

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE
N° : ...



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE
FILIERE : TELECOMMUNICATION
OPTION : SYSTEME DE
TELECOMMUNICATION

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par :

MECHETER Soumia

Intitulé

Implémentation sous SIMULINK d'un système de
transmission MIMO à base d'OFDM

Soutenu devant le jury composé de :

Dr. Lahouaoui Lalaoui	MCA	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Président
Dr.Zohra Zerdoumi	MCB	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Rapporteur
Dr. Ali Khalfa	MCA	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Examineur

Année universitaire : 2022 / 2023

Dédicace

Je dédie cet événement de ma vie à

À la personne à qui le Tout-Puissant a mis le Paradis à ses pieds, "ma mère bien-aimée" DALILA" qu'Allah lui accorde santé et bonheur au long de sa vie.

À celui qui, après Dieu, a le premier mérite de recevoir une éducation supérieure, "mon père bien-aimé", Elhadjerci qu'Allah vous accorde la longévité.

À mes frères qui ont été et continuent d'être mon soutien pour terminer ma carrière Mohamed et Ibrahim.

À mes sœurs qui ont eu un impact énorme en surmontant de nombreux obstacles et difficultés Linda et Marwa.

À tous mes professeurs et à tous ceux qui m'ont enseigné un message dans ma vie, qu'Allah vous bénisse.

À mes amies à qui je témoigne qu'ils sont la grâce des compagnons, nous avons partagé des joies ensemble pendant nos années d'études.

Soumia

Remerciement

Je remercie ALLAH le tout puissant de m'avoir accordé la force, le courage et la patience pour terminer ce mémoire.

Je remercie mon encadreur ZOËRA ZERDOUMI docteur à l'université Mohamed Boudiaf de M'sila, pour son grand aide durant la réalisation de mon travail, ces encouragements m'ont orienté vers le succès. Je lui témoigne ici de ma sincère considération et ma grande reconnaissance.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude aux membres de jury Messieurs Lahouaoui Lalaoui et KHALFA Ali enseignants à l'université Mohamed Boudiaf de M'sila, d'avoir accepté d'évaluer le présent travail et pour l'intérêt accordé à la lecture de ce mémoire.

Sommaire

Résumé.....	iv
Liste des abréviations.....	vi
Liste des figures.....	vii
Liste des tableaux.....	ix
Introduction Générale.....	1
Chapitre I. Aperçu générale sur les télécommunications.....	3
I.1 Introduction	3
I.2 Définition.....	3
I.3 Les Réseaux sans Fil	3
I.4 Classification selon la zone de couverture.....	4
I.4.1 Les Réseaux personnels sans fil (WPAN).....	4
I.4.2 Réseaux locaux sans fil (WLAN).....	5
I.4.3 Réseaux métropolitains sans fil (WMAN)	5
I.4.4 Réseaux étendus sans fil (WWAN).....	5
I.5 Classification selon l'infrastructure.....	6
I.5.1 Réseaux cellulaires	6
I.5.2 Réseaux ad hoc	7
I.5.3 Réseau WIMAX	7
I.6 Applications des réseaux sans fil.....	8
I.7 Les techniques de Multiplexage	9
I.7.1 Accès multiple par répartition en fréquence FDMA	9
I.7.2 L'accès multiple par répartition dans le temps (TDMA).....	10
I.7.3 Code Division Multiple Access (CDMA).....	11
I.7.4 L'accès multiple à division de longueur d'onde WDM.....	11
I.8 Modèles des canaux de communications.....	12
I.8.1 Canal à bruit blanc additif gaussien (AWGN).....	12
I.8.2 Canal à filtre linéaire et bruit blanc additif gaussien.....	13

I.8.3	Canal de propagation multi trajet	13
I.8.4	Canal à distribution de Rayleigh	15
I.8.5	Canal à distribution de Rice.....	15
I.9	Mesures de performances dans les systèmes de transmission	16
I.9.1	La probabilité d'erreur et le taux d'erreur	16
I.9.2	Rapport signal sur bruit (SNR).....	16
I.10	Conclusion	17
Chapitre II	Techniques OFDM et MIMO-OFDM	22
II.1	Introduction.....	22
II.2	Modulations multi-porteuse.....	22
II.3	Principe de la technique OFDM [24].....	24
II.4	Système de transmission OFDM [24].....	25
II.5	Modulation et démodulation OFDM [4].....	26
II.5.1	Modulation OFDM.....	26
II.5.2	Démodulation OFDM :	27
II.6	Présentation du système MIMO.....	28
II.7	Modélisation des différents canaux du système MIMO	30
II.7.1	Canal SISO (Single Input Single Output).....	30
II.7.2	Canal SIMO (Single Input Multiple Output).....	30
II.7.3	Canal MISO (Multiple Input Single Output).....	31
II.7.4	Canal MIMO (Multiple Input Multiple Output).....	32
II.8	Codage espace-temps STBC	33
II.8.1	Système MISO avec codage STBC.....	33
II.8.2	Système MIMO avec codage STBC.....	35
II.8.3	Système MIMO avec Codage (STBC-OFDM) :	36
II.9	Avantages et inconvénients de l'OFDM.....	37
II.10	Conclusion.....	38
Chapitre III	Résultats de simulation de la technique MIMO-OFDM.....	42
III.1	Introduction.....	42

III.2 Simulation d'un Système OFDM dans Simulink	42
III.3 Emetteur OFDM.....	42
III.4 Récepteur OFDM	47
III.5 Simulation des différentes structures d'un Système MIMO-OFDM	51
III.5.1 Structure SISO-OFDM	51
III.5.2 Structure d'un système MISO-OFDM.....	54
III.5.3 Bloc de codage et de modulation.....	55
III.5.4 Bloc de décodage et de démodulation.....	57
III.5.5 Canal MISO à fading de Rayleigh.....	57
III.6 Structure d'un système MIMO-OFDM.....	59
III.6.1 Canal MIMO à fading de Rayleigh.....	59
III.6.2 Constellation BPSK en sortie d'un système MIMO-OFDM	60
III.7 Conclusion	63
Conclusion générale.....	65
Références Bibliographiques.....	67

المخلص

تتزايد متطلبات تطبيقات الاتصالات اللاسلكية باستمرار من حيث السرعة والموثوقية. يعد تمثيل التردد المتعامد OFDM أحد تقنيات التعديل الأكثر استخدامًا وتكيفًا لتلبية هذه المتطلبات. يركز عملنا على التصميم والمحاكاة وتحليل الأداء لنظام MIMO-OFDM باستخدام أنواع مختلفة من التعديل. سلطت عمليات المحاكاة التي أجريناها الضوء على التحسينات التي حققها OFDM وتكامله مع أنظمة MIMO لتسهيل وزيادة الأداء من حيث معدل الخطأ ونسبة الإشارة/الضوضاء.

الكلمات المفتاحية: الاتصالات اللاسلكية، القنوات المتعددة المسارات، التشكيل المتعدد الناقلين، OFDM، MIMO-OFDM.

Abstract

The requirements of wireless communication applications continue to increase in terms of speed and reliability. Our work focuses on the design, simulation, and performance analysis of an MIMO-OFDM system using different types of modulation schemes. The simulations we conducted shed light on the enhancements achieved by OFDM and its association with MIMO systems to facilitate and increase system performance in terms of error rate and signal-to-noise ratio.

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

Résumé

Les exigences des applications de communication sans fil augmentent continuellement en termes de vitesse et de fiabilité. Notre travail se concentre sur la conception, la simulation et l'analyse des performances d'un système MIOM-OFDM utilisant différents types de modulation. Les simulations que nous avons réalisées ont mis en évidence les améliorations obtenues par l'OFDM et son intégration aux

systèmes MIMO pour faciliter et augmenter les performances en termes de taux d'erreur et de rapport signal/bruit.

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

Liste des abréviations

AWGN: Additive White Gaussian Noise.

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

FDM: Frequency Division Multiplexing.

FDMA: Frequency Division Multiple Access.

FFT: Fast Fourier Transform.

FSK: Frequency Shift keying.

GSM: Global System for Mobile communications.

HyperLan: High Performance LAN.

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineer.

LOS: Line of Sight.

MAN: Metropolitan Area Network.

OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing.

PSK: Phase Shift Keying.

QAM: quadrature amplitude modulation

QPSK: quadrature Phase Shift Keying.

TDM: Time Division Multiplexing.

TDMA: Time Division Multiple Access.

WIMAX: Worldwide Interoperability for Microwave Access.

WLAN: Wireless Local Area Network.

WMAN: Wireless Metropololitan Area Network.

WPAN: Wireless Personal Area Network.

WWAN: Wireless Wide Area Network.

MIMO: Multiple Input Multiple Output

MISO: Multiple Input Single Output

SIMO: Single Input Multiple Output

SISO: Single Input Single Output

STBC: Space-Time Block Code

GPRS: General Packet Radio Service.

NLOS: None Line Of Sight

Liste des figures

Figure I.1:Classification des réseaux sans fil.....	4
Figure I.2:réseaux sans fil selon la zone de couvertur	4
Figure I.3:Réseaux cellulaires à infrastructure	6
Figure I.4: Réseau en mode ad hoc	7
Figure I.5:Réseau WIMAX.....	8
Figure I.6:Multiplexage des possibilités d'accès à un canal.	9
Figure I.7:La technique de multiplexage FDM.....	10
Figure I.8:Répartition des périodes dans le cas d'un multiplexage TDMA.	11
Figure I.9:La technique de multiplexage CDMA.....	11
Figure I.10:La technique de multiplexage WDM.....	12
Figure I.11:Modèle d'un canal à bruit additif Gaussien	13
Figure I.12:Modèle d'un canal à filtre linéaire et bruit additif.....	13
Figure I.13:Pas de ligne de vue (propagation NLOS) : canal de Rayleigh.....	15
Figure I.14:Existence d'une ligne de vue (propagation LOS) : canal de Rice.....	16
Figure II.1: Modulations mono-porteuse et multi-porteuses	22
Figure II.2: Bande passante de l'OFDM et FDM.....	22
Figure II.3: Orthogonalités entre quatre fréquences.....	23
Figure II.4: Schéma bloc d'un système de transmission OFDM.....	24
Figure II.5: Schéma de principe d'un modulateur OFDM.....	25
Figure II.6: Schéma de principe d'un démodulateur OFDM.....	27
Figure II.7:Schéma général d'une transmission MIMO	29
Figure II.8:Schémas représentatifs des systèmes SISO, MISO, SIMO et MIMO	29
Figure II.9:modèle du canal SISO	30
Figure II.10:modèle du canal SIMO.	31
Figure II.11:modèle du canal MISO	32
Figure II.12:modèle du canal MIMO	33
Figure II.13 : Schéma d'un système MISO 2x1 avec codage STBC.....	35
Figure II.14 : Schéma d'un système MIMO 2x2 avec codage STBC.....	34
Figure II.15: Transmission STBC-OFDM.....	38
Figure II.16: Réception et décodage.....	39
Figure III.1Schéma bloc d'un système OFDM.....	41
FigureIII.2 : Schéma bloc d'un émetteur OFDM	42
FigureIII.3 : Paramètres du bloc Random Integer Generator.....	43
FigureIII.4 Paramètres du bloc Integer to bit converter.....	43
Figure III.5 : Paramètres du bloc Bit to integer Converter.....	44
FigureIII.6 : Paramètres du bloc général QAM Modulator.....	44
Figure III.7: Insertion des sous-porteuses.....	45
FigureIII.8 : Paramètres du bloc IFFT.....	45
FigureIII.9 : Paramètres du bloc Add Cyclic Prefix.....	46
Figure III.10 : Schéma bloc d'un récepteur OFDM.....	46
Figure III.11 : Paramètres du bloc Remove Cyclic Prefix.....	47
Figure III.12: Paramètres du bloc FFT.....	47
FigureIII.13 : Paramètres du bloc Frame Conversion.....	48
FigureIII.14 : Paramètres du bloc zéro-padding.....	48
FigureIII.15 : Paramètres du bloc Remove Pilots.....	49
Figure III.16: Paramètres du bloc QAM démodulateur.....	49

Figure III.17: schéma bloc du système SISO-OFDM.....	50
Figure III.18: Constellation 4 QAM en sortie d'un système SISO-OFDM SNR=10.....	50
Figure III.19 : Constellation 4 QAM en sortie d'un système SISO-OFDM SNR =25.....	51
Figure III.20 : Constellation 16 QAM en sortie d'un système SISO-OFDM SNR =15.....	52
Figure III.21 : Constellation 16 QAM en sortie d'un système SISO-OFDM SNR =25.....	52
Figure III.22: Taux d'erreur BER du système SISO-OFDM.....	53
Figure III.23: Système MISO-OFDM.....	54
Figure III.24: FEC et Modulateur.....	55
Figure III.25: Constellations de : BPSK, QPSK, 16QAM et 64QAM.....	55
Figure III.26: FEC& Démodulateur.....	56
Figure III.27: Canal MISO à fading de Rayleigh.....	56
Figure III.28 : Constellation 16 QAM en sortie d'un système MISO-OFDM.....	57
Figure III.29: Modèle MIMO-OFDM.....	57
Figure III. 30 : Canal MIMO à fading de Rayleigh.....	58
Figure III. 31 : BPSK en sortie d'un système MIMO-OFDM.SNR=5.....	58
Figure III. 32 : 4QAM en sortie d'un système MIMO-OFDM.SNR=10.....	59
Figure III. 33 : 16QAM en sortie d'un système MIMO-OFDM.SNR=25.....	59
Figure III. 34 : 64QAM en sortie d'un système MIMO-OFDM.SNR=35.....	60

Liste des tableaux

Tableau I .1:Classification des réseaux sans fil.....	5
Tableau II.2:Notations de différents canaux d'un système MIMO 2x2 avec codage d'Alamouti.	35
Tableau II.3: Notations des signaux reçus d'un système MIMO avec codage d'Alamouti.....	36
Tableau III.1: Taux d'erreur pour différents types de modulation.....	63

Introduction Générale

Introduction Générale

Les communications sans fils font l'objet d'étude d'un grand nombre de chercheurs, dont l'objectif est d'obtenir une bonne qualité de communication avec des débits de transmission élevés et de permettre aux usagers de se déplacer tout en restant connectés. Néanmoins les systèmes de communication sont sujets à des interférences et beaucoup de perturbations qui nuisent à la qualité de la transmission [1]. A cet égard les chercheurs sont menés à la conception des techniques permettant de combattre adéquatement l'effet de la sélectivité en fréquence et les interférences dues aux trajets multiples. La technique OFDM offre une grande robustesse aux évanouissements par trajets multiples et une capacité à fournir une efficacité élevée. Dû à ces avantages l'OFDM est adoptée dans de nombreux standards des systèmes sans fil [1][2].

La technique dites MIMO (Multiple Input Multiple Output), utilisant des antennes multiples en émission et en réception, a connu un développement significatif. L'utilisation d'antennes multiples permet d'apporter de la diversité, ceci a pour conséquence l'amélioration de la qualité de transmission. La mise en place d'une telle structure permet au système utilisé d'atteindre des débits importants et cela sans changer la largeur de la bande allouée au signal ni sa puissance d'émission [3].

La combinaison des deux techniques à savoir l'OFDM et le MIMO ouvre des perspectives vers des communications à hauts débits et permet de profiter des avantages des deux méthodes.

Notre travail se focalise dans ce contexte, nous présentons l'étude des performances d'un système OFDM et MIMO-OFDM. Les deux approches à savoir l'OFDM et le MIMO-OFDM sont implémentées sous SIMULINK, leurs performances respectives sont mises en valeurs. Les simulations que nous allons réaliser vont nous permettre de mettre en relief les améliorations obtenues par la technique MIMO-OFDM de point de vue du taux d'erreur binaire et qualité du signal.

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

Dans le premier chapitre, nous fournirons des informations générales sur les communications, les catégories de réseaux sans fil et leurs différentes normes. Nous examinerons également les techniques de transmission multiple.

Dans le deuxième chapitre, nous nous familiariserons avec la technique OFDM ses avantages, son développement grâce à l'utilisation de la transformation de Fourier rapide. Nous examinerons également son intégration avec le système MIMO, avec ces différentes structures.

Dans le troisième chapitre, nous effectuerons des simulations du système OFDM-MIMO, ainsi que des systèmes qui lui sont associés tels que SISO et MISO. Nous réaliserons également des simulations approfondies pour différents types de modulations. Nous étudions les performances des systèmes à travers l'examen des constellations des différents types de modulation ainsi que le taux d'erreur. A la fin, Nous récapitulons par une conclusion générale.

Chapitre 01 :

Aperçu générale sur les télécommunications

Chapitre I : Aperçu général sur les télécommunications

I.1 Introduction

Dans les télécommunications, un signal porteur d'informations doit acheminer entre un émetteur et un récepteur. Ces dernières années ont été marquées par l'avènement d'une véritable révolution des réseaux informatiques ; la révolution des systèmes sans fil. En alliant connectivité et mobilité, ces nouvelles technologies modifient en profondeur les systèmes d'information et leurs infrastructures. Dans ce chapitre, nous décrivons les différentes architectures des systèmes de télécommunication sans fil et les principales techniques de multiplexage de manière générale. Nous passons également en revue différents modèles de canaux de transmission et des mesures de performance pour évaluer les performances des systèmes de télécommunication. [4]

I.2 Définition

La communication numérique est un terme large qui se réfère à une technologie plutôt qu'à une stratégie. En fait, cette expression conduit à l'utilisation d'outils numériques (sites web, réseaux sociaux, etc.). La communication numérique est épanouie depuis l'avènement des nouvelles technologies de l'information et de la communication et est également devenue un objet de consommation de masse, la culture numérique devient indispensable pour les entreprises comme pour les particuliers [5].

I.3 Les Réseaux sans Fil [5]

Un réseaux sans fil est un réseau dans lequel au moins deux nœuds peuvent communiquer sans connexion filaire. Ces réseaux de communication permettent aux utilisateurs de profiter de tous les services traditionnels du réseau. Les réseaux sans fil peuvent avoir une classification Selon deux critères. Le premier est la zone de couverture du réseau. Compte tenu de cette norme, il existe quatre catégories : réseau personnel, réseau local, les réseaux MAN et WAN. Le deuxième critère est l'infrastructure, d'où les réseaux sans fil peuvent être classés en : réseaux avec et sans infrastructure, comme on le voit dans l'illustration de la figure (I.1).

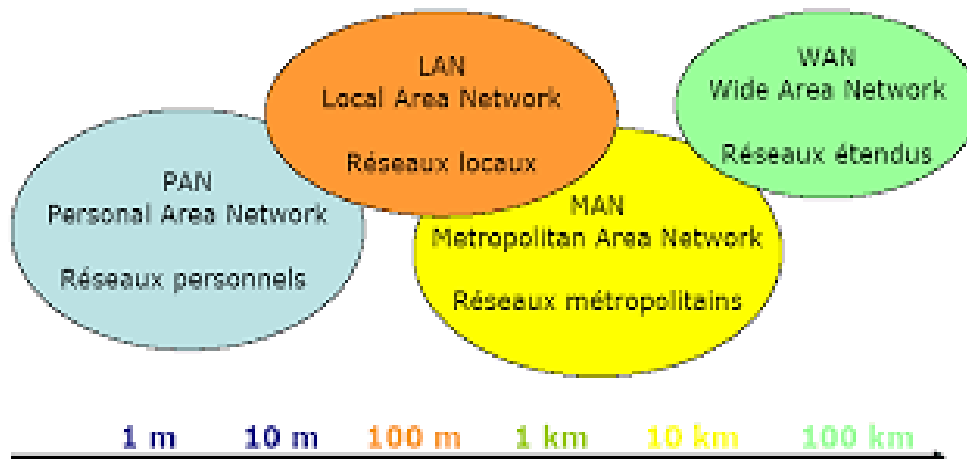
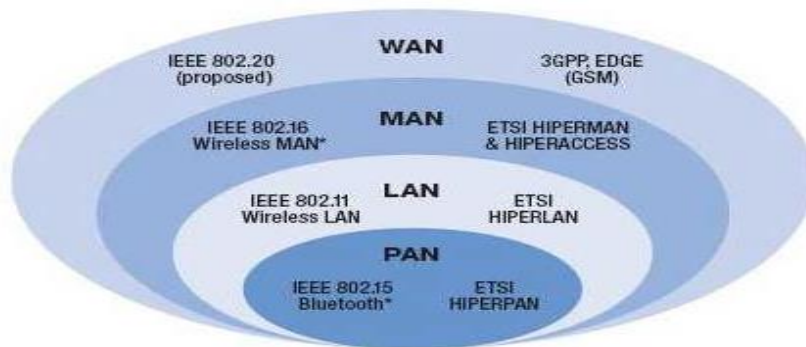


Figure (I.1): Classification des réseaux sans fil.

I.4 Classification selon la zone de couverture [6]

Chaque solution correspond à une finalité différente, en fonction de ses caractéristiques (vitesse de transmission, débit maximal, coût d'infrastructure, coût des appareils connectés, sécurité, flexibilité d'installation et d'utilisation, consommation et autonomie, etc.). Il existe quatre catégories basées sur l'étendue géographique sur laquelle la connectivité est offerte (appelées zones de couverture). La figure suivante montre ce type de classification



Figure(I.2): réseaux sans fil selon la zone de couverture.

I.4.1 Les Réseaux personnels sans fil (WPAN)

Un réseau personnel sans fil ou réseau domestique sans fil appelé WPAN (Wireless Personal Area Network) implique un réseau sans fil d'une portée de plusieurs dizaines de mètres. Ce type de réseau est souvent utilisé pour connecter des périphériques tels que des imprimantes, des

téléphones portables, des appareils électroménagers ou des assistants personnels à un ordinateur sans connexion filaire, ou pour permettre une connexion sans fil entre deux machines proches. Il existe plusieurs technologies utilisées pour le WPAN, nous citons : Bluetooth, HomeRF, ZigBee, Infrarouge.

I.4.2 Réseaux locaux sans fil (WLAN)

Le Réseau local sans fil est un réseau qui couvre l'équivalent d'un réseau local d'entreprise, d'une portée d'environ 100 mètres. Il relie les bornes présentes dans le secteur de couverture. Il y a plusieurs catégories concurrentes: WIFI et HiperLAN2.

I.4.3 Réseaux métropolitains sans fil (WMAN)

Le réseau sans fil métropolitain WMAN est l'abréviation de (Wireless Métropolitain Area Network), est également connu sous le nom Loop Locale Radio. Qui offre un débit utile d'un à dix Mbits/s pour une gamme de 4 à dix kilomètres, qui oriente principalement cette technologie vers les opérateurs de télécommunications. Ces réseaux sont prétendus à connecter des entreprises ainsi que des particuliers. Le réseau WMAN couvre la zone nommée -du dernier kilomètre- pour procurer un accès à l'internet haut débit, aux zones non couvertes par les moyens classiques.

I.4.4 Réseaux étendus sans fil (WWAN)

Le réseau WWAN (réseau Wireless Wire Area) est aussi connu comme le réseau cellulaire mobile.

Ce sont les réseaux sansfil les plus courants, car tous les téléphones portables sont reliés à un large Réseau sans-fil. Les technologies principales sont les suivantes :

- ❖ GSM (Global System for Mobile Communication ou en français Groupe Spécial Mobile)
- ❖ GPRS (General Packet Radio Service)
- ❖ UMTS (Universel Mobile Télécommunication System)

Tableau (I.1): Classification des réseaux sans fil

Cat	Portée max	Débit	Usages	Normes
WPAN	Qqs m	1Mbit /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	IEE 802.11 (a, b,c ,....) ETSI HyperLan

			comme réseau domestique) .	
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

I.5 Classification selon l'infrastructure [6]

L'environnement mobile est un système composé de sites mobiles qui permettent aux utilisateurs d'avoir accès à des informations quel que soit leur emplacement géographique. Les réseaux mobiles et sans fil peuvent être classés dans deux catégories :

Les réseaux dotés d'infrastructures et les réseaux dépourvus d'infrastructures.

I.5.1 Réseaux cellulaires

Ce type de réseau rassemble les sites fixes des réseaux filaires et les sites portables des réseaux sans fil. Certains emplacements fixes, connus sous le nom de stations de base, ont une interface sans fil de communication directe avec des sites mobiles situés dans une région géographique limitée., appelée cellule comme le montre la figure (I.3)

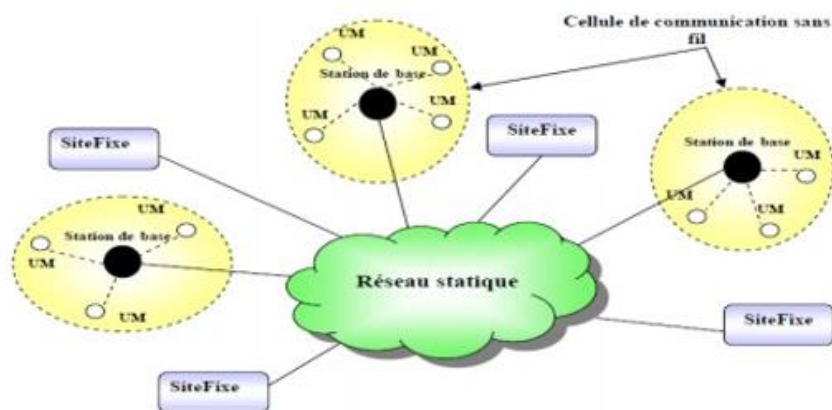


Figure (I.3): Réseaux cellulaires à infrastructure.

Chaque poste de base correspond à une cellule d'où les unités mobiles peuvent transmettre et recevoir les messages. Bien que les emplacements fixes soient interconnectés au moyen d'un réseau de communication câblé. Une unité mobile peut être connectée directement à une station de

base unique à un moment donné. Il peut communiquer avec d'autres sites par l'intermédiaire de la gare à laquelle il est directement relié.

I.5.2 Réseaux ad hoc

Il s'agit d'un réseau ad hoc appelé MANET (Réseau mobile ad hoc), dont la topologie ne bénéficie d'aucune infrastructure fixe ou administration topologique préexistante qui ne bénéficie d'aucune infrastructure fixe ou administration centralisée préexistante



Figure (I.4): Réseaux en mode ad hoc.

I.5.3 Réseaux WIMAX [6]

Le réseaux WIMAX est un réseaux à interopérabilité mondiale pour l'accès aux micro-ondes il tient son nom de l'abréviation anglo-saxonne (World Wide Interopérabilité for Microwave Access). Il a été créée afin d'assurer une convergence et une interopérabilité entre deux normes de réseau sans fil initialement indépendantes. Le réseau de WiMax est un ensemble de normes et de techniques dérivant de l'univers des réseaux métropolitains sans fil de WMAN (réseau métropolitain sans fil). La norme IEEE 802,16, ou le WiMax, permet la connexion sans fil des entreprises ou des particuliers sur les longues distances à large bande. Ce réseau fournit une réponse appropriée à certaines régions rurales ou difficiles d'accès.

Les ondes de WiMax proviennent d'une station de base appelée BTS connectée au réseau à fibre optique. Tous les abonnés peuvent accéder au réseau par l'installation d'une antenne sur le toit et le diriger vers la station de base. En raison de la puissance des ondes WiMax l'utilisateur ne doit pas forcément avoir une ligne directe de vue sur la station. Cependant, certains obstacles, tels que les montagnes ou les bâtiments à haute densité, peuvent réduire considérablement la portée du signal.

La technologie WIMAX fournit ainsi une solution complémentaire aux réseaux à ligne d'abonné numérique DSL (Digital Subscriber Line) et aux réseaux câblés d'une part, et à interconnecter des hot spots Wifi d'autre part. La communication peut se faire en ligne (LOS : Ligne de vue) ou pas (LNOS). Le WiMax offre un meilleur confort à l'utilisateur, permettant l'accès à Internet par fixe ou mobile. La figure 5 illustre la connectivité de réseau WIMAX.



Figure (I.5): Réseau WIMAX.

I.6 Applications des réseaux sans fil [10]

Les systèmes de réseaux sans fil et mobiles affectent graduellement tous les domaines d'activités économiques et s'incorporent peu à peu dans tous les types de services de télécommunications. Les réseaux sans fil fournissent une grande souplesse ainsi qu'une rapidité et facilité de mise en place.

Les réseaux sans fil sont plus aisés à implanter dans des zones, où il est impraticable d'installer des câbles convenablement, tel que les vieux immeubles, les sites classés tels que les châteaux et monuments historiques. Dans le cas aussi des manifestations momentanées comme : les congrès, foires, salons, expositions ...etc. L'utilisation des réseaux sans fil dans les campus universitaires, est d'un bénéfice majeur pour les universitaires qui peuvent se connecter de leurs chambres ou à partir de la bibliothèque. Les réseaux sans fil sont utilisés aussi dans plusieurs technologies telles que de Biométrie et télémétrie. Ces réseaux sont exploités également en télé médecine, où les techniques sans fil sont l'employé dans le contrôle des implants électroniques, la manipulation d'instruments d'observation et dans la télésurveillance des patients. Les réseaux sans fil sont aussi utilisés en téléenseignement à travers des plateformes dédiées à l'apprentissage à distance.

I.7 Les techniques de Multiplexage [11]

Le multiplexage est l'opération consistant à regrouper plusieurs canaux, chacun affecté à une communication, afin qu'ils puissent être transmis simultanément sur un même support physique (câble, liaison radio, satellite, etc.) sans ne se mélanger ni se gêner. A la réception, un démultiplexage aussi parfait que possible doit pouvoir séparer ces canaux et les retrouver dans leur forme d'origine. Ce partage des ressources disponibles nécessite que chacune d'elles soit isolée des autres ressources, il est donc nécessaire d'assurer la condition d'orthogonalité des ressources.



Figure (I.6) : Multiplexage des possibilités d'accès à un canal.

Il existe principalement trois aspects de multiplexage à noter : le multiplexage à accès multiple par répartition de fréquence dit FDMA pour (Frequency Division Frequency Division Multiple Access) ; le multiplexage à accès multiple par répartition de temps nommé TDMA pour (Time Division Multiple Access) et le multiplexage à accès multiple par répartition de code appelé CDMA pour (Code Division Multiple Access).

Un autre type de multiplexage dédié à la propagation sur des fibres optiques nommé le WDMA pour (Wavelength Division Multiple Access). Utilise la propagation des fenêtres optiques disponibles sur la même fibre.

I.7.1 Accès multiple par répartition en fréquence FDMA [11]

Le multiplexage par répartition de fréquence est une technique marquée des plus anciennes. Dans ce type de multiplexage des signaux indépendants occupent des bandes de fréquences différentes dans le signal composite. La figure (I.7) donne un aperçu sur ce type de multiplexage.

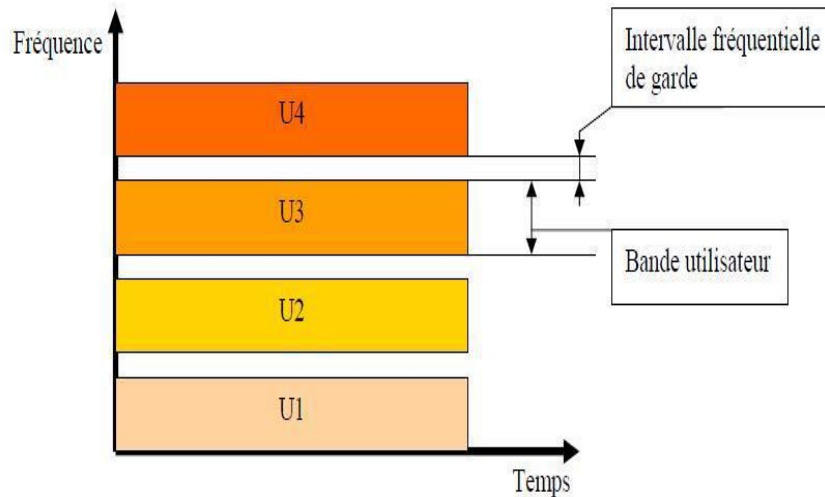


Figure (I.7) : La technique de multiplexage FDMA.

Le principe de ce type de multiplexage consiste à générer N porteuses espacées en fréquence au moins deux fois la bande de fréquence utile du signal à multiplexer. La porteuse est ensuite multipliée par les signaux afin d'assurer la conversion en différentes fréquences et générer un signal composite. Ensuite, on procède à la multiplication de chaque porteuse par le signal composite puis effectuer un filtrage passe-bas autour de la bande d'intérêt pour trouver le signal démultiplexé. Les éléments essentiels du multiplexage FDMA sont les opérations précises de génération des différentes porteuses dans le processus de modulation.

I.7.2 L'accès multiple par répartition dans le temps (TDMA)

Le multiplexage par répartition dans le temps, dit TDMA consiste à attribuer l'intégrale bande passante à un utilisateur unique pendant une courte période de temps, puis à chaque utilisateur à tour de rôle. L'allocation de cette bande passante se fait en fractionnant l'axe du temps en intervalles de durée fixe, et chaque utilisateur n'émettra que pendant l'une de ces cycles déterminés. La figure (I.8) montre le principe du multiplexage TDMA.

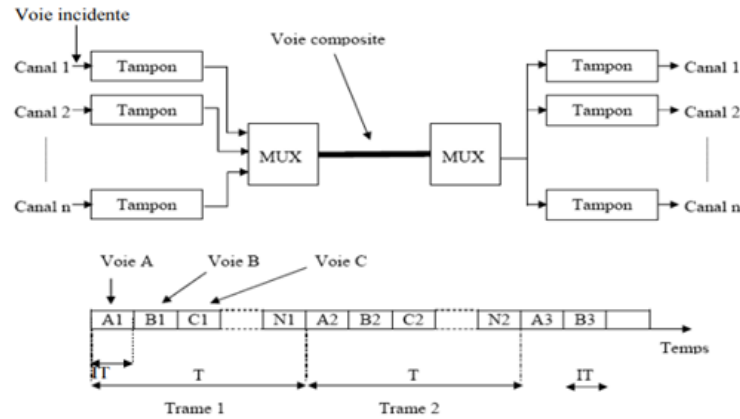
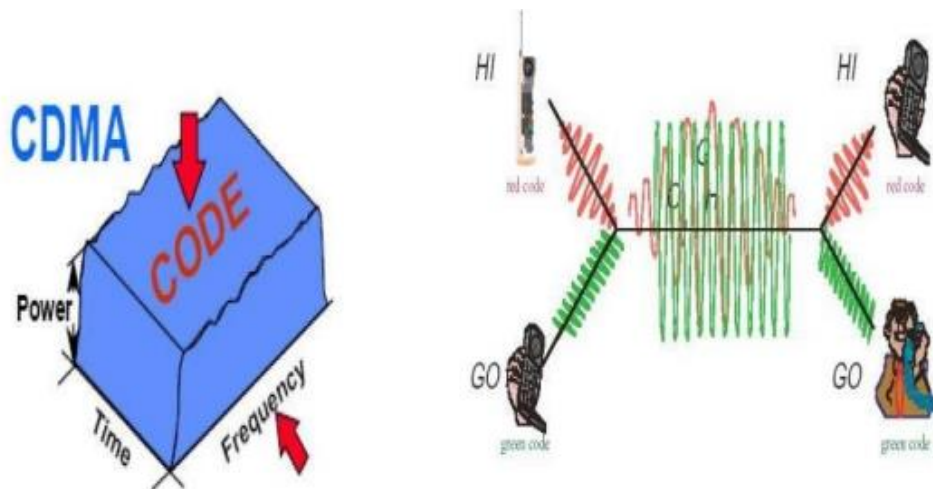


Figure (I.8): Répartition des périodes dans le cas d'un multiplexage TDMA.

I.7.3 Code Division Multiple Access (CDMA)

Le principe de l'accès multiple par répartition de code CDMA est d'utiliser des codes distincts pour différencier les utilisateurs. Communément, une forme de modulation de spectre à étalement de séquence directe (DS-CDMA) est utilisée. Le signal résultant est étalé sur une large bande passante, et des codes nommés codes d'étalement sont utilisés. En utilisant un ensemble de codes orthogonaux entre eux, il est possible de sélectionner un signal avec un code donné en présence de nombreux autres signaux, comme le montre la figure (I.9).



Figure(I.9): La technique de multiplexage CDMA.

I.7.4 L'accès multiple à division de longueur d'onde WDM [12]

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.

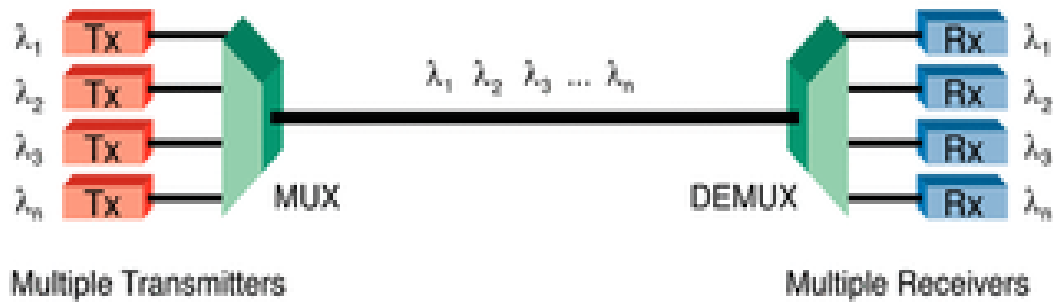


Figure (I.10) : La technique de multiplexage WDM.

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.

En WDM, un seul amplificateur optique remplace N régénérateurs par site de ligne, permettant des économies d'équipement qui augmentent avec la longueur de la liaison et le nombre de canaux.

I.8 Modèles des canaux de communications [10]

Dans la conception des systèmes de télécommunication, il est nécessaire d'établir un modèle mathématique qui caractérise le milieu de propagation. Nous présenterons les principaux modèles de canaux utilisés dans les télécommunications sans fil.

I.8.1 Canal à bruit blanc additif gaussien (AWGN)

Le canal Additive White Gaussian Noise AWGN (Additive White Gaussian Noise) est un modèle fréquemment utilisé car il décrit souvent bien le transport dans des environnements physiques. Ce canal génère un bruit de nature aléatoire qui s'ajoute au signal désiré. En effet, selon le théorème central limite, lorsqu'un phénomène correspond à la somme d'un grand nombre de causes aléatoires, la distribution statistique de ce phénomène obéit à une distribution gaussienne. Le bruit blanc a une densité spectrale de puissance constante qui varie avec la fréquence. Le bruit est souvent modélisé par un processus stochastique blanc gaussien de moyenne nulle de variance σ^2 sa densité de probabilité est donnée par l'équation (I.1).

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

La figure (I.11) : illustre le modèle d'un canal AWGN.

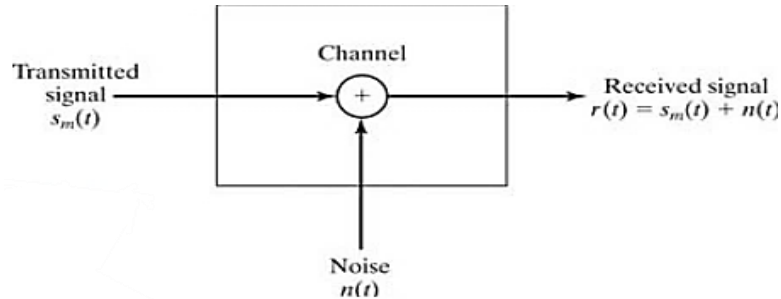
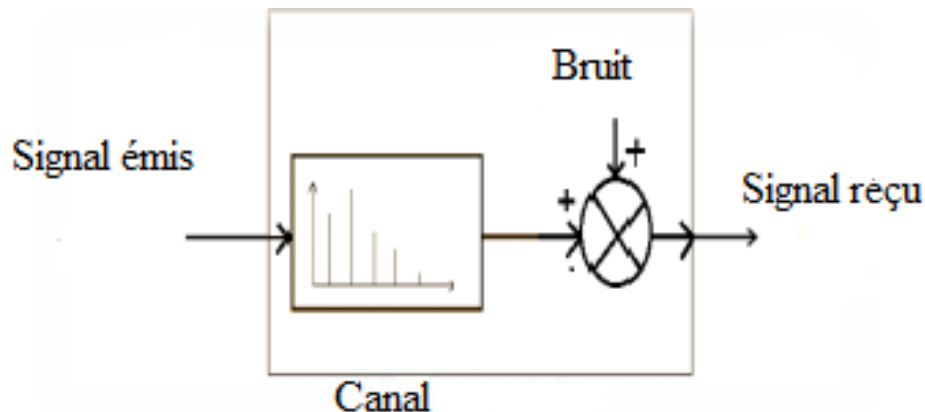


Figure (I.11) : Modèle d'un canal à bruit additif Gaussien.

I.8.2 Canal à filtre linéaire et bruit blanc additif gaussien

Un canal est caractérisé par une fonction de transfert ou réponse impulsionnelle, qui décrit le comportement fréquentiel ou temporel du canal. Comme le montre la Figure(I.12), les perturbations externes et le bruit se couplent dans le canal et s'ajoutent au signal Transmis

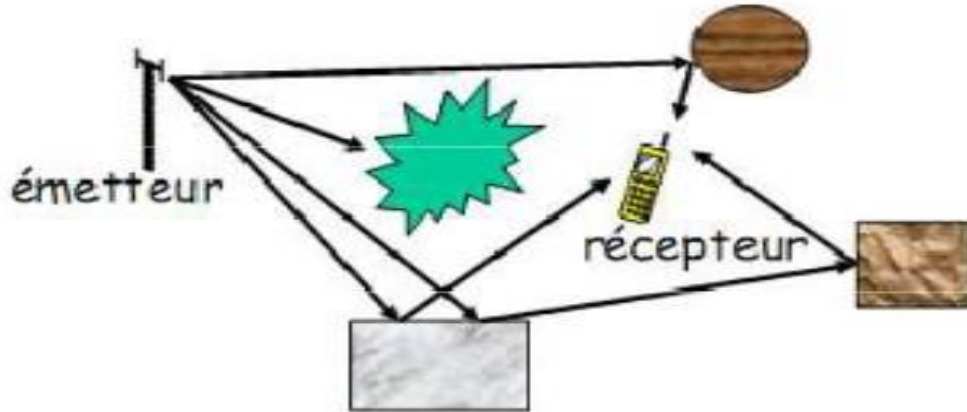


Figure(I.12): Modèle d'un canal à filtre linéaire et bruit additif.

I.8.3 Canal de propagation multi trajet [14]

La propagation en espace libre représente une situation idéale. Mais en réalité, le canal de propagation est l'endroit où les trajets multiples se produisent en raison d'obstacles autour de l'émetteur et du récepteur dans la Figure (I.13). Dans ce cas, plusieurs copies du signal transmis arrivent au récepteur à travers plusieurs trajets qui possèdent différents états d'atténuation, de déphasage et des retards dus à la longueur du trajet. Lors de la propagation par trajets multiples, on distingue généralement deux situations de propagation. Le premier est appelé NLOS (no line of

sight), où il n'y a pas de ligne de visée entre l'émetteur et le récepteur. Dans ce cas, la densité de probabilité de l'amplitude de l'évanouissement total du signal reçu suit la loi de Rayleigh dans la Figure (I.14).



Figure(I.13): Pas de ligne de vue (propagation NLOS) : canal de Rayleigh.

Le deuxième cas se produira lorsque (ligne de visée) un chemin direct appelé LOS domine, de sorte que l'amplitude de l'évanouissement a les caractéristiques d'une distribution de Ric (Figure : (I.15))

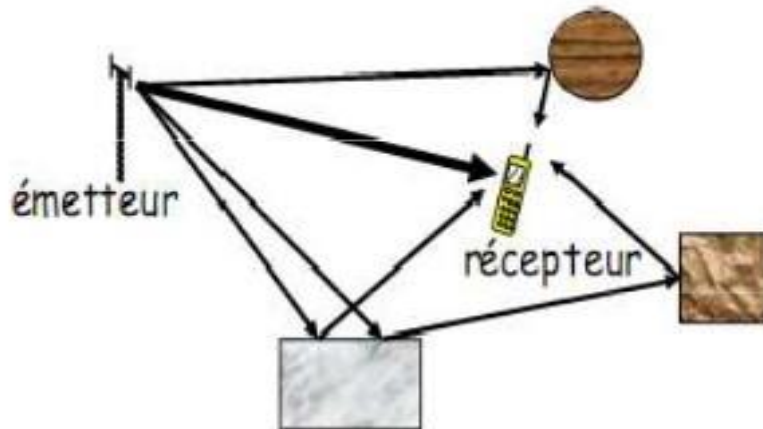


Figure (I.14) : Existence d'une ligne de vue (propagation LOS) : canal de Ric

Selon la nature des objets rencontrés lors du multi trajet, divers phénomènes électromagnétiques sont déclenchés, tels que : la réflexion, la diffraction et la diffusion à partir d'obstacles. Les canaux de transmission à trajets multiples créent des interférences entre symboles, abrégées en ISI (Inter-Symbol Interference). Dans ce cas, le signal transmis peut emprunter deux ou plusieurs chemins

pour atteindre le récepteur : un chemin direct et un chemin réfléchi. Les temps de propagation sur ces deux trajets sont différents, et le récepteur constate une superposition des deux versions décalées du signal émis. La présence d'interférences entre symboles ne permet pas au récepteur de prendre une décision symbole par symbole qui soit en même temps une décision optimale. Plusieurs approches ont alors été envisagées : la première consiste à faire en sorte que le terme ISI soit toujours nul ; elle conduit au critère de Nyquist. Cependant, cette approche présente des inconvénients car elle ne fait pas bon usage de la bande de fréquence disponible. Les deuxièmes et troisièmes méthodes sont respectivement l'égalisation linéaire (égaliseur sous-optimal) et l'algorithme de Viterbi (égaliseur optimal). L'égalisation a pour but de supprimer la distorsion introduite par le canal de transmission et de récupérer le message transmis à partir des observations reçues. Une autre approche est la technique OFDM, qui, combinée à l'égalisation, présente une solution quasi-optimale [15].

I.8.4 Canal à distribution de Rayleigh [16]

La distribution de Rayleigh correspond au cas idéal. Dans ce cas, le signal complexe reçu consiste en un grand nombre de trajets indirects (NLOS) avec des amplitudes et des phases aléatoires, indépendantes et uniformément réparties. L'enveloppe de ce signal obéit à la loi de Rayleigh définie par l'équation suivante :

$$P(r) = \frac{r}{\sigma^2} - \frac{r^2}{2\sigma^2} \geq 0 \quad (\text{I.2})$$

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

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

- La valeur moyenne : $E(r) = \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}}$ (I.3)

- La valeur quadratique moyenne : $E(r^2) = 2\sigma^2$ (I.4)

I.8.5 Canal à distribution de Rice

Dans d'autres cas, le canal de propagation est caractérisé par plusieurs trajets indirects et un trajet direct (LOS). En conséquence, la densité de probabilité d'enveloppe du signal complexe reçu suit la distribution de Rice définie par l'équation (I.6). Où r_d est l'amplitude du trajet direct et I_0 représente la fonction de Bessel modifiée d'ordre zéro de première espèce [17]. Cette loi a les caractéristiques suivantes :

- Density de probability:

$$f(x/v, \sigma) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(\frac{-(x^2+v^2)}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{xv}{\sigma^2}\right) \quad (\text{I.5})$$

- Valeur moyenne:

$$E\{r\} = \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}} \exp\left(\frac{r^2}{-4\sigma^2}\right) \left[\left(1 + \frac{r^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{r^2}{4\sigma^2}\right) + \frac{r^2}{4\sigma^2} I_1\left(\frac{r^2}{4\sigma^2}\right) \right] \quad (\text{I. 6})$$

I.9 Mesures de performances dans les systèmes de transmission

I.9.1 La probabilité d'erreur et le taux d'erreur

La probabilité d'erreur est exprimée par:

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \quad (\text{I.7})$$

E_b est l'énergie du bit reçu, N_0 est la densité spectrale du bruit et $\operatorname{erfc}(x)$ est la fonction d'erreur complémentaire.

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty \exp(-u^2) du \quad (\text{I.8})$$

Il est à noter que la probabilité d'erreur (P_e) est une valeur théorique, et l'estimation sans biais de celle-ci est faite en mesurant le taux d'erreur par bit BER (Bit Error Rate). Le taux d'erreur par bit BER est défini comme le rapport entre le nombre de bits erronés et le nombre de bits transmis. Ce rapport détermine le nombre d'erreurs qui se produisent avant la modulation et après la démodulation. Les erreurs de transmission augmentant en raison des interférences causées par un mauvais pointage des équipements, des réseaux défectueux, des antennes, des multi trajets du canal, etc. A noter que le taux d'erreur par bit BER tend vers la probabilité d'erreur P_e lorsque le nombre de bits transférés tend vers l'infini [15].

I.9.2 Rapport signal sur bruit (SNR) [16]

Le rapport signal sur bruit connu sous l'acronyme SNR est la mesure de performance la plus courante dans les systèmes de télécommunications. Le terme fait référence au signal démodulé, le bruit total et le bruit du réseau de transmission plus le bruit intégré dans le signal modulé et les autres dégradations. Le SNR est exprimé par :

$$\text{SNR} = \frac{P_s}{P_N} \quad (\text{I.9})$$

Avec P_s : Puissance du signal et P_N la puissance de bruit. Le SNR en décibel (dB) est évalué comme suit :

$$\text{SNR}_{\text{dB}} = 10 \log_{10} \frac{P_s}{P_N} \quad (\text{I.10})$$

I.10 Conclusion

Dans ce chapitre, l'arrière-plan de l'étude est la télécommunication numérique. Nous avons décrit les différents types de réseaux sans fil. Nous décrivons ensuite brièvement les techniques de multiplexage et leurs types. Nous nous intéressons particulièrement à la technologie FDMA dont fait partie la technologie OFDM Ceci sera exploré en détail dans le chapitre deux Les caractéristiques des différents types de canaux de propagation et les mesures de performance des systèmes de télécommunication sont passées en revue.

Chapitre 02 :

Techniques OFDM et

MIMO-OFDM

Chapitre II. Techniques OFDM et MIMO-OFDM

II.1 Introduction

Dans le cas des canaux sélectifs en fréquence, un moyen d'adapter l'information à transmettre au canal de propagation est l'utilisation de modulations multi-porteuses dans laquelle un bloc d'information est modulé par une transformée de Fourier. Cette technique connue sous le nom d'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) a connu un vif succès dans différents standards sans fils (IEEE802.11a, WiMax, LTE, DVB). L'OFDM est initialement 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'abonnés du réseau téléphonique à l'aide de la technique ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Loop). La technique OFDM transforme un canal multi-trajet large bande en un ensemble de sous-canaux mono-trajet très simples à égaliser. Le but de ce chapitre est l'étude de la technique OFDM et présenter ces principes généraux et son application dans les systèmes de télécommunications. [17] [18]

II.2 Modulations multi-porteuse

Dans les environnements de transmission où des phénomènes de trajets multiples existent, les techniques de modulation à porteuse unique (transmission sur une seule fréquence porteuse) sont sensibles à la fréquence de canal ainsi qu'à la sélectivité temporelle, ce qui entraîne des interférences entre symboles (IES). Pour compenser ces effets tout en augmentant le débit de transmission, des techniques de modulation multi porteuse ont été proposées. Le principe des Modulations multi-porteuses consiste à répartir le signal à transmettre sur un grand nombre de fréquences porteuses (sous-porteuses) dans toute la bande de fréquence du canal de transmission. Ainsi, sur des canaux multi-trajets où certaines fréquences sont atténuées, le système pourra toujours récupérer les signaux perdus sur d'autres sous-porteuses non affectées par les phénomènes multi-trajets. [22]. L'avantage de la modulation multi porteuse est de placer l'information dans une fenêtre temps-fréquence dont la durée est bien supérieure à la dispersion temporelle maximale du canal de propagation. Un autre avantage de la modulation multiporteuse est de remplacer l'opération d'égalisation dans le domaine temporel par une égalisation simplifiée dans le domaine fréquentiel

À fin de récupérer le signal transmis [20]. La figure 16 illustre les modulations de type mono porteuse et multi-porteuses.

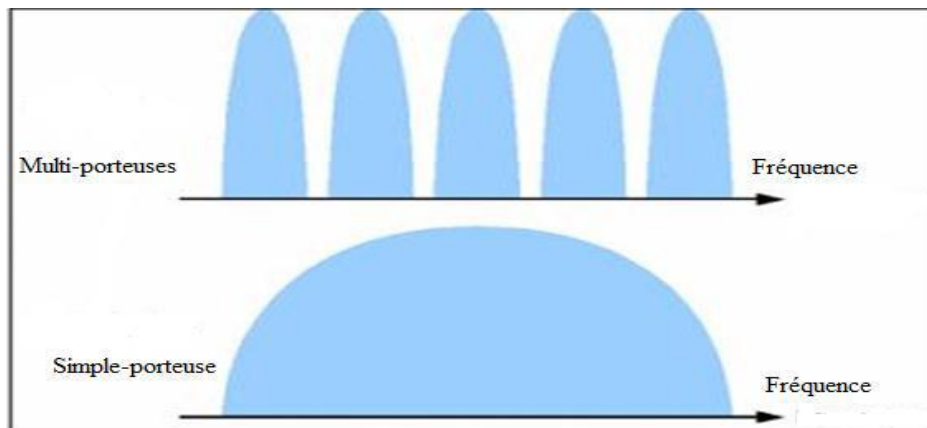


Figure (II.1) : Modulations mono-porteuse et multi-porteuses.

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 (I.2).

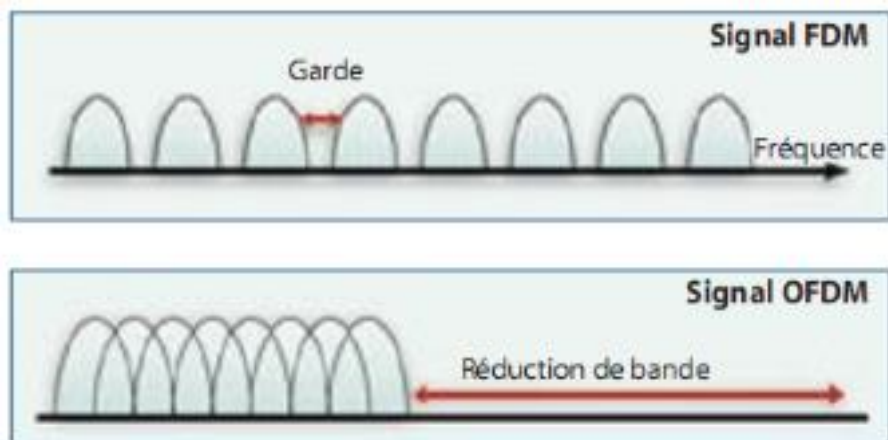


Figure (II.2) : Bande passante de l'OFDM et FDM.

Dans un système OFDM, les bits d'informations pour chaque sous-porteuse sont modulés par des différentes techniques de modulation comme la modulation BPSK, QPSK ou QAM. Le débit binaire d'entrée est augmenté en augmentant le nombre d'états dans la constellation, ce qui entraîne une diminution de la distance entre les points médians de la constellation, augmentant ainsi la sensibilité du système au bruit.

II.3 Principe de la technique OFDM [24]

Le principe de la modulation multi-porteuse de type OFDM consiste à transmettre les données de manière simultanée sur N porteuses modulées. Le débit global reste inchangé mais chaque porteuse est moins sensible à l'étalement des trajets sur le canal de propagation. 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 le principe d'orthogonalité des sous-porteuses. Les signaux des différentes sous-porteuses se chevauchent mais grâce à l'orthogonalité n'interfèrent pas entre eux. La propriété de l'orthogonalité des fréquences est très importante, car c'est elle qui garantit l'absence d'interférences entre les sous-porteuses. La performance d'un système OFDM dépend de la synchronisation des fréquences entre le transmetteur et le récepteur, afin d'assurer l'orthogonalité. Il suffit que l'espacement entre les fréquences soit de $1/T_s$, où T_s est la durée d'un symbole, pour que les fréquences soient orthogonales. La Figure (II.3) illustre l'orthogonalité entre quatre sous porteuses.

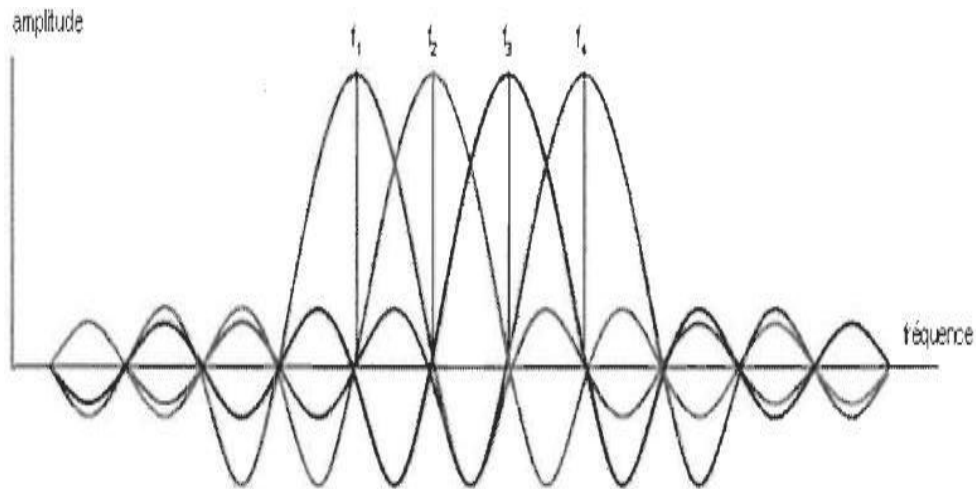


Figure (II.3) : Orthogonalités entre quatre fréquences.

II.4 Système de transmission OFDM [24]

Le schéma (figure 2.4) représente un système OFDM complet. Il comporte un émetteur, un récepteur et un canal radio à travers lequel se fait la transmission. On a en premier lieu le générateur des données qui vont être transmises, ensuite on a un convertisseur série parallèle qui sectionne les données à son entrée en des flux de données parallèles de débits réduits. On a encore le bloc de modulation numérique (QAM, 16-QAM ...), le bloc d'insertion de temps de garde, les blocs FFT et IFFT pour la modulation et démodulation des sous-porteuses et enfin les blocs caractérisant le canal de transmission. A la réception, le processus opposé 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 fourrier (FFT) est appliquée les, données sont par la suite démodulées et une conversion parallèle/série est effectuée.

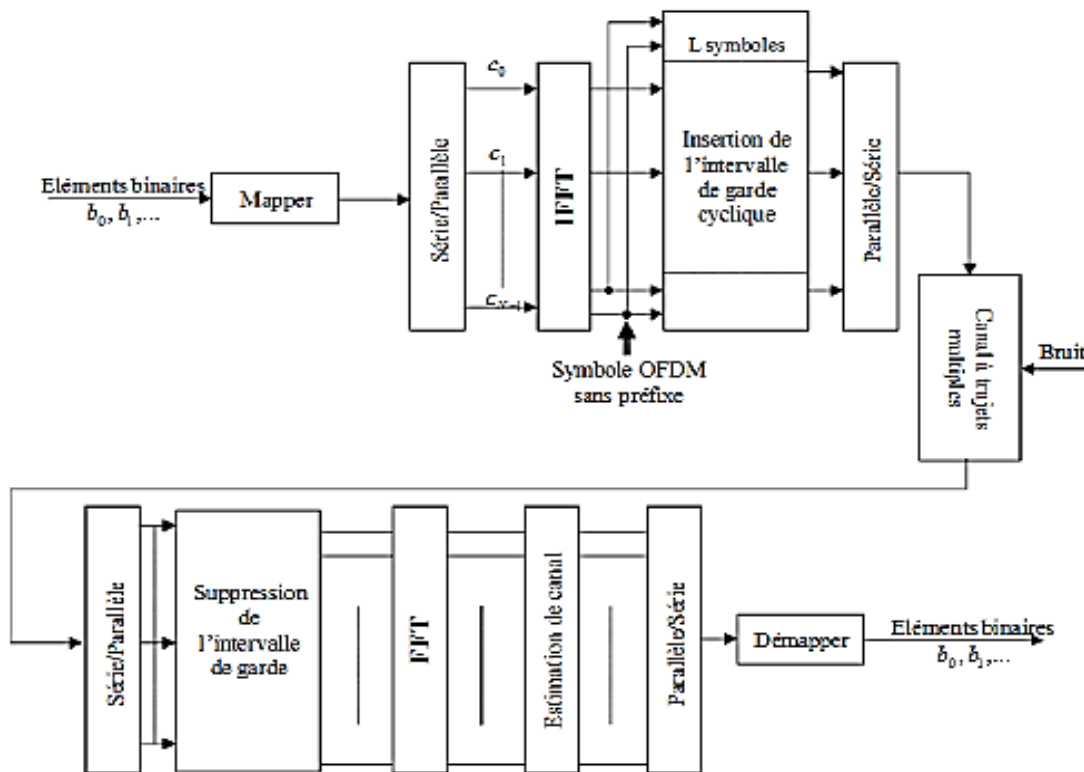


Figure (II.4) : Schéma bloc d'un système de transmission OFDM.

II.5 Modulation et démodulation OFDM [4]

II.5.1 Modulation OFDM

Les données d'entrée d'un système OFDM sont sous la forme d'un flux binaire mis en série. Des symboles complexes C_k sont, ensuite, définis à partir de ces éléments binaires selon une constellation typiquement de modulation BPSK, QPSK, 16-QAM ou 64-QAM. Le débit binaire peut être augmenté en augmentant le nombre d'états dans la constellation, ce qui entraîne une diminution de la distance entre les points de la constellation, ce qui augmente la sensibilité du système au bruit. Les données C_k passent, ensuite, dans un buffer permettant de les convertir de série en parallèle. Après cela, chaque donnée C_k module une porteuse à la fréquence f_k . Ces données sont, ensuite, groupées en paquets de N éléments qu'on appelle symbole OFDM. Cette étape caractérise ce qu'on appelle la modulation OFDM.

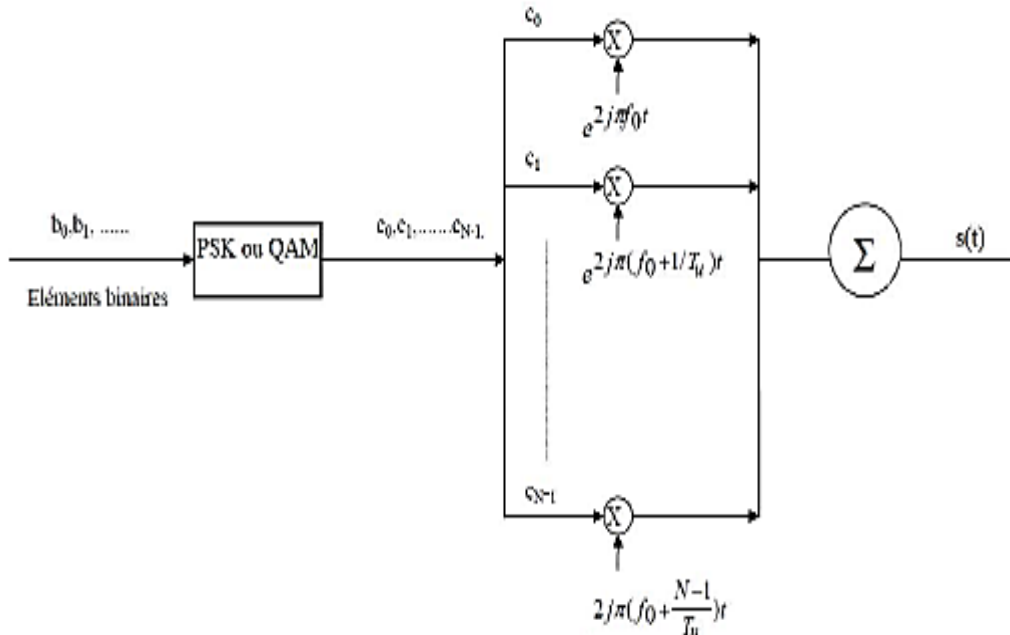


Figure (II.5) : Schéma de principe d'un modulateur OFDM.

Considérons une séquence de N données (symboles complexes) : C_0, C_1, \dots, C_{N-1} . Appelons T_u la durée utile d'un symbole OFDM. Le multiplexage est orthogonal si l'espace entre les sous-porteuses est $\frac{1}{T_u}$. Le signal total $s(t)$ correspondant à l'ensemble des N symboles réassemblés en un symbole

Le multiplexage est orthogonal si l'espace entre les sous-porteuses est $\frac{1}{T_u}$

$$\text{Alors : } f_k = f_0 + \frac{k}{T_u} \quad (\text{II.1})$$

Avec $K \in [0, 1, \dots, N-1]$

La fonction de base de chaque sous-porteuse est choisie tel que :

$$g_k(t) = \begin{cases} e^{2j\pi f_k t} & 0 \leq t < T_u \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

Le signal individuel s'écrit sous la forme complexe :

$$C_k e^{2j\pi f_k t} \quad (\text{II.3})$$

Le signal total transmis $S(t)$ correspondant à toutes les données d'un symbole OFDM est

La somme des signaux individuels :

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{2j\pi f_k t} \quad (\text{II.4})$$

II.5.2 Démodulation OFDM :

Au niveau du récepteur, le signal reçu $r(t)$ est corrélé avec les conjugués complexes de chaque fonction de base

$$g_k(t) = e^{-2j\pi f_k t} \quad (\text{II.5})$$

Dans le but de récupérer les données C_k du symbole OFDM transmis [22].

Voici le schéma de principe de la démodulation OFDM :

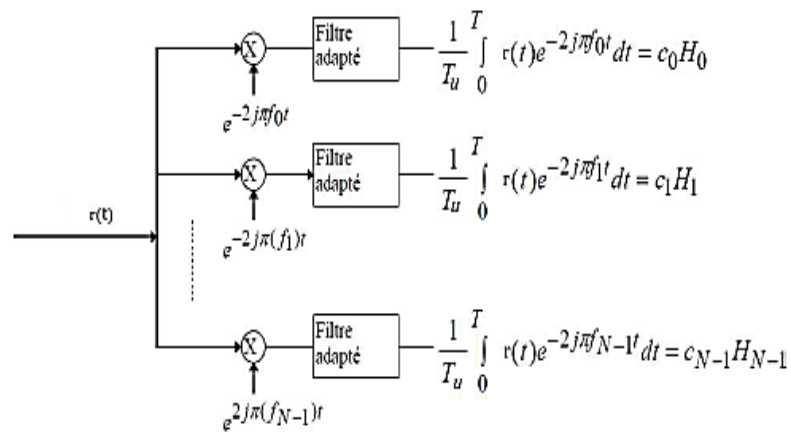


Figure (II.6): Schéma de principe d'un démodulateur OFDM.

En considérant le canal est sans bruit, le signal parvenant au récepteur s'écrit [23] :

$$r(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k H_k(t) e^{2j\pi(f_0 + \frac{k}{T_u})t} \quad 0 \leq t < T_u \quad (\text{II.6})$$

$H_K(t)$ est la fonction de transfert du canal autour de la fréquence f_k et au temps t . Cette fonction varie lentement et on peut la supposer constante sur la période T_u . La condition d'orthogonalité nous montre que [10] :

$$\frac{1}{T_u} \int_0^{T_u} r(t) e^{-2j\pi f_i t} dt = \frac{1}{T_u} \int_0^{T_u} C_K H_K(t) e^{2j\pi(Ki) \frac{t}{T_u}} dt = C_i H_i \quad (\text{II.7})$$

Car :

$$\frac{1}{T_u} \int_0^{T_u} e^{2j\pi(k-i) \frac{t}{T_u}} dt = \begin{cases} 0 & \text{si } k \neq i \\ 1 & \text{si } k = i \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

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 : InterCarrier 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 [24].

II.6 Présentation du système MIMO

Partant du point de vue de la théorie de l'information, deux chercheurs de laboratoire Bell, Foschini [25] et Teletar [26], ont indépendamment montré que la capacité des systèmes multi-antennes augmentait linéairement avec le nombre d'antennes émettrices. Ces découvertes sont à l'origine des systèmes MIMO qui visent essentiellement à résoudre les problèmes d'encombrement et de limitation de capacité des réseaux sans fil large bande (figure (II.7)). La propriété clé d'un système MIMO est sa capacité à tourner la propagation multi-trajet en un avantage (traditionnellement un inconvénient), en d'autres termes les systèmes MIMO exploitent les trajets multiples plutôt que de les supprimer [27]. La capacité d'un canal est la quantité maximale d'information pouvant transiter à travers le canal par unité de temps.

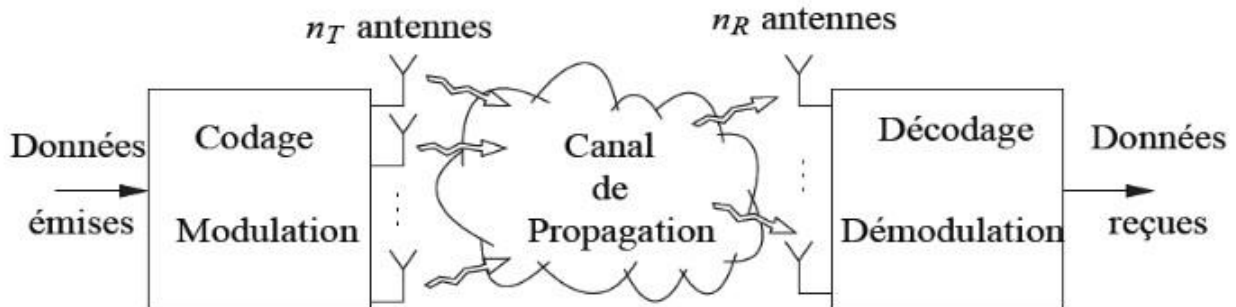


Figure (II.7): Schéma général d'une transmission MIMO [28].

Un système MIMO se caractérise par l'utilisation de plusieurs antennes à l'émission ainsi qu'à la réception. Lorsqu'un tel système comprend, seulement, une seule antenne à l'émission et plusieurs antennes à la réception, il est nommé SIMO (Single Input Multiple Output). De même, lorsqu'il comprend plusieurs antennes à la réception et une seule antenne à l'émission, il est nommé MISO (Multiple Input Single Output). Finalement, si les deux côtés comptent une antenne chacun, le système est dit SISO (Single Input Single Output) [29].

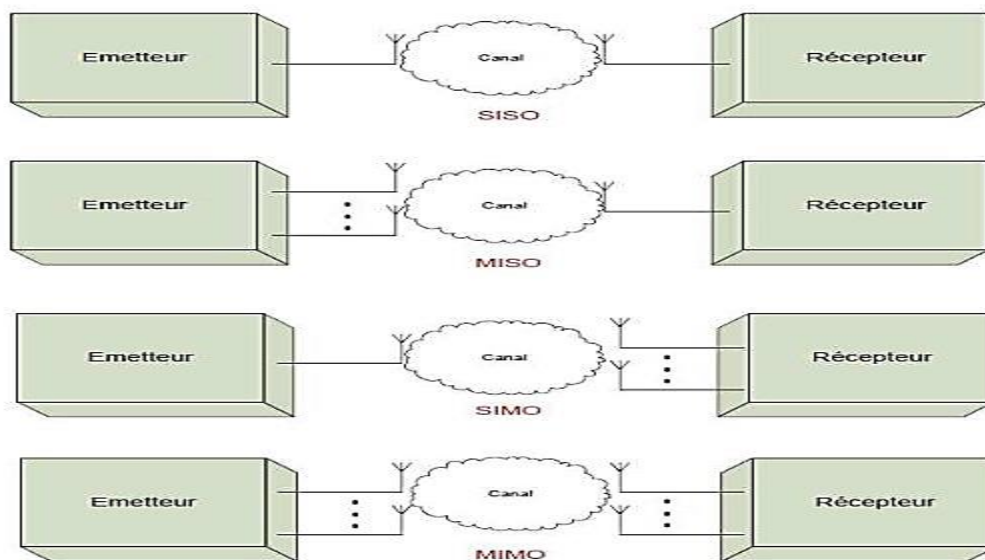


Figure (II.8): Schémas représentatifs des systèmes SISO, MISO, SIMO et MIMO.

II.7 Modélisation des différents canaux du système MIMO

II.7.1 Canal SISO (Single Input Single Output)

C'est le système le plus simple qui utilise une seule antenne en émission et une autre en réception. C'est effectivement un canal radio standard - cet émetteur fonctionne avec une antenne comme le récepteur. Il n'y a pas de diversité et aucun traitement supplémentaire n'est nécessaire (Figure 3.5).

De ce point de départ, pour des buts de simplification, on néglige l'AWGN et on considère que, Le canal est temporaire et sa réponse impulsionnelle est finie avec une durée τ_{max} . Alors le signal SISO reçu devient

$$r(t) = s(t) * h(\tau, t) = \int_0^{\tau_{max}} h(\tau, t) s(t - \tau) d\tau \quad (II.9)$$



Figure (II.9): modèle du canal SISO.

II.7.2 . Canal SIMO (Single Input Multiple Output)

Le modèle de canal SIMO comporte une antenne d'émission et plusieurs antennes de réception $i \in \{1, 2, \dots, M_R\}$. Ce modèle de canal est représenté dans la figure (2.11). Dans ce cas, le signal reçu est la convolution du signal transmis avec la réponse impulsionnelle du trajet parcouru.

$$h_i = (\tau, t) [30].$$

$$r_i(t) = s(t) * h_i(\tau, t) \quad (II.10)$$

Si on définit les signaux reçus et les réponses impulsionnelles sous forme de vecteurs de dimension $M_R \times 1$ comme

$$r(t) = [r_1(t), r_2(t), \dots, r_{M_R}(t)]^T \quad (II.11)$$

$$h(t, \tau) = [h_1(\tau, t), h_2(\tau, t), \dots, h_{M_R}(\tau, t)]^T \quad (II.12)$$

Alors, l'équation 3.2 devient

$$r(t) = h(\tau, t) * s(t) \quad (\text{II.13})$$



Figure (II.10): modèle du canal SIMO.

II.7.3 Canal MISO (Multiple Input Single Output)

Le modèle de canal MISO est en principe l'inverse du SIMO, avec plusieurs antennes de transmission $j \in \{1, 2, \dots, M_T\}$. Et une seule antenne de réception. La figure (2.12) représente un tel modèle. Dans ce cas, le signal reçu est la somme des convolutions de chaque signal transmis avec la réponse impulsionnelle du trajet parcouru $h_j = (\tau, t)$ [30].

$$r(t) = \sum_{j=1}^{M_T} S_j(t) * h_j(\tau, t) \quad (\text{II.14})$$

Si on définit les signaux transmis et les réponses impulsionnelles comme des vecteurs de dimensions $M_T \times 1$ comme

$$s(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_{M_T}(t)]^T \quad (\text{II.15})$$

$$h(t, \tau) = [h_1(\tau, t), h_2(\tau, t), \dots, h_{M_T}(\tau, t)]^T \quad (\text{II.16})$$

Alors, l'équation (2.16) peut s'écrire :

$$r(t) = h(t, \tau) * S(t) \quad (\text{II.17})$$



Figure (II.11) : modèle du canal MISO [10].

II.7.4 Canal MIMO (Multiple Input Multiple Output)

Ce modèle de canal est le cas le plus général et qui comporte plusieurs antennes d'émission $j \in \{1, 2, \dots, M_T\}$ et plusieurs antennes de réception $i \in \{1, 2, \dots, M_R\}$. Ce modèle de canal est représenté dans la figure (27). Dans ce cas, l' i ème signal reçu est la somme des convolutions de tous les signaux transmis avec les réponses impulsionnelles respectives des trajets parcourus $h_{ij} = (\tau, t)$ [30].

$$r(t) = \sum_{j=1}^{M_T} S_j(t) * h_{i,j}(\tau, t) \quad (\text{II.18})$$

Si on définit maintenant toutes les réponses impulsionnelles possibles du canal $h_{i,j}(\tau, t)$, entre chaque j ème antenne d'émission et i ème antenne de réception sous forme d'une matrice de dimension $M_R \times M_T$ comme suite:

$$H(\tau, t) = \begin{bmatrix} h_{1,1}(\tau, t) & h_{1,2}(\tau, t) & \dots & h_{1,M_T}(\tau, t) \\ \vdots & \ddots & & \vdots \\ h_{M_R,1}(\tau, t) & h_{M_R,2}(\tau, t) & \dots & h_{M_R,M_T}(\tau, t) \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

Alors, on peut écrire l'équation (2.18) sous la forme :

$$r(t) = H(\tau, t) * S(t) \quad (\text{II.20})$$

Où $r(t)$ et $s(t)$ sont définis respectivement dans les équations (II.19) et (II.20)

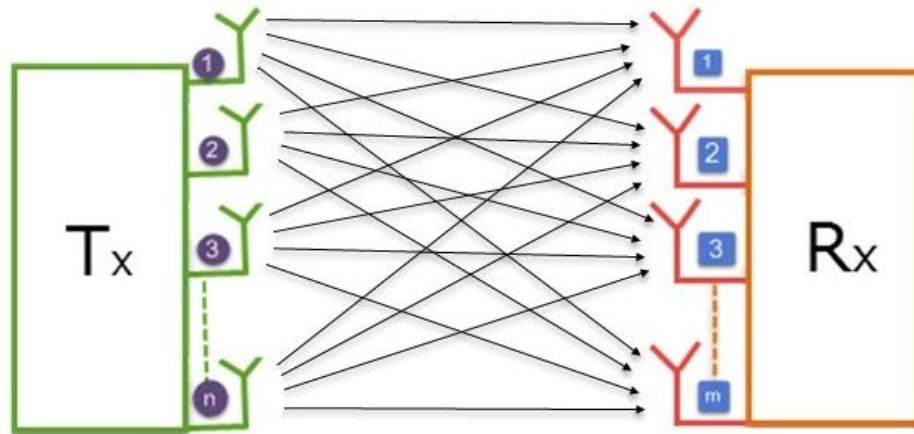


Figure (II.12) : modèle du canal MIMO.

II.8 Codage espace-temps STBC

Le codage espace-temps en bloc STBC (Space-Time Bloc Coding) a été présenté pour la première fois par Alamouti en 1998. Cette approche prend avantage des phénomènes de propagations multi-trajets, dans le but d'améliorer l'efficacité spectrale des systèmes MIMO. Le principe consiste à introduire une redondance d'information entre deux antennes d'émission et améliorer ainsi la robustesse du système pour une même puissance d'émission mais sans gagner du débit. Alamouti a présenté son code sur les systèmes MISO (2x1) et MIMO (2x2). Le codage est fait en prenant en compte la dimension spatiale et temporelle d'où son nom [29].

II.8.1 Système MISO avec codage STBC [34]

On considère un système MISO avec deux antennes en émission et une seule en réception. Dans le premier temps symbole t , les antennes d'émission T_{x1} et T_{x2} envoient, respectivement, les symboles S_1 et S_2 . À temps symbole d'après $t+T$, les symboles $-S_2^*$ et S_1 sont émis, où $*$ représente l'opération du complexe conjuguée. Le schéma d'un codage espace-temps appliqué à un système MISO avec deux Antennes en émission et une seule en réception est illustré sur la figure suivante :

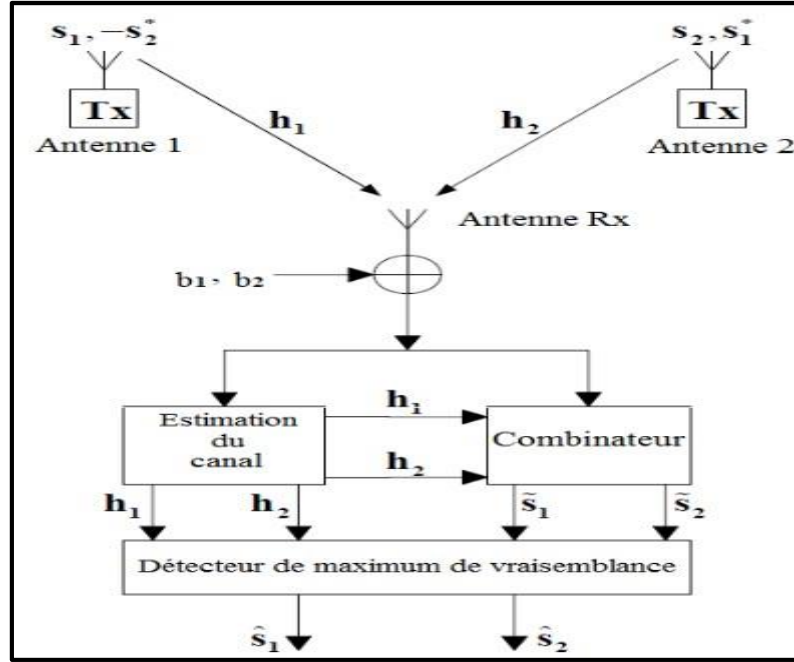


Figure (II.13) : Schéma d'un système MISO 2x1 avec codage STBC.

Supposant que les canaux entre les deux antennes d'émission et l'antenne de réception sont non sélectifs en fréquence durant la transmission de deux symboles consécutifs. Alors les canaux peuvent s'exprimer comme [31]

$$\mathbf{h}_1(t) = \mathbf{h}_1(t + T) = \mathbf{h}_1 = \alpha_1 e^{j\theta_1} \quad (\text{II.21})$$

$$\mathbf{h}_2(t) = \mathbf{h}_2(t + T) = \mathbf{h}_2 = \alpha_2 e^{j\theta_2} \quad (\text{II.22})$$

Et les signaux reçus au temps t et au temps $t+T$ peuvent s'exprimer comme

$$\mathbf{r}_1 = \mathbf{r}_1(t) = \mathbf{r}(t) = \mathbf{h}_1 \mathbf{S}_1 + \mathbf{h}_2 \mathbf{S}_2 + \mathbf{b}_1 \quad (\text{II.23})$$

$$\mathbf{r}_2 = \mathbf{r}_2(t) = \mathbf{r}(t + T) = -\mathbf{h}_1 \mathbf{S}_2^* + \mathbf{h}_2 \mathbf{S}_1^* + \mathbf{b}_2 \quad (\text{II.24})$$

Où b_1 et b_2 sont des variables aléatoires complexes qui représentent le bruit dans le récepteur

Le combinateur reçoit les signaux \mathbf{r}_1 et \mathbf{r}_2 avec l'estimation des canaux et construit les relations suivantes

$$S'1 = h_1 * r_1 + h_2 r_2 * \quad (\text{II.25})$$

$$S'2 = h_2 * r_1 + h_1 r_2 * \quad (\text{II.26})$$

II.8.2 Système MIMO avec codage STBC

Dans ce cas, le traitement appliqué à l'antenne de réception dans le cas MIMO 2x2 est appliqué à chacune des deux antennes de réception. Toutefois, comme on a deux antennes à la réception, au lieu d'une seule, le nombre de canaux et de signaux reçus sera doublé par rapport à la dernière configuration. Les notations de différents canaux et les notations des signaux reçus sont présentés, respectivement, par les tableaux (1) et (2).

Tableau (II.1): Notations de différents canaux d'un système MIMO 2x2 avec codage d'Alamouti.

	Antenne RX1	Antenne RX2
Antenne TX1	$h_1 = \alpha_1 e^{j\theta_1}$	$h_3 = \alpha_3 e^{j\theta_3}$
Antenne TX2	$h_2 = \alpha_2 e^{j\theta_2}$	$h_4 = \alpha_4 e^{j\theta_4}$

Tableau (II.2): Notations des signaux reçus d'un système MIMO 2x2 avec codage d'Alamouti.

	Antenne RX1	Antenne RX2
Temps t	r1	r3
Temps t+T	r2	r4

Le schéma d'un codage espace-temps appliqué à un système MIMO avec deux antennes en émission et en réception est illustré sur la figure suivante :

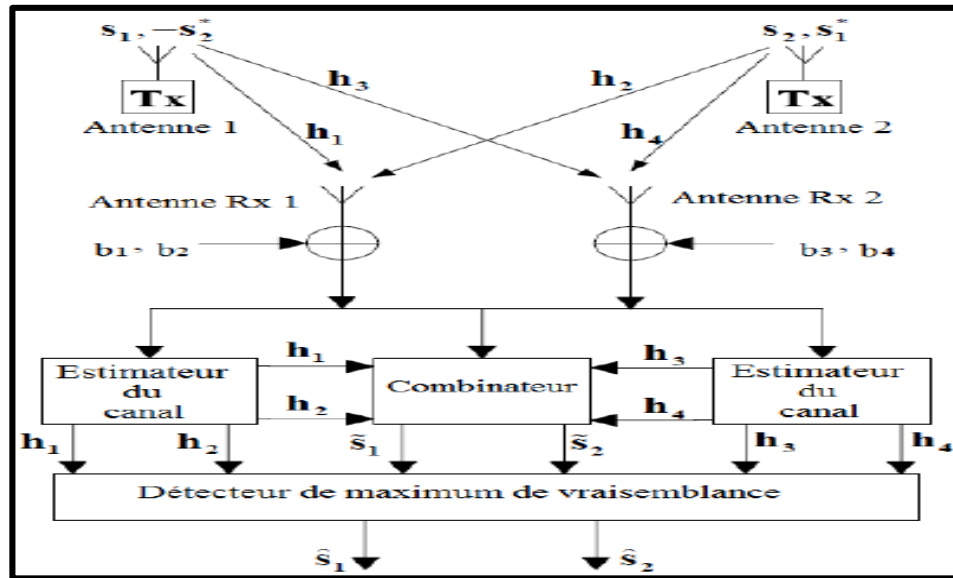


Figure (II.14) : Schéma d'un système MIMO 2x2 avec codage STBC [34].

On peut écrire les signaux reçus présentés dans le tableau (2) comme suit [31] :

$$r_1 = h_1 S_1 + h_2 S_2 + b_1 \quad (\text{II.27})$$

$$r_2 = -h_1 S_2^* + h_2 S_1^* + b_2 \quad (\text{II.28})$$

$$r_3 = h_3 S_1 + h_4 S_2 + b_3 \quad (\text{II.29})$$

$$r_4 = -h_3 S_2^* + h_4 S_1^* + b_4 \quad (\text{II.30})$$

Où b_k avec $k=1, 2, 3, 4$, sont des variables aléatoires complexes qui représentent le bruit dans le récepteur.

Le combineur reçoit les signaux reçus avec l'estimation des canaux et construit les relations suivantes [31]

$$S'1 = h_1 * r_1 + h_2 r_2^* + h_3 * r_3 + h_4 r_4^* \quad (\text{II.31})$$

$$S'2 = h_2 * r_1 + h_1 r_2^* + h_4 * r_3 + h_3 r_4^* \quad (\text{II.32})$$

Les signaux combinés $S'1$ et $S'2$ seront, ensuite, envoyés au détecteur de maximum de Vraisemblance dans le but d'estimer les symboles transmis S_1 et S_2 .

II.8.3 Système MIMO avec Codage (STBC-OFDM) :

Les deux figures suivantes Figure (II.16) et Figure (II.17) illustrent la manière dont la technique de codage STBC est combinée avec l'OFDM pour un système MIMO-OFDM (2x2).

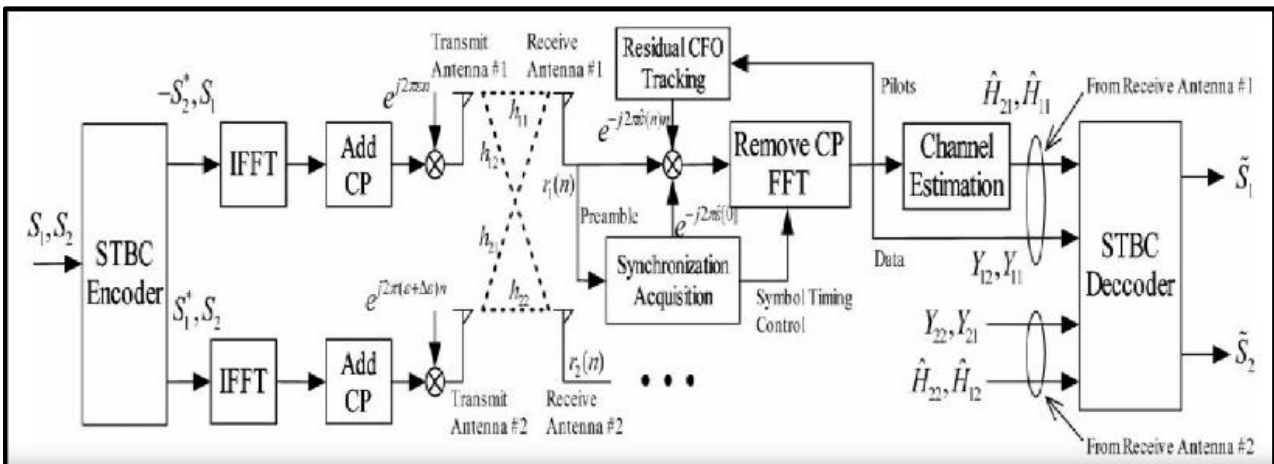


Figure (II.15): Transmission STBC-OFDM.

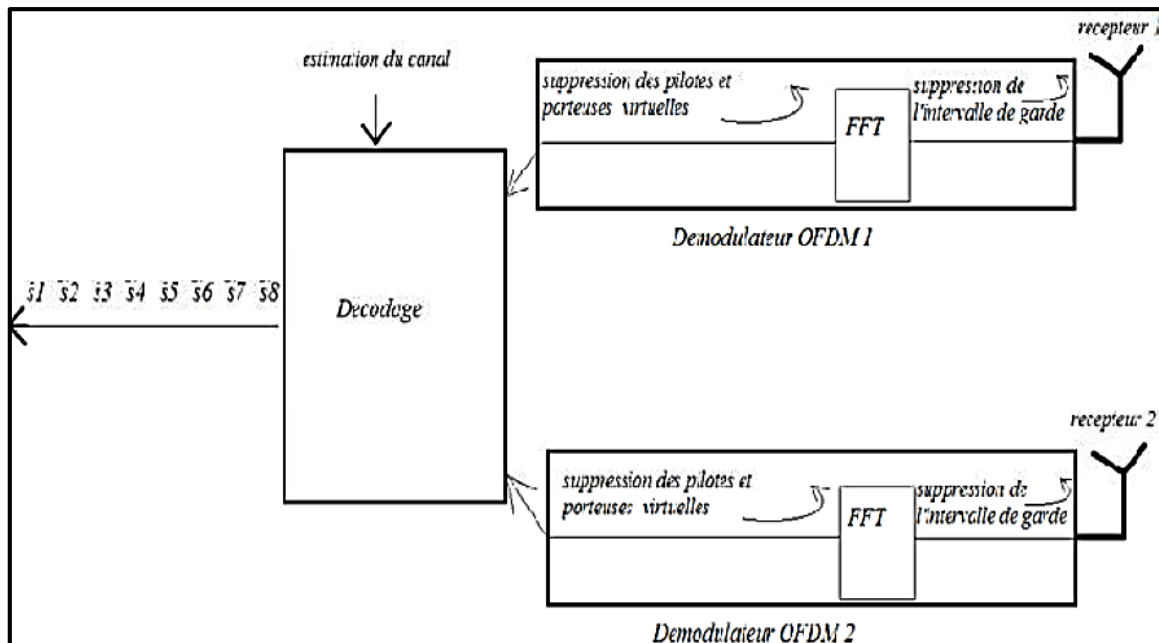


Figure (II.16) : Réception et décodage.

Comme il est illustré dans la figure (II.16) et la figure (II.17), le bloc de symboles à transmettre subit un codage STBC qui le transforme en deux blocs de symboles différents, dont chacun est envoyé vers un modulateur OFDM qui lui ajoute des pilotes et des sous-porteuses virtuelles, puis il lui fait une transformation de Fourier rapide inverse (IFFT). Finalement un intervalle de garde (préfixe cyclique) est ajouté au début du bloc de symboles avant de le transmettre sur l'un des émetteurs. Au niveau de chaque récepteur, les deux blocs transmis sont reçus, dont chacun est envoyé vers un démodulateur OFDM qu'il lui enlève l'intervalle de garde, puis, il lui fait une transformation de Fourier rapide (FFT), ensuite, il lui enlève les pilotes et les sous porteuses virtuelles. Enfin, les deux résultats issus des deux démodulateurs sont envoyés vers le décodeur qui assure le décodage en exploitant l'estimation du canal.

II.9 Avantages et inconvénients de l'OFDM [19]

Nous pouvons citer les avantages suivants :

- Une haute efficacité spectrale.
- Une réalisation digitale simple par utilisation de la FFT et l'IFFT.
- Réduction de la complexité des récepteurs due à la possibilité d'éviter les IES et IEP par insertion d'un intervalle de garde.

- 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.

Les inconvénients de la technique OFDM peuvent être énumérés ci-dessous :

- Les signaux multi-porteuses ont un coefficient du facteur de crête (PAPR) élevé, ce qui nécessite l'utilisation des amplificateurs à haute linéarité.
- La perte dans l'efficacité spectrale due à l'addition d'un intervalle de garde.
- La sensibilité à l'effet Doppler est supérieure par rapport aux systèmes de modulation mono-porteuse.
- Si le récepteur OFDM est mal synchronisé temporellement, un phénomène d'IES peut intervenir dégradant considérablement les performances du système global.

II.10 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, les avantages et les inconvénients de l'OFDM sont présentés, ainsi que les détails de sa mise en œuvre et son articulation avec la technique MIMO.

Les systèmes combinés MIMO-OFDM utilisant la technique de codage espace-temps en bloc STBC (Space Time Bloc Coding) sont plus robuste face aux évanouissements du canal multi-trajets, donc une bonne qualité de service. Ces systèmes sont adoptés par plusieurs standards IEEE, par exemple, le standard IEEE 802.16 2004 (WiMax fixe).

CHAPITRE 03 :

Résultats de simulation de la
technique MIMO-OFDM

Chapitre III. Résultats de simulation de la technique MIMO-OFDM

III.1 Introduction

La conception des systèmes de communication à base de l'OFDM et MIMO-OFDM nécessite des calculs de simulation, très proches de la réalité. A cet égard, nous présenterons dans ce chapitre les résultats de simulation pour un système MIMO-OFDM. Nous détaillerons et expliquerons les différentes étapes à suivre dans la conception d'émetteurs et de récepteurs OFDM et MIMO-OFDM. Les mesures de performances des systèmes seront présentées en étudiant les constellations des différents types de modulations numériques ainsi que le calcul de taux d'erreur.

III.2 Simulation d'un Système OFDM dans Simulink

Afin d'étudier les performances du système OFDM, nous allons faire des simulations sous l'environnement Simulink de MATLAB. Nous commençons par présenter les différents blocs constituant ce système, nous illustrons aussi leur utilité pour le bon fonctionnement du système à base de l'OFDM. Nous donnons aussi quelques détails sur les paramètres prépondérants tel que la taille de FFT, la valeur du préfixe cyclique et le nombre d'antennes dans un système MIMO. Le schéma bloc d'un système OFDM est illustré à la figure suivante.

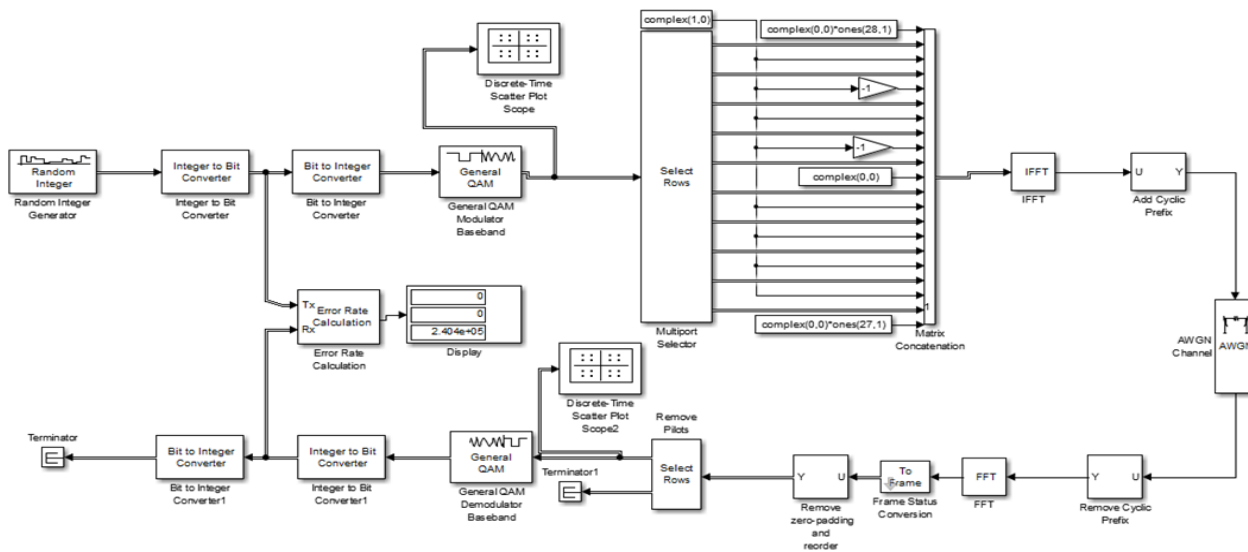


Figure (III.1) : Schéma bloc d'un système OFDM.

III.3 Emetteur OFDM

Nous présentons le schéma bloc d'un émetteur OFDM à la figure (III.2).

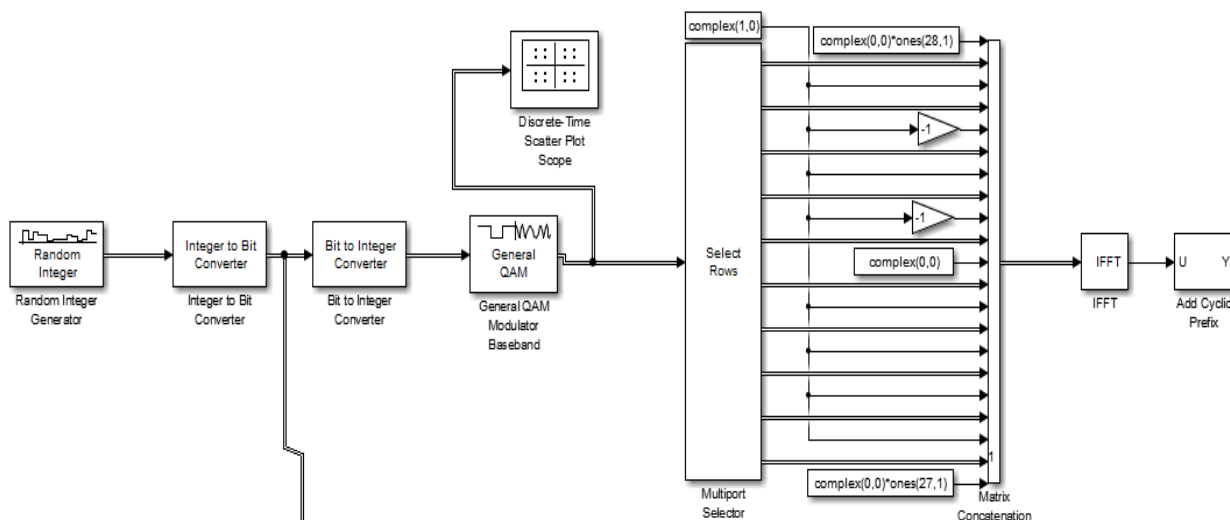


Figure (III.2) : Schéma bloc d'un émetteur OFDM.

Dans la partie émettrice, nous générons une série binaire aléatoire, ces 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. Par la suite une transformée de Fourier rapide inverse (IFFT) sera appliquée à chaque entrée, 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. Nous présenterons la description des blocs essentiels.

❖ Random Integer Generator

Le générateur de bits aléatoires constitue le premier bloc de l'émetteur OFDM. Ce bloc génère des nombres aléatoires d'entiers en série dans l'intervalle $[0, M-1]$. Les paramètres de ce bloc sont sélectionnés comme suit :

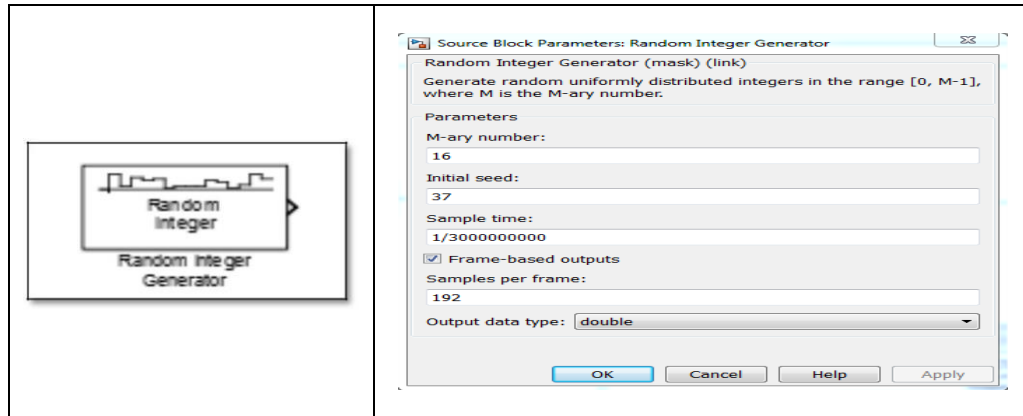


Figure (III.3) : Paramètres du bloc Radom Intégrer Generator.

❖ **Integer to bit converter**

Ce blocs converti chaque valeur entière en un groupe de M bits numériques ; la longueur du vecteur de sortie résultant étant égale à M fois la longueur du vecteur d'entrée.

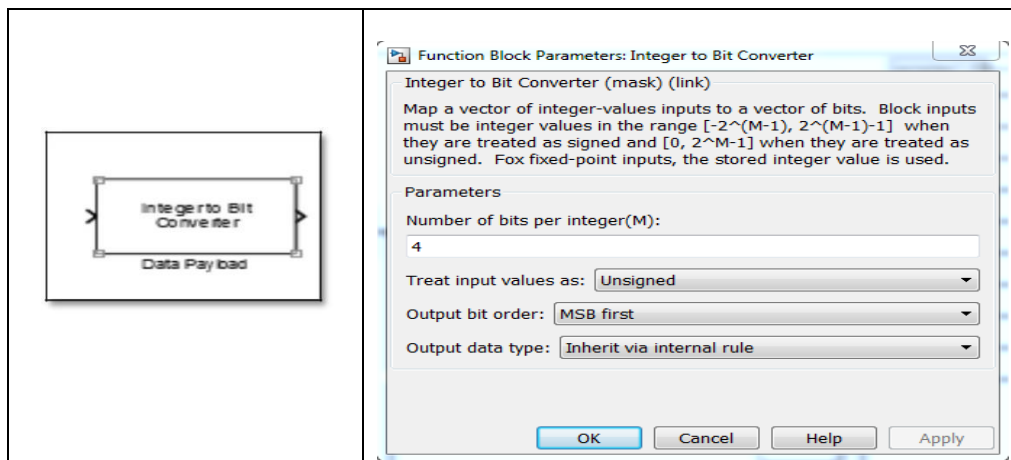


Figure (III.4) : Paramètres du bloc intègre to bit convertir.

❖ **Bit to intègre Convertir**

Il est utilisé pour inverser l'opération du bloc intègre to bit convertir, en convertissant les bits de données en nombres entiers avec le même nombre de bits pour chaque nombre entier come dans l'étape précédente.

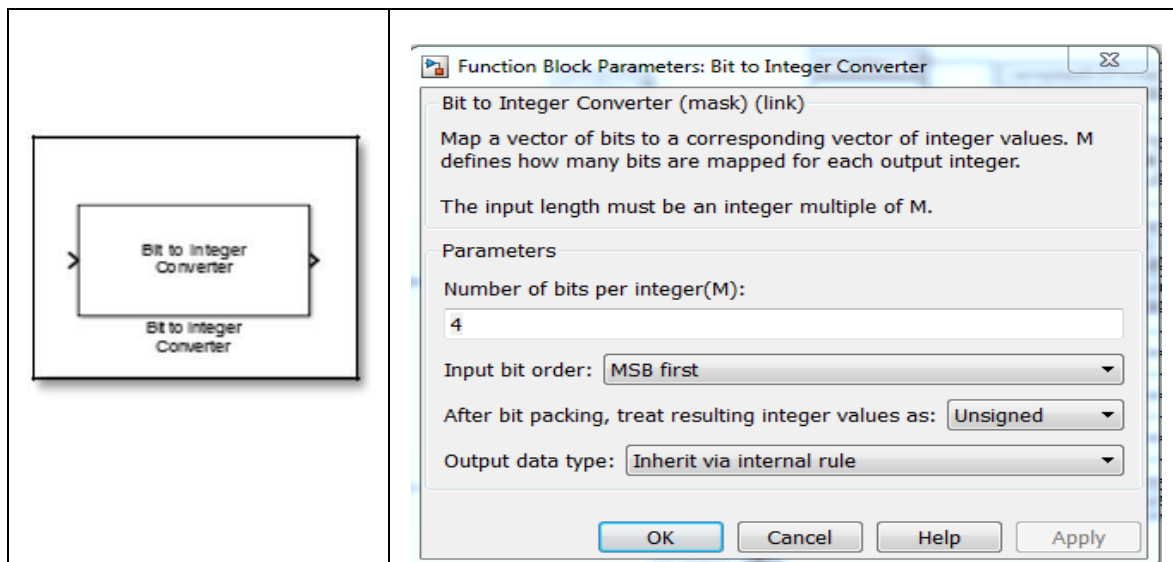


Figure (III.5) : Paramètres du bloc Bit to intègre Convertir.

❖ General QAM Modulator

Ce bloc génère la modulation d'amplitude en quadrature M-ary avec une constellation rectangulaire.

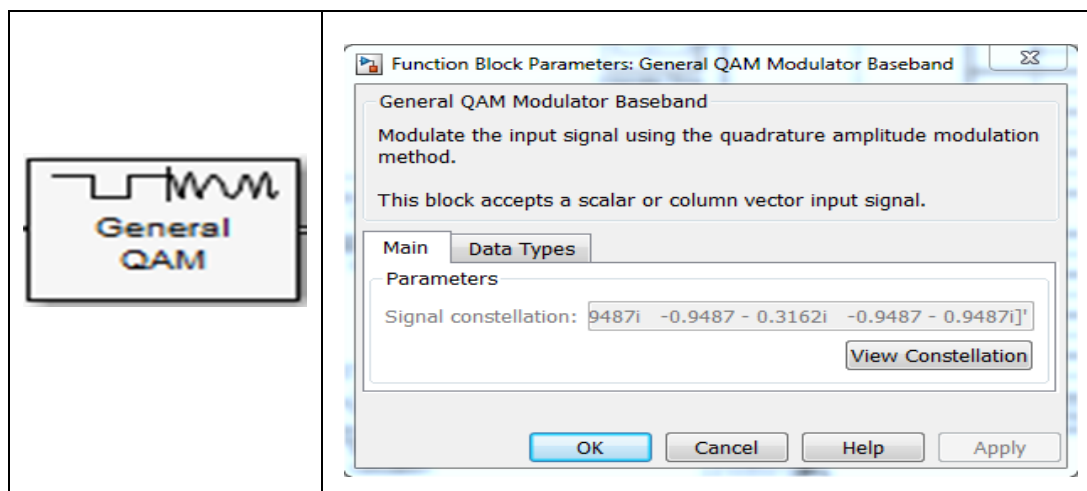


Figure (III.6) : Paramètres du bloc général QAM Modulator.

❖ Bloc Multiport Séléctor

Ce bloc réalise l'insertion des différentes porteuses à savoir les porteuses dédiées aux données de l'utilisateur et celles réservées à d'autres fins.

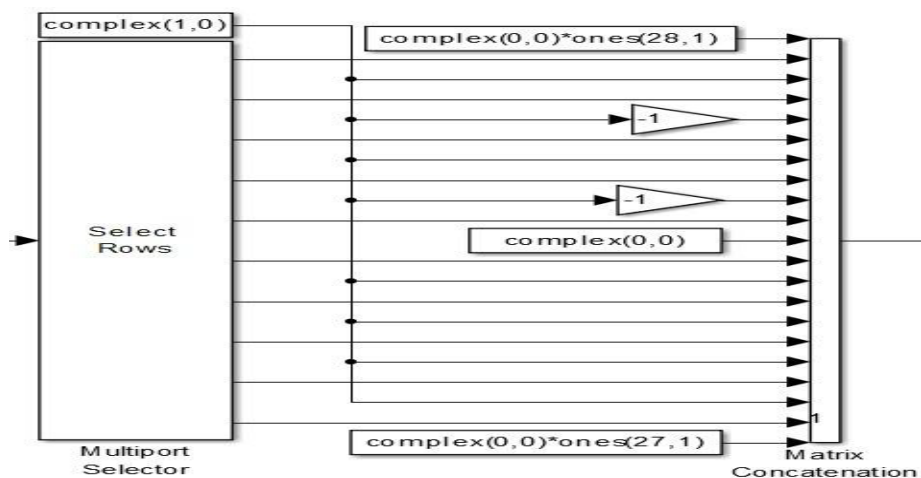
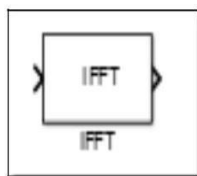


Figure (III.7) : Insertion des sous-porteuses.

❖ **Bloc IFFT :**



C'est le bloc le plus important de l'émetteur de transmission OFDM car il permet de moduler d'une manière aisée et efficace les données sur N sous-porteuses orthogonales. La sortie IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) est essentiellement la somme de toutes les N ondes sinusoïdales orthogonales. Ci-dessous on illustre la

sélection des paramètres de ce Bloc.

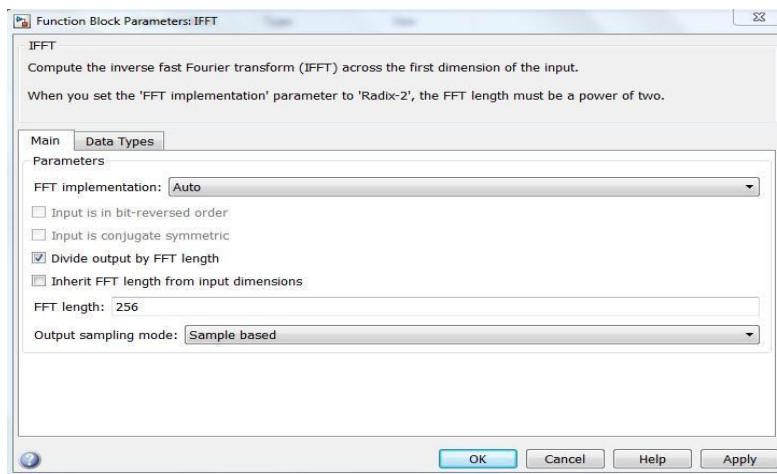


Figure (III.8) : Paramètres du bloc IFFT.

❖ Cyclique Préfix

Le préfixe cyclique est une partie importante du signal OFDM total puisqu'il agit comme un intervalle de garde entre chaque symbole. L'intervalle ainsi introduit permet de réduire, voire d'éliminer complètement, les effets de l'interférence des symboles.

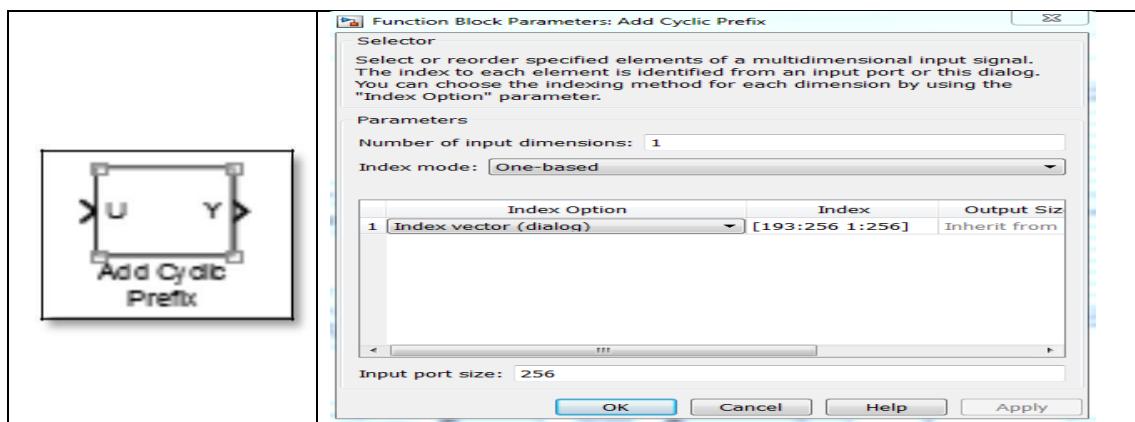


Figure (III.9) : Paramètres du bloc Add Cyclique Préfix.

III.4 Récepteur OFDM

La partie réception comprend généralement les opérations inverses de la partie transmission. Nous présentons le schéma bloc d'un émetteur OFDM à la figure ci-dessous.

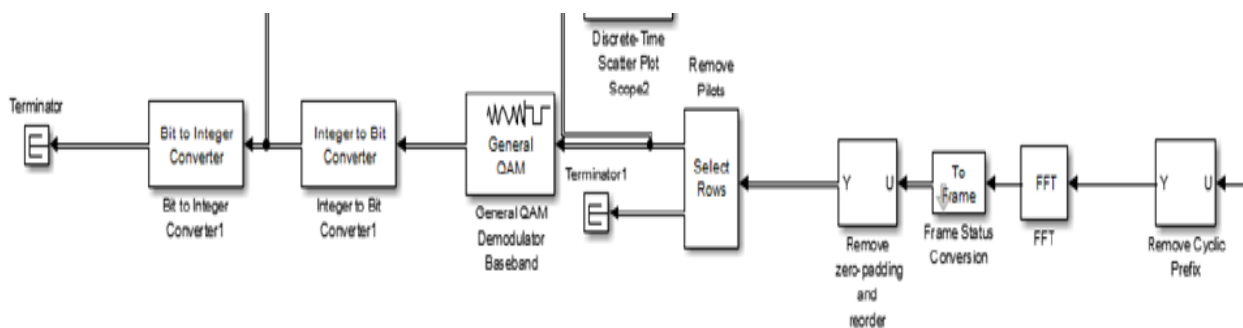


Figure (III.10) : Schéma bloc d'un récepteur OFDM.

Le récepteur réalise les opérations l'inverses de ce que fait l'émetteur. A la réception, on obtient un train d'informations dont la chance de correspondre au signal original transmis est déterminée par l'efficacité du système OFDM à réduire les perturbations du canal et les erreurs de transmission.

❖ **Remove cyclic prefix**

Dans ce bloc on supprime le préfixe cyclique ajouté pendant la transmission.

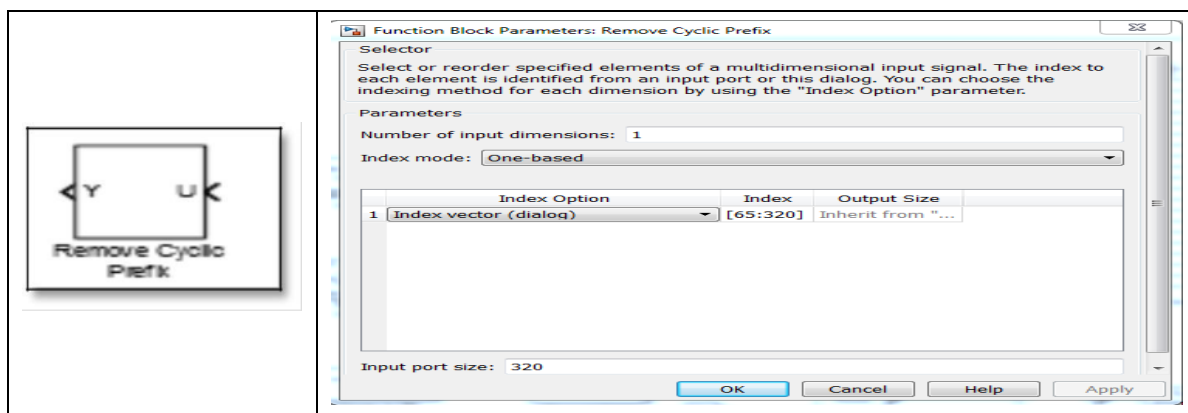


Figure (III.11) : Paramètres du bloc Remove Cyclique Préfix.

❖ **FFT**

Le signal OFDM reçu est démodulé au moyen du bloc FFT au niveau du récepteur. La sortie de la FFT devrait idéalement être les symboles originaux fournis à l'IFFT de l'émetteur.

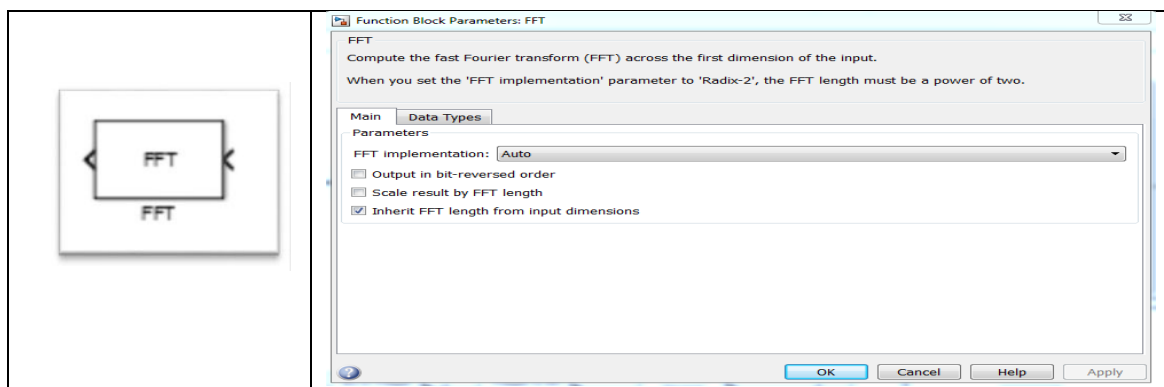


Figure (III.12): Paramètres du bloc FFT.

❖ **Frame Conversion**

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

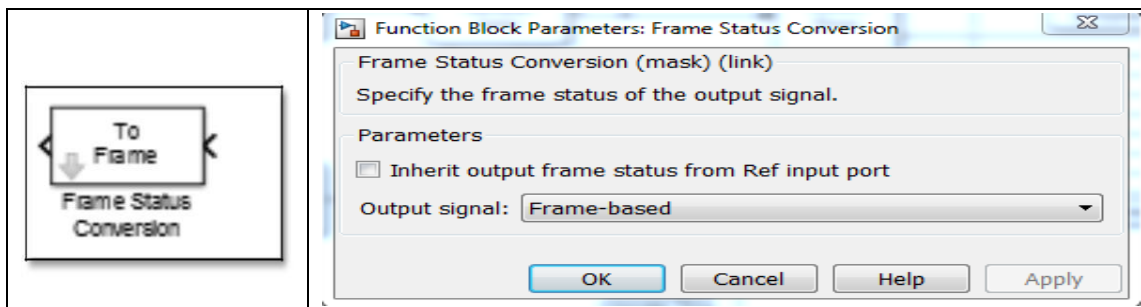


Figure (III.13) : Paramètres du bloc Frame Conversion.

❖ **Remove zero-padding**

Pour supprimer les zéros de remplissage qui ont été ajoutés à la transmission OFDM.

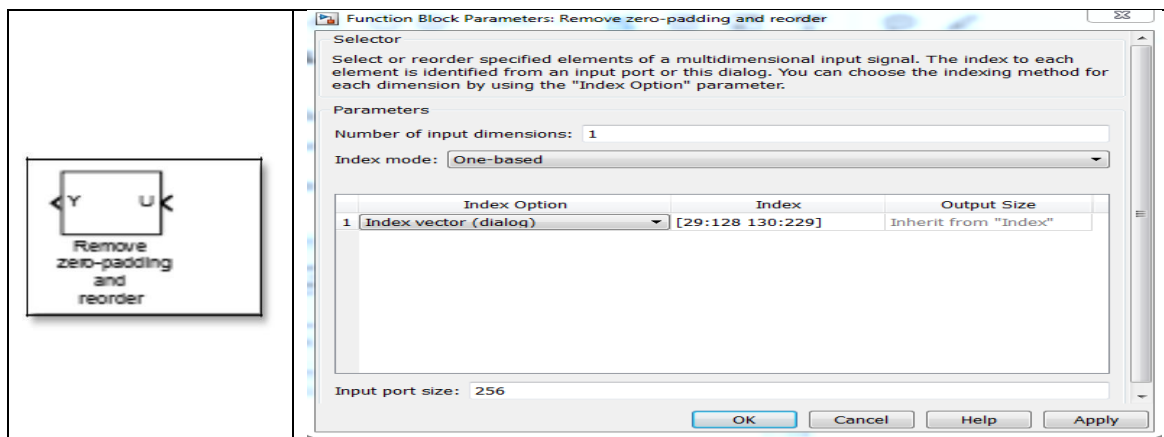


Figure (III.14) : Paramètres du bloc zéro-pudding.

❖ **Select Rows**

Au moyen de ce bloc les symboles des sous-porteuses pilotes et la sous-porteuse centrale de la porteuse ont été retirés de la matrice de données.

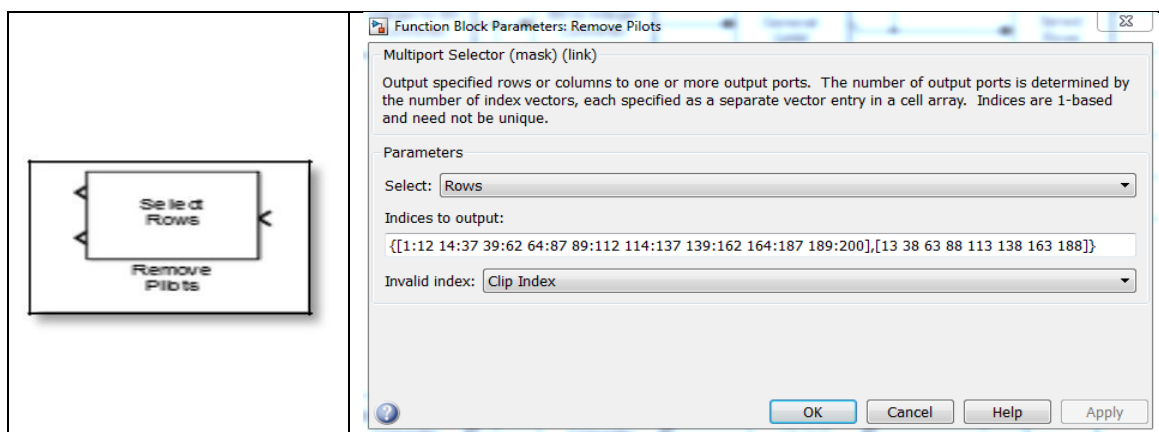


Figure (III.15) : Paramètres du bloc Remove Pilots.

❖ QAM démodulateur

Ce bloc réalise l'opération de démodulation de type QAM, ses paramètres sont introduits comme suit.

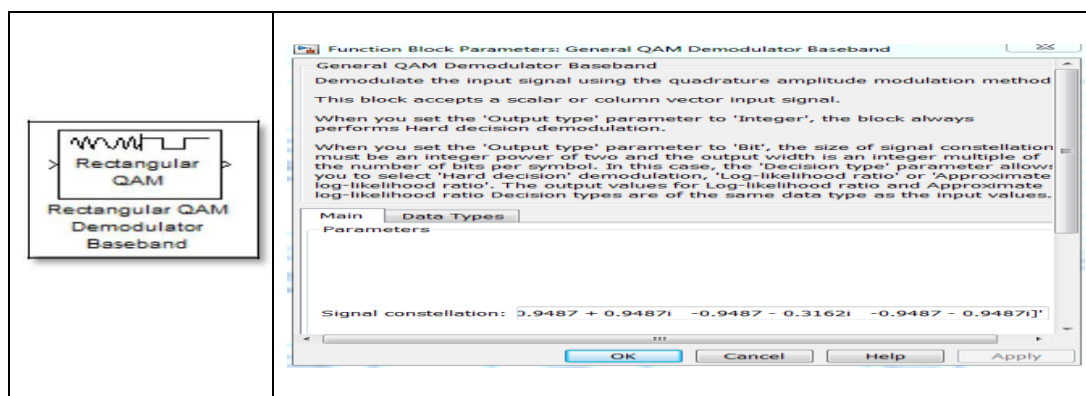


Figure (III.16) : Paramètres du bloc QAM démodulateur.

❖ Terminator

Le bloc de terminaison est utilisé pour fermer les blocs sans ports de sortie connectés à d'autres blocs.

III.5 Simulation des différentes structures d'un Système MIMO-OFDM

Dans ce qui suit nous simulons les différentes associations pour le système OFDM multi entrées multi sorties.

III.5.1 Structure SISO-OFDM

La figure suivante présente le schéma bloc d'un système SISO-OFDM en présence d'un canal AWGN.

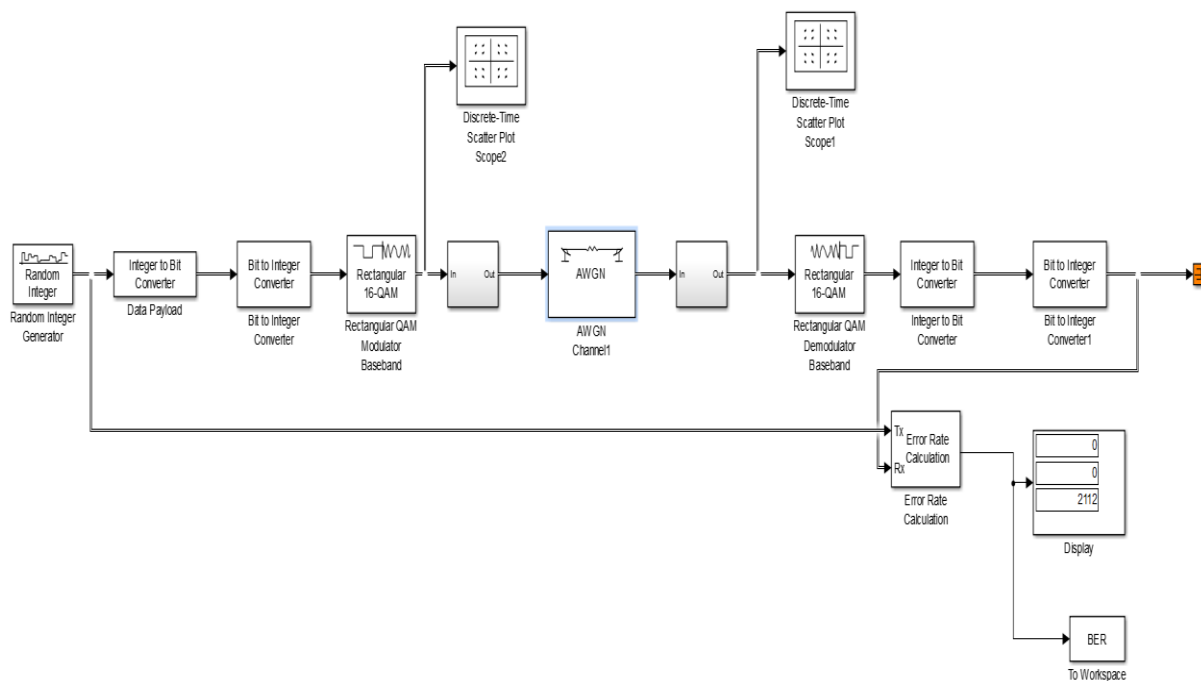


Figure (III.17) : schéma bloc du système SISO-OFDM.

Nous présentons les performances du système SISO-OFDM en examinant les constellations en sortie du démodulateur OFDM, pour différents type et nombre d'états de modulation en faisant varier le SNR.

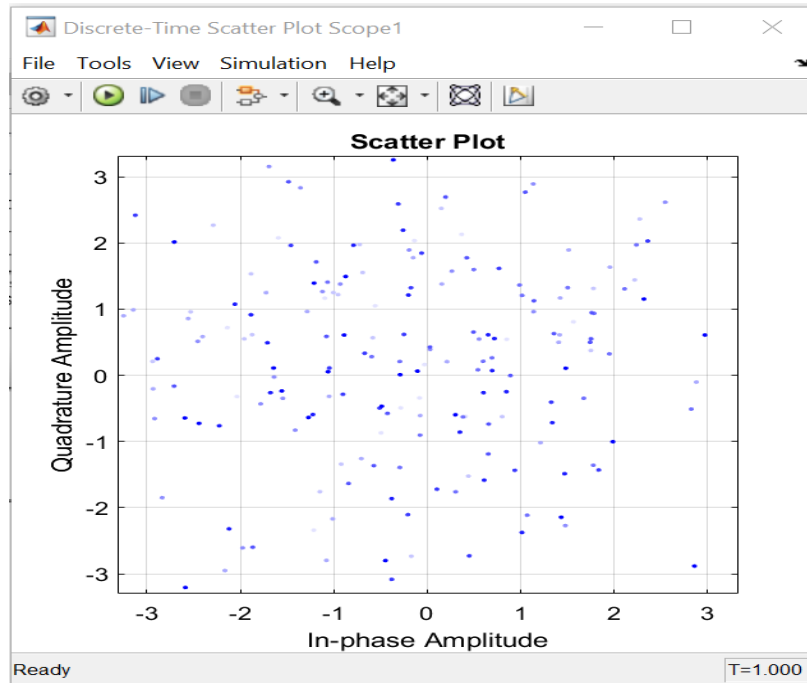


Figure (III.18) : Constellation 4 QAM en sortie d'un système SISO-OFDM SNR=10 dB.

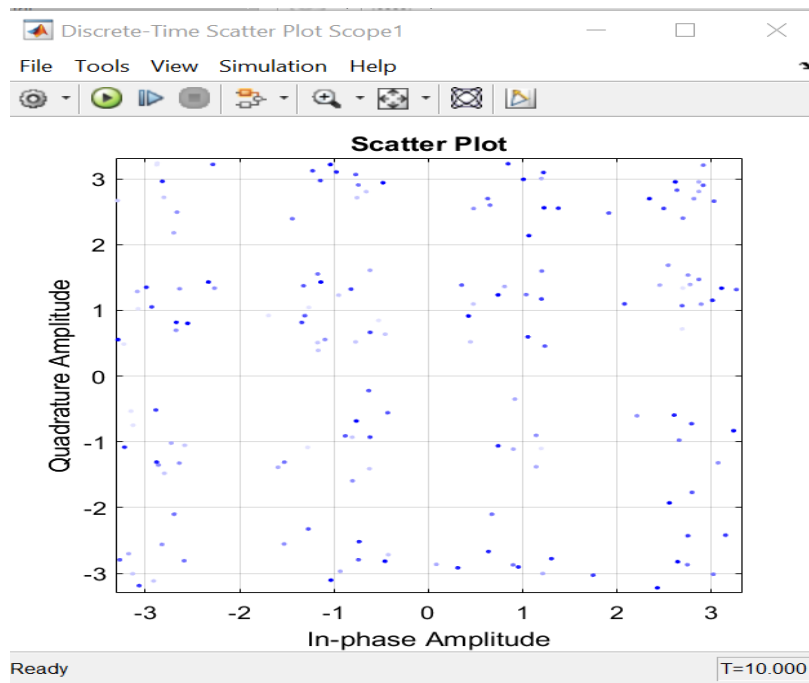


Figure (III.19) : Constellation 16 QAM en sortie d'un système SISO-OFDM SNR=15 dB.

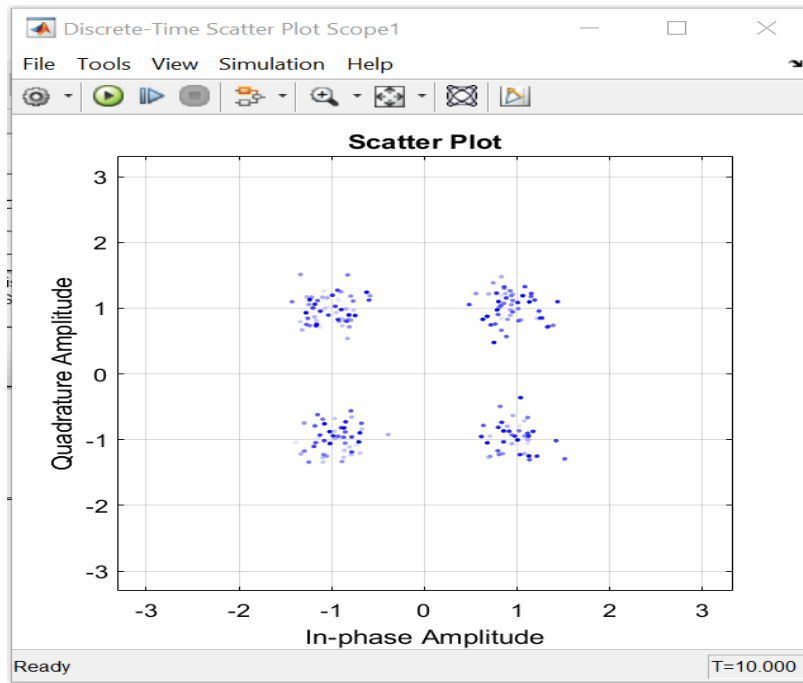


Figure (III.20) : Constellation 4 QAM en sortie d'un système SISO-OFDM SNR =25 dB.

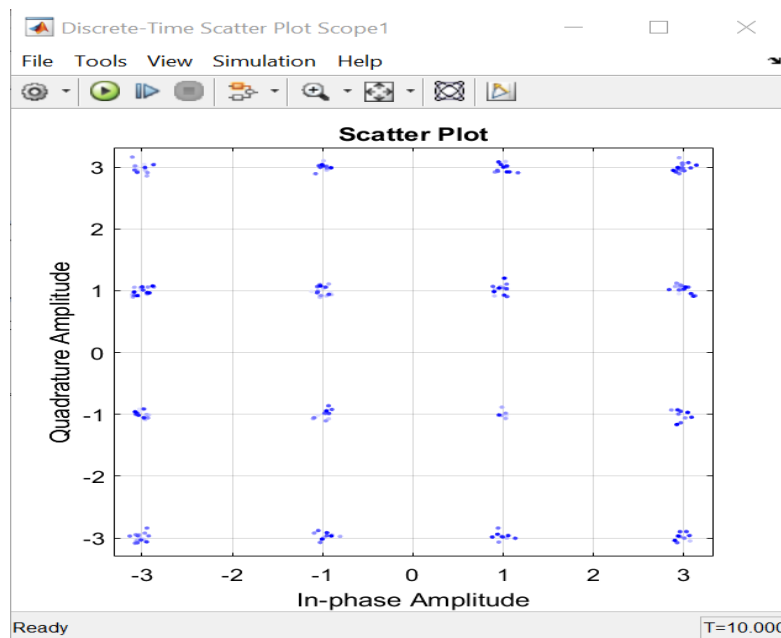


Figure (III.21) : Constellation 16 QAM en sortie d'un système SISO-OFDM SNR=25Db.

A travers les figures 3.18-3.21

Nous présentons aussi les performances du système SISO-OFDM en examinant les courbes du taux d'erreur par bit BER en considérant la modulation QAM à 4,16 et 64 états.

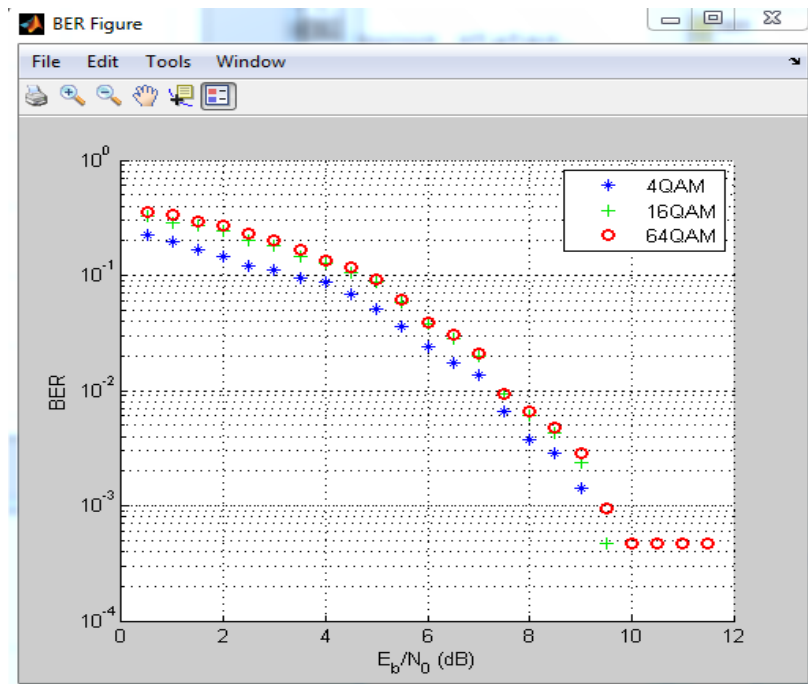


Figure (III.22) : Taux d'erreur BER du système SISO-OFDM.

Nous remarquons dans les exemples précédents que le résultat et la qualité des modifications varient en fonction de la valeur du SNR (Rapport Signal/Bruit). $SNR \geq 25\text{dB}$

III.5.2 Structure d'un système MISO-OFDM

Le modèle MISO-OFDM est représenté par la figure 3.23. Ce modèle contient des blocs supplémentaires par rapport à celui du modèle SISO-OFDM. Nous décrivons ces nouveaux blocs ci-dessous.

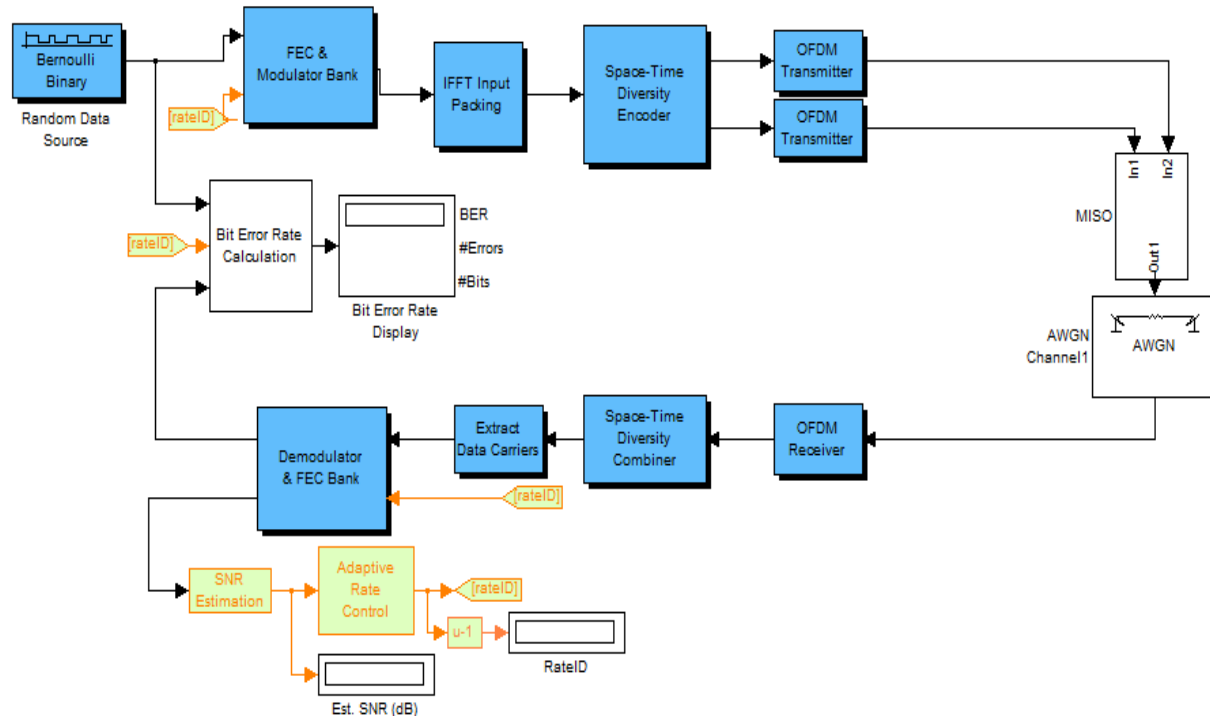


Figure (III.23) : Système MISO-OFDM.

III.5.3 Bloc de codage et de modulation

Le bloc ‘FEC & modulation Bank’ réalise un codage correcteur d’erreur ainsi et sélectionne un type de modulation approprié suivant le contexte de la transmission la figure (III.24). Le codage correcteur d’erreur nommé FEC pour (Forward Error Correction).

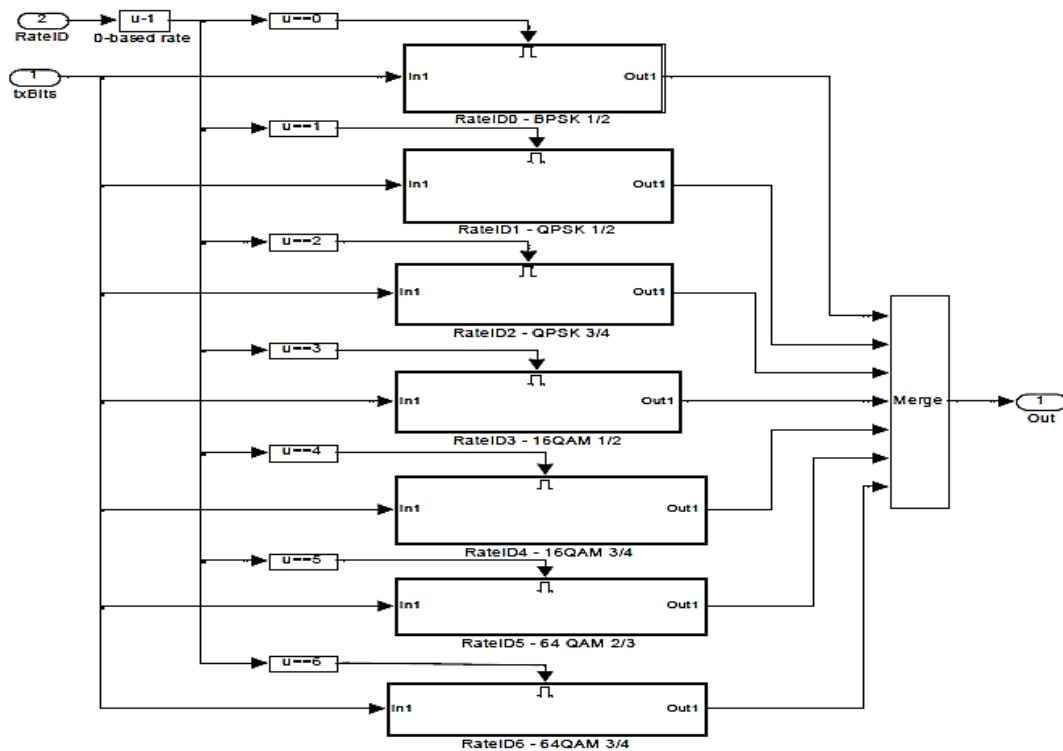


Figure (III.24) : FEC et Modulateur.

Les données rentrent en série au bloc de modulation ou elles seront ordonnées sous forme de constellations selon le type de modulation choisie (BPSK, QPSK, 16QAM et 64QAM). Les diagrammes de constellations de ces modulations sont décrits sur la figure suivante :

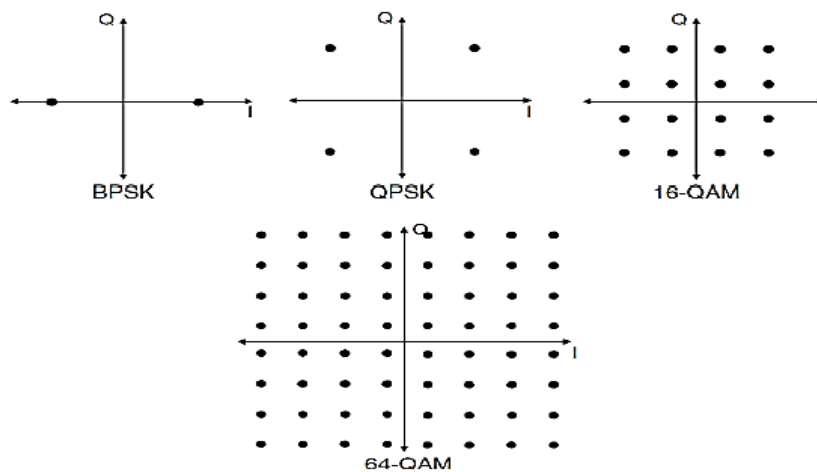


Figure (III.25) : Constellations de : BPSK, QPSK, 16QAM et 64QAM.

III.5.4 Bloc de décodage et de démodulation

Le bloc 'FEC et Démodulateur' est présenté par la figure (III.26) L'information est démodulée par un démodulateur correspondant.

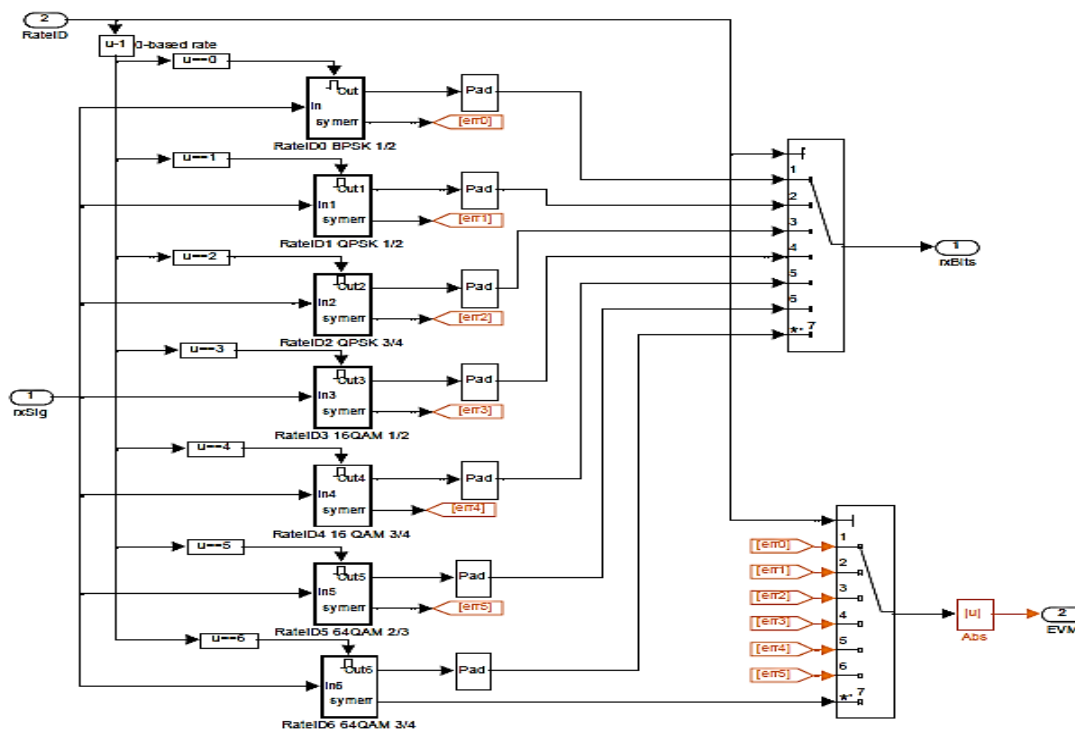


Figure (III.26) : FEC& Démodulateur.

III.5.5 Canal MISO à fading de Rayleigh

Le bloc présenté par la figure (III.27). Représente une simulation d'un canal MISO (2x1) à fading de Rayleigh.

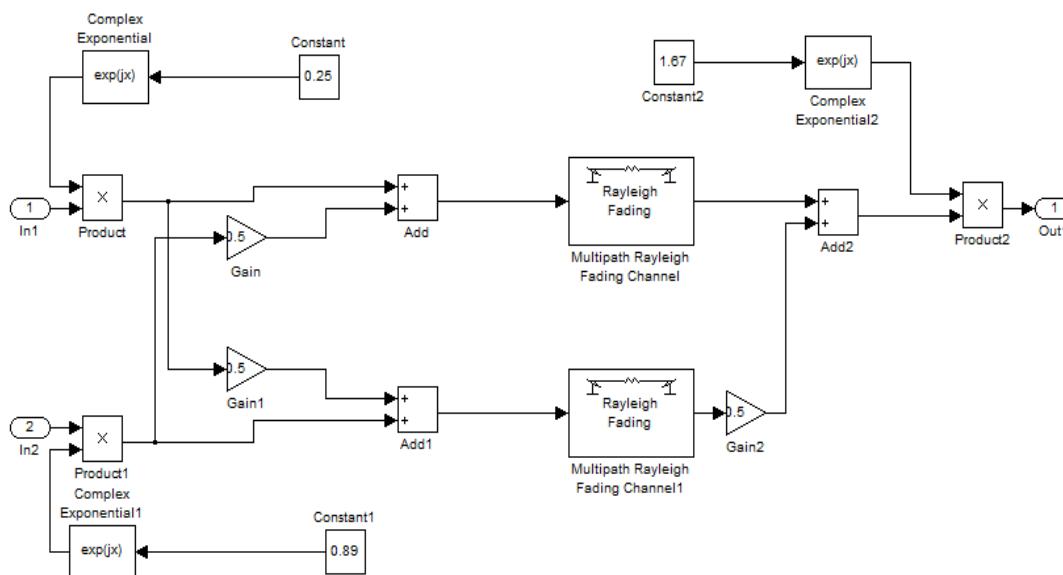


Figure (III.27) : Canal MISO à fading de Rayleigh.

La figure ci-dessous représente la constellation en sortie d'un système MISO-OFDM.

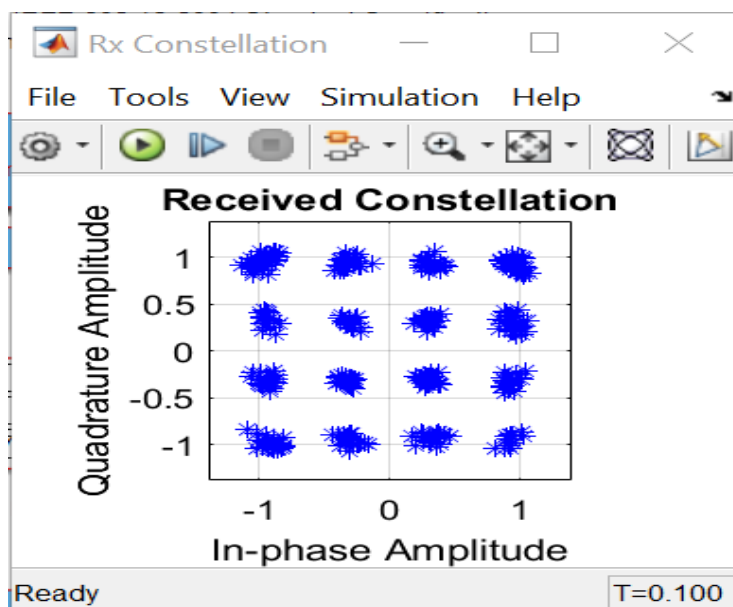


Figure (III.28) : Constellation 16 QAM en sortie d'un système MISO-OFDM SNR =25dB

III.6 Structure d'un système MIMO-OFDM

Le modèle MIMO-OFDM est présenté par la figure (III.29). Deux blocs sont modifiés par rapport au modèle MISO-OFDM, à savoir, le canal MIMO à fading de Rayleigh et Combinateur de diversité spatio-temporel.

mù

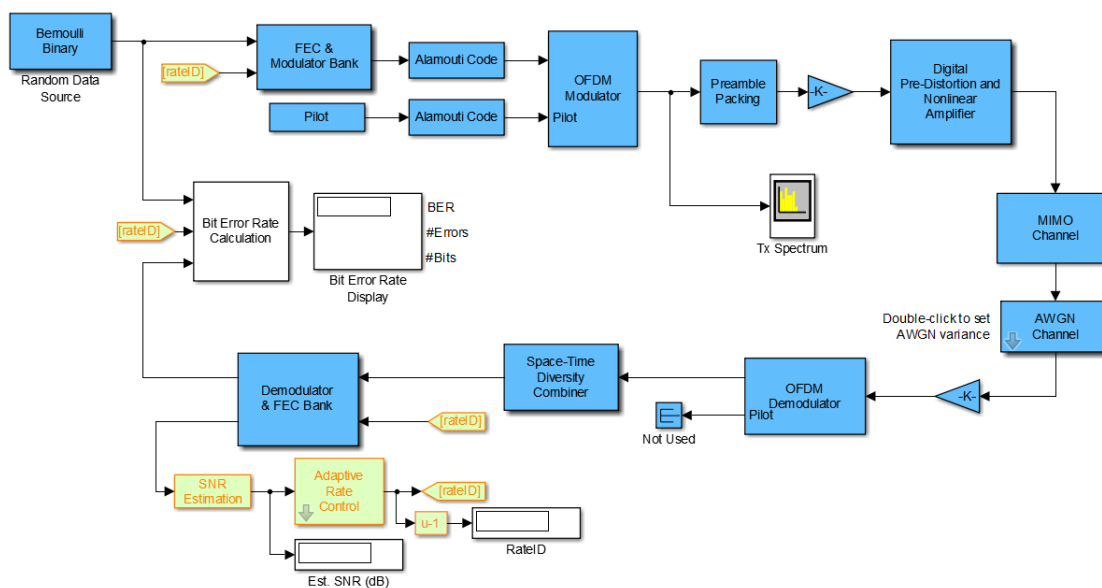


Figure (III.29) : Modèle MIMO-OFDM

III.6.1 Canal MIMO à fading de Rayleigh

Le bloc présenté par la figure 3.30 représente une simulation d'un canal MIMO (2x2) à fading de Rayleigh.

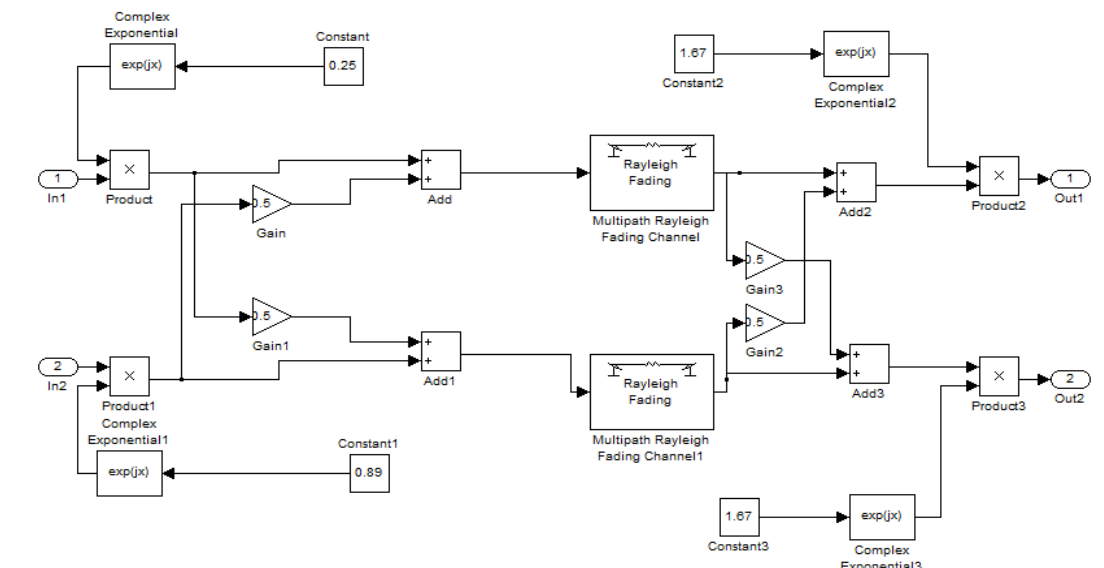


Figure (III. 30) : Canal MIMO à fading de Rayleigh.

III.6.2 Constellation BPSK en sortie d'un système MIMO-OFDM

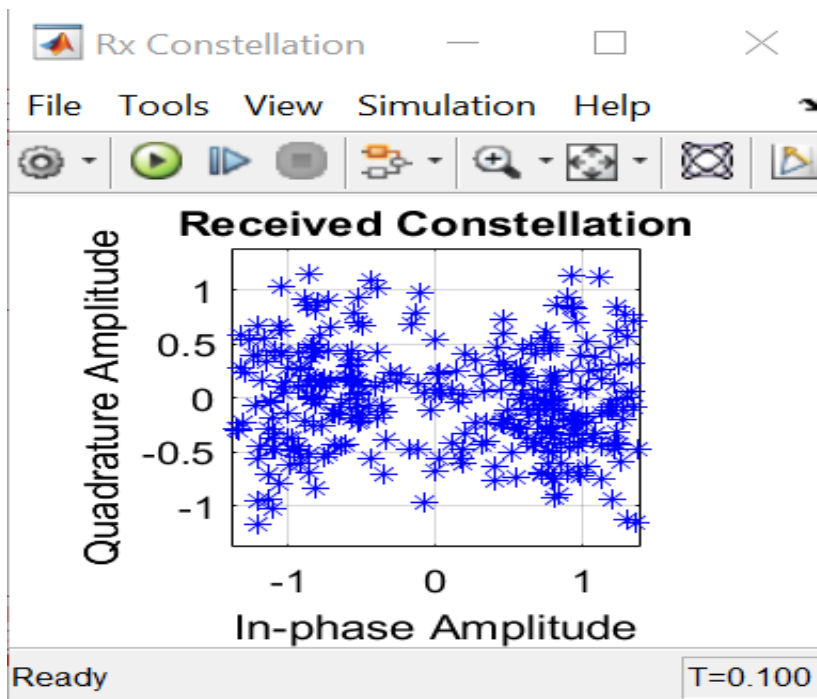


Figure (III. 31) : BPSK en sortie d'un système MIMO-OFDM.SNR=5 dB.

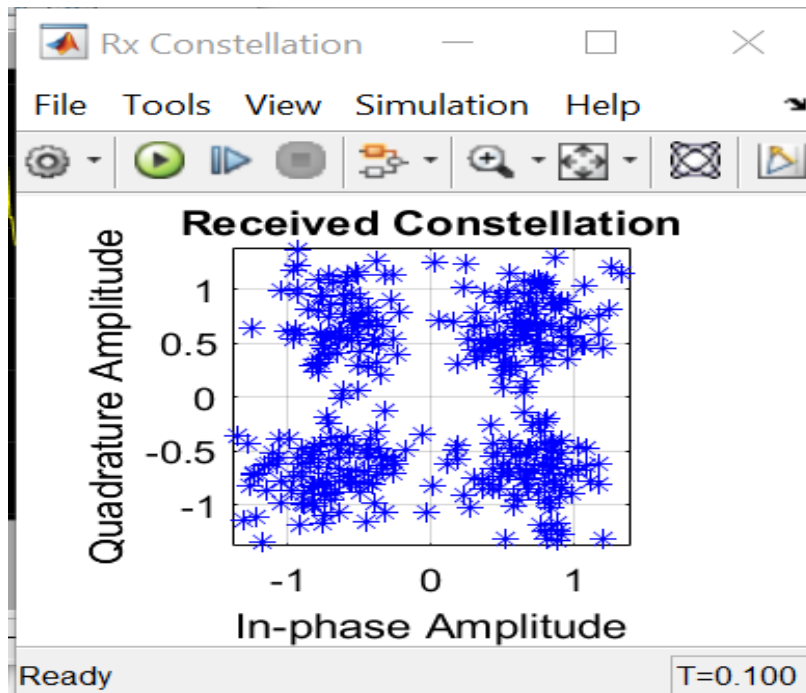


Figure (III.32) : 4QAM en sortie d'un système MIMO-OFDM.SNR=10 dB.

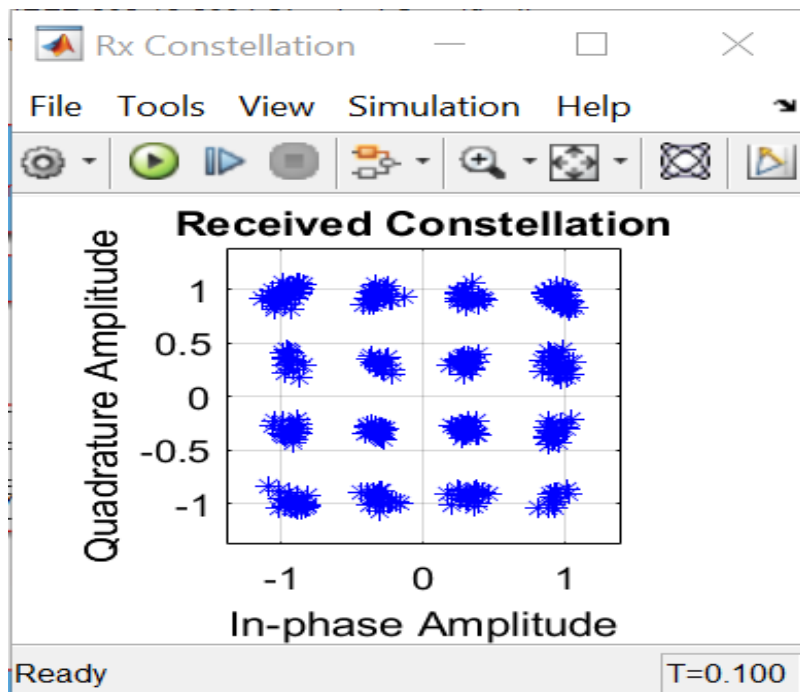


Figure (III.33) : 16QAM en sortie d'un système MIMO-OFDM.SNR=25dB.

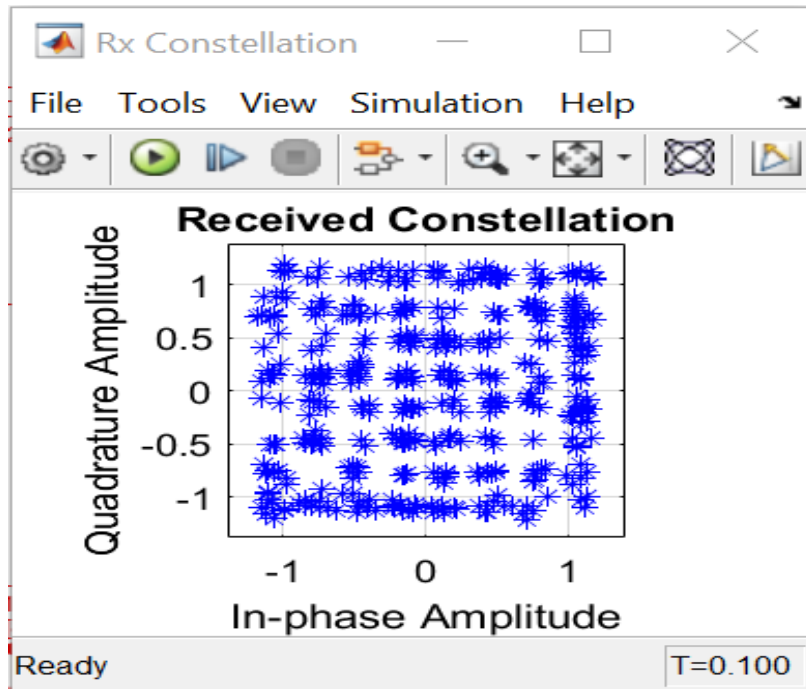


Figure (III.34) : 64 QAM en sortie d'un système MIMO-OFDM.SNR=35dB.

Nous remarquons dans les exemples précédents que le type de modulation change à mesure que nous modifions la valeur du SNR (Rapport Signal/Bruit) c'est-à-dire les conditions de la transmission ou l'environnement changent. Pour une faible valeur du rapport signal sur bruit SNR=5 dB, le système opte pour la Modulation PPSK qui est plus adapté pour cette situation. Au fur et à mesure que l'environnement de la transmission s'améliore ce qui se matérialise par une augmentation du SNR=10 dB Modulation le système bascule vers la modulation en quadrature QAM. Pour les valeurs normales du rapport signal sur bruit SNR =25 dB le système augmente l'état de la modulation vers 16 états pour la valeur du SNR=35 dB le système augmente davantage les états de la modulation vers 64 états.

Nous présentons dans le tableau ci-dessous le taux d'erreur par bit pour chaque type de modulation et pour chaque état.

Tableau (III.1) : Taux d'erreur pour différents types de modulation

SNR[dB]	Type de modulation	BER
5	BPSK	0.002468
10	4QAM	5.744 e-5
25	16QAM	0
35	64QAM	0

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les performances des systèmes SISO-OFDM, MISO-OFDM et MIMO-OFDM sous l'environnement SIMULINK de MATLAB.

Les Constituants des systèmes sont bien présentés et explicités, nous avons mis en évidence les performances de ces systèmes en terme des constellations des modulations suivant le contexte de la Transmission ainsi que les performances en taux d'erreur par bit.

Conclusion générale

Conclusion générale

Notre mémoire est consacré à l'étude des systèmes MIMO-OFDM et l'évaluation de leurs performances. Premièrement, nous avons donné un aperçu général des télécommunications numériques et des différents types de réseaux sans fil ainsi que les techniques de multiplexage. Nous avons présenté les bases de la technique permettant, de lutter contre les interférences dues aux canaux multi-trajets et garantissant ainsi l'amélioration de l'efficacité.

Dans le même contexte nous avons présenté la technique de transmission MIMO qui permet d'augmenter la fiabilité de la transmission en utilisant les techniques de diversité et d'augmenter la capacité des systèmes. Nous avons ensuite, implémenté les technique MIMO-OFDM sous Simulink nous avons présenté les différentes variantes à savoir le SISO- OFDM et MISO-OFDM, leurs performances respectives sont mises en valeurs.

Nous avons montré l'apport de l'utilisation de la diversité à travers le système MIMO-OFDM de point de vue qualité du signal et du taux d'erreur par bit BER. Les simulations que nous avons accomplies nous ont permis de mettre en valeur les améliorations obtenues par le MIMO-OFDM du point de vue du taux d'erreur binaire et rapport signal à bruit relativement à l'OFDM.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] M. Kowal, Sławomir Kubal, Piotr Piotrowski, and Ryszard J. Zieliński "A Simulation Model of the Radio Frequency MIMO-OFDM System" IEEE 802.11g – Technical documentation.
- [2] M. Kowal, S. Kubal, and R. J. Zielinski, "EMC in 802.11n – Selected Aspects," Przegląd Telekomunikacyjny, Wiadomości Telekomunikacyjne, vol. 81, no. 4, pp. 286–289, 2008, in Polish.
- [3] Mr B. MOUSSA, "Etude et Evaluation des performances des systèmes De communications sans fil", UNIVERSITE MOULOUD MAMMERRI, TIZI-OUZOU Année universitaire 2012/2013.
- [4] P. GRUYER, S. PAILLARD, "Modélisation d'un modulateur et Démodulateur OFDM", 12 décembre 2005
- [5] BAKIR HADJ ALI, "Exploitation de l'association des techniques MIMO-OFDM pour la transmission dans les réseaux locaux sans fil", UNIVERSITE ABOU BAKR BEL KAID-TLEMENEN Année 2012
- [6] Bentaleb Nacereddine Benatia Djelloule, " Etude des performances de la technique OFDM pour les communications sans fil", UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF M'SILA Année universitaire 2018/2019.
- [7] k. Zineb, L. Amina « Etude de la qualité de service (QOS) dans les réseaux sansfil » université de Tlemcen, 2011.
- [8] J. pillou « Les réseaux sans fil (Wireless Networks) », France, 14 octobre 2008.
- [9] A. Choumane, « Synthèse d'un canal de propagation par système multi antennes pour la caractérisation de terminaux mobiles à diversité », Université de Limoges, 2011
- [10] D. Khedidja « SIMULATION COMPARATIVE DES TECHNIQUES FBMC ET OFDM POUR LES RESEAUX 5G » université de Tlemcen (Abou Bekr Belkaid) Juin 2016.
- [11] S. R. Saunders, A. Aragon, « Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems », Wiley & Sons 2007.
- [12] H. Sizon, « Radio Wave Propagation for Telecommunication Application », Springer-Verlag, Berlin, 2005.
- [13] B. Bijou « Transmitter and Receiver Technique », Springer India , 2015
- [14] Jean-Louis, « Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s », Université de Limoges, 2003.
- [15] A. Bhatji « TDMA and CDMA in Mobile Communications » université de florida , 2004.
- [16] S. Selka, C. Benzerdjeb, « ENCODAGE DE L'AMPLITUDE SPECTRALE POUR OCDMA », université de Tlemcen, 2013.
- [17] L. Hanzo, T. Keller « OFDM and MC-CDMA for Broadband multiuser communications, WLAN and Broadcasting », Wiley and Sons, 2nd edition, 2006
- [18] M. L. Doeltz, E. Heald et D.L. Martin, "Binary data transmission techniques for linear

- systems,"1957.
- [19] O. BERDBER, "Optimisation et stratégies d'allocation de puissance des Systèmes de transmission multi-antennes", Université de Bretagne Occidentale,20 Décembre 2002
- [20] Adrien Renoult, "Analyse des performances d'un système multi-utilisateurs OFDM codé sans accès orthogonal", Université de Cergy-Pontoise, 1 décembre 2005.
- [21] Andreas F. Molisch, "Wireless communications", deuxième édition, Wiley, G Bretagne, 2011.
- [22] P. KADIONIK, "BASES DE TRANSMISSIONS NUMERIQUES Les Modulations numériques", Ecole Nationale supérieure Electronique, Informatique & Radiocommunications, Bordeaux, 2000.
- [23] http://fr.wikipedia.org/wiki/Orthogonal_frequency-division_multiplexing
- [24] Y. ACHOURI, "Implémentation efficace de la FFT pour des Communications OFDM", Université du QUÉBEC à TROIS-RIVIERES, Décembre 2010.
- [25] : <http://www.rennes.supelec.fr/ren/fi/elec/ftp/docs/signal/ofdm.pdf>.
- [26] L. COLLIN, "Optimisation de systèmes multi-antennes basée sur la distance Minimale", Université de Bretagne Occidentale, 17 décembre 2002.
- [27] E. Teletar, "Capacity of multi-antenna Gaussian channels". Bell Labs, Tech. Rep., June 1995.
- [28] G. J. FOSCHINI and M. J. GANS, "On limits of wireless communications in afading environment when using multiple antennas", volume 6, pages 311–335, March 1998.
- [29] H. WANG, "Architectures reconfigurables à base d'opérateur CORDIC pour le traitement du signal : Applications aux récepteurs MIMO", Université de RENNES I,28 avril 2009.
- [30] B. Rihawi, "Analyse et réduction du Power Ratio des systèmes de Radiocommunications multi-antennes", Université de Rennes I, 20 mars 2008.
- [31] B. Adil, "Etudes théoriques et expérimentales de systèmes de Transmissions MIMO-OFDM", Université de Limoges, 2009.
- [32] L. M. M. Simoes, "Optimal data transmission on MIMO OFDM channels", these de master, Naval Postgraduate School MONTEREY CALIFORNIA, 2008.