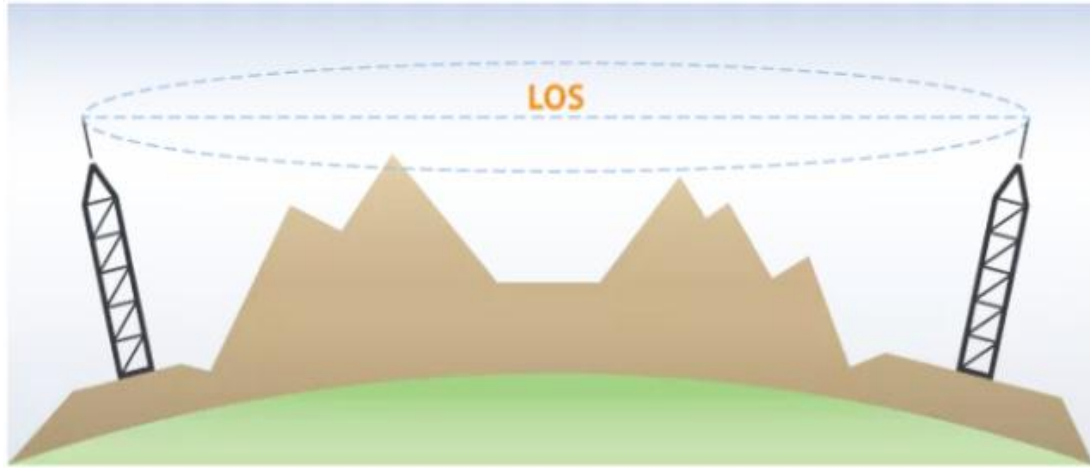


Figure1.16: Existence d'une ligne de vue (propagation LOS) : canal de Rice

Selon la nature des objets rencontrés durant le parcours des trajets multiples, divers phénomènes électromagnétiques sont dégagés tels que : la réflexion, la diffraction et la diffusion sur des obstacles.

Le canal de transmission multi-trajets produit les interférences entre symboles connu sous l'acronyme ISI (inter symbol interference). Dans cette situation, le signal émis peut emprunter deux chemins ou plus, pour atteindre le récepteur : un trajet direct et un trajet réfléchi. Les temps de propagation étant différents sur ces deux trajets, le récepteur observe la superposition de deux versions décalées du signal émis.

La présence d'interférences entre symboles, ne permet pas au récepteur d'effectuer une décision symbole par symbole qui soit en même temps une décision optimale. Plusieurs approches sont alors considérées: la première consiste à faire en sorte que le terme d'ISI soit toujours nul ; elle aboutit au critère de Nyquist. Toutefois cette approche présente des faiblesses dans la mesure où elle ne permet pas de bien exploiter la bande disponible. La deuxième et la troisième approche sont l'égalisation linéaire (égaliseur sous optimale) et l'algorithme de Viterbi (égaliseur optimale) respectivement.

L'objectif de l'égalisation est d'annuler les distorsions introduites par le canal de transmission et restituer le message émis à partir des observations reçues. Une autre

approche est la technique OFDM qui conjuguée à l'égalisation présente une solution approximativement optimale [12].

1.6.4. Canal à distribution de Rayleigh [13]

La distribution de Rayleigh correspond à un cas idéal. Dans ce cas, le signal complexe reçu est constitué d'un grand nombre de trajets indirects (NLOS) ayant des amplitudes et phases aléatoires, indépendants et uniformément distribués. L'enveloppe de ce signal suit une loi de Rayleigh définie par l'équation suivante :

$$P(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right), \geq 0 \quad (1.2)$$

- r est l'enveloppe du signal complexe reçu.
- σ est l'écart type.

D'autres propriétés utiles de cette distribution sont données par :

- La valeur moyenne : $E(r) = \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}}$ (1.3)

- La valeur quadratique moyenne : $E(r^2) = 2\sigma^2$ (1.4)

- La variance : $E(r^2) = 2\sigma^2$ (1.5)

1.6.5. Canal à distribution de Rice

Dans d'autres situations, un canal de propagation est caractérisé par plusieurs trajets indirects et un trajet direct (LOS). De ce fait, la densité de probabilité de l'enveloppe du signal complexe reçu obéit à la distribution de Rice définie par l'équation (1.6).

Où r_d est l'amplitude du trajet direct et I_0 représente la fonction de Bessel modifiée de première espèce et d'ordre zéro [14].

Cette loi possède les caractéristiques suivantes :

- Densité de probabilité : $f(x|v, \sigma) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{(x^2+v^2)}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{xv}{\sigma^2}\right)$ (1,6)

- Valeur moyenne:

$$E\{r\} = \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}} \exp\left(-\frac{r^2}{4\sigma^2}\right) \left[\left(1 + \frac{r^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{r^2}{4\sigma^2}\right) + \frac{r^2}{4\sigma^2} I_1\left(\frac{r^2}{4\sigma^2}\right) \right] \quad (1.7)$$

- Valeur quadratique moyenne : $E\{r^2\} = 2\sigma^2 + r^2$ (1.8)

- Variance $E\{r^2\} - E\{x\}^2$ (1.9)

1.7 La probabilité d'erreur et le taux d'erreur

La probabilité d'erreur est considérée comme un paramètre originel décrivant la qualité de la transmission numérique. Elle exprime la probabilité de prendre une décision erronée sur un élément binaire.

La probabilité d'erreur est notée P_e , elle est exprimée en fonction du rapport E_b/N_0 , pour une transmission binaire telle que la BPSK cette probabilité est donnée par :

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \quad (1.10)$$

E_b est l'énergie du signal reçu, N_0 est la densité spectrale du bruit

$\operatorname{erfc}(x)$ est la fonction d'erreur complémentaire.

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-u^2) du \quad (1.11)$$

Il est à noter que la probabilité d'erreur (P_e) est une valeur théorique, une estimation non biaisée de cette dernière est réalisée par la mesure du taux d'erreur par bit BER (Bite Error Rate).

Le BER se définit comme le rapport entre le nombre d'éléments binaires erronés et le nombre d'éléments binaires transmis. Ce taux détermine le nombre d'erreurs apparues avant la modulation et juste après la démodulation, il accroisse à cause des perturbations dues aux équipements, au réseau défectueux, au pointage incorrect d'une antenne, au canal de canal, etc. On notera que le BER tend vers P_e si le nombre de bits transmis tend vers l'infini [15].

1.8 Rapport signal sur bruit (SNR) [16]

Le rapport signal sur bruit, plus connu sous l'acronyme SNR pour Signal to Noise Ratio, est la mesure de performance la plus répandue dans les systèmes de télécommunication. Ce terme fait référence au signal démodulé, le bruit total est celui du réseau de transmission plus le bruit intégré au signal de modulation ainsi que d'autres dégradations de la modulation. Le SNR est exprimé par :

$$SNR = \frac{P_S}{P_N} \quad (1.12)$$

Avec P_s : Puissance du signal et P_N la puissance de bruit en watts.

SNR en décibel (dB) est évalué comme suit:

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \frac{P_s}{P_N} \quad (1.13)$$

1.9 Conclusion

Dans ce chapitre, le contexte de l'étude portait sur les télécommunications numériques. Nous avons effectué un survol sur les différents types de réseaux sans fil. Nous avons ensuite décrit brièvement les techniques de multiplexage et leurs types. Nous nous sommes intéressés, plus particulièrement, à la technique FDMA dont la technique OFDM fait partie. Cette dernière fera objet d'une étude détaillée au deuxième chapitre. Les caractéristiques des différents types de canaux de propagation ont été rappelées ainsi que les mesures de performance pour les systèmes de télécommunications.

Chapitre 02 :

**La technique OFDM: de la transformée de
Fourier à la transformée en ondelette**

Chapitre 02 : La technique OFDM: de la transformée de Fourier à la transformée en ondelette

2.1 Introduction

La technique OFDM qui fait partie des techniques qu'on appelle modulations multi-porteuses a le grand mérite de transformer un canal multi-trajet large bande en un ensemble de sous-canaux mono-trajet très simples à égaliser. L'OFDM est essentiellement utilisée pour la transmission mobile à haut débit, son développement est lié au lancement de la radiodiffusion numérique DAB (Digital Audio Broadcasting), mais on trouve aussi son application dans la transmission de données sur la ligne d'abonné du réseau téléphonique à l'aide de la technique ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Loop).

Le but de ce chapitre est d'introduire la technique OFDM. Ces principes généraux sont décrits (chaîne de transmission...) ainsi que les avantages (simplicité de l'égalisation, utilisation d'algorithmes FFT rapides). Les transformées en ondelettes discrètes constituent une amélioration à l'analyse de Fourier, nous allons présenter le principe de leur utilisation dans une chaîne de transmission OFDM, comme alternative à la FFT [17].

2.2 Historique de la technique OFDM

La technique OFDM fait partie des modulations multi-porteuses dont l'histoire a commencé dans les années 50 avec un système précurseur appelé Kineplex, conçu pour des liaisons radio militaires en bande HF, L'utilisation de la transformée de Fourier pour la modulation et la démodulation fut proposée pour la première fois par Saltzberg en 1967, puis par Weinstein et en 1971. La conception des filtres analogiques parfaitement orthogonaux étant coûteuse, ce système n'a pas connu le succès escompté. Ce n'est que vers le début des années 80, à l'aide d'une modélisation discrète basée sur des modulateurs numériques de transformée de Fourier rapide (FFT: Fast Fourier Transform), que les modulations multi-porteuses ont connu un grand engouement. L'algorithme de calcul de la transformée de Fourier rapide inventé par Cooley et Tukey a permis le décollage quasi-immédiat des modulations multi-porteuses en raison de sa faible complexité. Du fait son efficacité, il a eu un impact considérable sur le

développement des applications en traitement numérique des signaux. Un calcul de transformée de Fourier discrète est un calcul de produit d'une matrice par un vecteur effectué de façon récursive. Ceci réduit la complexité du modulateur et donc la consommation des terminaux. Les systèmes de modulations multi-porteuses basés sur la FFT sont actuellement connus sous l'acronyme OFDM pour (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) pour les réseaux sans fil, ou encore DMT pour les réseaux filaires [18].

2.2 Modulations multi-porteuses

Les techniques dites multi-porteuses consistent à transmettre des données numériques en les modulant sur un grand nombre de porteuses en même temps. Ce sont des techniques de multiplexage en fréquence qui existent depuis longtemps.

Les techniques de modulation simples porteuses sont très sensibles aux l'interférence inter-symboles (Inter Symbol Interference ou ISI) lorsque la transmission se fait sur un canal à trajets multiples. Ces interférence sont d'autant plus importantes que la durée d'un symbole est petite relativement au retard ou dispersion temporelle maximale dite (delay spread) du canal. En d'autres termes, une modulation simple porteuse est favorisée si la durée des symboles utiles est grande par rapport à ce paramètre du canal.

L'intérêt des modulations multi-porteuses (Multi-Carrier Modulation) est de placer l'information dans une fenêtre temps-fréquence telle que sa durée soit bien plus grande que la dispersion temporelle maximale du canal de propagation.

L'intérêt des modulations multi-porteuses (Multi-Carrier Modulation) est de placer l'information dans une fenêtre temps-fréquence telle que sa durée soit bien plus grande que la dispersion temporelle maximale du canal de propagation. Cet avantage, primordial pour les communications sans fils, en fait une solution pressentie pour les différents types de réseaux haut débit sans fils: réseaux cellulaires, réseaux locaux sans fils et boucle locale radio.

En effet un autre intérêt des modulations multi-porteuses est de transformer l'étape d'égalisation dans le domaine temporel par une égalisation simplifiée dans le domaine fréquentiel pour retrouver le signal émis [18].

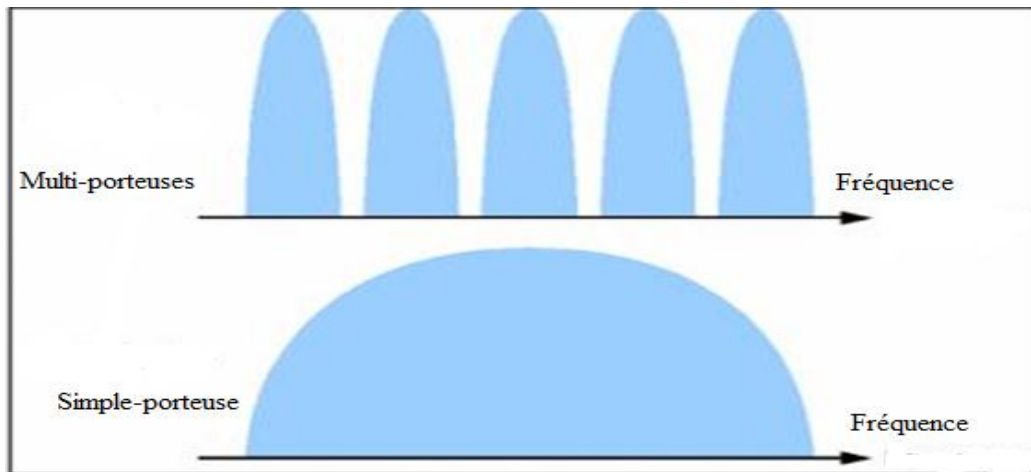


Figure 2.1 *Modulations multi-porteuses*

Le principe des modulations multi-porteuses est basé sur la technique de multiplexage par division en fréquence FDM pour (Frequency Division Multiplexing). Dans un système FDM, les signaux de plusieurs émetteurs sont transmis simultanément (dans le même intervalle de temps) sur des fréquences multiples. Chaque gamme de fréquence (sous-porteuse) est modulée séparément par différents flux de données et un espacement dit bande de garde est placé entre les sous-porteuses pour éviter un chevauchement des signaux, comme illustrée par la figure 2. 2. a

La technique FDM transmet les données en haut débit sur K voies à bas débit qui seront modulées en même temps par K sous porteuses de fréquences f_k multiples d'une fréquence de base f_0 , ce qui réduit la bande passante d'un bloc symbole par un facteur de $\frac{1}{k}$ permettant ainsi d'augmenter la durée symbole par K .

L'utilisation d'une modulation multi-porteuse pour des données à hauts débits est plus adaptée à un canal multi trajet sélectif en fréquence, mais en FDM l'efficacité spectrale est réduite à cause de l'ajout des bandes de garde entre chaque deux porteuses adjacentes comme illustrée dans la figure 1.2.a. En effet une autre solution pour la modulation multi-porteuse plus adéquate, présentant une meilleure efficacité spectrale est la technique dite OFDM. Cette technique divise la bande passante en sous fréquences multiples orthogonales entre elles.

L'OFDM utilise plusieurs sous-porteuses, celles-ci sont espacées les unes par rapport aux autres pour ne pas provoquer d'interférences, dans ce cas tous les transporteurs sont orthogonaux les uns aux autres pour éliminer les bandes de garde entre sous-porteuse adjacentes.

L'utilisation de l'OFDM permet d'économiser la bande passante comme on peut le percevoir sur la figure 2.2.b.

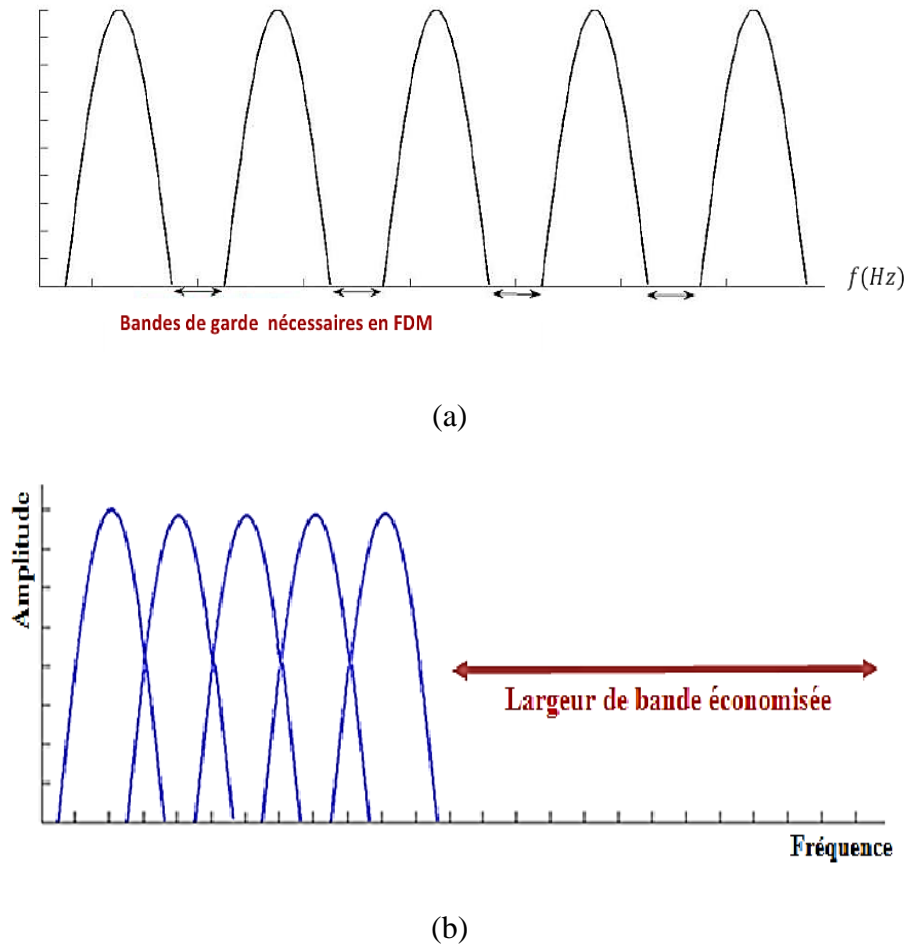


Figure 2. 2 Comparaison de la bande passante de l'OFDM et FDM (a) Sous porteuses en FDM (b) Sous porteuse en OFDM

2.4 Modulation de chaque sous-porteuse du signal OFDM

Dans un système OFDM, les bits d'informations pour chaque sous-porteuse sont modulés par des différent techniques de modulation comme la modulation BPSK, QPSK ou QAM-16. On peut augmenter le débit binaire en augmentant le nombre d'états dans une constellation, entraînant une diminution de distance entre les points de la constellation, ce qui accroît la sensibilité du système au bruit.

En général, la constellation de chaque sous-porteuse montre un changement aléatoire d'amplitude et de phase provoqué par l'environnement par trajets multiples. Parmi les

modulations utilisées dans un système OFDM, la plus robuste est la modulation QPSK qui code 2 bits par symbole [18].

2.4.1 Modulation QPSK

La modulation QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) code deux bits par symbole. Le train de donnée binaire est séparé en deux ‘sous trains’ appelés le composant cosinus (**I** ou In-phase) et le composant sinus (**Q** ou Quadrature). La paire de valeur (ou doublet) constitue ce que l’on appelle un symbole.

Pour des considérations électroniques, les signaux **I** et **Q** sont centrés sur 0V. On peut donc considérer que **I** et **Q** prennent symboliquement deux niveaux +1, -1 correspondant aux états binaires.

L’état de phases du signal modulé se représentent en coordonnées polaires dans le plan **I, Q**. Suivant les combinaisons de **I** et **Q**, on obtient alors un diagramme que l’on appelle communément constellation. La figure 2.3 montre le diagramme de constellation pour la modulation QPSK [19].

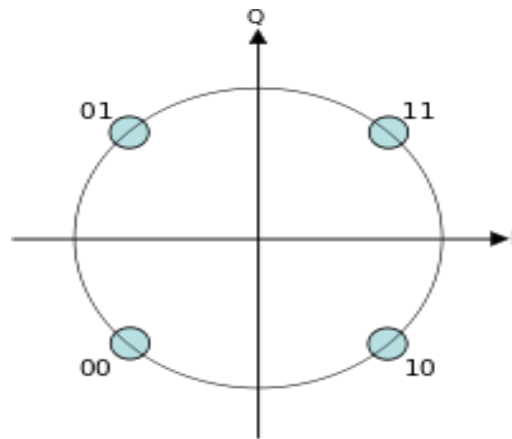


Figure 2.3: Constellation de la modulation de phase QPSK

Cette modulation permet d’augmenter l’efficacité spectrale sans modifier la bande passante allouée.

2.4.2 Modulation QAM

La Modulation d’amplitude en quadrature QAM (Quadrature Amplitude Modulation) résulte de la combinaison de deux fréquences porteuses sinusoïdales déphasées l’une de l’autre de 90° (d’où le nom de quadrature). Elle peut aussi être vue comme une modulation de phase et d’amplitude. Elle permet des débits élevés avec une

rapidité de modulation relativement faible, par exemple, la QAM16 utilise 4 bits par symbole 2 bits sur i et deux bits sur Q [19]. La valeur de i peut être une des 4 amplitudes possibles. Il en est de même pour la valeur de Q . La figure 2.4 montre le diagramme de constellation et les signaux temporels de la modulation 16 QAM.

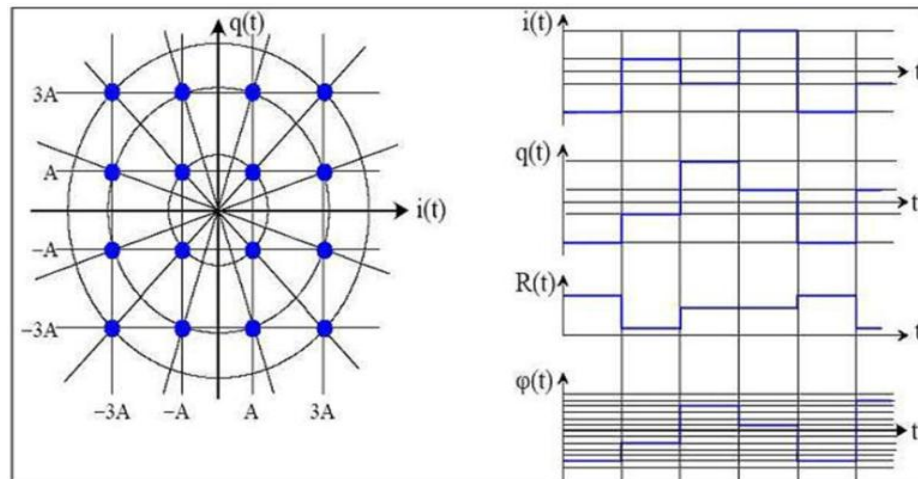


Figure 2.4 Modulation QAM.

Si on veut une modulation 32QAM, il faut doubler le nombre d'états (pour gagner un bit par rapport à 16 QAM), la sensibilité au bruit devient beaucoup plus forte [19].

2.5 Technique de modulation OFDM

L'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) est une technique de modulation utilisée dans les réseaux sans fil et les réseaux cellulaires, ainsi que la télévision numérique. Elle consiste à transmettre les données en parallèle sur un très grand nombre de sous-porteuses. Une est basée essentiellement sur l'utilisation de l'algorithme de la transformées de Fourier rapide FFT (Fast Fourier Transform) [20].

2.5.1 Principe de l'OFDM

Contrairement aux systèmes mono-porteuse qui modulent sur une porteuse unique à un débit R_s , le principe de la modulation multi-porteuse de type OFDM consiste à transmettre les données de manière simultanée sur N porteuses modulées à un débit de R_s/N . Le débit global reste inchangé mais chaque porteuse est moins sensible à l'étalement des trajets sur le canal de propagation. Ainsi, le signal numérique à transmettre est réparti sur un grand nombre de sous-

porteuses, comme si l'on combinait le signal à transmettre sur un grand nombre de systèmes de transmission indépendants et à des fréquences différentes.

Pour que les fréquences des sous-porteuses soient les plus proches possibles et ainsi transmettre le maximum d'information sur une portion de fréquences donnée, l'OFDM utilise des sous-porteuses orthogonales entre elles. Les signaux des différentes sous-porteuses se chevauchent mais grâce à l'orthogonalité n'interfèrent pas entre eux .

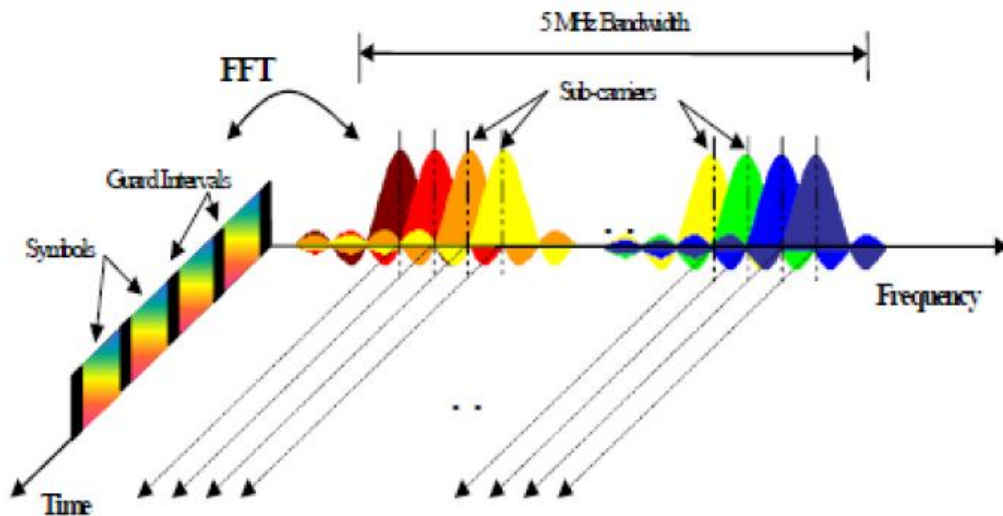


Figure 2.5: Représentation fréquentielle et temporelle d'un signal OFDM

La technique OFDM est actuellement utilisée dans diverses applications à haut débit, que ce soit en bande de base sur paire torsadée (Assymetric Digital Subscriber Line ADSL) ou sur onde porteuse pour les transmissions sans fil : Télévision Numérique Terrestre (Digital Video Broadcasting DVB-T), radio numérique (Digital Audio Broadcasting DAB), Wifi (Wireless Fidelity IEEE 802.11g) et WiMAX [20].

2.5.2 Porteuses orthogonales

Dans une transmission de type OFDM, le choix de l'écartement entre les porteuses va influencer sur l'efficacité spectrale. Plus l'espacement entre porteuses est grand, plus nous avons besoin de bande passante pour transmettre un même débit, plus l'efficacité spectrale diminue.

Ainsi, pour garantir une efficacité spectrale optimale, il faut que les fréquences des porteuses soient les plus proches possibles, tout en garantissant une absence d'interférence entre les informations qu'elles transportent afin que le récepteur soit capable de les retrouver [21].

Les fréquences sont orthogonales si l'espace entre deux fréquences adjacentes f_k et f_{k+1} est $\frac{1}{T_s}$.

En effet, chaque porteuse modulant un symbole pendant une fenêtre rectangulaire temporelle de durée T_s , son spectre en fréquence est un sinus cardinal, fonction qui s'annule tous les multiples $1/T_s$.

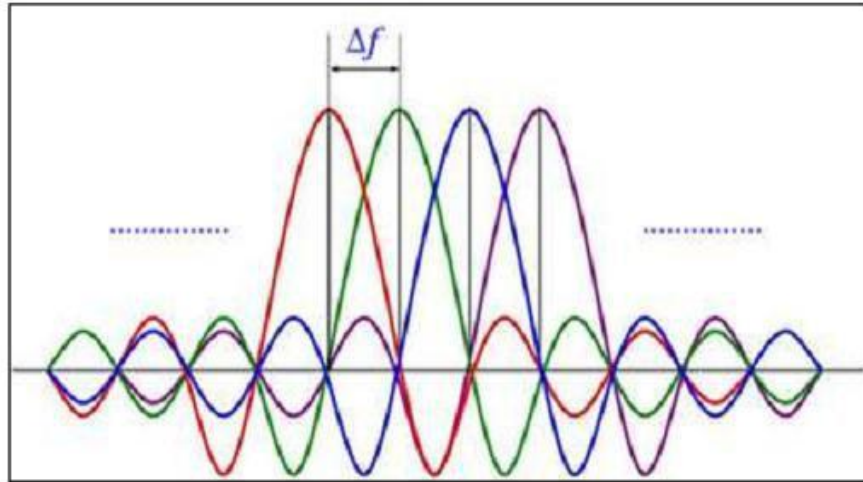


Figure 2.6 : *Spectre en sortie du modulateur OFDM*

Ainsi, lorsque l'échantillonnage est effectué précisément à la fréquence f_k d'une sous-porteuse, il n'y a aucune interférence avec les autres sous-porteuses. C'est ce qui permet de recouvrir les spectres des différentes porteuses et d'obtenir ainsi une occupation optimale du spectre. Les spectres des différentes porteuses sont présentés sur la figure 2.6. Le spectre d'un signal OFDM est la somme de tous ces spectres.

Notons que lorsque la mise en forme est une fonction rectangulaire de longueur T , les filtres adaptés en réception sont des intégrateurs sur la durée T .

2.6 Système OFDM basé sur la transformée de Fourier discrète

La figure 2.7 représente un système OFDM complet. Il comporte un émetteur, un récepteur et un canal radio à travers lequel se fait la transmission [22].

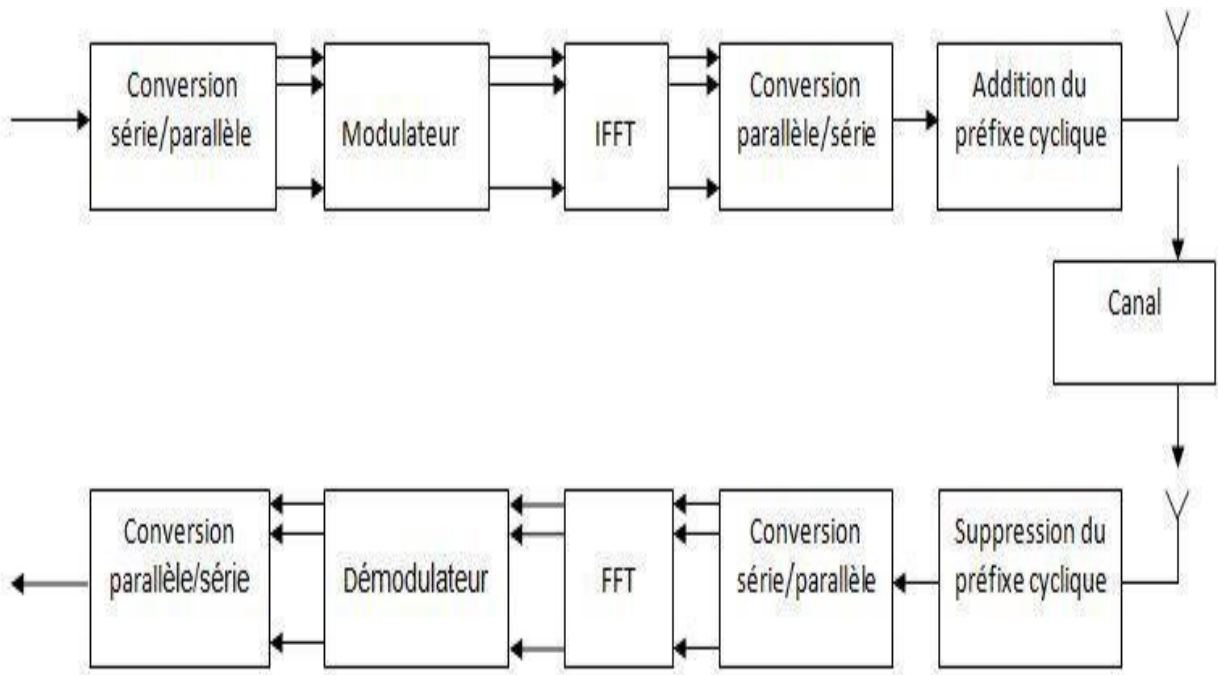


Figure 2.7: Schéma bloc d'un système OFDM-FFT

Dans la chaîne d'émission, nous générons une série binaire représentant par exemple une voix, des données, une image ou encore une information analogique qui résulte d'une conversion analogique numérique. Les données binaires sont ensuite distribuées sur les différentes sous-porteuses, puis modulées à l'aide d'un modulateur (M-QAM par exemple). À la sortie de ce modulateur, l'information possède une constellation bien spécifique.

A chaque entrée, on applique par la suite une transformée de Fourier rapide inverse (IFFT) pour moduler les sous-porteuses. Puis, une conversion parallèle/série est effectuée, et nous ajoutons ensuite l'intervalle de garde sous forme de préfixe cyclique et l'ensemble sera prêt pour l'émission.

A la réception, le processus inverse est effectué. Le préfixe cyclique est tout d'abord supprimé, et le signal est réparti sur plusieurs entrées différentes (conversion série/parallèle). La transformée de Fourier (FFT) est appliquée dans le but de ramener le signal dans le domaine fréquentiel. Les données sont par la suite démodulées et une conversion parallèle/série est effectuée. On obtient à la sortie de la chaîne de réception un train d'informations dont la

vraisemblance avec le signal original transmis dépend des perturbations introduites par le canal et les erreurs de traitement.

2.6.1 Principe de la modulation dans un système OFDM

Le schéma ci-dessous (figure 2.8) montre le principe du modulateur OFDM. Pour répartir les données à transmettre sur les N porteuses, on groupe les symboles c_k par paquets de N. Les c_k sont des nombres complexes définis à partir des éléments binaires par une constellation souvent de modulation QAM à 4, 16, 64, ou 2^q états [22].

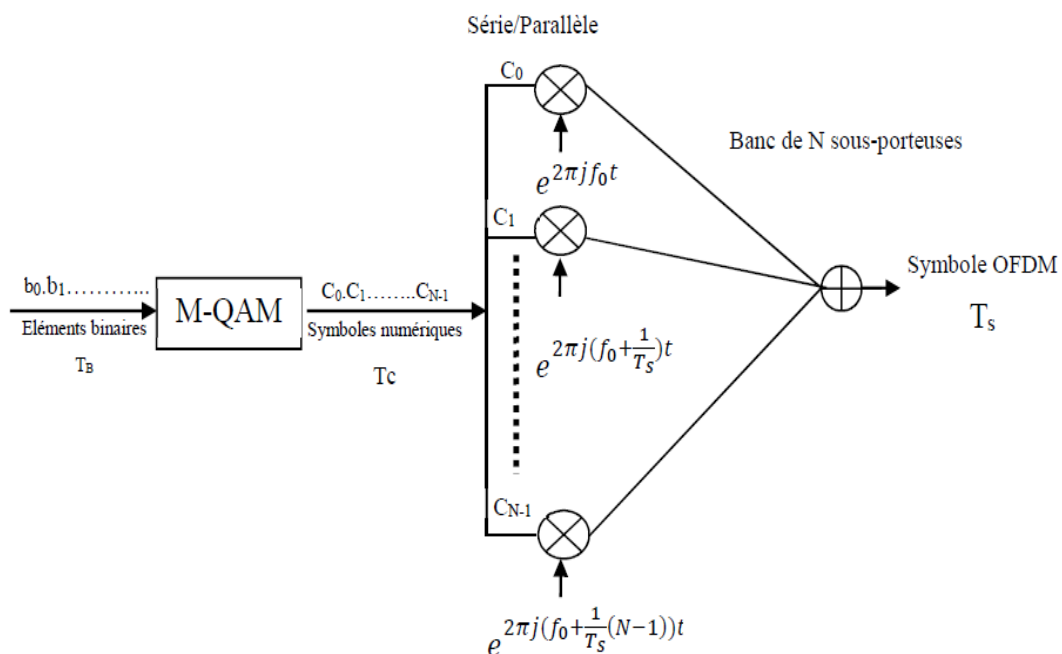


Figure 2.8: Schéma de principe du modulateur OFDM.

La séquence de N symboles c_k constitue un symbole OFDM. Le k-ième train de symboles parmi les N trains module un signal de fréquence f_k . Le signal modulé du train k s'écrit sous forme complexe comme suit:

$$c_k e^{j2\pi f_k t} \quad (2.1)$$

Le signal total $s(t)$ correspondant à l'ensemble des N symboles réassemblés en un symbole OFDM est donné par :

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{j2\pi f_k t} \quad (2.2)$$

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

$$f_k = f_0 + \frac{k}{T_s} \quad \text{et} \quad S(t) = e^{2j\pi f_0 t} \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{2j\pi \frac{kt}{T_s}} \quad (2.3)$$

Où f_0 est la première fréquence porteuse.

2.6.2 Principe de la démodulation dans un système OFDM

Le signal parvenu au récepteur s'écrit sur une durée symbole T_S comme suit :

$$y(t) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k H_k(t) e^{j2\pi f_k t} \quad (2.4)$$

$H_k(t)$ est la fonction de transfert du canal autour de la fréquence f_k et à l'instant t . Cette fonction de transfert varie lentement et on peut la supposer constante sur la période T_S ($T_S \ll 1/\text{Bande passante}$). La démodulation classique consisterait à démoduler le signal suivant les N sous-porteuses suivant le schéma classique de la figure 2.9

La condition d'orthogonalité nous montre que :

$$\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} y(t) e^{-2j\pi f_i t} dt = \frac{1}{T_s} \sum_{k=0}^{N-1} C_k H_k e^{2j\pi(k-i)\frac{t}{T_s}} dt = C_i H_i \quad (2.5)$$

Parce que

$$\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} e^{2j\pi(k-i)\frac{t}{T_s}} dt = 0 \text{ si } k \neq i, 1 \text{ si } k=i \quad (2.6)$$

Pratiquement, comme dans le cas de la modulation, la démodulation peut être accomplie par une transformée de Fourier.

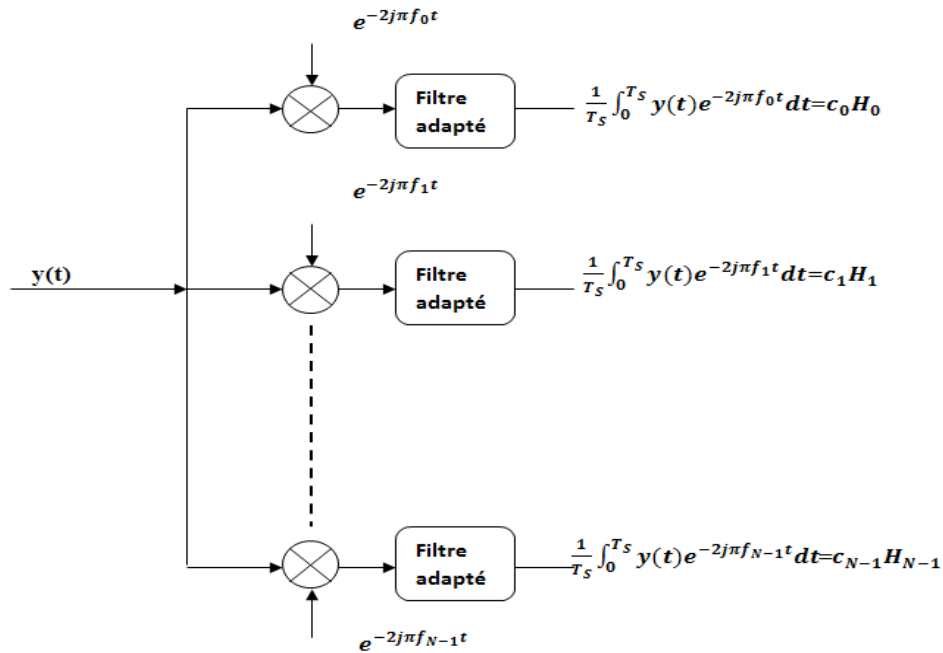


Figure 2.9 : Schéma de principe du démodulateur OFDM

Soulignons que dans une chaîne de transmission OFDM, la démodulation en réception doit être synchronisée entre le début et la fin de la période du symbole transmis, si ce n'est pas le cas, on a des interférences entre symboles. Les perturbations du canal entraînent généralement une perte d'orthogonalité entre porteuses et conduisent à des interférences entre porteuses (ICI : Inter Carrier Interférence), ou des interférences entre symboles (ISI : Inter Symbol Interférence). Une solution à ce problème est l'introduction des intervalles de gardes à chaque symbole OFDM [23].

2.6 .3 Intervalles de gardes

Les intervalles de gardes sont nécessaires pour l'orthogonalité entre les porteuses lorsque le canal introduit des multi-trajets au signal. Ceux-ci permettent de créer une zone tampon dans laquelle seront accumulées les versions retardées susceptibles de produire des interférences.

Plusieurs techniques existent pour l'introduction des intervalles de gardes pour l'OFDM. Il s'agit soit de remplir l'espace de garde entre deux symboles consécutifs par des zéros (technique utilisée pour certaines transmissions Ultra Wide Band UWB), soit d'introduire une extension cyclique du symbole OFDM.

Cette dernière peut être introduite de deux façons différentes : l'une est nommée préfixe cyclique et l'autre suffixe cyclique [24].

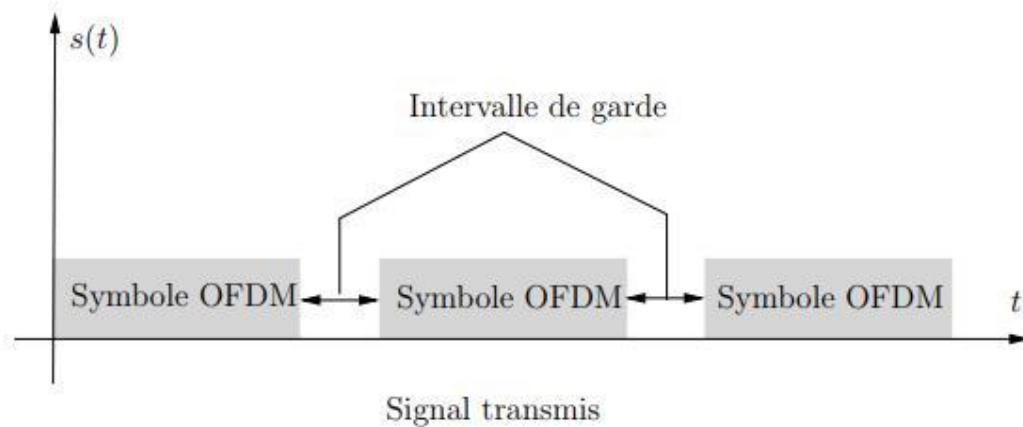


Figure 2.10 Les intervalles de gardes dans un symbole OFDM

2.6.3.1 Remplissage par des zéros

C'est une méthode qui consiste à insérer dans l'intervalle de garde des zéros à la place du préfixe et suffixe cyclique. Cette approche est utilisée dans le système UWB. Lorsque l'intervalle de garde est rempli par des zéros, la longueur du symbole OFDM est plus courte que dans les cas d'attribution de préfixe cyclique et suffixe cyclique.

Aussi la longueur de la fenêtre rectangulaire de transmission est plus courte que pour le cas contenant les préfixes et suffixes cycliques T_{total} , on aboutit à un spectre correspondant plus large. Le débit est de $\frac{T_{eff}}{T_{total}} = \frac{T_{eff}}{T_{total}+T_{cp}}$ à cause de l'intervalle de garde, est la durée du symbole OFDM ajouté de l'intervalle de garde

2.6.3.2 Préfixe cyclique

Le principe du préfixe cyclique est de copier les derniers échantillons d'un symbole et les placer à son début. En utilisant cette technique, on garde une continuité dans le symbole. Le préfixe cyclique est une bonne méthode pour combattre les interférences entre symbole ISI et entre porteuses ICI. Grâce à cette extension, la période du symbole est plus longue. Précisons que bien que la période soit plus longue, cela n'a aucun incident sur le spectre fréquentiel du signal. Aussi longtemps que le bon nombre d'échantillons est pris en réception n'importe où dans le symbole rallongé, l'orthogonalité est maintenue et les interférences éliminées. La figure 2.11 donne une vue sur le principe d'insertion du préfixe cyclique

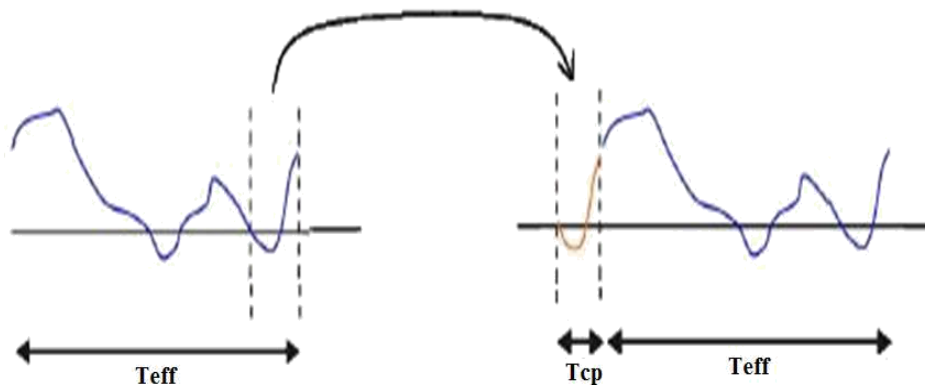


Figure 2.11 : Insertion du préfixe cyclique.

La longueur du préfixe que nous rajoutons est additionnée au symbole initial, nous obtenons un symbole OFDM de longueur totale égale à :

$$T_{total} = T_{cp} + T_{eff} \quad (2.7)$$

Il est important de savoir que la longueur du préfixe doit être définie en fonction des délais maximums de retard prévus dans le canal multi-trajet. En effet, l'idée n'est pas qu'on résolve uniquement le problème d'interférence en utilisant le préfixe, mais aussi d'effectuer une utilisation la plus optimale possible de la bande passante. L'information répétée dans le préfixe crée un gaspillage de bande passante qu'il est important d'amoindrir au maximum.

Typiquement, la durée de l'extension cyclique se situe entre 1/4 et 1/10 du nombre de sous-porteuses. Ceci implique des pertes de bande passante allant respectivement de 20% à 9%.

2.6.3.3 Suffixe cyclique

Le suffixe cyclique est aussi une extension cyclique du symbole OFDM. C'est le même principe de rajout que précédemment sauf que dans ce cas, le suffixe est intégré à la fin du symbole OFDM. Il est utilisé pour éviter l'interférence entre le flot montant et celui descendant dans une communication. Pour choisir sa longueur, on calcule la différence de temps de réception entre le flot montant et celui qui est descendant.

2.7 Parenthèse sur les ondelettes

La transformation en ondelettes est un moyen de décomposer un signal d'intérêt (ou onde) en un ensemble de formes d'ondes de base, appelées ondelettes permettant ainsi d'analyser le signal en examinant les coefficients (ou pondérations) des ondelettes. Cette méthode est utilisée dans diverses applications et devient très populaire dans le domaine de recherche scientifique entre les technologues, ingénieurs et mathématiciens. Dans la plupart des applications, la puissance de la transformation provient du fait que les fonctions de base de la transformation sont localisées dans le temps (ou l'espace) et la fréquence, et ont des résolutions dans ces domaines. Différentes résolutions correspondent souvent au comportement naturel du processus à analyser, d'où le pouvoir de la transformation.

Ces propriétés rendent les ondelettes et la transformation en ondelettes choix naturels dans des domaines aussi divers que la synthèse d'images, la compression de données, l'infographie et l'animation, vision humaine, radar, optique, astronomie, acoustique, sismologie, génie nucléaire, génie biomédical ,imagerie par résonance magnétique, musique, fractales, turbulence et mathématiques pures [24].

La transformation en ondelettes a récemment été proposée comme système d'analyse possible lors de la conception des systèmes de communication sans fil numériques sophistiqués, avec des avantages tels que la flexibilité de transformation, la sensibilité à la distorsion et au brouillage des canaux et meilleure utilisation du spectre.

2.8 Motivation pour l'utilisation des ondelettes [24]

- La transformation en ondelettes peut créer des sous-porteuses de différentes largeurs de bandes et de longueur de symboles.
- La capacité des ondelettes à organiser le pavage temps-fréquence de manière à minimiser les perturbations du canal, et l'effet du bruit ainsi que les interférences entre symboles.
- Les ondelettes donnent une nouvelle dimension, une diversité des signaux pouvant être exploitée dans un système de communication cellulaire, où les cellules adjacentes peuvent être désignées par des ondelettes différentes afin de minimiser les interférences inter-cellules.

- Réduction des interférences inter symboles ISI (Inter Symbole Interférence) et inter porteuses ICI (Inter Carrier Interférence). Beaucoup les chercheurs ont prouvé que les schémas multi-porteuses à base d'ondelettes. Beaucoup les chercheurs ont prouvé que les schémas multi-porteuses à base d'ondelettes dépassent dans la suppression des ICI et ISI les systèmes traditionnels à base de la FFT.
- Dans le scénario sans fil, les effets de canal ne peuvent pas être contrôlés. Mais la forme de l'ondelette peut être soigneusement conçue pour avoir une distorsion minimale.
- La transformation en ondelettes permet plus de flexibilité dans la conception des systèmes OFDM.

2.9 Système OFDM basé sur la transformée en ondelette discrète

Cette section donne un aperçu sur la transformée en ondelette discrète DWT (Discreet Wavelet Transform) méthode alternative à la FFT pour l'implémentation d'un système OFDM. Dans l'OFDM à base d'ondelettes nommée OFDM-DWT, les exponentielles complexes à fenêtre temporelle sont remplacées par des porteuses d'ondelette, à différentes échelles (j) et positions sur l'axe des temps (k). Ces fonctions sont générées par la translation et la dilatation d'une fonction unique, dite 'ondelette mère', notée $\psi(t)$:

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}t - k) \quad (2.8)$$

L'orthogonalité de ces porteuses repose sur la localisation temporelle (k) et l'indice d'échelle (j). Les porteuses à base d'ondelette exhibent une meilleure localisation temps-fréquence relativement aux exponentielles complexes de la FFT, tandis que la complexité de la mise en œuvre du système OFDM-DWT est comparable à celle du système OFDM-FFT.

Le point clé pour l'orthogonalité est réalisé par la génération des membres d'une famille d'ondelettes, selon l'équation suivante:

$$\langle \psi_{j,k}(t), \psi_{m,n}(t) \rangle = \begin{cases} 1, & j = m \text{ et } k = n \\ 0, & \text{autrement} \end{cases} \quad (2.9)$$

Ces fonctions ont une base ortho-normale de $L^2(\mathbb{R})$, sous condition qu'un nombre fini d'échelles $j \in \mathbb{Z}$ est considéré.

Pour réaliser cette condition, la fonction d'échelle $\Phi(t)$ est utilisée. Le symbole OFDM-DWT peut maintenant être considéré comme une somme pondérée des porteuses, ondelette et échelle, comme exprimée par l'équation (2.10). Ceci correspond pratiquement à la transformée d'ondelette discrète inverse IDWT pour (Inverse Discrete Wavelet Transform)

$$s(t) = \sum_{j \leq J} \sum_k w_{j,k}(t) \cdot \Psi_{j,k}(t) + \sum_k a_{j,k} \Phi_{j,k}(t) \quad (2.10)$$

Les symboles de données sont vus par le modulateur IDWT comme une séquence des ondelettes $w_{j,k}$ et des coefficients d'approximation $a_{j,k}$. Selon l'équation (2.8) J est l'échelle des porteuses ayant le plus mauvais temps de résolution et la meilleure localisation en fréquence. Pour calculer la transformée d'ondelette discrète inverse IDWT, l'algorithme de Mallat basé sur un banc de filtre est utilisé à la place de l'équation (2.10). A la sortie du filtre, la version discrète du symbole OFDM-DWT est obtenue, avec réponse impulsionnelle des filtres (passe-bas et passe-haut) décidés par l'ondelette mère.

La figure 2.12 représente le schéma de principe d'un système OFDM-DWT où il n'est pas nécessaire d'ajouter un préfixe cyclique au début section émetteur ce qui augmente davantage l'efficacité spectrale. On peut atteindre jusqu'à 20% de gain en efficacité spectrale en évitant l'ajout de préfixe cyclique pour le système OFDM-DWT

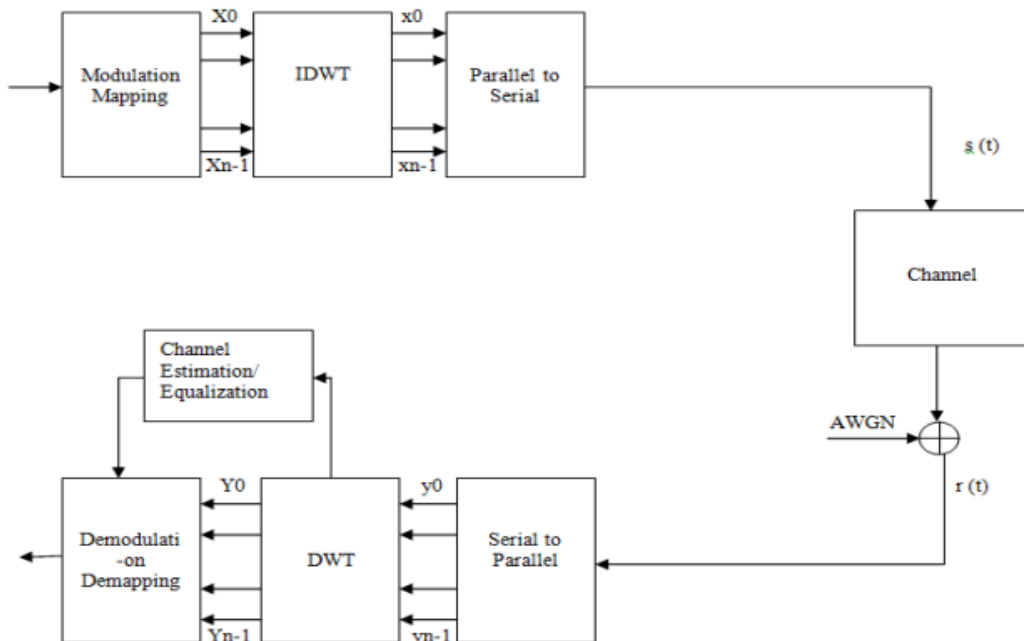


Figure 2.12 Schéma bloc d'un système OFDM-DWT

En OFDM à base d'ondelettes, les blocs IFFT et FFT sont simplement remplacés par une transformée en ondelette discrète inverse (IDWT) et une transformée en ondelette

discrète (DWT), respectivement. En OFDM-FFT, il y a M sous canaux indépendants via une opération IFFT avec $K = 2^M$ points.

Pour conserver le même débit de données dans les systèmes d'ondelette, K sous-canaux indépendants sont multiplexés ensemble via une opération IDWT avec K points .

Des ondelettes telles que Harr ou bi-orthogonale peuvent être utilisées pour la mise en œuvre du système OFDM-DWT. Ainsi les filtres utilisés sont à réponses impulsionnelles finies.

L'OFDM ondelette est mis en œuvre via des formes d'ondes chevauchantes pour préserver le débit de données. Dans ce contexte, l'utilisation du préfixe cyclique n'a pas de sens [24].

2.10 Application des ondelettes en télécommunications [25]

Les ondelettes ont trouvé applicabilité avantageuse dans divers aspects de la conception de systèmes de communication sans fil, y compris la modélisation des canaux, conception des émetteurs-récepteurs, représentation des données, compression des données et codage de la source et du canal, atténuation des brouillages, suppression du bruit et signalisation à faible consommation d'énergie. Ces domaines d'applications sont explicité sur le graphique suivant :

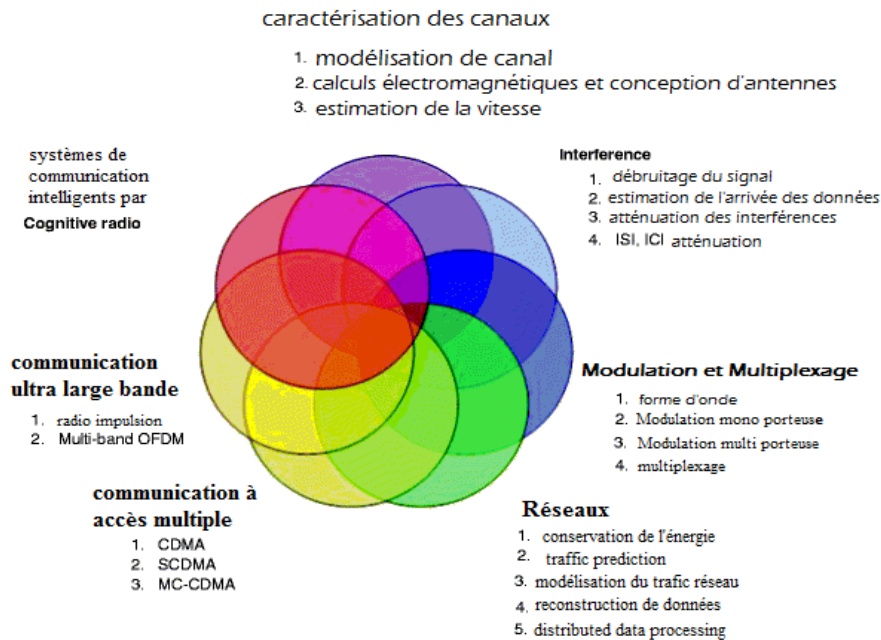


Figure 2.13 Applications des ondelettes en télécommunications

2.11 Avantages et inconvénients de l'OFDM

L'OFDM a été utilisé dans de nombreux systèmes sans fil haut débit en raison des nombreux avantages qu'elle offre [26].

- L'immunité à la sélectivité en fréquence que les systèmes mono porteuse parce qu'elle divise le canal global en plusieurs signaux à bande étroite qui sont considérées individuellement comme sous-canaux simples.
- L'efficacité du spectre : un important avantage OFDM est qu'elle permet d'utiliser efficacement le spectre disponible
- Résistant à l'ISI : Un autre avantage de l'OFDM est la résistance aux l'inter-symbole interférences. Cela résulte du faible taux de données sur chacun des sous-canaux.
- L'égalisation du canal est plus simple: l'un des problèmes avec les systèmes mono-porteuses était la complexité de l'égalisation du canal qui de varier être appliqués dans l'ensemble du canal. Un avantage de l'OFDM est que le recours à de multiples sous-canaux, rend l'égalisation beaucoup plus simple.

Le système utilisant la technique d'OFDM n'est pas parfait, il a des inconvénients qu'il faut prendre en considération en faisant la conception et surtout au niveau de sa mise en œuvre matérielle. L'OFDM a en effet certains inconvénients mentionnés ci-dessous par rapport à la modulation d'une seule porteuse.

- L'OFDM est plus sensible au décalage de fréquence et au bruit de phase.
- Elle représente des variations d'amplitudes sur des intervalles dynamiques assez larges. Ceci exige des amplificateurs de puissances RF avec un taux de puissance crête relativement élevée.

2.12 Conclusion

Dans ce chapitre notre concentration s'est focalisée sur la technique OFDM en parcourant toutes les étapes nécessaires soit pour la génération du signal OFDM soit pour l'extraction à la réception du signal utile pour la technique FFT et la technique DWT, Nous avons vu que l'OFDM-DWT présente une amélioration relativement à l'OFDM-FFT étant donné la suppression des préfixes cycliques donc un gain en efficacité spectrale. Nous étudions les performances des deux systèmes au chapitre suivant.

CHAPITRE 03:

Résultats de simulation de la technique OFDM

CHAPITRE 3: Résultats de simulation de la technique OFDM

3.1 Introduction

La conception matérielle d'un système de communication, tel un système OFDM requiert des outils de simulations et des calculs assez précis capables de produire des résultats assez proches de la réalité. Dans ce chapitre, nous présentons la conception d'une chaîne de transmission OFDM à l'aide de l'outil SIMULINK. Nous illustrons les différentes étapes suivies dans la conception d'un émetteur et d'un récepteur OFDM à base des transformées de Fourier discrètes. Nous proposons des améliorations au système OFDM à travers l'utilisation des transformées en ondelettes discrètes. Nous établirons une comparaison des performances des systèmes OFDM en utilisant différents types de modulations numériques.

3.2 Présentation du Simulink

Simulink est un outil complémentaire à MATLAB, il fournit un environnement graphique interactif pour la modélisation, la simulation et l'analyse de systèmes dynamiques. Il comprend une bibliothèque complète de blocs prédéfinis à utiliser pour construire des modèles graphiques de systèmes. On peut changer les paramètres et voir immédiatement ce qui se passe, pour l'exploration. Simulink est intégré à MATLAB et les données peuvent être facilement partagées entre les programmes.

Chaîne de transmission OFDM à base de FFT

Dans cette phase nous simulons une chaîne de transmission OFDM basée sur la transformée de Fourier. Les différents blocs illustrés ci-dessous vont être explicités en détails ultérieurement.

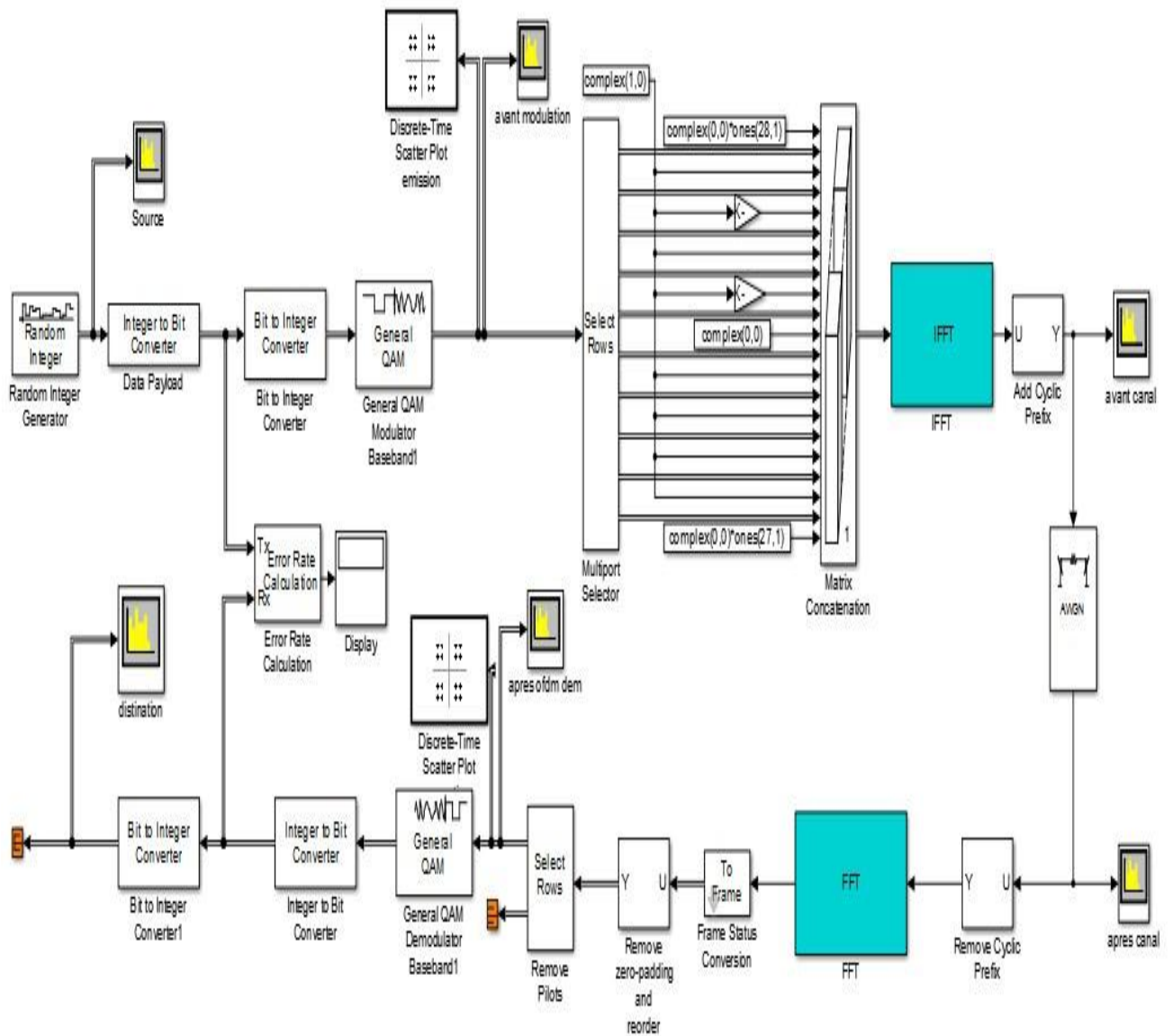


Figure 3.1: Schéma bloc d'une chaîne de transmission OFDM-FFT en Simulink.

Cette chaîne peut être décomposée en deux parties ; à savoir une partie en émission (OFDM-FFT) et l'autre en réception (OFDM-FFT).

3.3.1 Blocs d'émission OFDM-FFT

Dans la partie d'émission, nous générons une série binaire aléatoire, des données, voix, image ou encore une information analogique qui résulte d'une conversion analogique numérique. Les données binaires sont ensuite distribuées sur les différentes sous-porteuses, puis modulées à l'aide d'un modulateur à ce niveau, l'information possède une constellation bien spécifique.

A chaque entrée, on applique par la suite une transformée de Fourier rapide inverse (IFFT) pour moduler les sous-porteuses, puis, une conversion parallèle/série est effectuée. Nous ajoutons ensuite l'intervalle de garde sous forme de préfixe cyclique et l'ensemble sera prêt pour l'émission.

La figure 3.2 illustre le schéma bloc d'une chaîne d'émission OFDM-FFT. Nous allons présenter une description explicite pour chaque bloc, à commencer par les blocs en émission.

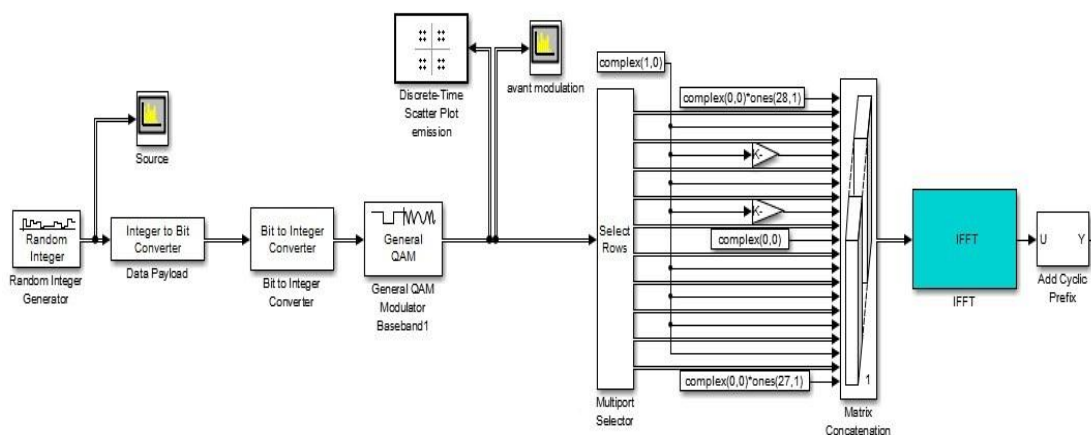
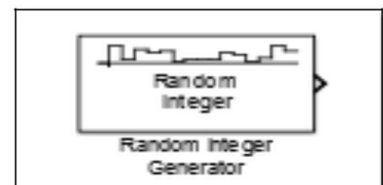


Figure 3.2: Schéma bloc d'émission OFDM-FFT

❖ Random Integer Generator

Le premier bloc du système OFDM est le générateur de bits aléatoires, ce bloc génère des nombres aléatoires d'entiers en série dans l'intervalle $[0, M-1]$



Avec les paramètres suivant :

- Etats d'entiers 2 pour BPSK ,4 pour QPSK ,16 pour QAM-16
- 3GHz la bande passante

- 192 entiers par trame

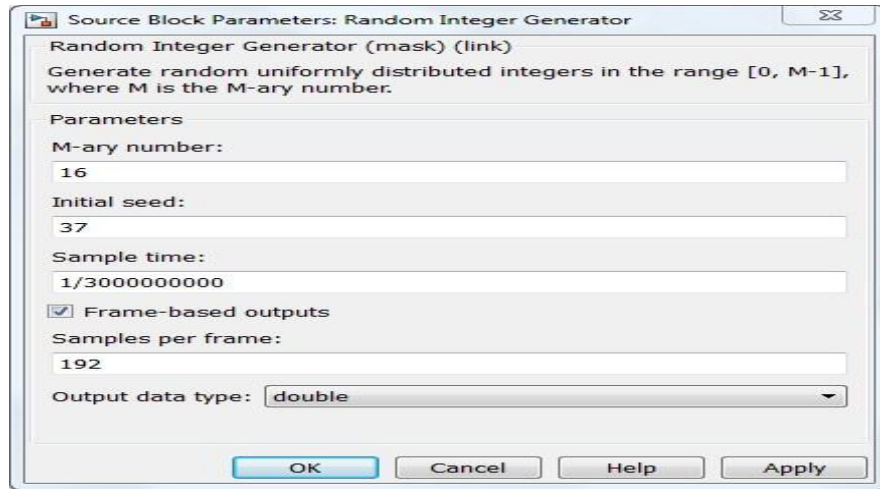


Figure 3.3: Paramètres du bloc Random Integer Generator

❖ **Integer to bit converter:**

Convertit le nombre entier à des bits numériques. Fait correspondre à chaque valeur entière ou la valeur de point fixe dans le vecteur d'entrée à un groupe de bits du vecteur de sortie.

Le bloc trace chaque valeur de nombre entier à un groupe de M bits, la longueur du vecteur de sortie résultant est M fois la longueur du vecteur d'entrée. Dans notre cas on va choisir 2 bits car l'entrée est composée de 4 états possibles.

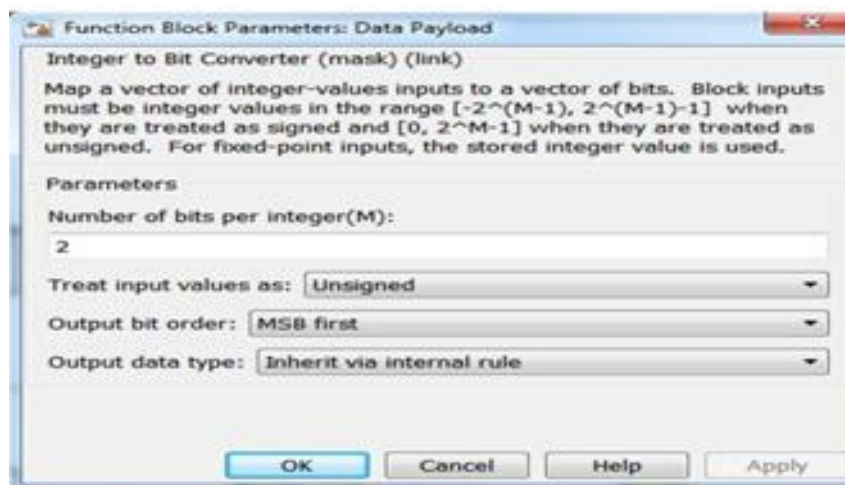
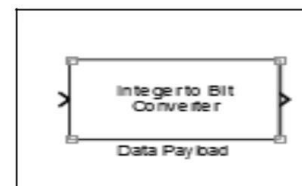


Figure 3.4: Paramètres du bloc Integer to bit converter

❖ **Bit to integer Converter:**

Pour la conversion des bits en entiers, avec le même paramètre à modifier qui est le nombre de bits pour chaque entier et qui vaut 2 bits.

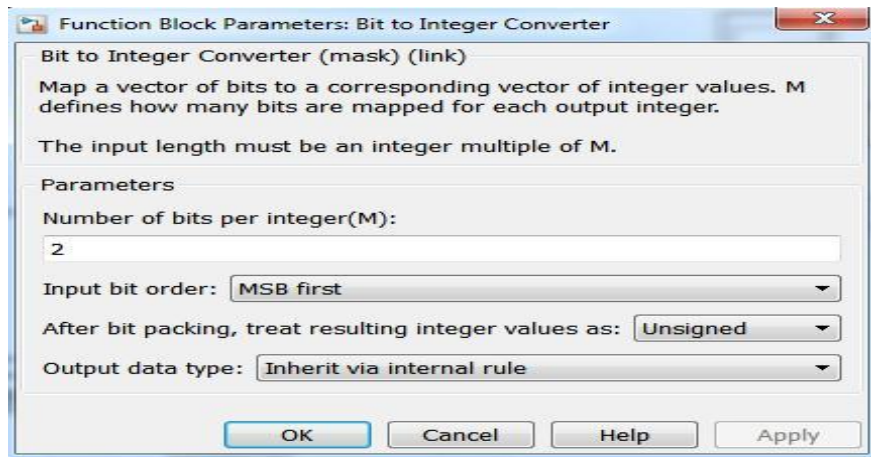
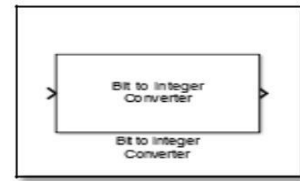


Figure 3.5: Paramètres du bloc *Bit to integer Converter*

L'intérêt est d'extraire les bits de la source pour les comparer avec ceux du récepteur comme ça on peut calculer le taux d'erreur binaire.

❖ **Modulation QPSK :**

Le bloc Modulateur effectue la modulation numérique QPSK pour moduler les données. La source que nous avons utilisé est composée de 4 états possibles donc la modulation doit être elle aussi à 4 états.

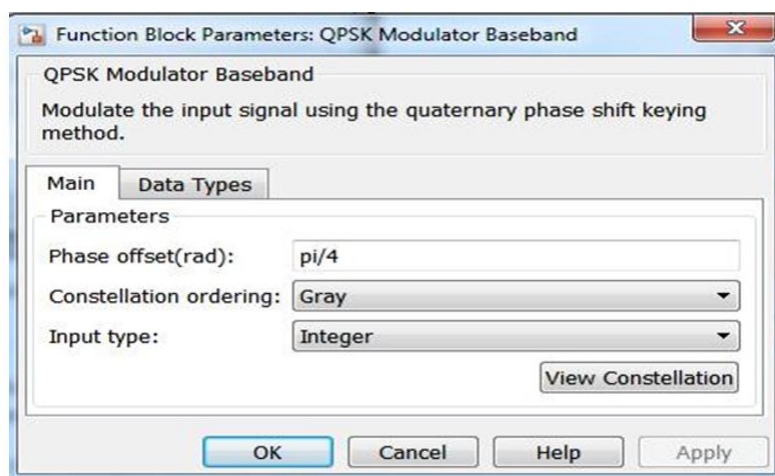
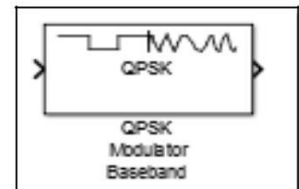


Figure 3.6: Paramètres du bloc *QPSK Modulator*

❖ **Genarale QAM Modulator :**

Bloc modulation en utilisant une modulation d'amplitude en quadrature M-ary avec une constellation sur un réseau rectangulaire. La sortie est une représentation en bande de base du signal modulé. Ce bloc accepte un signal d'entrée de vecteur scalaire ou colonne.

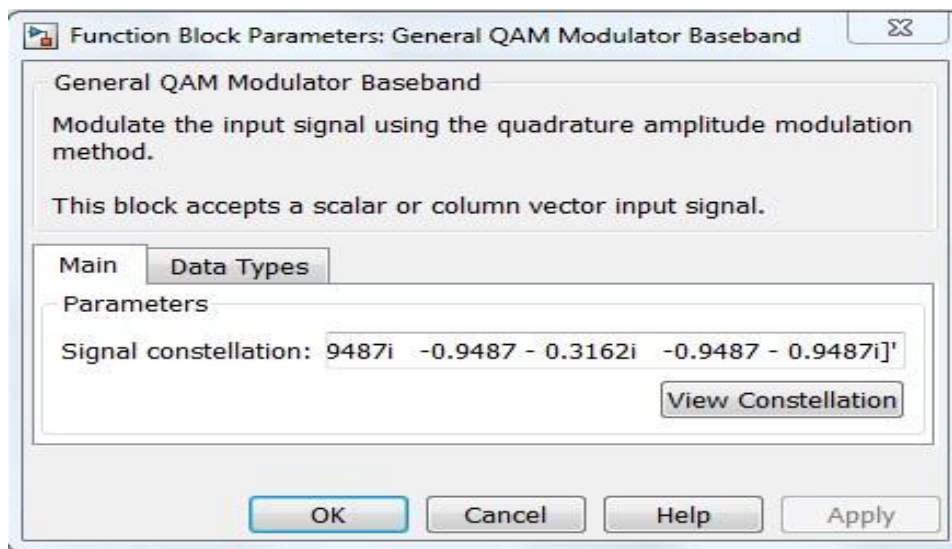
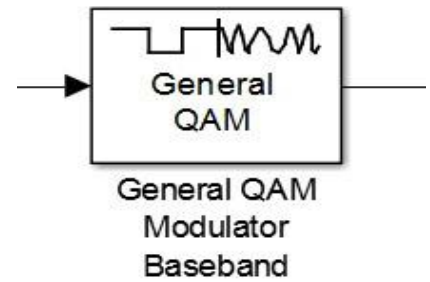


Figure 3.7: Paramètres du bloc QAM Modulator

❖ **Insertion des sous-porteuses :**

Parmi les sous-porteuses disponibles dans une bande, il existe celles qui sont attribuer aux données des utilisateurs, et celles réservées pour d'autres tâches telles que :

- DC sub-carrier : La porteuse centrale, pour marquer le centre de la bande OFDM.
- Pilot sub-Carriers : sous-porteuses utilisées pour transporter les séquences pilotes nécessaires pour connaître le canal de propagation.

Ce bloc nous permet d'intégrer toutes ces différentes sous-porteuses :

- On va intégrer une DC sub-Carrier au milieu de la trame et 10 Pilot sub-Carriers.

- Select Rows : Pour découper les 192 symboles reçus à son entrée par 10, en rangeant chaque ensemble dans une sortie.
- Entre les 10 ensembles on va intégrer nos Pilot sub-Carriers et au milieu la porteuse centrale.

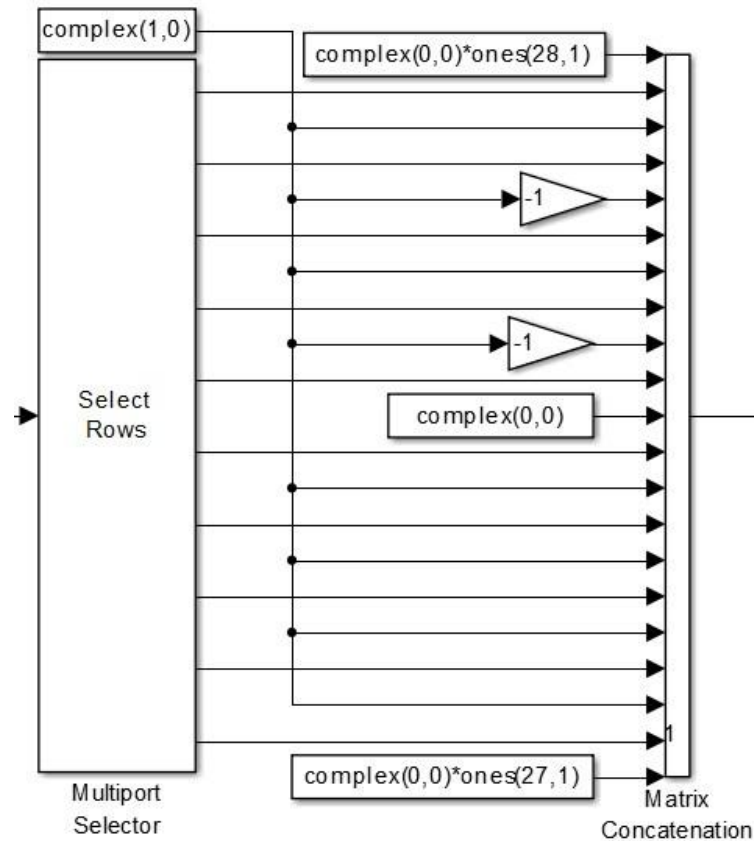


Figure 3.8: Insertion des sous-porteuses

❖ **Bloc Multiport Selector :**

Ce bloc distribue des sous-ensembles arbitraires de lignes d'entrées ou de colonnes à plusieurs ports de sortie. Le bloc Multiport sélecteur extrait plusieurs sous-ensembles de lignes ou les colonnes de M par N de la matrice d'entrée u, Pour découper les 192 symboles reçus à son entrée par 10, en rangeant chaque ensemble dans une sortie.

Entre les 10 ensembles on va intégrer nos Pilot Sub-Carriers et au milieu la porteuse centrale, l'ensemble est rassemblé par le bloc Matrix Concaténation.

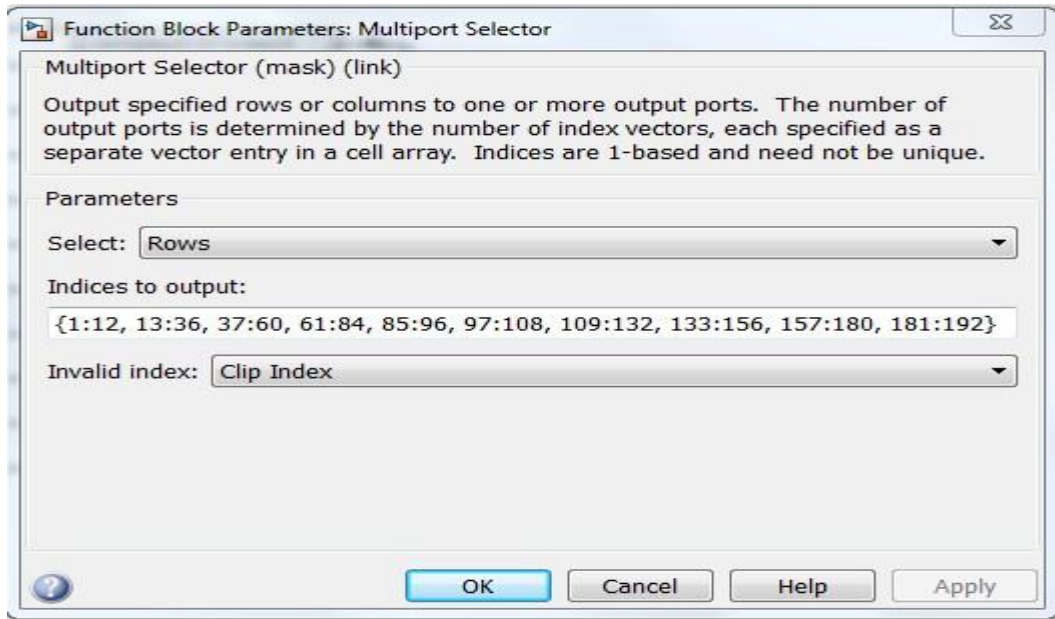


Figure 3.9: Paramètres du bloc Multiport Sélecteur

❖ **Bloc IFFT :**

Ce bloc est le plus important dans la chaîne de transmission OFDM étant donné qu'il fournit un moyen simple pour moduler les données sur N sous-porteuses orthogonales. La sortie IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) est essentiellement le résumé de tous les N sinusoides orthogonales, ainsi la taille de l'IFFT choisie est 256.

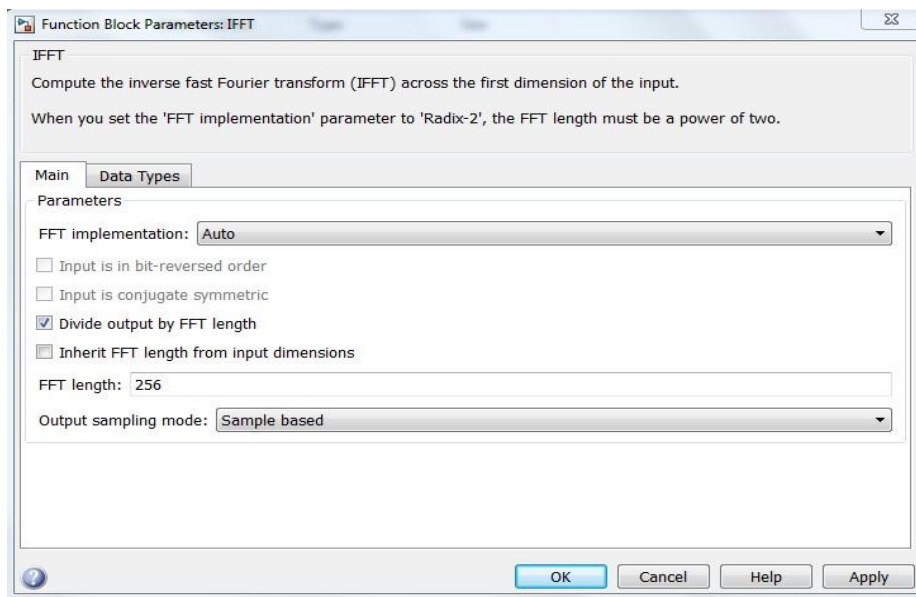
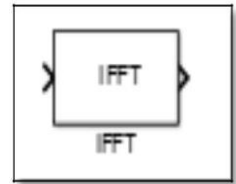


Figure 3.10: Paramètres du bloc IFFT

❖ **Cyclic Prefix:**

Le préfixe cyclique utilisé dans l'OFDM fournit un élément essentiel du signal global agissant comme intervalle de garde entre chaque symbole.

L'ajout de ce préfixe cyclique assure la robustesse du signal OFDM. L'intervalle dégradé ainsi introduit permet de réduire voire même d'annuler les effets de l'interférence entre symboles

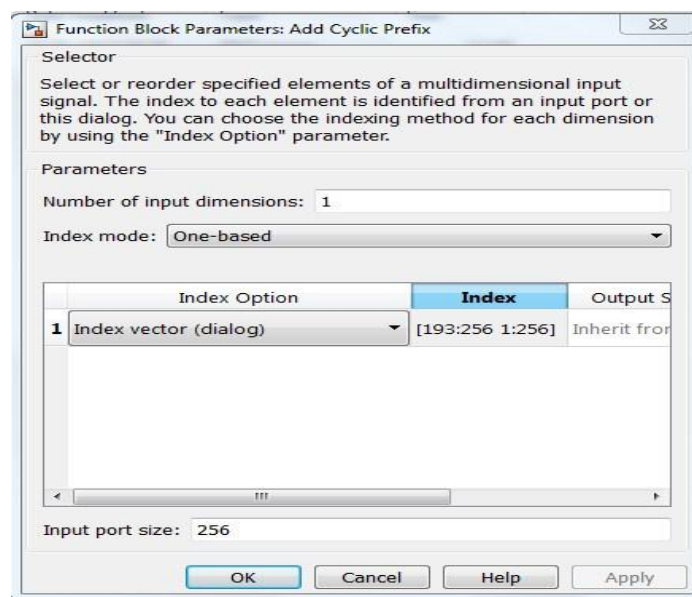
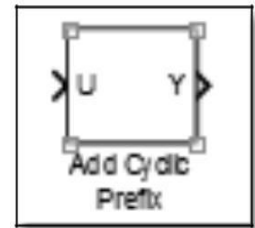
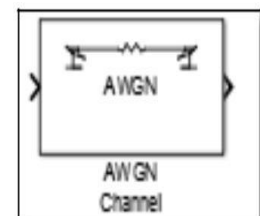


Figure 3.11: Paramètres du bloc Add Cyclic Prefix

❖ **Canal AWGN**

Le bloc AWGN Channel modélise le bruit blanc gaussien. Lorsque le signal d'entrée est réel, ce bloc ajoute un bruit gaussien réel. Dans le cas où le signal d'entrée est complexe, ce bloc ajoute un bruit gaussien complexe et génère un signal de sortie complexe. Ce bloc accepte une entrée sous forme scalaire, vecteur, ou matrice. Ce bloc nous permet de choisir le paramètre rapport signal sur bruit (SNR), de modifier sa valeur jusqu'à atteindre un taux d'erreur élevé.



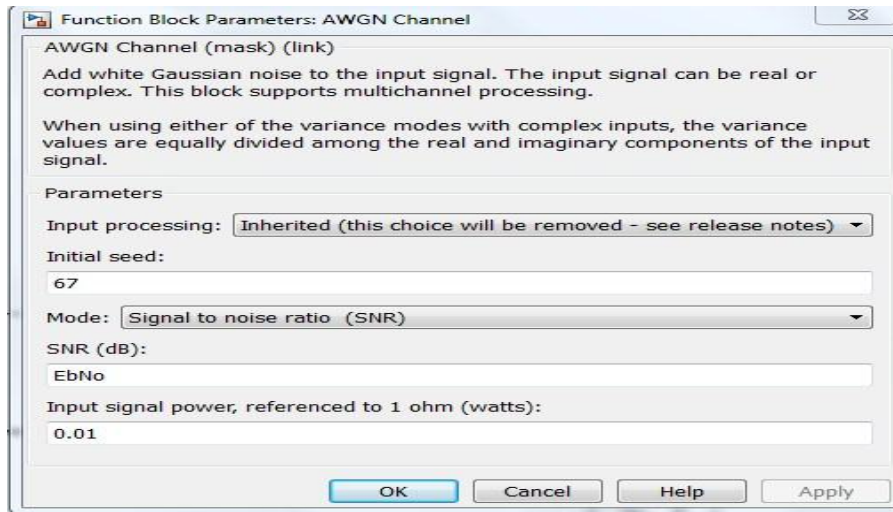


Figure 3.12: Paramètres du bloc AWGN

3.3.2 Blocs de réception OFDM-FFT

La figure ci-dessous illustre le schéma bloc d'un récepteur OFDM à base de la FFT

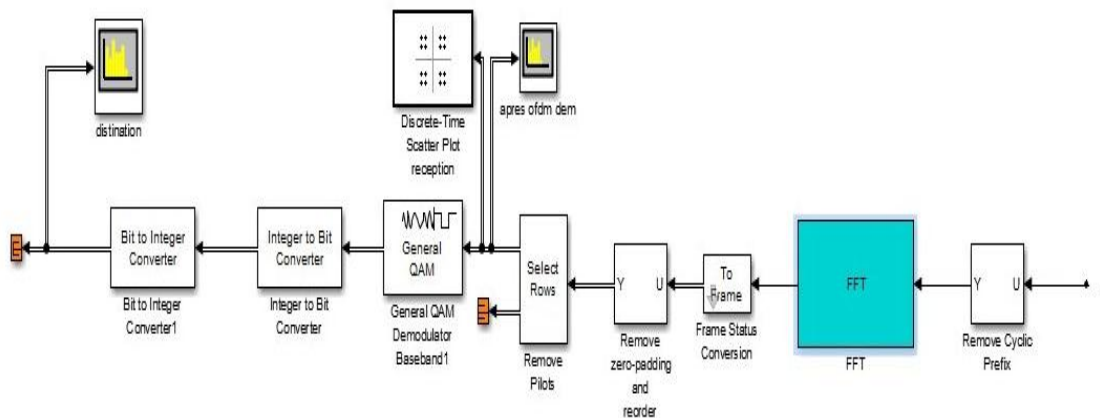
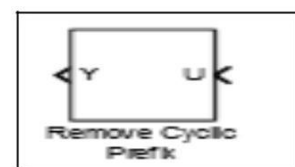


Figure 3.13: Schéma bloc d'un récepteur OFDM-FFT

Le récepteur effectue les opérations inverses de l'émetteur. On obtient à la sortie de la chaîne de réception un train d'informations dont la vraisemblance avec le signal original transmis dépend des perturbations introduites par le canal et les erreurs de traitement.

❖ Remove Cyclic Prefix :

Etant donné que nous avons ajouté un préfixe cyclique en émission, ainsi à la réception on doit enlever ce préfixe qui a été introduit.



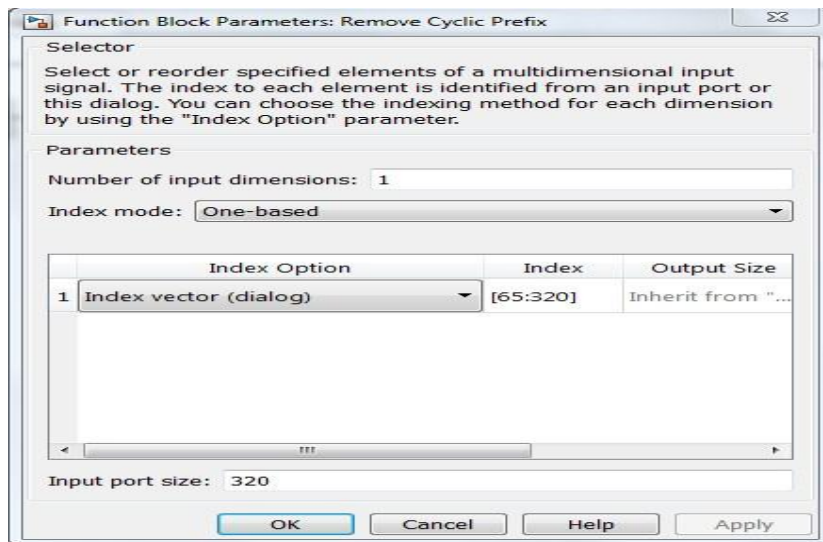


Figure 3.14: Paramètres du bloc Remove Cyclic Prefix

❖ **FFT :**

A la sortie du préfixe cyclique la taille du vecteur est 256, qui seront directement traités par le bloc FFT. Au niveau du récepteur, un bloc FFT est utilisé pour démoduler le signal OFDM reçu. Idéalement, la sortie de la FFT sera les symboles d'origine qui ont été envoyés à l'IFFT à l'émetteur.

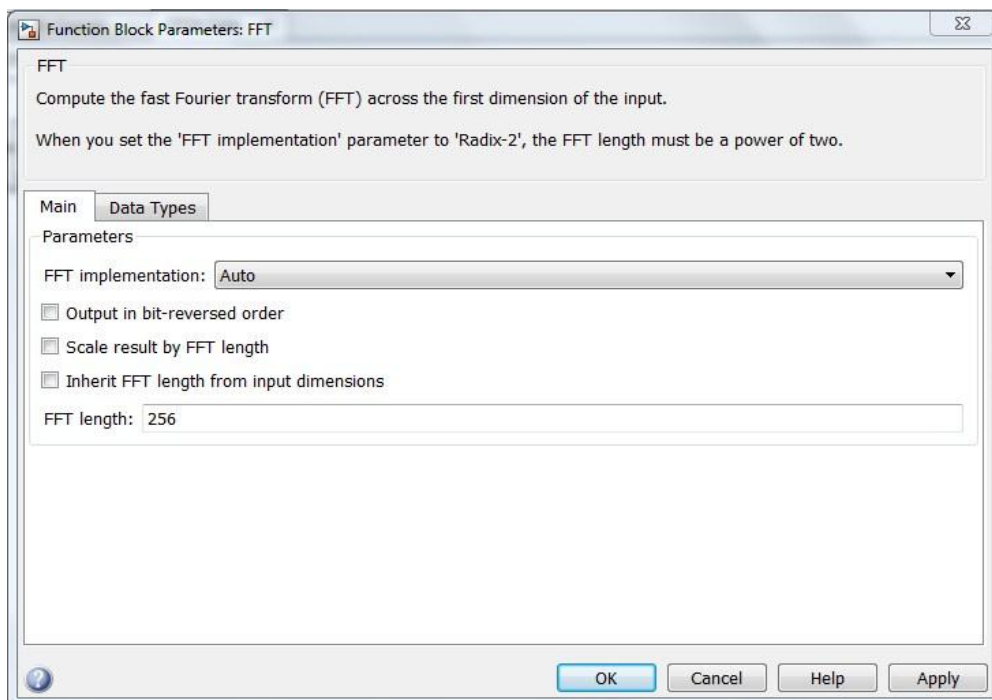
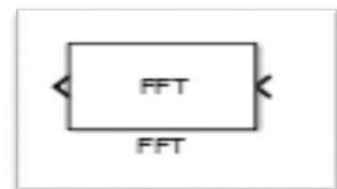


Figure 3.15: Paramètres du bloc FFT

❖ **Frame Conversion :**

Ce bloc permet de regrouper les données en trame (256 éléments).

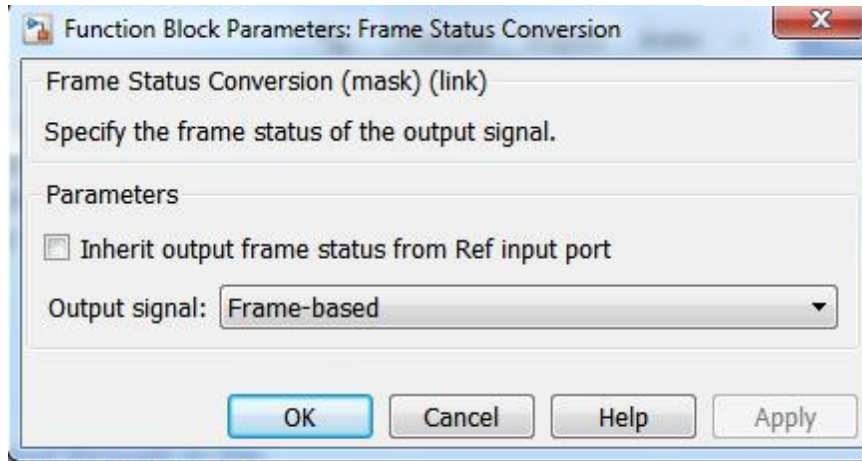
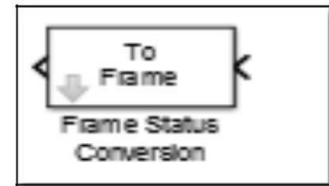


Figure 3.16: Paramètres du bloc Frame Conversion

❖ **Remove zéro-padding :**

Pour éliminer les zéros de bourrage qui a été introduit dans la transmission OFDM à cause de l'fft on a utilisé les paramètres suivant :

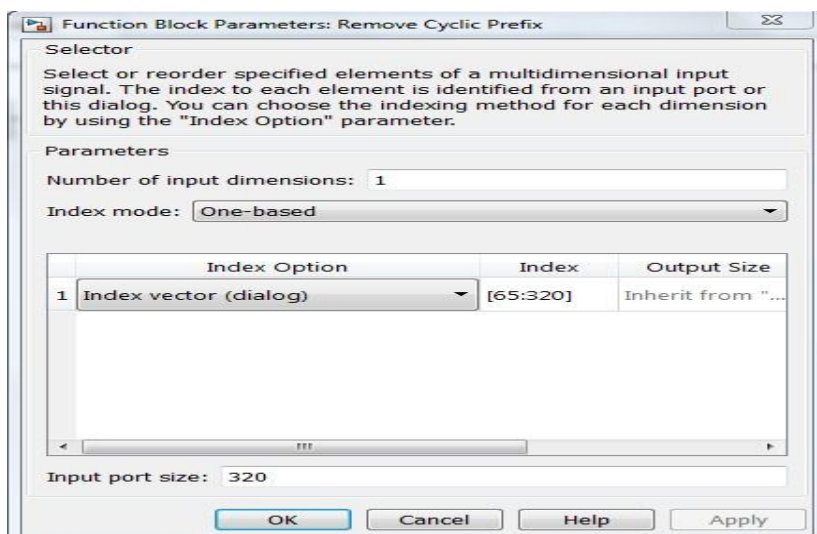
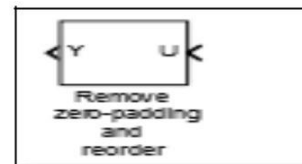


Figure 3.17: Paramètres du bloc zéro-padding

❖ **Select Rows :**

Ce bloc a été utilisé ici pour éliminer les symboles prévenant des sous porteuses pilotes et la sous porteuse centrale à partir de la matrice de données.

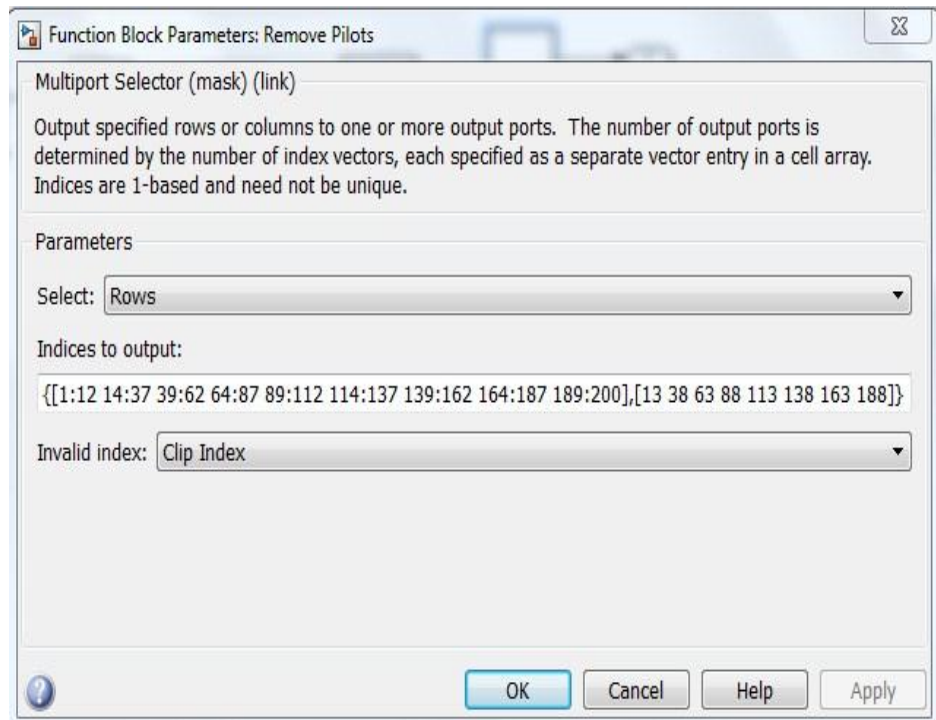
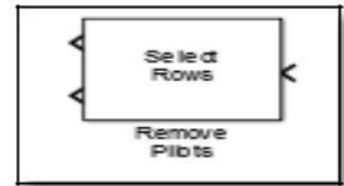
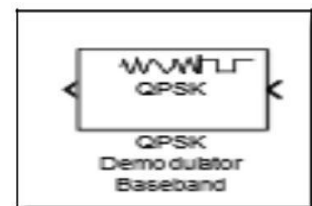


Figure 3.18: Paramètres du bloc Remove Pilots

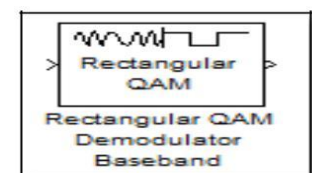
❖ **QPSK démodulateur**

Le bloc démodulateur QPSK(ou QAM) transforme un signal qui a été modulé. Même paramètres que le bloc de modulation QPSK. Ce bloc utilise des paramètres dépendants du type et du niveau de la modulation utilisée.



❖ **QAM démodulateur**

Bloc démoduler un signal qui a déjà été modulé en utilisant une modulation d'amplitude en quadrature.



❖ **Error Rate Calculation**

Ce bloc permet de calculer soit le taux d'erreur de symboles ou de bits, car il ne tient pas compte de la différence entre les éléments de données d'entrée. Si les entrées sont des bits, alors le bloc calcule le taux d'erreur binaire. Si les entrées sont les symboles, il calcule le taux d'erreur de symboles.

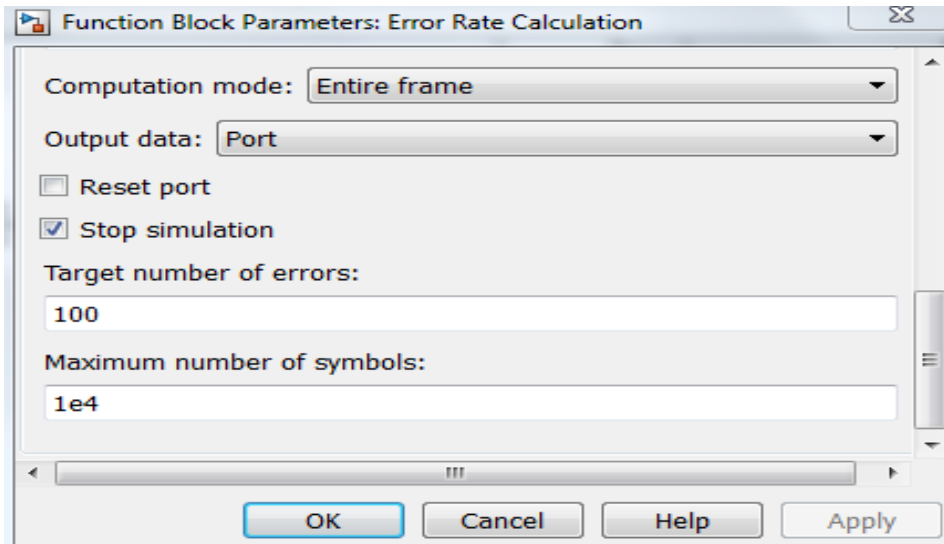
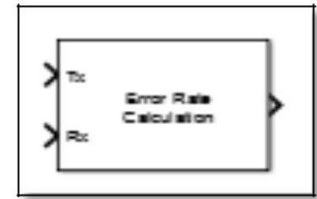
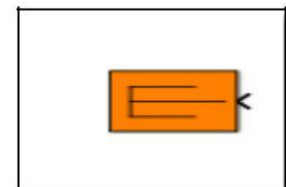


Figure 3.19: Paramètres du bloc Error Rate Calculation

❖ **Terminator**

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



3.3.3 Comparaison des performances de l'OFDM-FFT

3.3.3.1 Constellation de l'OFDM-FFT, modulation BPSK

La figure 3.20 représente la constellation d'OFDM-FFT pour la modulation BPSK. On note que la dispersion des symboles est d'autant plus forte pour le faible rapport signal sur bruit (SNR=15dB) cependant n'engendrent pas des erreurs de décision.

Les symboles pour le SNR=25dB se délimitent dans leurs zones de départ, et sont proches de ceux émis.

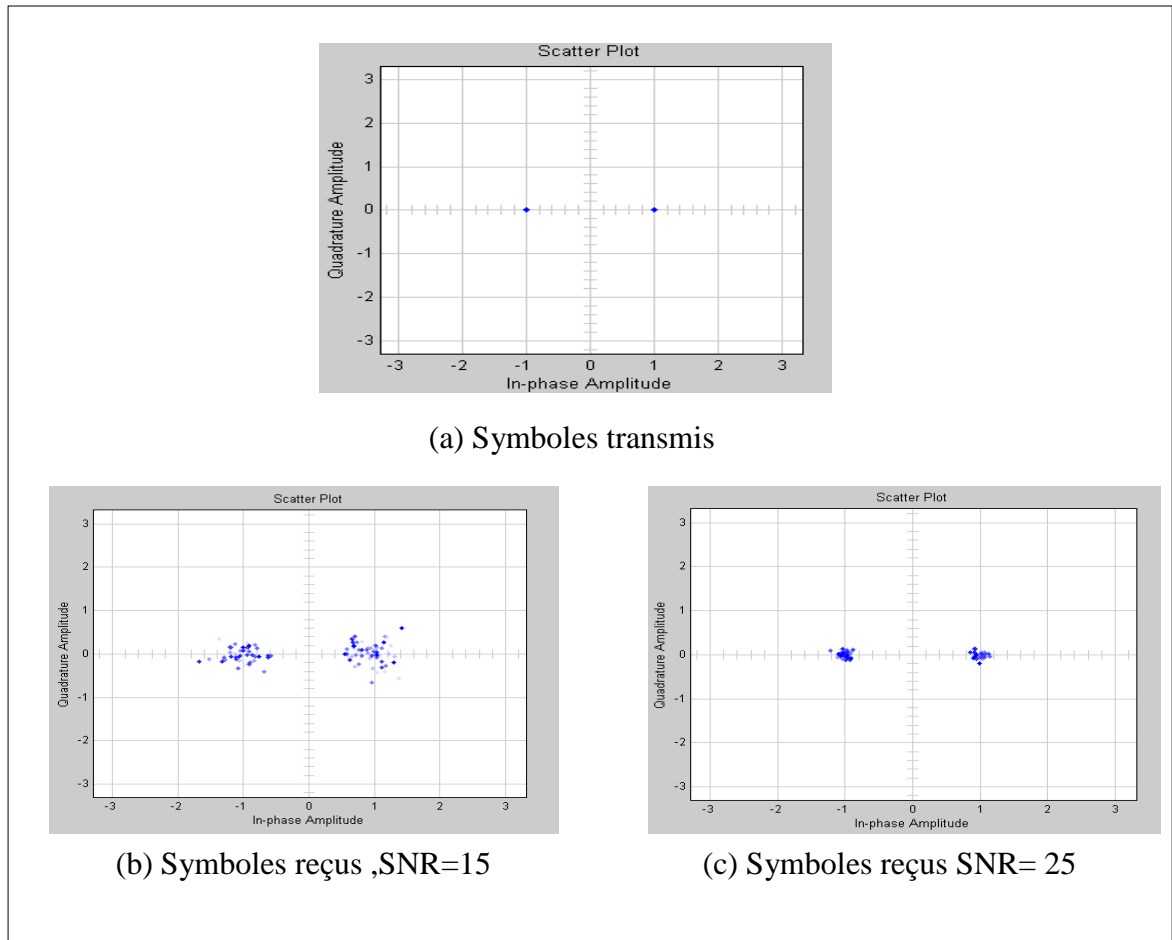


Figure 3.20: Symboles BPSK, (a) Symboles transmis, (b) Symboles reçu SNR=15dB(c) Symboles reçus SNR=25 dB

3.3.3.2 Constellation de l'OFDM-FFT, modulation QPSK

La figure 3.21 représentent la constellation d'OFDM-FFT dans la modulation QPSK. Nous remarquons que la dispersion des symboles s'accroît d'avantage pour le faible rapport signal sur bruit (SNR=15dB) relativement à la BPSK.

Les symboles pour le SNR=25dB se délimitent dans leurs zones de départ, et sont proches de ceux émis.

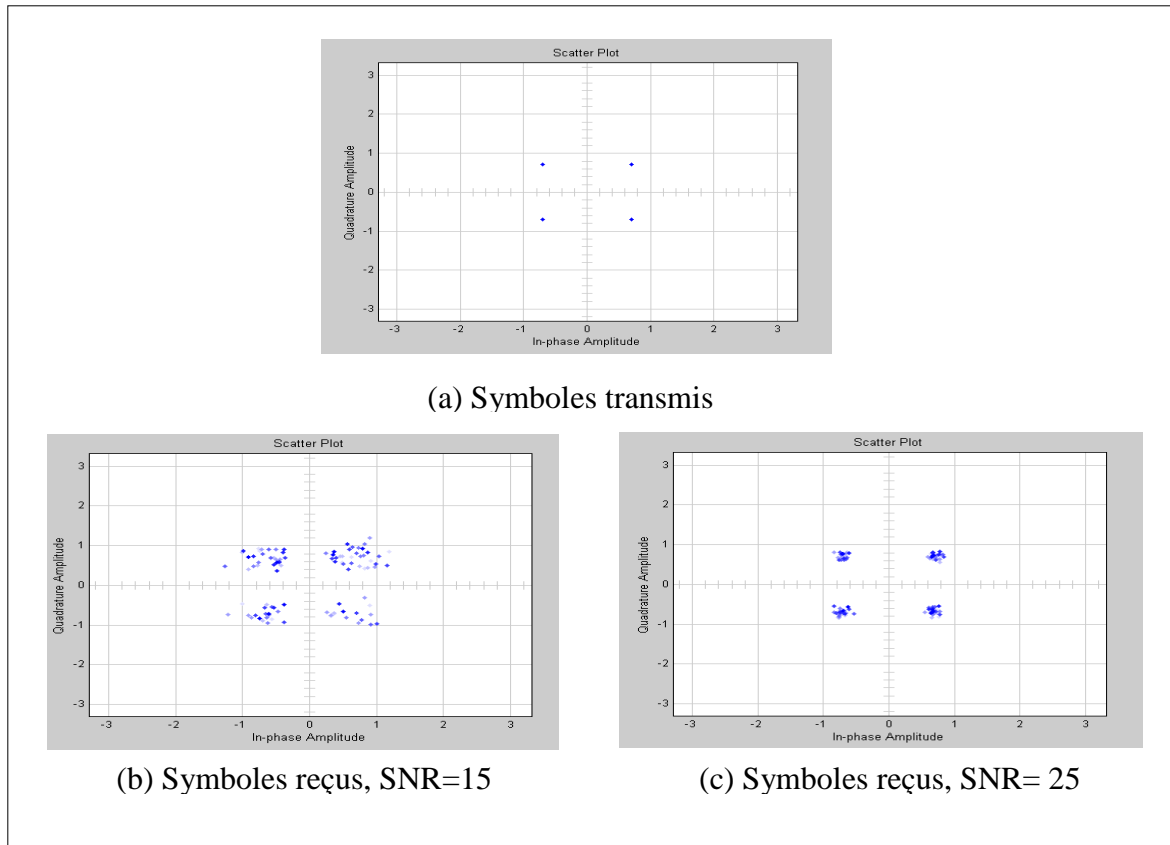


Figure 3.21: Symboles QPSK, (a) Symboles transmis, (b) Symboles reçus SNR=15dB(c) Symboles reçus SNR=25 dB

3.3.3.3 Constellation de l'OFDM-FFT, modulation 16-QAM

La figure 3.22 représentent les constellations d'OFDM-FFT dans la modulation 16-QAM. Nous percevons que la dispersion des symboles s'accroît énormément que nous ne pouvant pas distinguer les symboles les uns des autres le SNR=15dB relativement à la BPSK et la QPSK.

Les symboles pour le SNR=25dB se délimitent dans leurs zones respectives, ils n'engendrent pas des erreurs de décision.

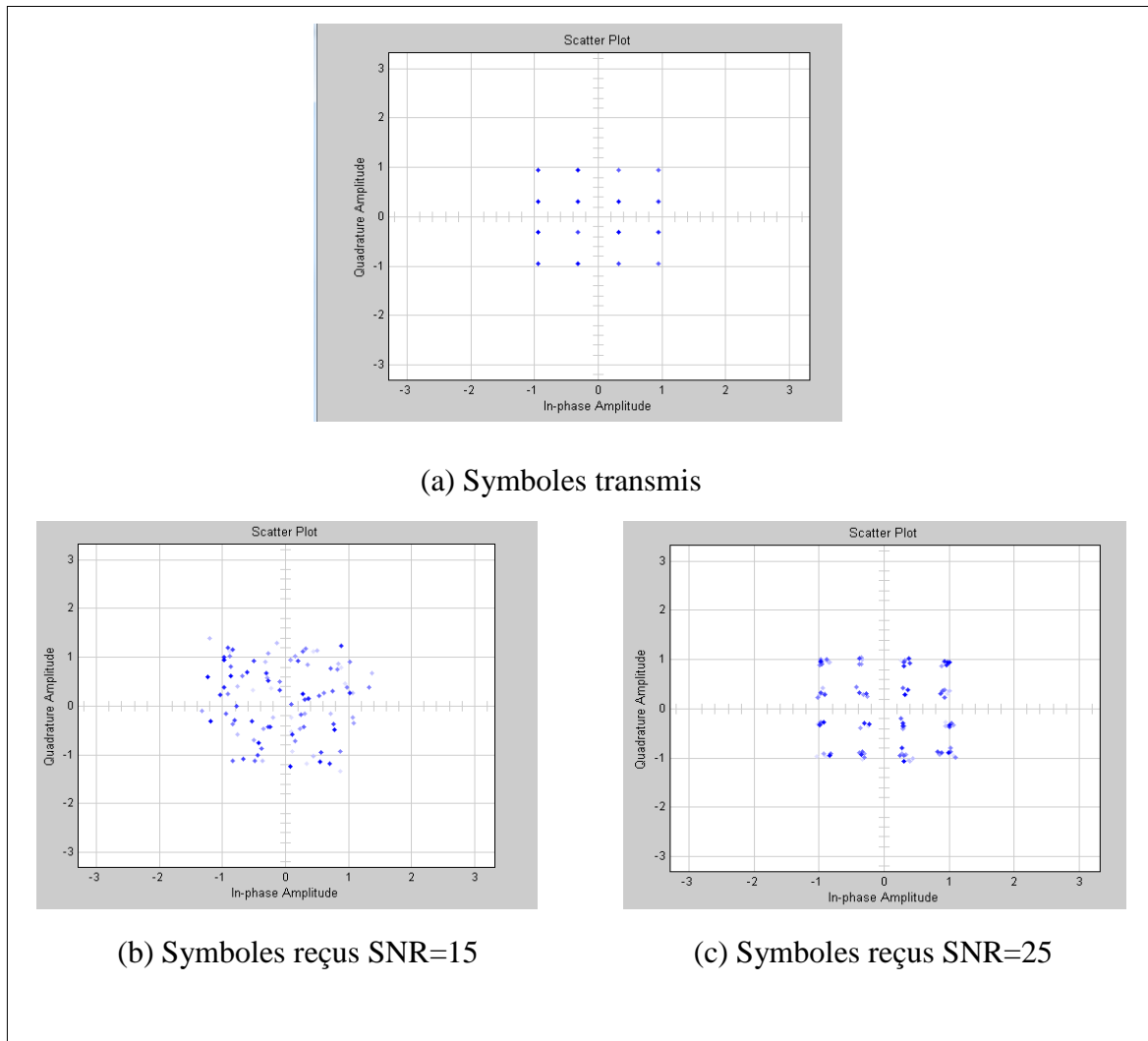


Figure 3.22: Symboles 16 QAM, (a) Symboles transmis, (b) Symboles reçus SNR=15dB(c) Symboles reçus SNR=25 dB

3.3.3.4 Taux d'erreur de l'OFDM-FFT

Le taux d'erreur est calculé pour une variété de valeurs du support SNR pour les modulations BPSK, QPSK et QAM-16. Les courbes du BER sont tracées sur la figure 3.23 suivante:

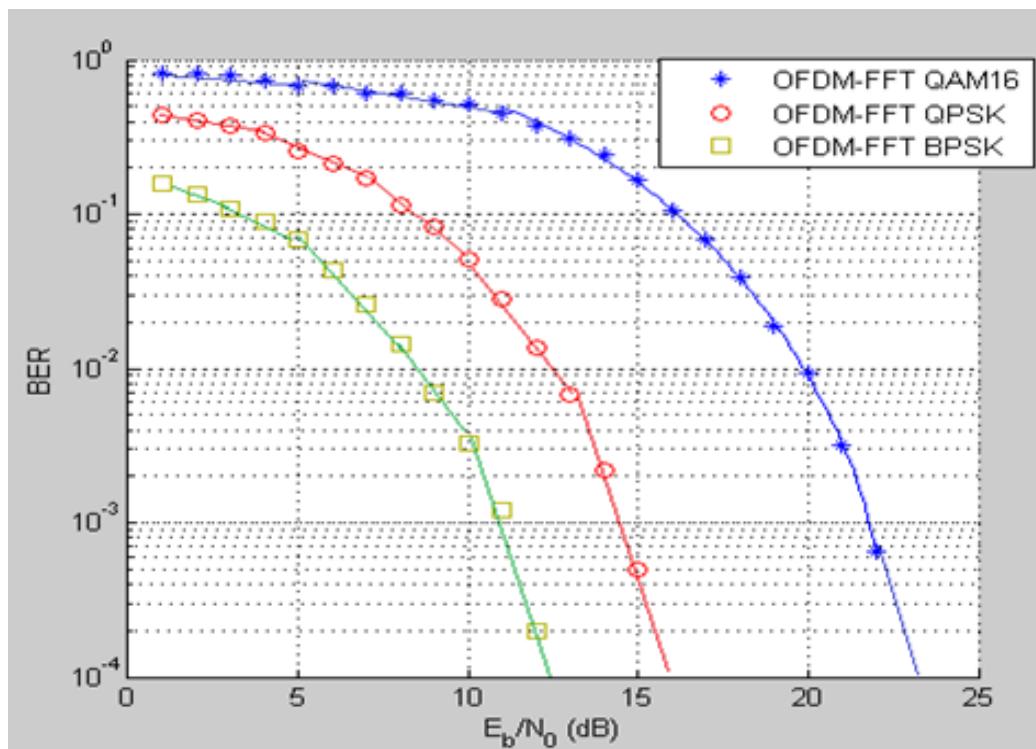


Figure 3.23: Taux d'erreur de l'OFDM-FFT, BPSK QPSK, QAM

Nous percevons que la performance de l'OFDM en taux d'erreur BER dépend du rapport signal sur bruit (SNR)

- Une transmission utilisant BPSK peut supporter un SNR de 11-13dB. Cependant, l'utilisation du BPSK permet au BER d'être amélioré dans un canal bruyant,
- Pour une transmission utilisant la QPSK peut supporter un SNR plus que 15-17dB
- Pour un canal à faible bruit la capacité de transmission peut être augmentée en utilisant le.16QAM. A partir de SNR=24dB, le 16QAM peut être utilisé et par conséquent augmenter la capacité.

3.3 Chaîne de transmission OFDM à base de DWT

Dans cette phase nous simulons une chaîne de transmission OFDM basée sur la transformée en ondelette discrète DWT. Les différents blocs non présentés pour l'OFDM-FFT seront illustrés ci-dessous en détails.

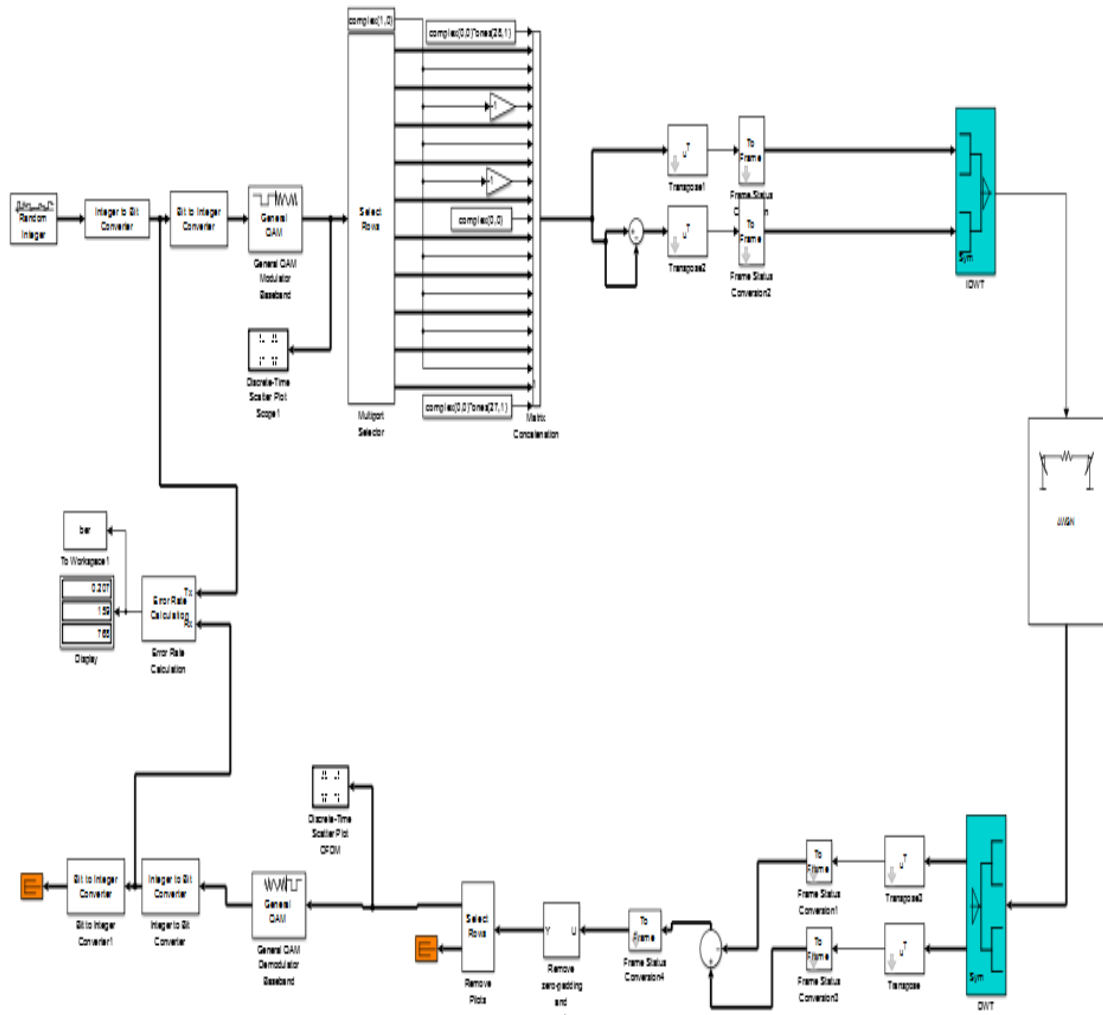


Figure 3.24 : Schéma bloc OFDM à base de DWT sous Simulink.

A l'instar de l'OFDM-FFT, la chaîne de transmission OFDM-DWT peut être aussi décomposée en deux parties ; à savoir une partie en émission (OFDM-DWT) et l'autre en réception (OFDM-DWT).

3.4.1 Blocs d'émission OFDM-DWT

A chaque entrée, on applique par la suite une transformée on ondelette inverse (IDWT) pour moduler les sous-porteuses ou lieu de la IFFT. Puis, une conversion parallèle/série est effectuée, et nous n'ajoutons pas le préfix cyclique pour la DWT.

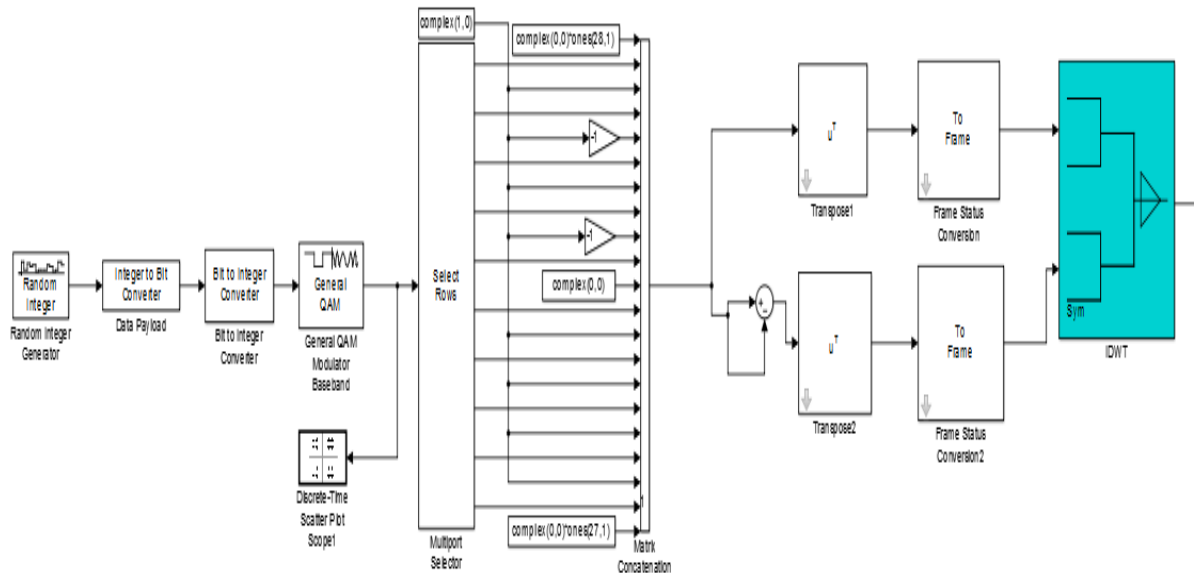


Figure 3.25 : Schéma bloc d'émission de l'OFDM à base de DWT

❖ Bloc discret wavelet inverse

Ce bloc compose les signaux des sous-bandes avec des largeurs de bande plus petites avec des fréquences d'échantillonnage plus lents ou calculer la transformée en ondelettes discrète inverse (IDWT) en utilise les paramètres suivant dans les figure ci dessus :

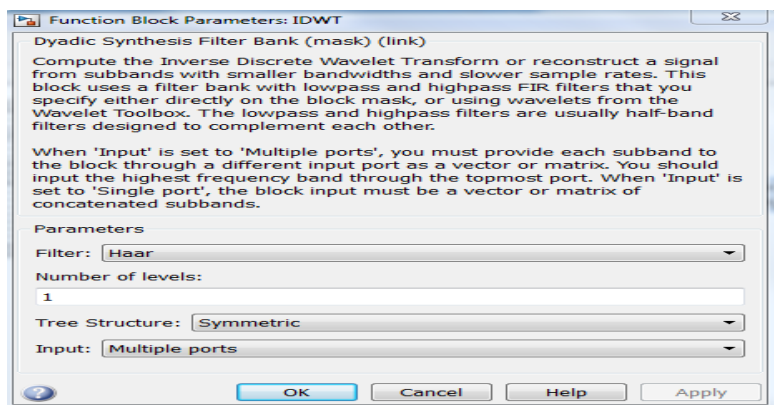
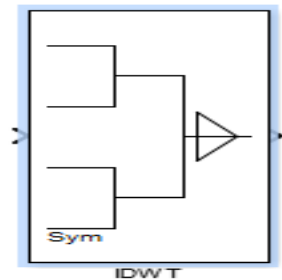


Figure 3.26: Bloc IDWT

3.4.2 Blocs de réception OFDM-DWT:

La figure 3.27 ci-dessous illustre un récepteur, le récepteur effectue l'opération inverse de l'émetteur.

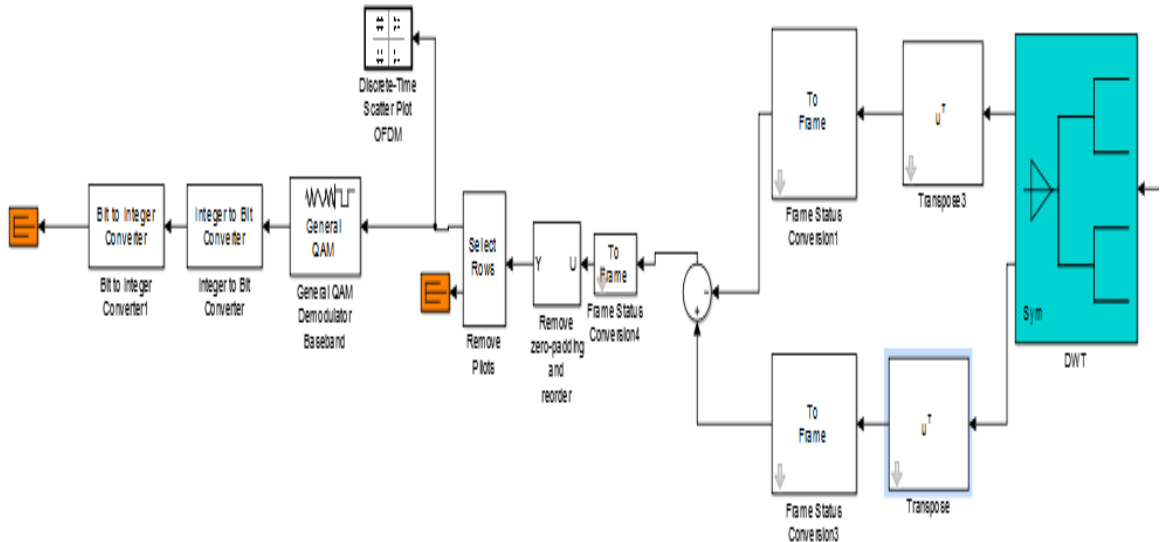


Figure 3.27: Schéma bloc en réception de l'OFDM-DWT

❖ Bloc discret wavelet

Ondelette discrète transformer et décomposer les signaux en sous-bandes avec des largeurs de bande plus petites avec des fréquences d'échantillonnage plus lents utilise les paramètres suivant dans la figure 3.28 ci-dessus :

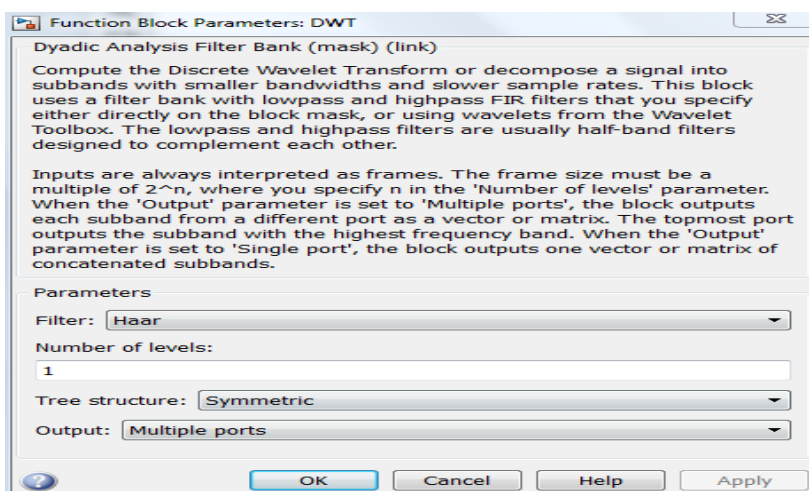
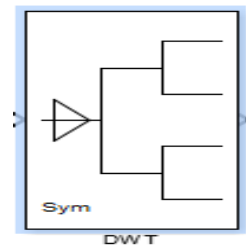


Figure 3.28: Bloc DWT

❖ **Bloc transpose**

Performe le calcul de la matrice transposée du signal à son entrée.

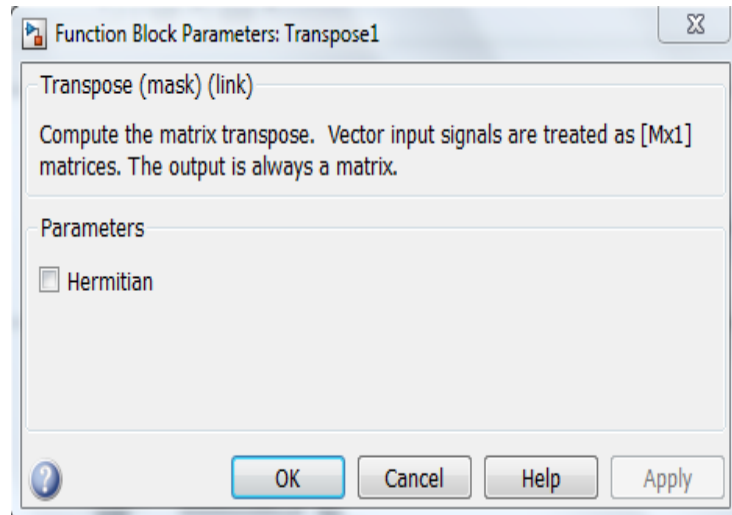
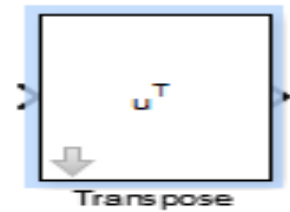


Figure 3.29: Bloc transpose

3.4.3 Comparaison des performances de l'OFDM-DWT

3.4.3.1 Constellation de l'OFDM-DWT, modulation BPSK

La figure 3.30 représente les constellations d'OFDM-DWT dans la modulation BPSK. Nous apercevons une amélioration consistante en comparaison avec OFDM-FFT. Les symboles se délimitent dans leurs zones de départ, et sont proches de ceux émis pour les deux valeurs du SNR.

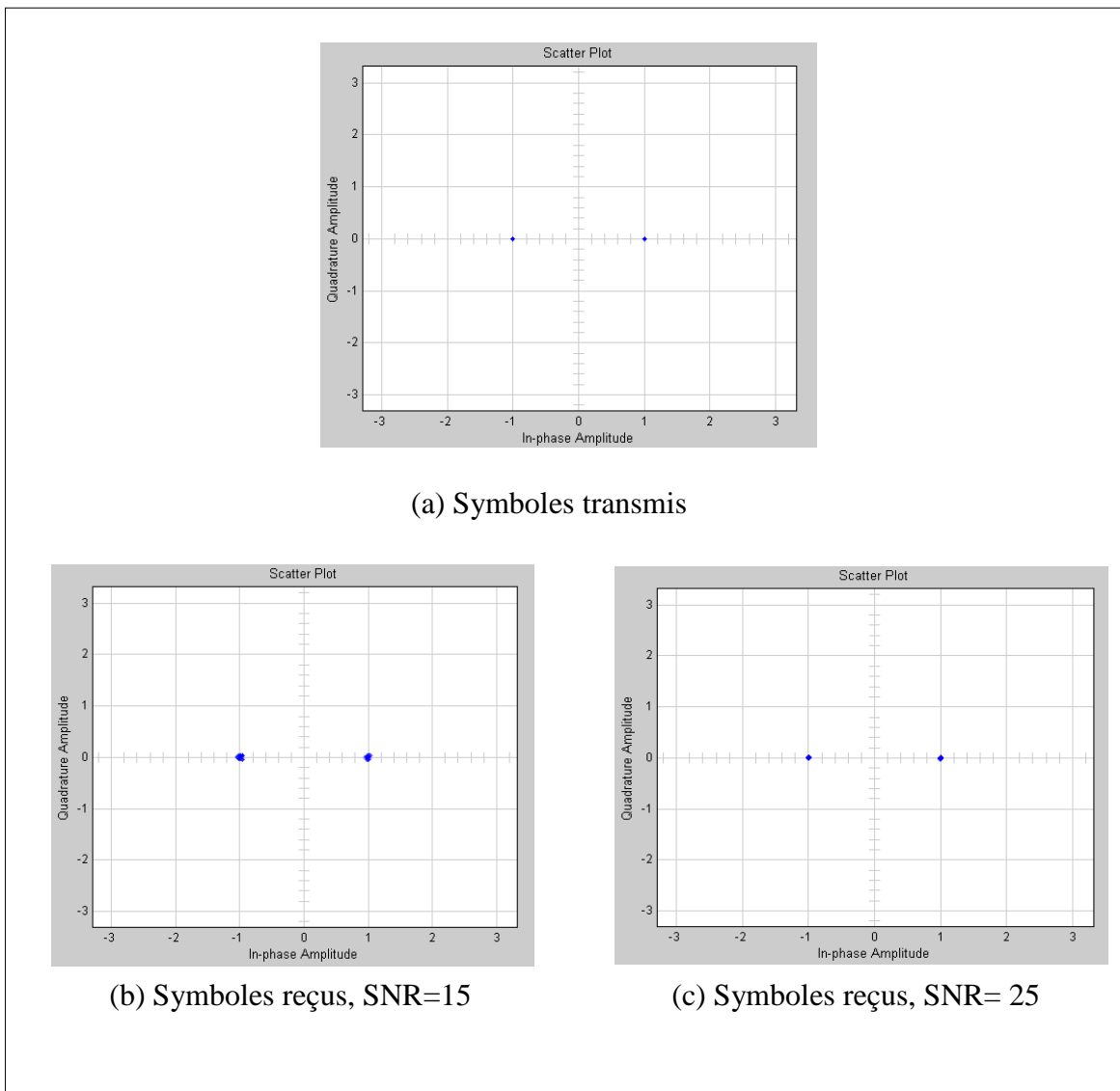


Figure 3.30: Symboles BPSK, (a) Symboles transmis, (b) Symboles reçus SNR=15 dB(c) Symboles reçus SNR=25 dB

3.4.3.2 Constellation de l’OFDM-DWT, modulation QPSK

La figure 3.31 représentent la constellation d’OFDM-DWT dans la modulation QPSK. Des améliorations similaires sont obtenues avec la QPSK relativement à l’OFDM-FFT. Les symboles se délimitent dans leurs zones respectives, pour les deux valeurs du SNR.

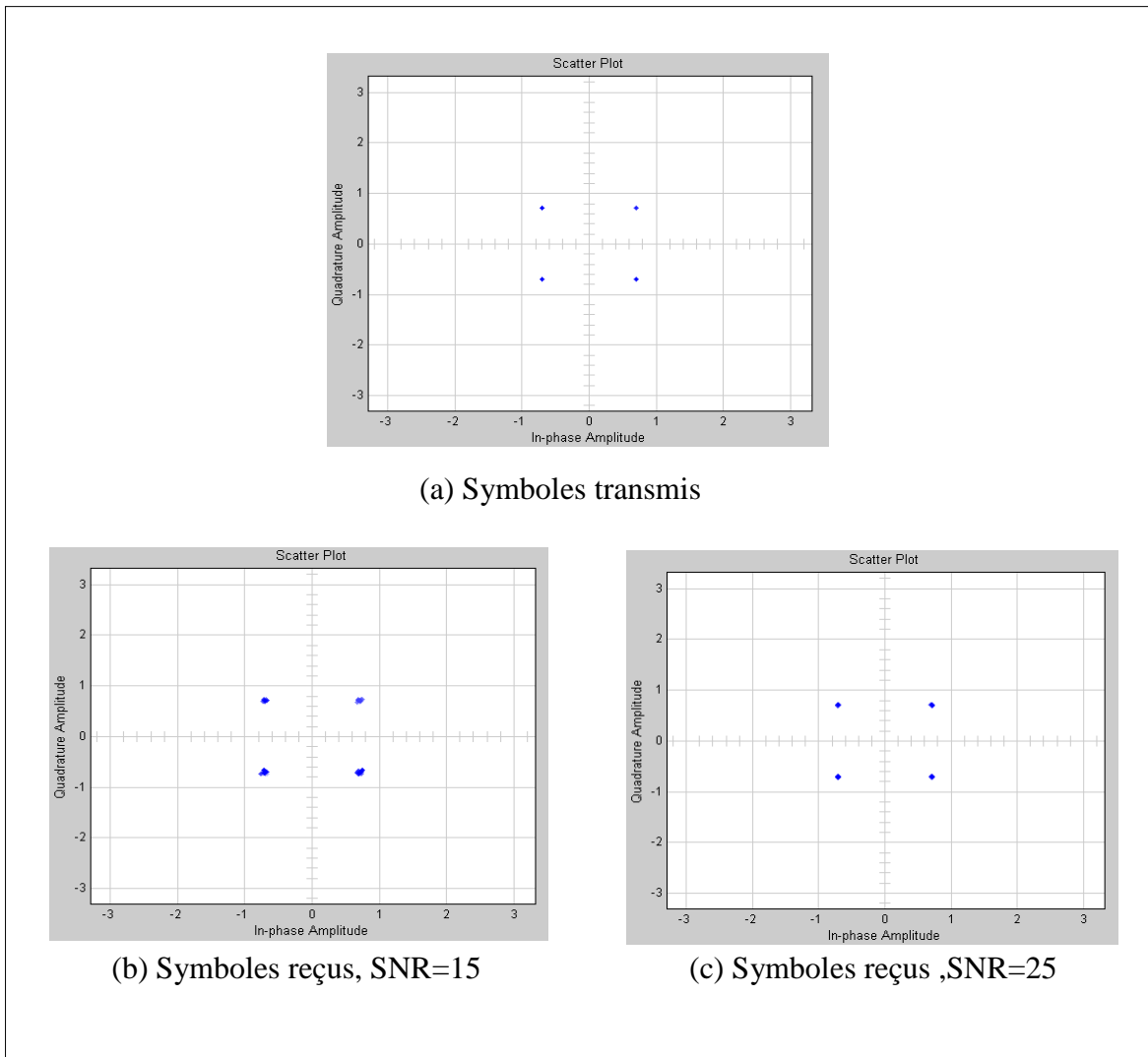


Figure 3.31: Symboles QPSK, (a) Symboles transmis, (b) Symboles reçus SNR=15dB
(c) Symboles reçus SNR=25 dB

3.4.3.3 Constellation de l'OFDM-DWT, la modulation 16-QAM

La figure 3.32 représente la constellation d'OFDM-DWT dans la modulation 16-QAM. Des améliorations similaires sont obtenues avec la 16-QAM relativement à l'OFDM-FFT. Les symboles se délimitent dans leurs zones respectives, ils sont similaires à ceux en émission, pour les deux valeurs du SNR. Ce qui met en évidence la capacité de l'OFDM-DWT à combattre les effets des interférences relativement à l'OFDM-FFT.

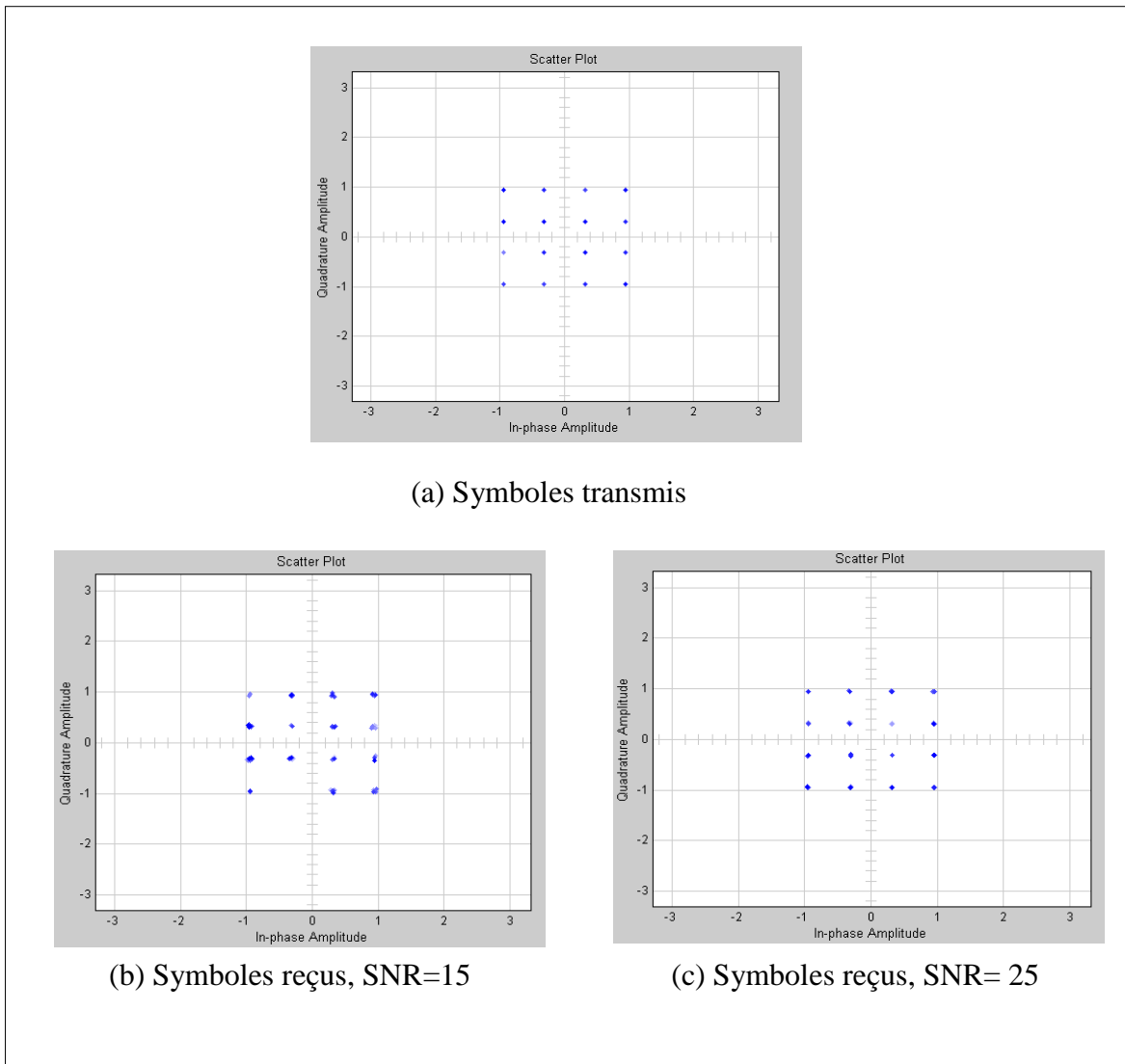


Figure 3.32: Symboles 16 QAM, (a) Symboles transmis, (b) Symboles reçus SNR=15 dB (c) Symboles reçus SNR=25 dB

3.4.3.4 Taux d'erreur de l'OFDM-DWT

De la même manière que pour le OFDM-DWT le taux d'erreur est calculé pour une variété de valeurs du support SNR pour les modulation BPSK, QPSK et QAM-16.

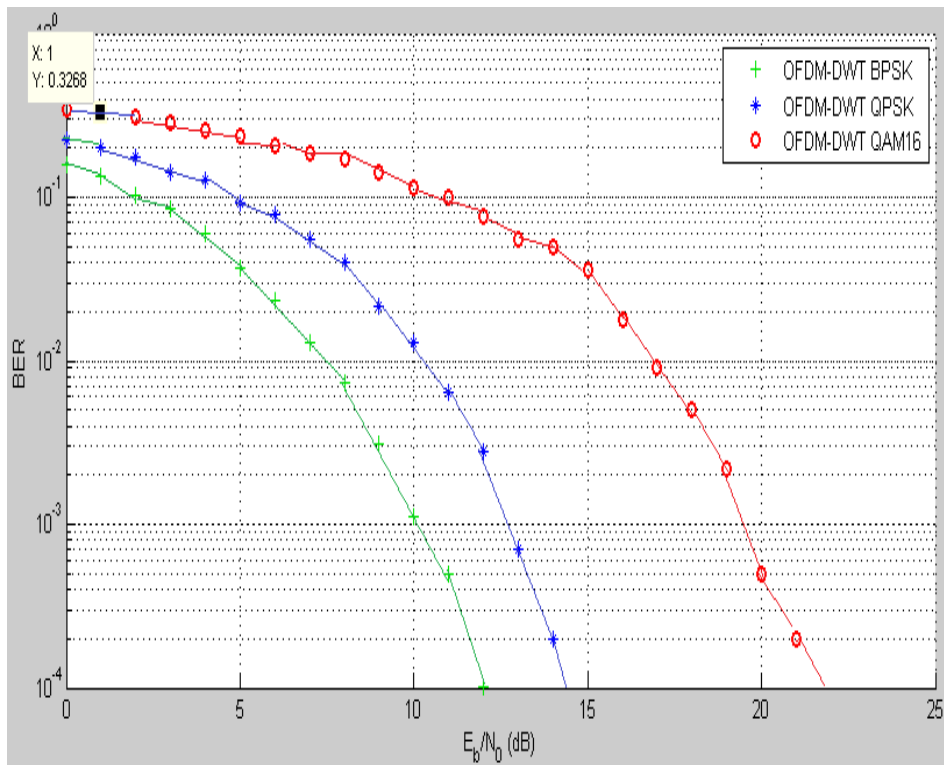


Figure 3.33: Taux d'erreur de l'OFDM-DWT, BPSK, QPSK, QAM

Les courbes du BER sont tracées sur la figure 3.33. Nous pouvons lire sur ces courbe que :

- La BPSK peut supporter un SNR entre 10-12dB.
- La QPSK peut supporter un SNR entre 12-15dB
- La 16QAM. A partir de SNR=22dB

3.4 Comparaison entre l'OFDM-FFT et l'OFDM-DWT en BER

Les performances de l'OFDM- FFT et l'OFDM-DWT sont étudiées à travers les courbes du taux d'erreur en fonction du rapport SNR pour les modulations BPSK, QPSK et QAM-16.

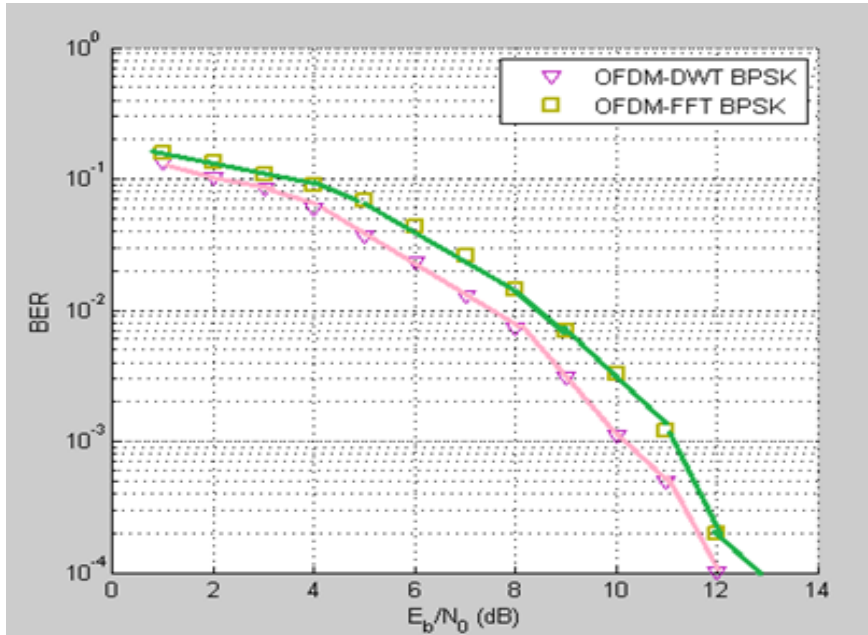


Figure3.34: BER de l'OFDM- FFT et l'OFDM-DWT, BPSK

Nous remarquons que la courbe d'OFDM utilisant la DWT fournit le taux d'erreur le plus réduit relativement à l'OFDM utilisant la FFT.

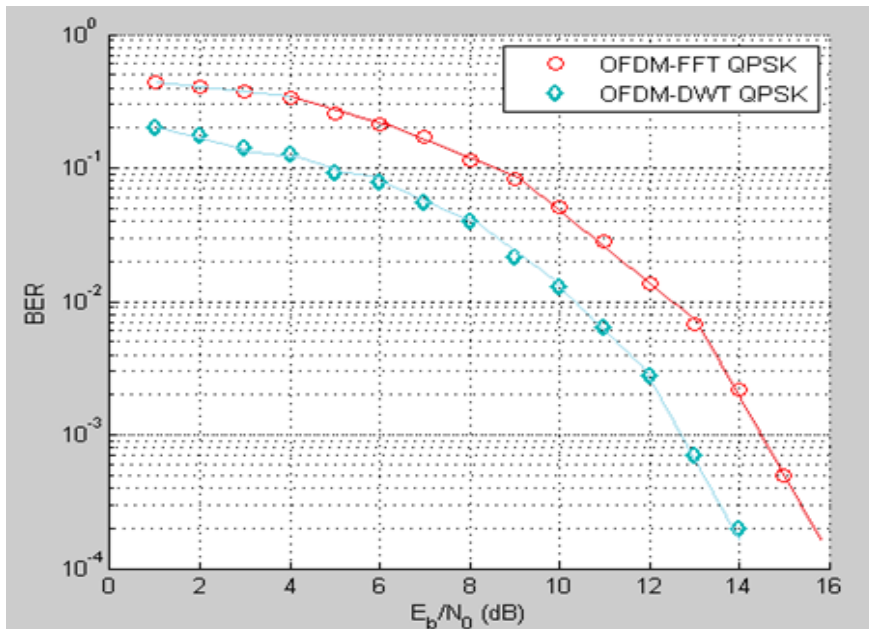


Figure3.35: BER de l'OFDM- FFT et l'OFDM-DWT, QPSK

Nous constatons que l'OFDM utilisant la DWT fournit toujours le taux d'erreur le plus réduit relativement à l'OFDM utilisant la FFT.

Nous observons également que l'écart entre les performances en taux d'erreur de l'OFDM-FFT et l'OFDM-DWT augmente d'avantage pour la modulation QPSK et QAM-16 et ceci pour les faibles valeurs du SNR, relativement à la BPSK.

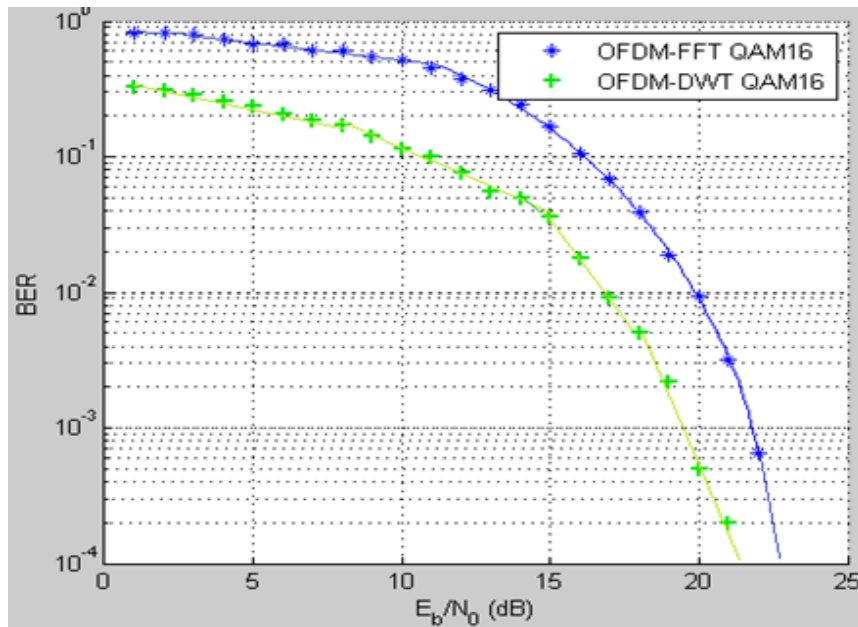


Figure 3.36: BER de l'OFDM-FFT et l'OFDM-DWT, QAM-16

Durans nos simulations, nous avons également essayé un autre type d'ondelette dite bi-orthogonale [11], néanmoins nous avons obtenu les mêmes résultats que dans le cas de l'ondelette Haar que nous avons adopté dans nos simulations et ceci en considérant l'OFDM-FFT ainsi que l'OFDM-DWT.

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté l'implémentation des systèmes OFDM-FFT et OFDM-DWT sous l'environnement Simulink de Matlab. Les différents blocs de simulation entrant dans la chaîne de transmission (émission/réception) ont été présentés, Le travail effectué sous Simulink a mis en évidence les performances des deux techniques pour différents types de modulation.

Les mesures de performances sont présentées en termes de constellations des symboles et du taux d'erreur binaire BER.

Les simulations que nous avons réalisées nous ont permis de mettre en relief les améliorations obtenues en utilisant l'OFDM-DWT en termes de taux d'erreur binaire et du rapport signal à bruit, relativement à l'OFDM-FFT.

Conclusion Générale

Les besoins accrues des services de télécommunications sans fil à grande vitesse, ont abouti à un regain d'intérêt aux modulation multi-porteuses, plus explicitement la technique OFDM. Cette dernière a suscité des intérêts majeurs en raison de sa robustesse aux évanouissements par trajets multiples et sa capacité à réaliser une efficacité élevée de transmission. Les excellentes performances de l'OFDM ont incité son adoption dans de nombreux standards des systèmes sans fil actuels et futurs.

Nous avons présenté le fondement de la technique OFDM à base de la transformée de Fourier discrète et les principes de son utilisation. Nous avons également introduit la transformée en ondelette discrètes DWT (Discreet Wavelet Transform) au système OFDM comme alternative à la FFT.

Les deux approches à savoir l'OFDM-FFT et l'OFDM-DWT sont implémentées à l'aide de SIMULINK, leurs performances respectives sont misent en valeurs. Nous avons montré l'impacte de l'utilisation des ondelettes sur les performances du système de transmission OFDM. Les mesures des performances sont données au moyen des diagrammes de constellations, ainsi que les courbes du tau d'erreur par bit BER (Bit Error Rate).

Les simulations que nous avons réalisées nous ont permis de mettre en relief les améliorations obtenues par l'OFDM-DWT du point de vue du taux d'erreur binaire et rapport signal à bruit relativement à l'OFDM-FFT.

Comme perspective aux travaux que nous avons accompli dans ce mémoire, nous proposons l'étude et l'implémentation de l'OFDM pour les systèmes à multiples entrées / multiples sorties MIMO (Multi-input Multi-output).

Nous suggérons aussi d'adjoindre à la technique OFDM la technique dite d'égalisation (supervisée ou non supervisée), pour augmenter d'avantage les performances des systèmes de communications.

Bibliographie

- [1] N.Ferhi , S.Helaimia «**Etude et Simulation d'une Transmission de Type OFDM Pour Les Communications Sans Fil**» L'université de Tébessa, 2016.
- [2] P.GRUYER, S.PAILLARD «**Modélisation d'un modulateur et démodulateur OFDM**» , 2005.
- [3] Adil Belhouji «**Etudes théoriques et expérimentales de systèmes de transmissions MIMO-OFDM** », L'université de LIMOGES, 2009.
- [4] k.Zineb , L.Amina «**Etude de la qualité de service (QOS) dans les réseaux sans fil** » université de Telemcen , 2011.
- [5] J.pillou «**Les réseaux sans fil (Wireless Networks)**» ,France,14 octobre 2008.
- [6] S.Bensaid , M.Ferjani, «**Développement d'un outil de planification d'un réseau WIMAX** »,Université Virtuelle de Tunis,2011.
- [7] A.Choumane, «**Synthèse d'un canal de propagation par système multi antennes pour la caractérisation de terminaux mobiles à diversité** », Université de Limoges, 2011 .
- [8] D. Khedidja «**SIMULATION COMPARATIVE DES TECHNIQUES FBMC ET OFDM POUR LES RESEAUX 5G**» université de Tlemcen (Abou Bekr Belkaid) Juin 2016.
- [9] S. R. Saunders , A. Aragon, «**Antennas and Propagation for Wireless communication Systems** », Wiley & Sons 2007.
- [10] H.Sizun, «**Radio Wave Propagation for Telecommunication Application** », Springer-Verlag, Berlin, 2005.
- [11] B.Bijoy «**Transmitter and Receiver Technique** »,Springer India ,2015
- [12] Jean-Louis ,«**Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s** », Université de Limoges, 2003.
- [13] A .Bhatji «**TDMA and CDMA in Mobile Communications**» université de florida ,2004 .
- [14] S.Selka, C.Benzerdjeb, «**ENCODAGE DE L'AMPLITUDE SPECTRALE POUR OCDMA** » , université de Tlemcen , 2013.

- [15] L.Hanzo ,T.Keller « **OFDM and MC-CDMA for Broadband multiuser communications, WLAN and Broadcasting** », Wiley and Sons, 2nd edition,2006
- [16] M. L. Doeltz , E. Heald et D.L. Martin, “**Binary data transmission techniques for linear systems**,”1957.
- [17] B. R. Saltzberg, “**Performance of an efficient Parallel Data Transmission System**,” IEEE Trans. Communications, 1967
- [18] M. Joindot et A. Glavieux, « **Introduction aux Communications Numériques** », Collection Pédagogique de Télécommunication, Ellipses, 1995.
- [19] A.Rachini « **Etude de la synchronisation temporelle dans les systèmes MIMO-OFDM appliquées aux réseaux mobiles** » , université Bretagne ,2014.
- [20] R. W. CHANG, « **Synthesis of band-limited orthogonal signals for multichannel datatransmission** ».Bell System Technical Journal, Annés 1966.
- [21] M.Veena , Dr. S.Swamy, “**Performance analysis of DWT based OFDM over FFT based OFDM and implementing on FPGA**” International Journal of VLSI design & Communication Systems , 2011.
- [22] A.saiba , A. Loubany « **Une approche intelligente pour les systèmes OFDM à modulation adaptative**» Université libanaise , 2013.
- [23] B. Houssameddine et B. Hadjer «**RESEAUX ET SYSTEMES DE TELECOMMUNICATIONS**» A L’ université de Tlemcen (Abou Bekr Belkaid) Juin 2015.
- [24] Mrs. Veena , S.Swamy, “**Performance analysis of DWT based OFDM over FFT based OFDM and implementing on FPGA**” International Journal of VLSI design & Communication Systems 2011.
- [25] S. Sharma, S. kumar , “**BER Performance Evaluation of FFT-OFDM and DWT-OFDM**” International Journal of Network and Mobile Technologies , 2011.
- [26] R. Asif et R. A. Abd-Alhameed ,O. Anoh et Y.A.S. Dama “**Performance Evaluation of DWT-FDM and FFT-OFDM for Multicarrier Communications Systems using Time Domain Zero Forcing Equalization**” Bradford University, 2012.

Résumé

Résumé

Notre travail est concerné à la conception, simulation et l'étude des performances d'un système OFDM à base de la transformée de Fourier discrète utilisant, différents types de modulations. La transformée en ondelette discrète DWT (Discret Wavelet Transform) constitue une amélioration à l'analyse de Fourier, nous avons étudié l'impacte de l'utilisation des cette techniques sur les performances du système de transmission OFDM. Les deux approches à savoir l'OFDM-FFT et l'OFDM-DWT sont implémentées à l'aide de SIMULINK, leurs performances respectives sont mises en valeurs. Les simulations que nous avons réalisées nous ont permit de mettre en relief les améliorations obtenues par l'OFDM-DWT du point de vue du taux d'erreur binaire et rapport signal sur bruit relativement à l'OFDM-FFT.

Mots -clés : *Communications sans fil, canaux à trajets multiples, Modulation multi-porteuses, OFDM, FFT, DWT*

Abstract

Our work is concerned with the design, simulation and performance study of an OFDM system based on the discrete Fourier transform using different types of modulations. DWT (Discrete Wavelet Transform) is an improvement to Fourier analysis; we had studied the impact of the use of this technique on the performance of the OFDM transmission system. The two approaches namely OFDM-FFT and OFDM-DWT are implemented using SIMULINK, their performances respective are highlighted. The simulations we carried out allowed us to highlight the improvements obtained by the OFDM-DWT in term of the bit error rate and signal-to-noise ratio relatively to the OFDM-FFT.

ملخص

مع التطور المتسارع لتقنيات الاتصال , والطلب المتزايد على ارسال واستقبال المعلومات مهما كان نوعها بالسرعة والدقة العالية ادعت الحاجة الى تطوير اساليب ضغط ونقل واستقبال ومعالجة المعلومات من اجل تغطية كافة الاحتياجات. يهتم عملنا بتصميم ومحاكاة ودراسة أداء نظام OFDM استنادًا إلى تحويل فورييه المنفصل باستخدام أنواع مختلفة من التشكيلات.

يعد تحويل الموجات المنفصل DWT (تحويل الموجة المنفصلة) تحسینًا لتحليل فورييه , حيث درسنا تأثير استخدام هذه التقنيات على أداء نظام نقل OFDM. يتم تطبيق النهجين وهما OFDM-FFT و OFDM-DWT باستخدام SIMULINK , يتم تسليط الضوء على أدائهما. سمحت لنا المحاكاة التي أجريناها بتسليط الضوء على التحسينات التي حصل عليها OFDM-DWT من وجهة نظر معدل الخطأ في البتات ونسبة الإشارة إلى الضوضاء بالنسبة إلى OFDM-FFT.