

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° : STLC 8



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE
FILIERE : TELECOMMUNICATIONS
OPTION : STLC

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par :

AMAR CHEINE Mariem
MOHAMED VALL Nebghouha

Intitulé :

Simulation d'un système MIMO-OFDM
pour les transmissions sans fil

Soutenu devant le jury composé de :

Pr. LALAOUI Lahouaoui	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Président
Dr. ZERDOUMI Zohra	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Rapporteur
Dr. GARAH Messaoud	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Examineur

Année universitaire : 2023 / 2024

Dédicace

*À nos parents, pour leur amour, leur soutien indéfectible et leurs sacrifices. Depuis notre plus jeune âge, vous nous avez encouragés à poursuivre nos rêves et à ne jamais abandonner, même face aux obstacles. Votre patience, vos conseils avisés et votre confiance inébranlable en nous ont été les piliers sur lesquels nous avons pu nous leur guidance tout au long de ce parcours académique.
appuyer durant toutes ces années.*

Sans vous, ce projet n'aurait jamais été possible, et nous vous en sommes éternellement reconnaissants.

*Nous dédions également ce mémoire à nos professeurs et pour leur inspiration et leur guidance tout au long de ce
parcours académique.*

Mariem Et Nebghouha

Remerciement

Nous remercions nos chères parents, pour leur amour inconditionnel, leur soutien et leurs sacrifices. Leurs encouragements nous ont guidé le long de nos parcours.

Nous exprimons nos reconnaissance à tous nos enseignants et spécialement à notre encadreur : Dr. Zohra Zerdoumi, pour sa guidance, ses conseils précieux et sa disponibilité. Nous remercions les membres de jury : Pr. LALAOUI Lahouaoui et Dr. GARAH Messaoud pour avoir accepté d'évaluer notre présent travail et pour l'intérêt accordé à ce mémoire.

Nous remercions le personnel administratif et technique à l'Université Mohamed Boudiaf de M'sila , pour leur aide et leur efficacité durant nos études. Nous remercions également tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire et à la réussite de nos études.

Mariam Et Nebghouha

Résumé

Dans le cadre de cette recherche, nous nous sommes penchés sur l'étude du système de télécommunications MIMO (Multiple Input Multiple Output) à multiplexage spatial dans un contexte OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Les applications de ces travaux de recherche peuvent être aussi bien dans le domaine des applications fixes, telles que le WiFi et l'IEEE, que dans celui des applications mobiles, comme la LTE et le 3GPP. L'objectif de ce mémoire est d'étudier et d'améliorer les techniques d'émission et de réception de ces systèmes MIMO dans un contexte multiporteuses OFDM, qui permet de transformer un canal sélectif en fréquence en de multiples canaux non sélectifs. La combinaison du MIMO et de l'OFDM permet d'exploiter les avantages des deux méthodes : la robustesse de la liaison sur des canaux sélectifs en fréquence pour l'OFDM et la robustesse sur des canaux non corrélés en espace pour les MIMO avec codage. Pour différentes configurations des systèmes multi-antennaires SISO (Single Input Single Output), MISO (Multiple Input Single Output) et MIMO, une étude comparative est réalisée entre ces dernières. Cette étude démontre que la configuration MIMO associée à la technique OFDM apporte une amélioration significative des performances par rapport aux autres cas d'étude.

Mots-clés : Télécommunications sans fil, canaux à trajets multiples, Modulation multiporteuses, OFDM, MIMO-OFDM

ملخص

في إطار هذا البحث، درسنا نظام اتصالات MIMO (إدخال متعدد إخراج متعدد) بتعدد الإرسال الفضائي في سياق OFDM (تعدد الإرسال بتقسيم التردد المتعامد). يمكن أن تكون تطبيقات هذا البحث في كل من التطبيقات الثابتة، مثل WiFi و IEEE، والتطبيقات المتنقلة، مثل LTE و 3GPP. هدف هذه الأطروحة هو دراسة وتحسين تقنيات الإرسال والاستقبال لهذه الأنظمة MIMO في سياق OFDM متعدد الحوامل، الذي يسمح بتحويل قناة انتقائية التردد إلى قنوات غير انتقائية متعددة. يجمع الجمع بين MIMO و OFDM مزايا كلتا الطريقتين: متانة الاتصال على القنوات الانتقائية التردد بالنسبة لـ OFDM والمتانة على القنوات غير المرتبطة فضائياً بالنسبة لـ MIMO مع التشفير. لأجل تكوينات

مختلفة من أنظمة الهوائي المتعدد) SISO إدخال واحد وإخراج واحد)، MISO (إدخال متعدد وإخراج واحد) وMIMO، يتم إجراء دراسة مقارنة بينها. وتظهر هذه الدراسة أن تكوين MIMO المرتبط بتقنية OFDM يوفر تحسناً كبيراً في الأداء مقارنة بالحالات الدراسية الأخرى.

Abstract

In the context of this research, we examined a MIMO (Multiple Input Multiple Output) telecommunications system with spatial multiplexing in an OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) context. The applications of this research can be in both fixed applications, such as WiFi and IEEE, and mobile applications, such as LTE and 3GPP. The objective of this thesis is to study and improve the transmission and reception techniques of these MIMO systems in a multi-carrier OFDM context, which allows transforming a frequency-selective channel into multiple non-selective channels. The combination of MIMO and OFDM exploits the advantages of both methods: the robustness of the link on frequency-selective channels for OFDM and the robustness on spatially uncorrelated channels for MIMO with coding. For different configurations of multi-antenna systems SISO (Single Input Single Output), MISO (Multiple Input Single Output), and MIMO, a comparative study is conducted among them. This study demonstrates that the MIMO configuration associated with the OFDM technique provides a significant performance improvement compared to other study cases.

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

Table des matières

Dédicace	I
Remerciements	II
Résumé	III
Table des matières	VI
Liste des figures	X
Liste des Tableaux	XII
Liste des Acronymes	XIII
Introduction Générale	1
Chapitre 01 : Concepts de base en télécommunications	
1.1 Introduction	4
1.2 Classification de réseaux sans fil	4
1.2.1. Classification selon la zone de couverture.....	5
1.2.1.1. Les réseaux personnels (WPAN)	5
1.2.1.2. Réseaux locaux (WLAN)	6
1.2.1.3. Réseaux métropolitains (WMAN)	6
1.2.1.4. Réseaux étendus (WWAN)	6
1.2.2. Classification selon l'infrastructure	7
1.2.2.1 Réseaux avec infrastructure	7
1.2.2.2 Réseaux ad hoc.....	8
1.3 Réseau WIMAX	9
1.4 Utilité des réseaux sans fil	11
1.4.1 Connectivité mobile	11
1.4.2 Accès à Internet.....	11
1.4.3 Communication d'urgence.....	11
1.4.4 Technologies de la santé.....	11
1.4.5 Systèmes de sécurité.....	11
1.4.6 Technologies intelligentes.....	11
1.4.7 Applications industrielles.....	11
1.5 Les techniques de Multiplexage	12
1.5.1. Accès multiple par répartition en fréquence	13

Table des matières

1.5.2 Accès multiple par répartition dans le temps	13
1.5.3. Accès multiple par répartition Code.....	15
1.5.4. Accès multiple à division de longueur d'onde.....	15
1.6 Types des canaux de transmission.....	16
1.6.1 Canal gaussien.....	17
1.6.2 Canal multi-trajet.....	17
1.7 Conclusion.....	18

Chapitre 02 : Principe de l'OFDM et le MIMO-OFDM

2.1 Introduction.....	20
2.3 Aperçu sur la Technique OFDM	22
2.3.1 Principe de l'OFDM.....	23
2.3.2 Porteuses orthogonales.....	23
2.6 Système de transmission OFDM.....	24
2.6.1 Système OFDM en émission	27
2.6.2 Système OFDM en réception.....	27
2.6.3 Les intervalles de gardes.....	27
2.6.3.1 Remplissage par des zéros	29
2.6.3.2 Préfixe cyclique	29
2.6.3.3 Suffixe cyclique	30
2.7 Présentation du système MIMO.....	30
2.8 Différentes architectures du système MIMO.....	32
2.8.1 Architecture SISO (Single Input Single Output)	32
2.8.2 Architecture SIMO (Single Input Multiple Output)	33
2.8.3 Architecture MISO (Multiple Input Single Output)	33
2.8.4 Architecture (Multiple Input Multiple Output)	34
2.9 Présentation du système MIMO-OFDM.....	35
2.10 Conclusion	37

Table des matières

Chapitre 03 : Résultats de simulation du système MIMO-OFDM

3.1. Introduction	39
3.2. Mesure de performance d'un système de transmission.....	39
3.2.1. Taux d'erreur binaire (BER)	39
3.2.2. Rapport signal sur bruit (SNR)	39
3.2.3. Constellation reçu.....	40
3.3. Modèles de canaux utilisés en simulation.....	40
3.3.1. Le canal AWGN.....	40
3.3.2. Le canal Rayleigh	41
3.4. Simulation du système MIMO-OFDM.....	41
3.4.1. Simulation du système MISO-OFDM	42
3.4.2. Blocs d'émission su système MISO-OFDM	43
3.5. Mesures des performances du système MISO-OFDM.....	54
3.5.1. Constellation de la modulation BPSK en sortie du système MISO-OFDM	54
3.5.2. Constellation de la modulation QAM en sortie du système MISO-OFDM.....	55
3.5.3. Taux d'erreur et type de modulation du système MISO-OFDM	56
3.5.4. Spectre du signal MISO-OFDM	56
3.6. Description du modèle SISO-OFDM	57
3.6.1. Constellation de SISO-OFDM, modulation BPSK	58
3.6.2. Constellation du système SISO-OFDM, modulation QAM	59
3.6.3. Taux d'erreur et type de modulation du système SISO-OFDM	59
3.6.4. Capacité d'un système MIMO-OFDM	60
3.6.5. Taux d'erreur du système MIMO-OFDM	60
3.7 Conclusion	61
Conclusion Générale.....	63
Références	64

LISTE DES FIGURES

Chapitre 01

Figure 1 Classification des réseaux sans fil	5
Figure 1.2: réseaux sans fil selon la zone de couverture	5
Figure 1.3: Le modèle des réseaux mobiles avec infrastructure.....	8
Figure 1.4: Réseau en mode ad hoc	9
Figure 1.5: Réseau WIMAX.....	10
Figure 6: Multiplexage des possibilités d'accès à un canal.....	12
Figure 1.7: La technique de multiplexage FDM	13
Figure 1.8: Répartition des périodes dans le cas d'un multiplexage TDMA	14
Figure 1.9: Représentation d'un multiplex TDMA(4 voies vers 1)	14
Figure 1.10: La technique de multiplexage CDMA.....	15
Figure 1.11: La technique de multiplexage WDM	16
Figure 1.12: Le canal dans un système d'émission-réception.....	17
Figure 1.13: Le canal à trajets multiples	18

Chapitre 02

Figure 2.1: Modulations multi-porteuses	21
Figure 2.2: Bande passante en FDM (a) et OFDM (b).....	22
Figure 2.3: Sous porteuses orthogonales	24
Figure 4: Système de transmission OFD.....	25
Figure 2.5: Constellation de la modulation de phase QPSK	26
Figure 2.6: Modulation QAM.....	26
Figure 2.7: Les intervalles de gardes dans un symbole OFDM.....	28
Figure 2.8: Les différents intervalles de garde.....	28
Figure 2.9: Insertion d'un préfixe cyclique dans l'intervalle de garde.....	29
Figure 2.10: Système MIMO	31
Figure 2.11: Différentes configurations des antennes multiples.....	32
Figure 2.12: SISO.....	32
Figure 2.13: SIMO (Single Input Multiple Output).....	33
Figure 2.14: MISO - Multiple Input Single Output	33
Figure 2.15: MIMO Multiple Input Multiple Output.....	34
Figure 2.16: système MIMO-OFDM	35

LISTE DES FIGURES

Chapitre 03

Figure 3.1: Constellations des modulations : BPSK, QPSK, 16QAM et 64QAM.....	40
Figure 3.2: Schéma bloc d'un système MISO-OFDM sous Simulink.....	42
Figure 3.3: Schéma bloc d'émission MISO-OFDM.....	43
Figure 3.4: Paramètres du bloc 'Bernoulli Binary'.....	44
Figure 3.5: Paramètres du bloc FEC & modulator Bank.....	45
Figure 3.6: Paramètres du bloc IFFT Input packing.....	46
Figure 3.7: Paramètres du bloc pace-Time Diversity Encoder.....	47
Figure 3.8: Paramètres du bloc OFDM transmitter.....	47
Figure 3.9: Paramètres du bloc Digital Pre-Distortion and Non liner Amplifier.....	48
Figure 3.10: Paramètres du bloc du Channel MISO.....	49
Figure 3.11: Schéma bloc d'émission MISO-OFDM.....	49
Figure 3.12: Paramètres du bloc AWGN Channel.....	50
Figure 3.13: Paramètres du bloc OFDM Receiver.....	51
Figure 3.14: Paramètres du bloc Space-Time Diversity Combiner.....	51
Figure 3.15: Paramètres du bloc Extract Data carriers.....	52
Figure 3.16: Paramètres du bloc démodulation & FEC Banc.....	53
Figure 3.17: Symboles reçus BPSK, (a) SNR=10dB, (b) SNR=20 dB.....	54
Figure 3.18: Symboles reçus QAM (a) quatre états (4-QAM), SNR=10dB (b) Seize états (16QAM), SNR=20 dB.....	55
Figure 3.19: Spectre du signal reçu avant canal.....	56
Figure 3.20: Spectre du signal reçu après canal.....	57
Figure 3.21: Schéma bloc d'un système SISO-OFDM sous Simulink.....	58
Figure 3.22: Symboles BPSK, (a) Symboles reçu SNR=10dB, (b) Symboles reçus SNR=20 dB.....	58
Figure 3.23: Symboles QAM, (a) Symboles reçu SNR=10dB (4QAM), (b) Symboles reçus SNR=20 dB (16QAM).....	59
Figure 3.24: Capacité d'un système MIMO-OFDM.....	60
Figure 3.25: Courbes de BER des systèmes SISO et SIMO.....	61

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 01

Tableau 1.1: Classification des réseaux sans fil..... 7

Tableau 2.2: Normes IEEE 802.16, IEEE 802.16-2004 et IEEE 802.16 e..... 10

Chapitre 03

Tableau 3.1: Taux d'erreur et type de Modulations 56

Tableau 3.2: Taux d'erreur du Modulations BPSK et QAM 60

LISTE DES ACRONYMES

Liste des Acronymes

ADSL Asymmetric Digital Subscriber Line

AWGN Additive White Gaussian Noise

BER Bit Error Rate **BPSK** Binary Phase Shift Keying

CDMA Code Division Multiple Access

CP-OFDM Cyclic Prefix Orthogonal Frequency Division Multiplexing

DAB Digital Audio Broadcasting

DSL Digital Subscriber Line

DVB Digital Video Broadcast

DVB-T Digital Video Broadcasting – Terrestrial

FDM Frequency Division Multiplexing

FDMA Frequency Division Multiple Access

FEC Forward Error Correction

FFT Fast Fourier Transform

GPRS General Packet Radio Service

GSM Global System for Mobile Communication

IEEE802.11a (Wi-Fi)

IFFT Inverse Fast Fourier Transform

LOS Line Of Sight

LTE Long Term Evolution

MIMO Multiple Input Multiple Output

MISO Multiple Input Single Output

LISTE DES ACRONYMES

- OFDM** Orthogonal Frequency Division Multiplexing
- QAM** Quadrature Amplitude Modulation
- QPSK** Quadrature Phase Shift Keying
- SIMO** Single Input Multiple Output
- SISO** Single Input Single Output
- SNR** Signal to Noise Ratio
- STBC** Space-Time Block Code
- TDMA** Time Division Multiple Access
- UMTS** Universal Mobile Telecommunications System
- UWB** Ultra Wide Band
- WDM** Wavelength Division Multiplexing
- WIMAX** Worldwide Interoperability for Microwave Access
- WLAN** Wireless Local Area Network
- WMAN** Wireless Metropolitan Area Network
- WPAN** Wireless Personal Area Network
- ZP-OFDM** Zero-pedaling Orthogonal Frequency Division Multiplexing

Introduction générale

Dans la conception d'un système de communication radio, le plus grand défi à relever dans est la mise en œuvre des techniques efficaces pour combattre l'effet des trajets multiples. Ceci a mené au développement et à l'utilisation de la technique du multiplexage par division de fréquences orthogonales OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). L'OFDM est une technique de transmissions multi-porteuses qui consiste à répartir l'information sur un grand nombre de sous-porteuses, créant ainsi des sous-canaux très étroits. Elle est adéquate à la propagation par trajets multiples. La répartition des symboles sur plusieurs sous-porteuses est la propriété plus importante de la transmission OFDM. C'est elle qui engendre la robustesse contre le délai d'étalement et par conséquent diminue le taux de transmission par sous-porteuse. L'OFDM a été utilisée pour plusieurs standards de communications numériques haut débit sur les réseaux sans fil.

La combinaison de la technologie MIMO (Multiple Input Multiple Output) avec la transmission multi-porteuse OFDM promet d'atteindre des efficacités spectrales élevées tout en maintenant des exigences de complexité modérées pour les structures d'émetteurs et de récepteurs. En outre, le concept du système MIMO-OFDM permet une allocation flexible des ressources en termes de temps, de fréquence et d'espace pour différents utilisateurs. Ce mémoire se concentre sur les méthodes de transmission de signaux dans les systèmes MIMO-OFDM.

Les performances des différentes architectures du système MIMO-OFDM 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 et capacité du canal.

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

Dans le premier chapitre, nous donnerons un rappel général sur les communications, les catégories de réseaux sans fil et leurs différentes normes. Nous examinerons également les techniques de transmission multiple.

INTRODUCTION GENERALE

Dans le second chapitre, nous abordons la technique OFDM ses avantages, son déploiement à travers l'utilisation de la transformation de Fourier rapide. Nous examinerons également son intégration avec le système MIMO, avec ces différentes architectures.

Dans le troisième chapitre, nous accomplirons des simulations du système OFDM-MIMO, ainsi que des architectures associées à savoir SISO, MISO et SIMO. Nous effectuerons des simulations pour types distincts 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 : Concepts de base en télécommunications

Chapitre 01 : Concepts de base en télécommunications

1.1 Introduction

Dans le domaine des télécommunications, la transmission des signaux porteurs d'informations nécessite un canal de transfert entre l'émetteur et le récepteur. Ces dernières années ont été marquées par l'émergence fulgurante des réseaux sans fil, représentant une véritable révolution dans le domaine des technologies de l'information. En combinant connectivité et mobilité, ces nouvelles avancées sont en train de remodeler en profondeur les infrastructures et les systèmes d'information. Ce chapitre offre une vue d'ensemble des différentes architectures des systèmes de télécommunications sans fil, ainsi qu'une présentation des principales techniques de multiplexage. De plus, nous passons en revue les divers modèles de canaux de transmission et les indicateurs de performance utilisés pour évaluer la qualité des transmissions.

1.2 Classification de réseaux sans fil [1]

Un réseau sans fil (Wireless Network) est défini comme un ensemble de nœuds où au moins deux peuvent communiquer sans nécessiter de connexion physique. Ces systèmes de communication permettent aux utilisateurs d'accéder à tous les services traditionnels des réseaux, peu importe leur position géographique. La classification des réseaux sans fil repose sur deux critères principaux. Le premier concerne la portée du réseau, conduisant à quatre catégories distinctes : les réseaux personnels, les réseaux locaux, les réseaux métropolitains et les réseaux étendus. Le deuxième critère porte sur l'infrastructure et le modèle d'implémentation adopté. Selon cette classification, les réseaux sans fil sont divisés en deux types : ceux avec une infrastructure établie et ceux opérant sans infrastructure définie, comme on le voit dans l'illustration de la figure 1.1

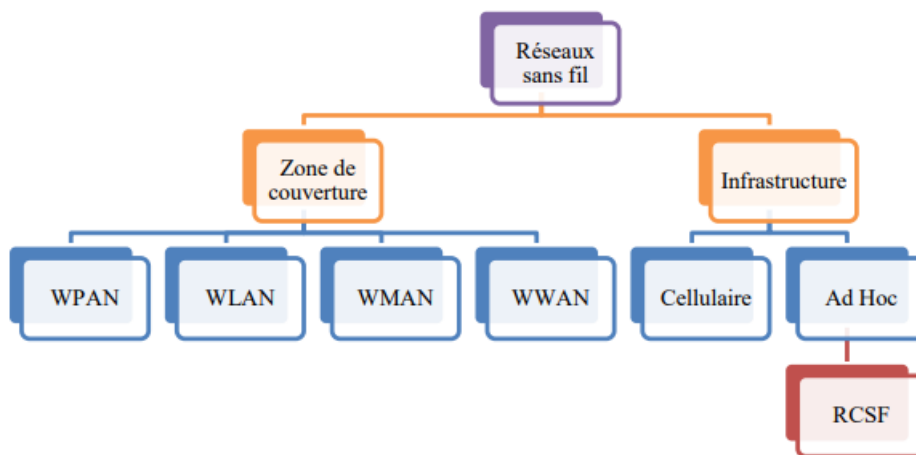


Figure 1 Classification des réseaux sans fil

1.2.1. Classification selon la zone de couverture [2]

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...).

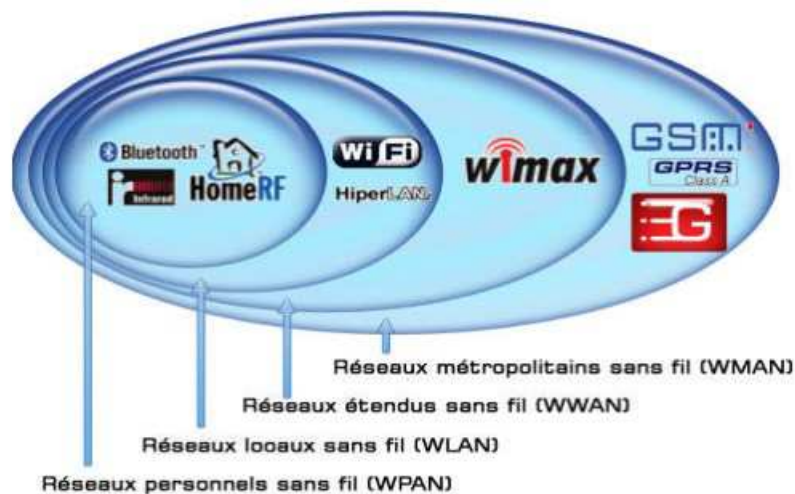


Figure 1.2: réseaux sans fil selon la zone de couverture

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

1.2.1.1. Les réseaux personnels (WPAN)

Les réseaux personnels sans fil, également appelés réseaux domestiques sans fil ou WPAN (Wireless Personal Area Network), sont des réseaux sans fil avec une portée limitée

à quelques dizaines de mètres. Leur principal objectif est de connecter des appareils tels que des imprimantes, des téléphones portables, des équipements domestiques ou des assistants personnels à un ordinateur, sans recourir à des câbles. Ils permettent également une liaison sans fil entre deux appareils très proches. Plusieurs technologies sont utilisées pour les WPAN, notamment le Bluetooth, l'HomeRF, ZigBee et les liaisons infrarouges.

1.2.1.2. Réseaux locaux (WLAN)

Le réseau local sans fil, connu sous le nom de WLAN (Wireless Local Area Network), est un système permettant de couvrir une zone équivalente à celle d'un réseau local d'entreprise, avec une portée d'environ une centaine de mètres. Il facilite la connexion des terminaux situés dans cette zone de couverture. Plusieurs technologies concurrentes sont disponibles, notamment le WiFi et le HiperLAN2.

1.2.1.3. Réseaux métropolitains (WMAN)

Le réseau sans fil métropolitain, désigné sous le nom de WMAN (Wireless Metropolitan Area Network), est également connu sous l'appellation de Boucle Locale Radio (BLR). Les WMAN reposent sur la norme IEEE 802.16. La Boucle Locale Radio offre une bande passante de 1 à 10 Mbit/s sur une portée de 4 à 10 kilomètres, ce qui en fait principalement une technologie destinée aux opérateurs de télécommunications.

1.2.1.4. Réseaux étendus (WWAN)

Le réseau sans fil à large échelle, communément désigné sous le nom de WWAN (Wireless Wide Area Network), est également connu sous le nom de réseau cellulaire mobile. Il constitue l'infrastructure sans fil la plus répandue, car tous les téléphones mobiles sont connectés à un tel réseau. Les principales technologies incluent :

- ❖ GSM (Global System for Mobile Communication): la technologie pionnière du réseau cellulaire, offrant une couverture mondiale.
- ❖ GPRS (General Packet Radio Service): une évolution du GSM permettant un accès internet mobile plus rapide.
- ❖ UMTS (Universal Mobile Telecommunications System): la troisième génération de réseau mobile, offrant des débits encore plus élevés et des services multimédias avancés.

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 [2]

Les environnements mobiles regroupent des systèmes comprenant des sites mobiles, permettant à leurs utilisateurs d'accéder à l'information sans être contraints par leur emplacement géographique. Les réseaux mobiles ou sans fil peuvent être divisés en deux catégories distinctes : ceux qui disposent d'une infrastructure établie et ceux qui fonctionnent sans infrastructure définie.

1.2.2.1 Réseaux avec infrastructure

Ce genre de réseau combine les points d'accès fixes du réseau câblé avec les points d'accès mobiles des réseaux sans fil. Certains points d'accès fixes, désignés comme stations de base (SB), sont équipés d'une interface de communication sans fil permettant d'interagir directement avec les points d'accès mobiles situés dans une zone géographique restreinte, appelée cellule comme le montre la figure (1. 3) suivante.

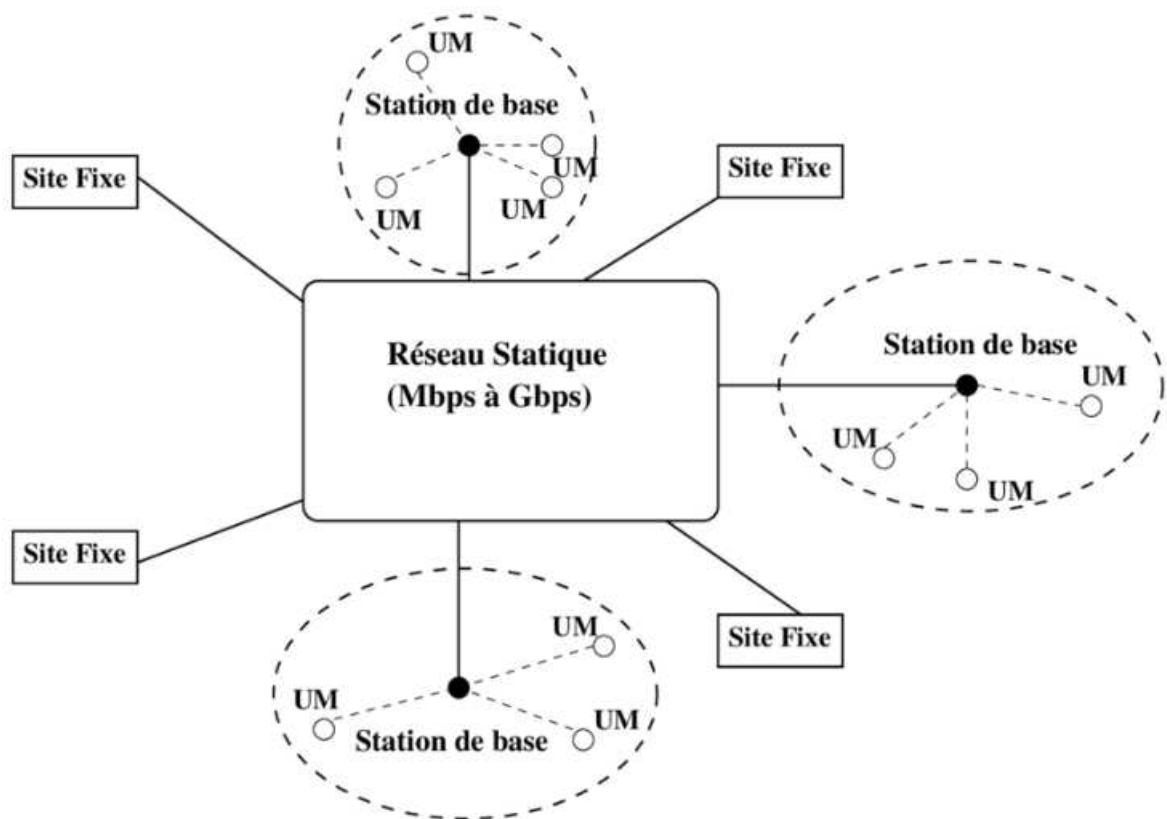


Figure 1.3: *Le modèle des réseaux mobiles avec infrastructure*

Chaque station de base est associée à une cellule à partir de laquelle des appareils mobiles peuvent émettre et recevoir des messages. Pendant ce temps, les points fixes sont reliés les uns aux autres via un réseau de communication câblé. À tout moment, un appareil mobile ne peut être directement connecté qu'à une seule station de base, mais il peut communiquer avec d'autres points via la station à laquelle il est directement lié.

1.2.2.2 Réseaux ad hoc

Dans le domaine de la technologie et de l'informatique, "ad hoc" se réfère souvent à des solutions, des réseaux, des protocoles ou des systèmes qui sont développés ou mis en place de manière temporaire et improvisée pour répondre à un besoin immédiat, sans être nécessairement conçus pour une utilisation à long terme ou pour des applications plus générales. Par exemple, un réseau ad hoc est créé spontanément pour permettre la communication entre des appareils dans une situation où une infrastructure de réseau traditionnelle est pas disponible ou pratique.

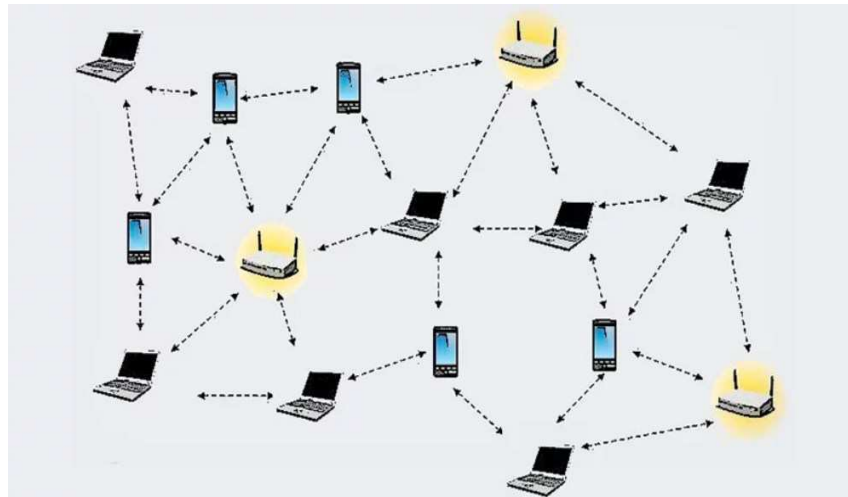


Figure 1.4: Réseau en mode ad hoc

1.3. Réseau WIMAX [3]

Le WiMax, abréviation de "World Wide Interoperability for Microwave Access", a été développé pour favoriser la convergence et l'interopérabilité entre deux standards de réseaux sans fil auparavant distincts. Il représente un ensemble de normes et de techniques pour les réseaux métropolitains sans fil (WMAN - Wireless Metropolitan Area Network). Le standard IEEE 802.16, ou WiMax, permet la connexion sans fil à haut débit d'entreprises ou de particuliers sur de longues distances. Cette technologie répond efficacement aux besoins des zones rurales ou difficiles d'accès.

En complément aux connexions DSL (Digital Subscriber Line) et aux réseaux câblés, le WiMax vise à fournir une solution alternative, tout en interconnectant les points d'accès WiFi. Sa topologie principale est en étoile, bien que la topologie maillée soit également envisageable. La communication peut se faire en ligne de vue (LOS : Line Of Sight) ou hors de vue (NLOS). Comparé au WiFi, le WiMax offre une meilleure efficacité, procurant ainsi une expérience d'utilisation plus agréable, que ce soit pour un accès Internet fixe ou mobile.

	802.16	802.16-2004	802.16e
Spectrum	10-66 GHz	< 11 GHz	< 6 GHz
Maximum data rate	32-134 Mbps (28 MHz channel)	up to 70 Mbps (20 MHz channel)	up to 15 Mbps (5 MHz channel)
Alignment	LoS	LoS and NLoS	LoS and NLoS
Coverage range	2-5 km approx.	5-10 km approx. (maximum of 50 km)	2-5 km approx.
Channel bandwidth	20, 25 and 28 MHz	Flexible, from 1.25 up to 20 MHz	Equal to 802.16-2004
Modulation	2-PAM, 4-QAM, 16-QAM, and 64-QAM	OFDM with 256 subcarriers 2-PAM, 4-QAM, 16-QAM, and 64-QAM	OFDMA with 2048 subcarriers 2-PAM, 4-QAM, 16-QAM, and 64-QAM
Mobility	Fixed	Fixed and Pedestrian	Vehicular (20-100 km/h)

Tableau 2.2: Normes IEEE 802.16, IEEE 802.16-2004 et IEEE 802.16 e.

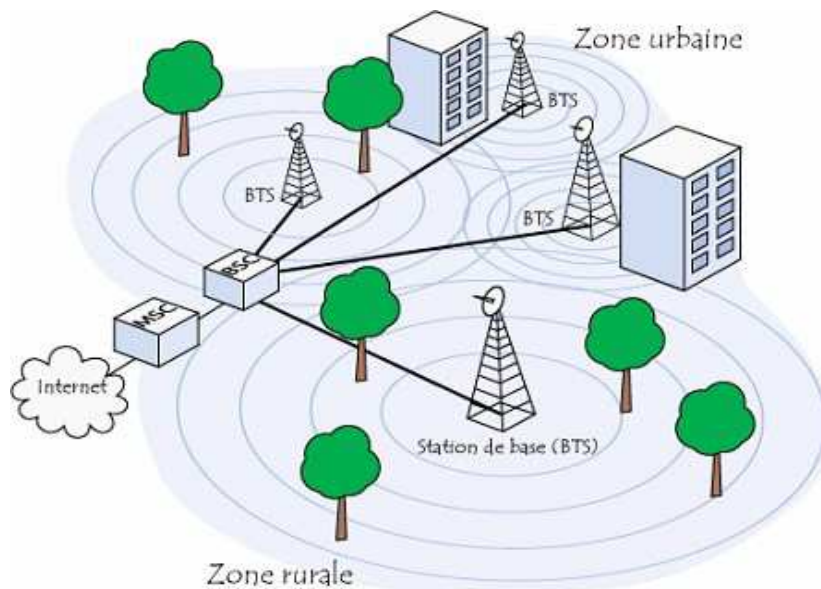


Figure 1.5: Réseau WIMAX

Les ondes du réseau WiMax émanent d'une station de base désignée sous le nom de BTS, qui est connectée au réseau à fibre optique. Chaque abonné peut accéder au réseau en installant une antenne sur son toit et en l'orientant vers la station de base. En raison de la robustesse des ondes WiMax, il n'est pas nécessaire que l'utilisateur ait une ligne de vue directe vers la station. Il suffit que celle-ci se trouve dans un certain périmètre, généralement de l'ordre de 20 à 30 kilomètres, autour du domicile de l'abonné. Cependant, certains obstacles tels que des montagnes ou une densité élevée d'immeubles peuvent considérablement atténuer la portée du signal.

1.4. Utilité des réseaux sans fil [4]

Les réseaux sans fil offrent une gamme d'utilités essentielles dans notre vie quotidienne et dans de nombreux domaines professionnels. Nous présentons ci dessous quelques-unes des principales utilisations :

1.4.1 Connectivité mobile

Les réseaux sans fil permettent aux utilisateurs de rester connectés en déplacement, que ce soit via des smartphones, des tablettes ou des ordinateurs portables, offrant ainsi une communication constante et un accès à l'information.

1.4.2 Accès à Internet

Les réseaux sans fil offrent un accès à Internet à haut débit dans les zones où les connexions filaires sont limitées ou absentes, ce qui est particulièrement utile dans les zones rurales ou en développement.

1.4.3 Communication d'urgence

Les réseaux sans fil jouent un rôle crucial dans les situations d'urgence en permettant la communication rapide et efficace des secours, des autorités et des citoyens lors de catastrophes naturelles ou d'autres situations d'urgence.

1.4.4 Technologies de la santé

Les réseaux sans fil sont utilisés dans les applications de santé telles que la surveillance à distance des patients, les dispositifs médicaux connectés et les dossiers médicaux électroniques, améliorant ainsi la prestation des soins de santé.

1.4.5 Systèmes de sécurité

Les réseaux sans fil sont largement utilisés dans les systèmes de sécurité domestique et commerciale, permettant la surveillance vidéo à distance, les alarmes et les systèmes de contrôle d'accès.

1.4.6 Technologies intelligentes

Les réseaux sans fil alimentent les technologies intelligentes dans les maisons, les bureaux et les villes, permettant le contrôle à distance des appareils électroménagers, l'automatisation des bâtiments, la gestion intelligente de l'énergie et la gestion du trafic urbain.

1.4.7 Applications industrielles

Dans le secteur industriel, les réseaux sans fil sont utilisés pour la surveillance et le contrôle des processus, la gestion de la chaîne logistique, la maintenance prédictive et d'autres applications visant à améliorer l'efficacité opérationnelle.

1.5. Les techniques de Multiplexage [5]

Tout à fait, le multiplexage est une opération fondamentale dans les réseaux de communication, permettant de regrouper plusieurs flux de données sur un même support de transmission tout en préservant leur intégrité. L'objectif est de maximiser l'utilisation des ressources disponibles tout en évitant les interférences entre les différents flux.

Pour assurer un multiplexage efficace, il est essentiel que les ressources attribuées à chaque communication soient orthogonales les unes par rapport aux autres. Cela garantit que chaque flux peut être séparé de manière précise lors de la réception, sans qu'il y ait de confusion entre les données.

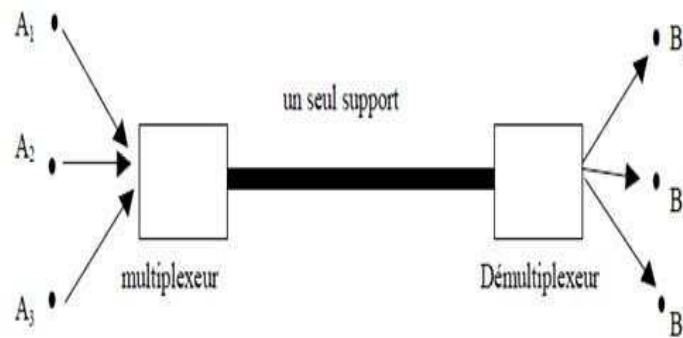


Figure 6: Multiplexage des possibilités d'accès à un canal

Il existe principalement trois types de multiplexage dans le domaine des radiofréquences et hyperfréquences : le multiplexage fréquentiel ou spectral, appelé FDMA (Frequency Division Multiple Access) ; le multiplexage temporel, connu sous le nom de TDMA (Time Division Multiple Access) ; et le multiplexage de code, désigné par CDMA (Code Division Multiple Access).

Une nouvelle méthode de multiplexage spécifique à la transmission sur fibres optiques a récemment émergé, appelée WDM (Wavelength Division Multiplexing). Cette technique consiste à partager les différentes fenêtres optiques disponibles sur une même fibre optique.

1.5.1. Accès multiple par répartition en fréquence [6]

L'accès multiple par répartition en fréquence (AMRF) et le multiplexage fréquentiel sont étroitement liés. Dans l'AMRF, les utilisateurs partagent une ressource de transmission en utilisant différentes bandes de fréquences. Chaque utilisateur est assigné à une bande de fréquences spécifique sur laquelle il peut transmettre ses données. Cette technique est également connue sous le nom de Frequency Division Multiple Access (FDMA).

Lorsque plusieurs signaux indépendants sont multiplexés ensemble en utilisant des bandes de fréquences distinctes dans un signal composite, on utilise le multiplexage fréquentiel. Cela signifie que le multiplexage fréquentiel est une application pratique de l'AMRF, où plusieurs signaux sont combinés dans un signal composite en utilisant des bandes de fréquences distinctes pour chaque signal.

Ainsi, dans le contexte de l'accès multiple par répartition en fréquence, le multiplexage fréquentiel est une méthode permettant à plusieurs utilisateurs de partager efficacement une ressource de transmission en utilisant des bandes de fréquences distinctes. La (figure 1.7) donne un exemple de multiplexage fréquentiel 4 vers 1.

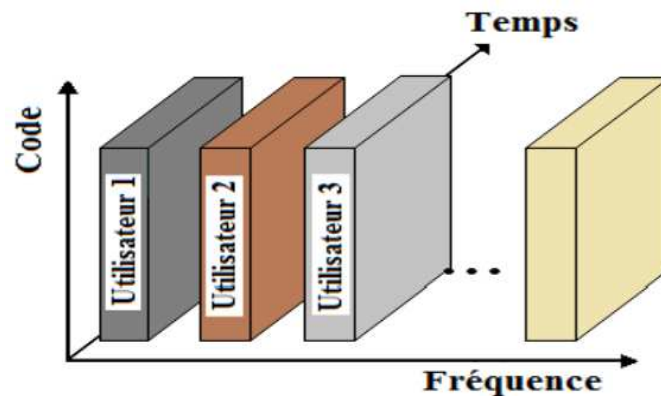


Figure 1.7: La technique de multiplexage FDM

1.5.2 Accès multiple par répartition dans le temps [6]

Le multiplexage TDM implique de consacrer l'intégralité de la bande passante à un utilisateur unique pendant de brefs intervalles, et ce de manière cyclique pour chaque utilisateur (Figure 1.7). Cette attribution de bande passante se réalise en segmentant l'axe temporel en périodes de durée constante, chaque utilisateur transmettant uniquement

pendant une de ces périodes spécifiques (Figure 1.8). Un intervalle de temps fixe (IT) est attribué successivement à chaque source.

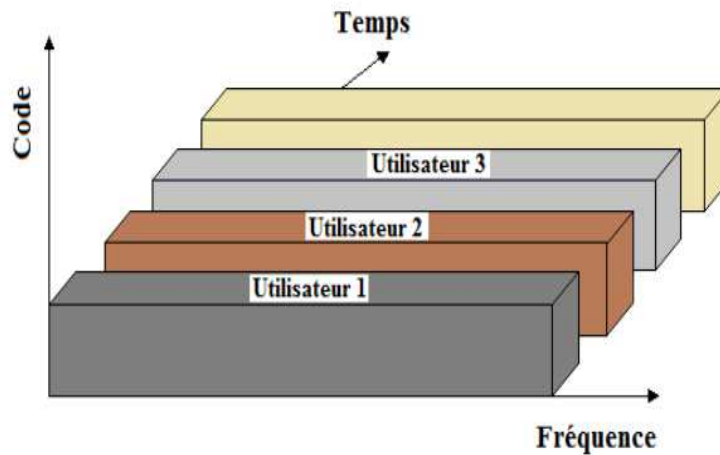


Figure 1.8: Répartition des périodes dans le cas d'un multiplexage TDMA

Le multiplexage TDMA permet de rassembler plusieurs canaux de communication à bas débit en un seul canal à débit plus élevé (par exemple, en agrégeant quatre séquences de 10 Gbits/s pour obtenir un débit total de 40 Gbits/s).

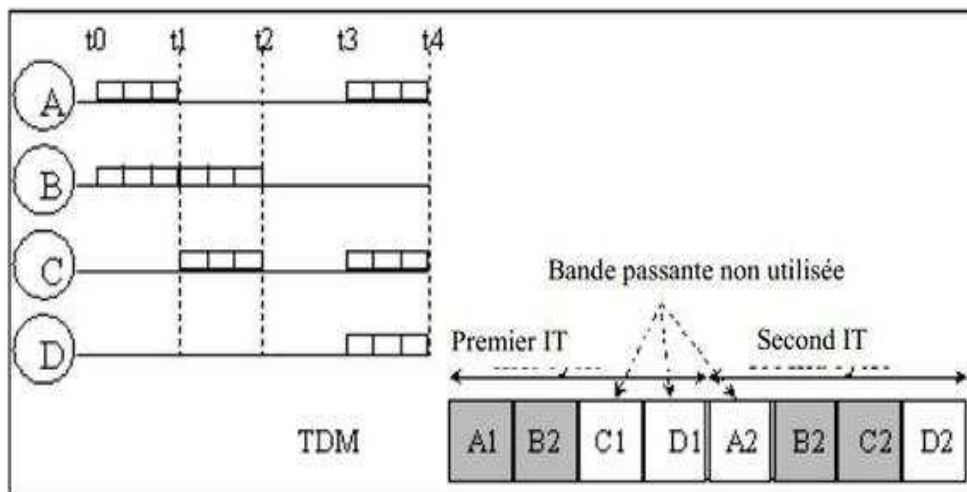


Figure 1.9: Représentation d'un multiplex TDMA (4 voies vers 1)

Dans de nombreux cas, l'intégralité de la bande passante du système pour une période donnée n'est pas attribuée à une seule station. Au lieu de cela, la fréquence du système est subdivisée en sous-bandes, et le TDMA est utilisé pour permettre un accès multiple à chaque sous-bande. Ces sous-bandes sont appelées fréquences porteuses,

et les systèmes mobiles utilisant cette technique sont désignés sous le terme de systèmes à opérateurs multiples.

1.5.3. Accès multiple par répartition Code

Dans le cas de l'accès multiple à répartition par les codes, tous les mobiles coexistent dans une même bande de fréquence et transmettent pendant les mêmes intervalles temporels, comme illustré dans la figure (I.14). Cependant, ils utilisent des techniques d'étalement de spectre où chaque utilisateur possède un code ou une séquence unique dans la cellule, déterminant ainsi les fréquences et la puissance utilisées. Ces techniques impliquent la redistribution et l'étalement du signal sur une large bande passante, le rendant idéalement "invisible" pour les autres utilisateurs partageant la même bande passante. L'émetteur associe l'information originale avec le code, puis transmet l'information codée via l'interface radio. L'information originale est ensuite régénérée dans l'unité de réception en utilisant le même code de manière synchrone. En isolant toutes les séquences provenant des autres utilisateurs (perçues comme du bruit), le signal original de l'utilisateur peut alors être extrait.

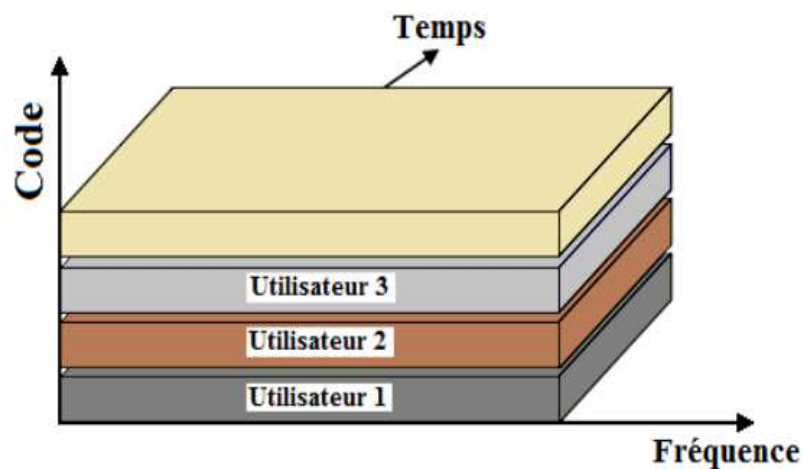


Figure 1.10: La technique de multiplexage CDMA

1.5.4. Accès multiple à division de longueur d'onde [7]

La technologie WDM repose sur le multiplexage optique, où plusieurs signaux sont transportés sur une seule fibre optique grâce à différentes longueurs d'onde. Cette approche offre une utilisation plus efficace de la capacité de transmission des fibres, permettant d'augmenter le débit total du système sans installer de nouvelles fibres. Avec la capacité croissante de WDM à prendre en charge un nombre accru de longueurs d'onde, elle offre une

évolutivité significative pour répondre à la demande croissante de bande passante dans les réseaux modernes.

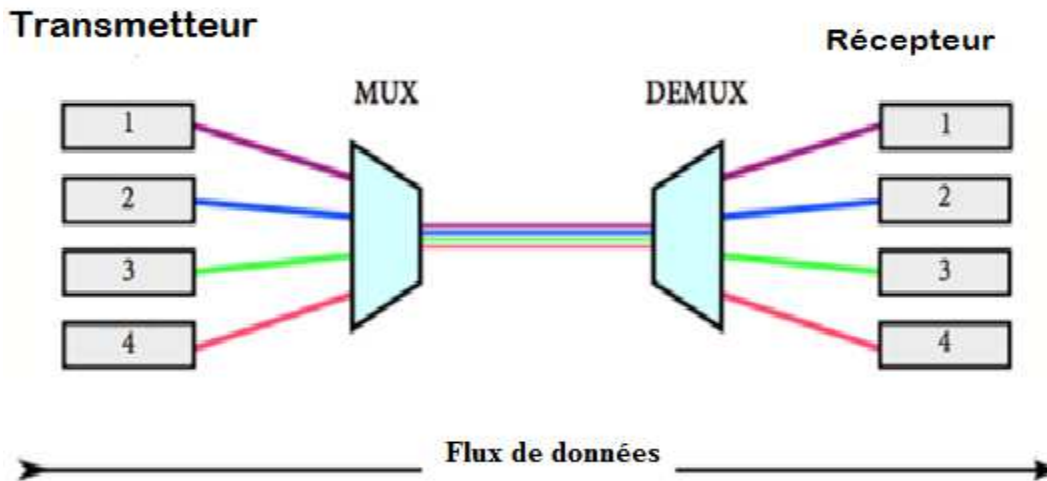


Figure 1.11: La technique de multiplexage WDM

Dans le cadre du WDM, un seul amplificateur optique remplace les N régénérateurs situés sur chaque site de ligne, offrant ainsi des économies d'équipements qui augmentent avec la longueur de la liaison et le nombre de canaux.

1.6. Types des canaux de transmission [8]

Le canal de transmission, également appelé canal de diffusion, est l'élément qui permet de transmettre les informations (signal) entre l'émetteur et le destinataire. Il peut se présenter sous la forme d'un ensemble de phénomènes qui contribuent à la détérioration de la qualité du signal lors de sa transmission. Ces phénomènes peuvent varier en importance selon la nature de l'environnement et l'emplacement de l'émetteur et du récepteur, ainsi que leurs positions relatives.

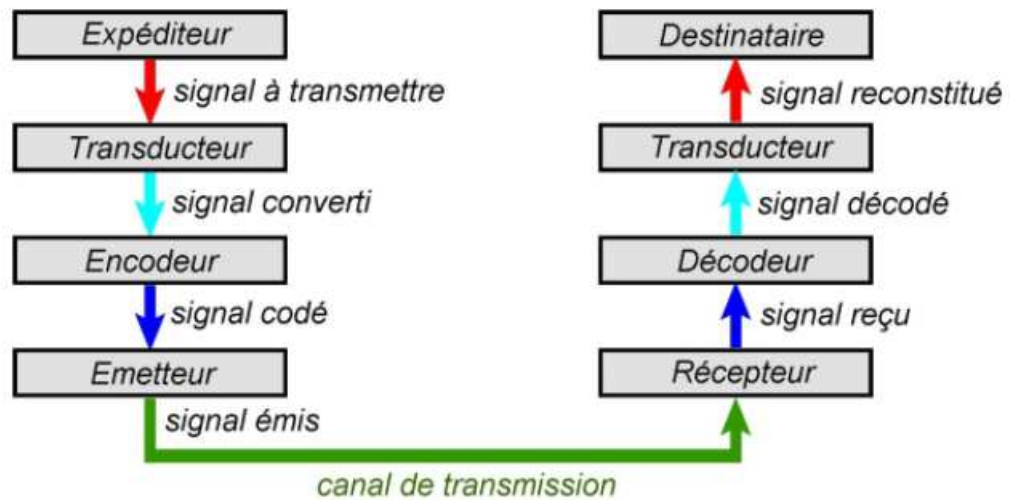


Figure 1.12: Le canal dans un système d'émission-réception

1.6.1 Canal gaussien

Le canal gaussien pour les communications sans fil est le modèle statistique le plus simple en termes d'implémentation, mais il n'est pas nécessairement le plus réaliste. Ce modèle ne prend en compte que le bruit thermique du récepteur, représenté par une variable aléatoire gaussienne de densité de probabilité $P_X(x)$, qui est ajoutée au signal utile. Cette variable aléatoire est appelée le bruit blanc additif gaussien (BBAG). Le bruit est qualifié de "blanc" car il perturbe de manière uniforme tout le spectre, avec une densité spectrale de puissance constante N_0 (W/Hz). Ainsi, le bruit est entièrement caractérisé statistiquement par sa moyenne nulle μ_b et sa variance σ_b^2 .

$$p_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_b^2}} \cdot \exp \left[-\frac{(x - \mu_b)^2}{2\sigma_b^2} \right] \quad (1.1)$$

1.6.2 Canal multi-trajet

Le canal multi-trajet est une réalité dans les communications sans fil, où les signaux peuvent suivre plusieurs chemins de propagation entre l'émetteur et le récepteur en raison de réflexions, diffractions et réfractions. Cette multiplicité de chemins crée des défis tels que les interférences inter-symboles, le fading sélectif en fréquence, la variation du niveau de puissance et les problèmes de synchronisation. Ces défis se manifestent dans divers

contextes, notamment la téléphonie mobile urbaine, le Wi-Fi domestique, la communication Véhicule-Véhicule (V2V), les réseaux de capteurs sans fil (WSN) et les communications par satellite. Pour relever ces défis, des techniques avancées de modulation, de codage, de synchronisation et de traitement du signal sont nécessaires.

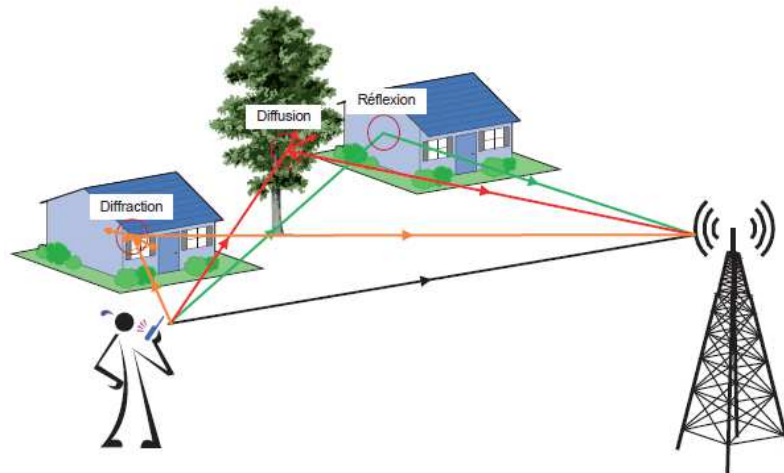


Figure 1.13: *Le canal à trajets multiples*

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre a fourni un aperçu du domaine des télécommunications numériques, en mettant l'accent sur les réseaux sans fil. Nous avons examiné différents types de réseaux sans fil et passé en revue les techniques de multiplexage, en mettant en lumière notamment la technique FDMA et son association avec l'OFDM. Cette dernière sera analysée plus en détail dans le deuxième chapitre. De plus, nous avons rappelé les caractéristiques des différents types de canaux de propagation dont la modélisation est importante pour les systèmes de télécommunications. Ce survol constitue une base solide pour approfondir notre compréhension des concepts et des technologies qui seront étudiés par la suite dans ce travail.

Chapitre 02 : Principe de l'OFDM et le MIMO-OFDM

Chapitre 02 : Principe de l'OFDM et le MIMO-OFDM

2.1 Introduction

L'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) est une technique de modulation utilisée en télécommunications pour transmettre des données sur des canaux sélectifs en fréquence. Cette méthode, intégrée dans des normes telles que IEEE802.11a, WiMAX, LTE, DVB et DAB, modifie les données en utilisant la transformée de Fourier pour créer plusieurs sous-canaux mono-trajet. Cela simplifie l'égalisation du signal, tandis que l'utilisation de la redondance cyclique et des algorithmes FFT rapides réduit la complexité des terminaux. Cependant, l'OFDM peut manquer de diversité et nécessiter des techniques supplémentaires telles que pour compenser les interférences spécifiques au canal. Le but de ce chapitre est d'introduire la technique OFDM dans un contexte MIMO (Multi input multi output). Leurs principes généraux sont décrits et explicités. [9]

2.2 Modulations multi-porteuses

Les techniques multi-porteuses, telles que l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), sont en effet utilisées pour surmonter les problèmes liés à l'interférence inter-symboles dans les canaux à trajets multiples. Ces canaux introduisent des retards et une dispersion temporelle qui peuvent provoquer des interférences entre les symboles transmis, affectant ainsi la qualité de la transmission.

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 [10].

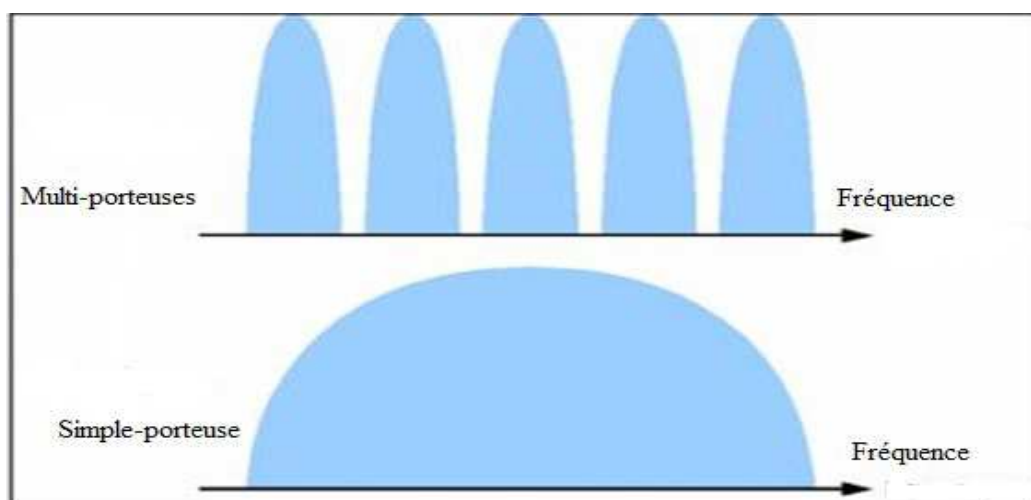


Figure 2.1: *Modulations multi-porteuses*

Le principe des modulations multi-porteuses est basé sur la technique de multiplexage par division en fréquence FDM pour (Frequency Division Multiplexing). Cette technique permet de transmettre plusieurs signaux simultanément sur des fréquences différentes au sein d'un même canal de communication. Chaque signal est modulé sur une porteuse distincte, et ces porteuses sont espacées les unes des autres pour éviter toute interférence entre les signaux. figure 2.1

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 dans un canal multi-trajet sélectif en fréquence est adaptée pour des données à haut débit, mais elle réduit l'efficacité spectrale en raison des bandes de garde nécessaires entre chaque paire de porteuses adjacentes. Comme illustrée dans la

Figure 2.2.a. L'OFDM est en effet une technique de modulation multi-porteuse très efficace et largement utilisée dans les systèmes de communication modernes. En divisant la bande passante en sous-porteuses 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.

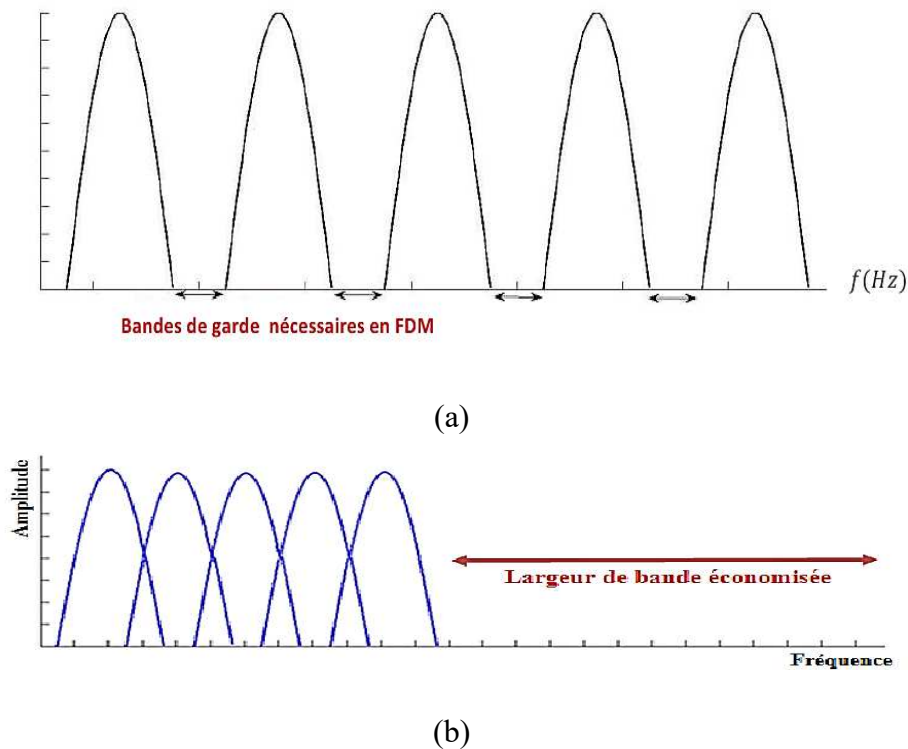


Figure 2.2: Bande passante en FDM (a) et OFDM (b)

2.3 Aperçu sur la Technique OFDM

L'OFDM, ou Orthogonal Frequency Division Multiplexing, est une technique de modulation utilisée dans les réseaux sans fil et les réseaux cellulaires ainsi que la télévision numérique.

Il s'agit d'une technique de modulation qui consiste à diviser la bande passante disponible en plusieurs sous-porteuses, sur lesquelles les données sont transmises simultanément en parallèle. Le processus de transmission des données en utilisant l'OFDM repose sur les transformées de Fourier, qui permettent de passer du domaine temporel au domaine fréquentiel. Chaque sous-porteuse transporte une partie des données, et étant orthogonales entre elles, elles ne se chevauchent pas, évitant ainsi les interférences et améliorant l'efficacité spectrale.

Les avantages de l'OFDM incluent une meilleure résistance aux interférences et aux échos, une utilisation efficace de la bande passante disponible, une meilleure adaptabilité aux conditions de propagation du canal, et une plus grande capacité à gérer les débits élevés de données.

Cependant, l'OFDM présente également certains problèmes, tels que la sensibilité aux décalages de fréquence et de phase, l'impact de la distorsion non linéaire dans les amplificateurs, et la complexité de la conception des récepteurs. Pour compenser ces

problèmes, diverses techniques ont été développées, telles que l'utilisation de pilotes pour la synchronisation et la correction des décalages, l'utilisation de techniques de codage et de modulation avancées, et l'optimisation des paramètres du système pour réduire les effets indésirables. [11]

2.3.1 Principe de l'OFDM

Dans les systèmes mono-porteuse, la modulation se fait sur une seule fréquence à un certain débit R_s . Cependant, avec la modulation multi-porteuse de type OFDM, les données sont transmises simultanément sur plusieurs fréquences (N) modulées à un débit de R_s/N . Bien que le débit total reste le même, cette méthode rend chaque porteuse moins sensible aux interférences et à la dispersion du signal dans le canal de transmission. Cela revient à diviser le signal à transmettre en de nombreuses sous-porteuses, similaire à l'utilisation de plusieurs systèmes de transmission indépendants à différentes fréquences.

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.

La technique OFDM est actuellement utilisée pour les transmissions à haut débit, tant sur fil que sans fil. Elle est utilisée dans des applications telles que l'ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) pour la transmission sur paire torsadée, le DVB-T (Digital Video Broadcasting - Terrestrial) pour la télévision numérique terrestre, le DAB (Digital Audio Broadcasting) pour la diffusion numérique de l'audio, le WiFi IEEE 802.11g pour les réseaux sans fil, et le WiMAX pour l'accès à Internet sans fil sur de longues distances.[12]

2.3.2 Porteuses orthogonales :

Dans une transmission OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), l'écartement entre les porteuses joue un rôle crucial dans l'efficacité spectrale du système. En effet, si les porteuses sont trop éloignées les unes des autres, cela implique un besoin accru de bande passante pour transmettre un même débit d'information, ce qui diminue l'efficacité spectrale de la transmission.

Pour optimiser l'efficacité spectrale, il est donc essentiel de rapprocher autant que possible les fréquences des porteuses. Cependant, il faut également veiller à ce qu'il n'y ait pas

d'interférences entre les différentes porteuses, car cela pourrait rendre difficile la récupération des informations par le récepteur.

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 $1/T_s$.

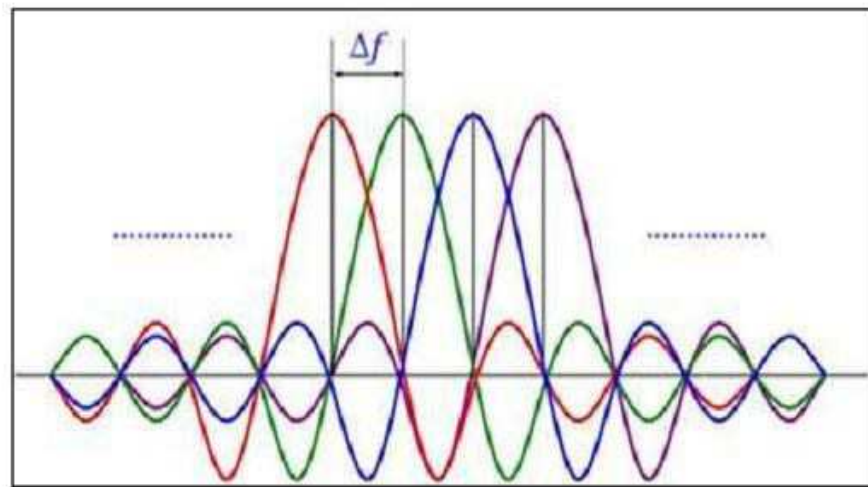


Figure 2.3: *Sous porteuses orthogonales*

En échantillonnant précisément à la fréquence d'une sous-porteuse, on évite effectivement les interférences avec d'autres sous-porteuses. Cela permet de superposer les spectres des différentes porteuses, optimisant ainsi l'occupation du spectre sont présentés sur la figure 2.3. Le spectre d'un signal OFDM est la somme de tous ces spectres.[13]

2.6 Système de transmission OFDM

Le système OFDM est un système qui consiste à diviser un grand nombre de porteuses le signal numérique que l'on veut transmettre. Comme si l'on combinait le signal à transmettre sur un grand nombre de systèmes de transmission (exemple: des émetteurs) indépendants et à des fréquences différentes. Pour que les fréquences des porteuses soient les plus proches possibles et ainsi transmettre le maximum d'information sur une portion de fréquences donnée.

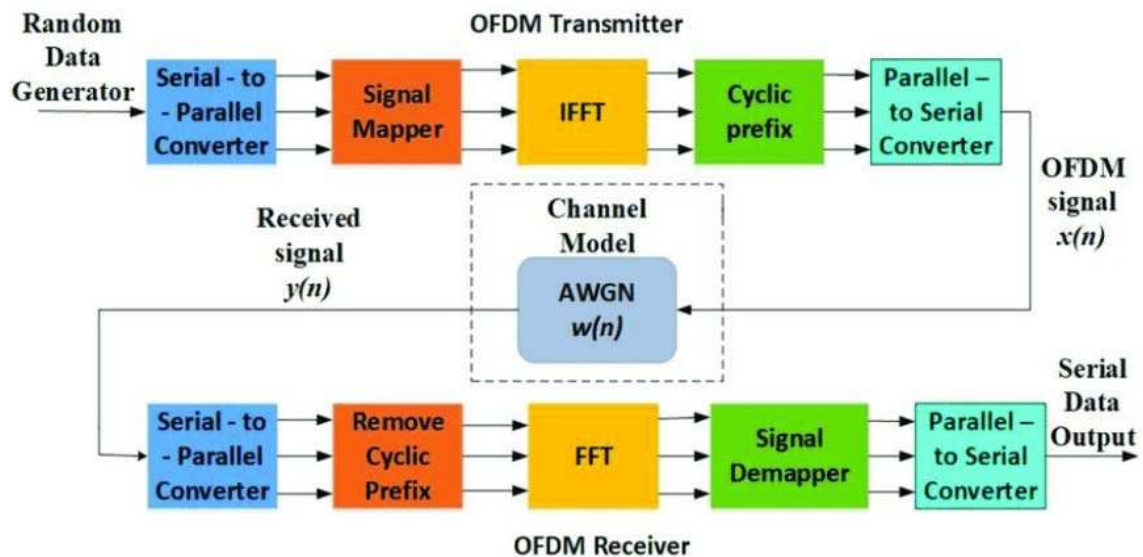


Figure 4: Système de transmission OFD

l'OFDM utilise des porteuses orthogonales entre elles. Les signaux des différentes porteuses se chevauchent mais grâce à l'orthogonalité, n'interfèrent pas entre elles. Le signal à transmettre est généralement répété sur différentes fréquences porteuses. Ainsi dans un canal de transmission avec des chemins multiples où certaines fréquences seront détruites à cause de la combinaison destructive de chemins, le système sera tout de même capable de récupérer l'information perdue sur d'autres fréquences porteuses qui n'auront pas été détruites. Chaque porteuse est modulée indépendamment en utilisant des modulations numériques : QPSK, QAM-16, QAM-64,... [14]

- 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 précédent montre le diagramme de constellation pour la modulation QPSK.

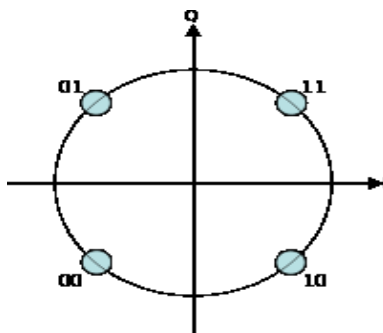


Figure 2.5: Constellation de la modulation de phase QPSK

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

- Modulation QAM :

La modulation d'amplitude en quadrature (QAM) est une technique de modulation qui combine deux fréquences porteuses sinusoïdales déphasées de 90 degrés, d'où le terme "quadrature". Elle peut également être vue comme une combinaison de modulation de phase et d'amplitude. La QAM permet d'atteindre des débits de données élevés tout en conservant une rapidité de modulation relativement faible par exemple, la QAM16 utilise 4 bits par symbole 2 bits sur i et deux bits sur Q . La valeur de i peut être une des 4 amplitudes possibles. Il en est de même pour la valeur de Q .

La figure 1.6 montre le diagramme de constellation et les signaux temporels de la modulation 16 QAM.

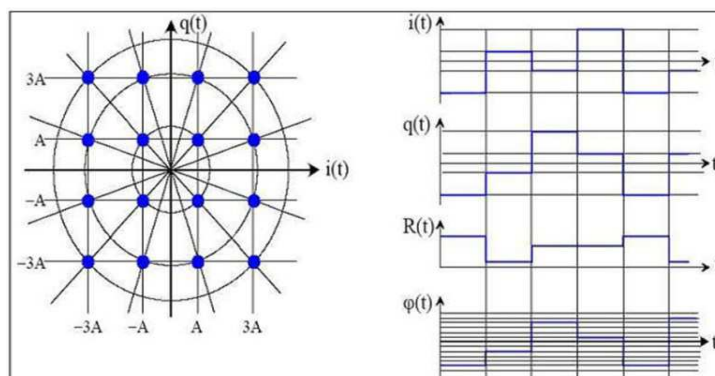


Figure 2.6: Modulation QAM.

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.

2.6.1 Système OFDM en émission :

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). Après modulation, l'information est représentée dans une constellation 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. [15]

2.6.2 Système OFDM en réception

À la réception, le processus inverse est mis en œuvre. Tout d'abord, le préfixe cyclique est éliminé, puis le signal est distribué sur plusieurs voies d'entrée différentes via une conversion série/parallèle. Ensuite, une transformée de Fourier rapide (FFT) est utilisée pour ramener le signal dans le domaine fréquentiel. Les données sont ensuite démodulées et converties en série, générant ainsi un flux d'informations en sortie de la chaîne de réception. La fidélité de ce flux par rapport au signal original dépend des interférences du canal et des erreurs de traitement, ce qui peut affecter sa ressemblance.[16]

2.6.3 Les intervalles de gardes

Les intervalles de gardes sont nécessaires pour l'orthogonalité entre les porteuses lorsque le canal introduit des multi-trajets au signal. Est l'ajout d'une extension cyclique (ou préfixe cyclique) au début de chaque symbole OFDM. Cette technique consiste à copier les derniers échantillons du symbole et à les ajouter au début, créant ainsi un chevauchement entre les symboles successifs.

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.

L'objectif principal de l'intervalle de garde est de protéger les symboles contre les interférences

Inter-symboles en fournissant un espace de séparation temporelle entre les symboles adjacents.

En fournissant cet espace de séparation, l'intervalle de garde permet au récepteur de mieux distinguer les symboles et de réduire les effets de l'IIS.

Cela contribue à maintenir l'orthogonalité entre les sous-porteuses et à améliorer la robustesse et la fiabilité du système de transmission OFDM. [17]

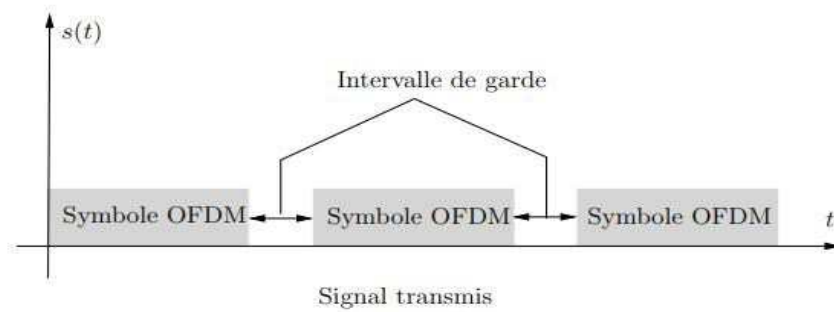


Figure 2.7: Les intervalles de gardes dans un symbole OFDM

Les types d'intervalles de garde sont :

CP : Est une technique qui consiste à insérer une copie d'un bloc d'information à transmettre en amont de la trame. Plus clairement, il s'agit de récupérer une partie des informations à transmettre et d'insérer ces informations en début de trame appelé PREFIXE CYCLIC (CP-OFDM).

ZP : Insérer des zéros au lieu d'intervalle de garde et aucun signal est transmise pendant l'intervalle de garde, appeler zéro-remplissage (ZPOFDM).

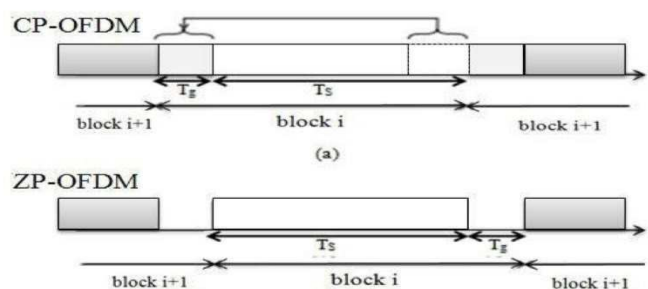


Figure 2.8: Les différents intervalles de garde

2.6.3.1 Remplissage par des zéros :

Une technique couramment employée dans le domaine des systèmes UWB consiste à remplacer le préfixe et le suffixe cyclique par des zéros à l'intérieur de l'intervalle de garde.

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. [18]

2.6.3.2 Préfixe cyclique

Le Préfixe Cyclique est une technique de transmission de données qui implique l'insertion d'une copie d'un bloc d'informations au début de ce bloc. Cela signifie qu'une partie des données à transmettre est récupérée et placée en amont du bloc principal. Cependant, l'inconvénient de cette méthode est que l'insertion d'un intervalle de garde peut réduire le taux de symbole, bien que si le nombre de sous-porteuses est élevé, la durée de symbole peut compenser cette réduction. Il existe trois types d'intervalle de garde

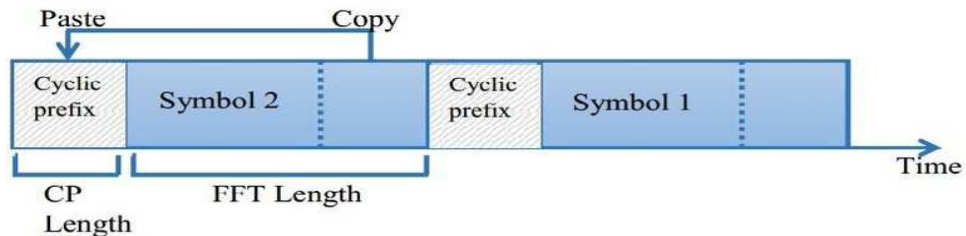


Figure 2.9: Insertion d'un préfixe cyclique dans l'intervalle de garde

Figure 2.9 : Insertion d'un préfixe cyclique dans l'intervalle de garde

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

$$(2.1) \quad T_{total} = T_{cp} + T_{eff}$$

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 une technique utilisée dans les systèmes de communication à modulation orthogonale de fréquence divisionnaire multiple (OFDM) pour réduire l'interférence inter-symbole.

Il s'agit d'une extension cyclique ajoutée à la fin de chaque symbole OFDM, permettant de compenser les effets de l'impulsion de l'onde transmise et de minimiser les distorsions causées par le canal de communication.

Le concept de suffixe cyclique repose sur le même principe que le préfixe cyclique, mais il est ajouté à la fin du symbole OFDM plutôt qu'au début. Son but principal est d'éviter les interférences.

D'autres termes, il permet de séparer efficacement les signaux montants et descendants pour une transmission plus fiable et de meilleure qualité.

Pour déterminer la longueur optimale du suffixe cyclique, il est essentiel de calculer la différence de temps de réception entre le flot montant et le flot descendant. Cette différence de temps est généralement causée par la propagation inégale des signaux à travers le canal de communication.

En ajustant la longueur du suffixe cyclique en fonction de cette différence de temps, on peut minimiser les interférences et optimiser les performances du système OFDM.

2.7 Présentation du système MIMO

Le MIMO, ou Multiple-Input Multiple-Output, est une technologie de communication sans fil avancée qui révolutionne la manière dont les données sont transmises et reçues.

Contrairement aux systèmes traditionnels qui se contentent d'une seule antenne à la fois pour l'émission et la réception, le MIMO exploite plusieurs antennes à la fois des deux côtés de la liaison à l'émetteur (multiple-input) et au récepteur (multiple-output).

L'idée fondamentale derrière le MIMO est d'exploiter la diversité spatiale. En d'autres termes, au lieu de compter uniquement sur des signaux directs entre l'émetteur et le récepteur, le MIMO profite des chemins multiples, des réflexions et des diffractions dans l'environnement pour améliorer la communication. Cela se traduit par une augmentation significative de la capacité du canal sans fil et une amélioration notable de la qualité de transmission.

En utilisant plusieurs antennes à l'émetteur, le MIMO peut diviser le flux de données à transmettre en plusieurs flux spatiaux distincts, connus sous le nom de streams spatiaux. Chaque stream spatial est transmis simultanément par une antenne différente, ce qui augmente le débit global de transmission. Du côté du récepteur, les multiples antennes permettent de capter ces différents streams spatiaux et de les combiner intelligemment pour reconstruire les données d'origine avec une meilleure précision et une résistance accrue aux interférences.

En plus d'augmenter la capacité et d'améliorer la fiabilité de la transmission, le MIMO offre également des avantages en termes d'efficacité spectrale. En exploitant les propriétés spatiales du canal, il permet d'atteindre des débits plus élevés tout en utilisant les mêmes ressources spectrales, ce qui est particulièrement précieux dans des environnements où la bande passante est limitée ou congestionnée. [19]

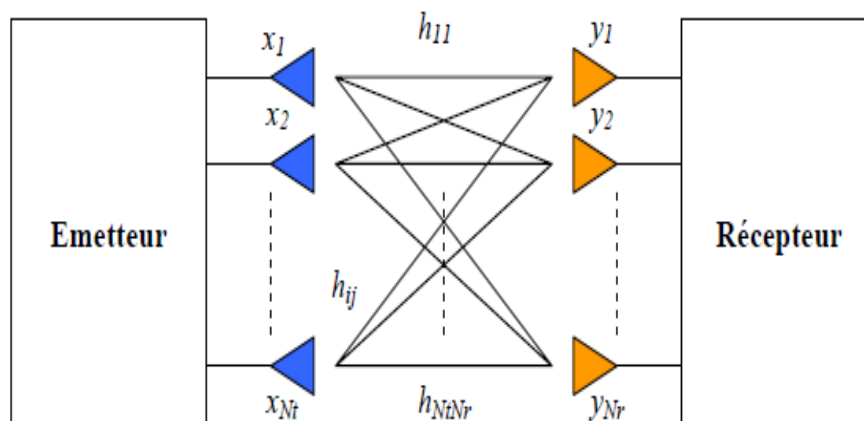


Figure 2.10: *Système MIMO*

2.8 Différentes architectures du système MIMO

Il existe quatre configurations d'antenne de base dans les systèmes de communication sans fil MIMO. La première est SISO (Single Input Single Output), où il y a une seule antenne à la fois pour l'émetteur et le récepteur. 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 l'émission et une seule antenne, à la réception il est nommé MISO. Enfin, un système MIMO se caractérise par l'utilisation de plusieurs antennes à l'émission ainsi qu'à la réception [20].

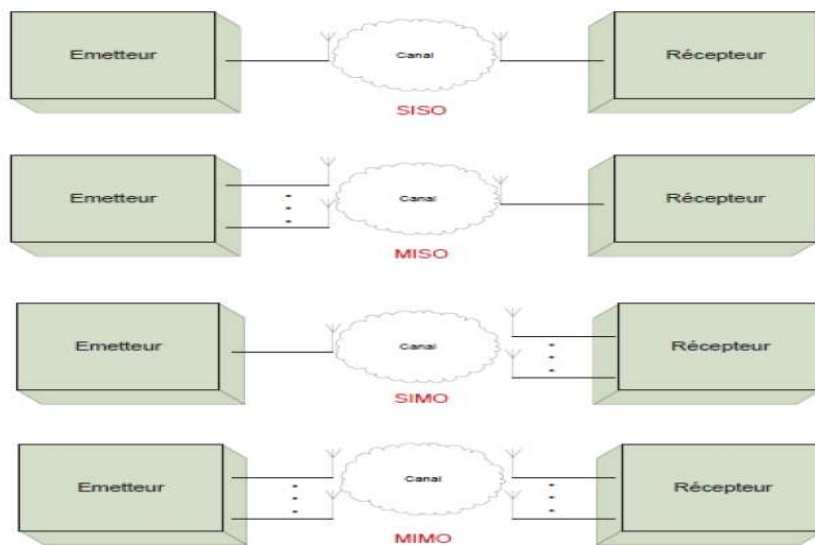


Figure 2.11: Différentes configurations des antennes multiples

2.8.1 Architecture SISO (Single Input Single Output):

Système SISO, ou "Single Input Single Output" C'est l'architecture la plus simple qui utilise une seule entrée et une seule sortie.

En d'autres termes, cela signifie qu'il n'y a qu'une seule variable d'entrée qui influence une seule variable de sortie dans ce système.

Comme présentée dans la figure :



Figure 2.12: SISO

La capacité du canal SISO est :

$$C = W \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P}{N_0 W} \right) \text{ bps} \quad (2.2)$$

2.8.2 Architecture SIMO (Single Input Multiple Output) :

C'est une technique qui utilise plusieurs antennes en réception pour contrer l'affaiblissement causé par le canal. le signal reçu est additionné et le rapport signal sur bruit total est la somme des rapports signaux sur bruits de chacun des antennes de la réception. Comme présente dans la figure (2.4) Son objectif principal est de permettre à un récepteur de recevoir des signaux issus de différentes sources indépendantes, afin de contrer les effets des affaiblissements.

La capacité du canal SIMO :

$$C = W \cdot \log_2 \left(1 + N_r^2 \frac{P}{N_0 W} \right) \quad (2.3)$$



Figure 2.13: SIMO (Single Input Multiple Output)

2.8.3 Architecture MISO (Multiple Input Single Output):

MISO C'est une technique de transmission à antennes multiples avec une seule antenne de réception. Comme présente dans la figure 2.14 :

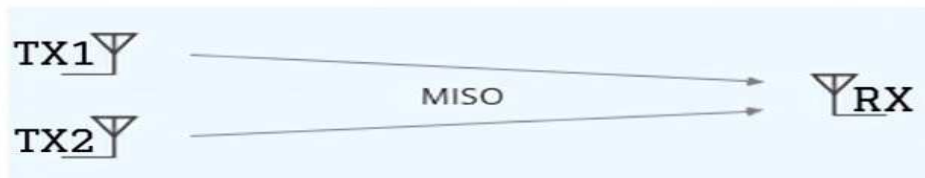


Figure 2.14: MISO - Multiple Input Single Output

Dans ce mode de transmission, une superposition du signal transmis simultanément par les N_t antennes émettrices est reçue. Chaque antenne émet le même symbole d'énergie E_s/N_t C'est-à-dire que la puissance émise est divisée sur le nombre d'antenne telle que :

$$P = \sum_{i=1}^{N_t} P_i \quad (2.4)$$

Avec P_i est la puissance émise sur chaque antenne. Si cette puissance est égale sur toutes les

Antennes, alors on dira que $P = N_t P_i$.

La capacité du canal MISO :

$$C = W \log_2 \left(1 + N_t \frac{P_i}{N_0 W} \right) = W \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P}{N_0 W} \right)$$

(2.5)

2.8.4 Architecture (Multiple Input Multiple Output)

La technologie MIMO permet d'augmenter le débit linéairement avec le nombre D'antenne à la réception et de contrer l'évanouissement du canal, ce qui contribue à minimiser la probabilité d'évanouissement et d'atténuation du signal.

En comparant le système MISO (Multiple Input Single Output) avec le système MIMO, la principale différence réside dans la manière dont les données sont transmises. Dans un système MISO, les mêmes paquets de données sont envoyés à toutes les antennes qui émettent sur la même fréquence. En revanche, dans un système MIMO, des paquets différents peuvent être envoyés simultanément à différentes antennes qui émettent également sur la même fréquence.

Cette différence fondamentale entre les deux systèmes contribue à améliorer considérablement les performances globales des réseaux sans fil.



Figure 2.15: MIMO Multiple Input Multiple Output

En considérant l'ensemble des signaux reçus simultanément, cette relation peut s'écrire

Sous forme matricielle de dimension par :

Avec :

$$y(k) = Hs(k) + b(k)$$

(2.6)

$$H = \begin{pmatrix} h_{11} & \dots & h_{1N_t} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_r1} & \dots & h_{N_rN_t} \end{pmatrix}, \quad \text{et} \quad y = (y_1 \dots y_{N_r})^T$$

2.9 Présentation du système MIMO-OFDM

Le système MIMO (Multiple Input Multiple Output) utilisant la modulation OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) est une technique avancée de communication sans fil qui permet d'améliorer considérablement l'efficacité spectrale et la qualité de transmission des signaux radio. Dans ce contexte, lorsque l'émetteur et le récepteur sont équipés respectivement d' N_r antennes d'émission et d' N_t antennes de réception, et que ces antennes sont alignées et uniformément espacées, cela crée un système MIMO particulièrement performant.

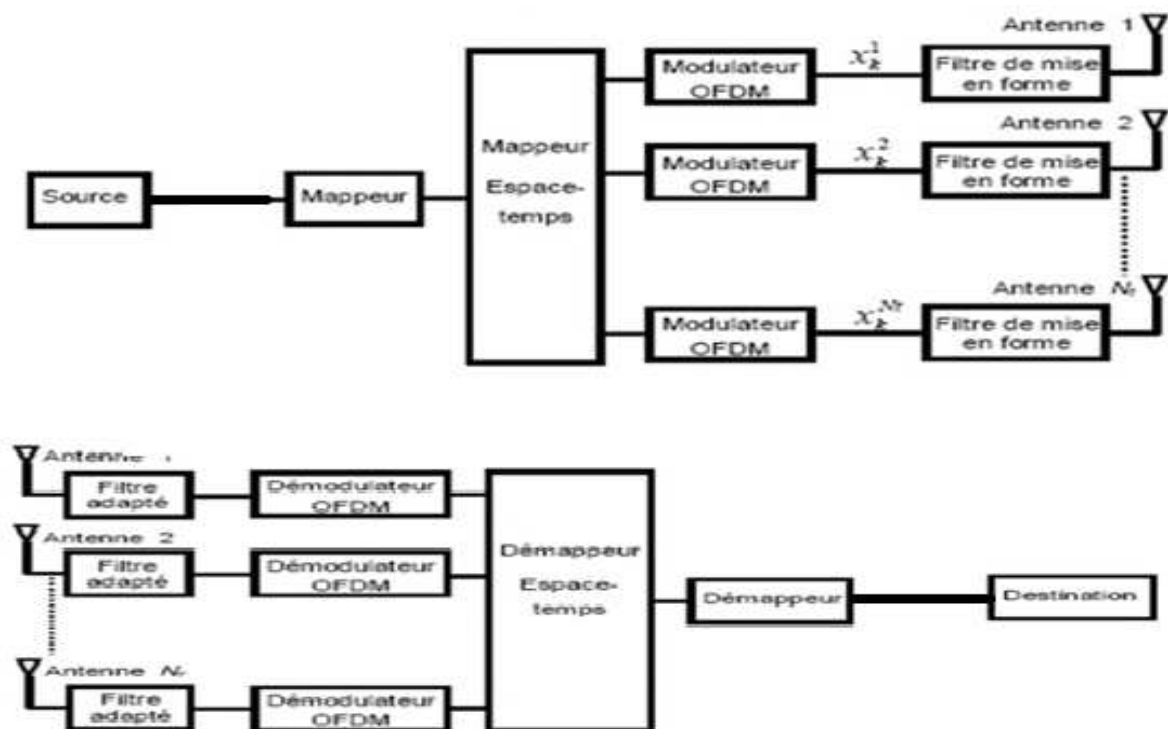


Figure 2.16: système MIMO-OFDM

Nous présentons le chemin emprunté par le message depuis sa création par l'émetteur jusqu'à son arrivée chez le destinataire. [21]

- Le message généré par la source est d'abord transformé en une séquence binaire.

Idéalement. Cette opération de conversion d'un signal analogique à un signal Numérique est assurée par un processus de compression appelé le codeur Source. En général, le codeur source n'est pas pris en compte lors de l'étude des Performances des systèmes MIMO, puisque la séquence il est donné

directement

Avec des valeurs binaires. Ainsi la chaîne de transmission se délimite par le Codeur de canal et le décodeur de canal, de part et d'autre du canal de Transmission ;

- la séquence binaire résultante est ensuite passée au codeur de canal. Le but du Codeur de canal est de la protéger contre les effets du canal (bruits, interférences, Etc.). Ainsi, le codeur introduit d'une façon contrôlée des bits de redondance qui Peuvent être utilisés au niveau du récepteur. La séquence binaire passe à travers Un entrelacer afin que la transmission soit plus robuste aux atténuations en bloc (Block fading) du canal ;

- la séquence binaire passe à travers un modulateur numérique. Ce dernier associe A chaque séquence de q bits un symbole complexe selon une constellation de Taille 2^q Par exemple, nous citons la modulation binaire de phase dite (BPSK),

la

Modulation d'amplitude en quadrature (QAM) ;

- les symboles complexes sont par la suite mappés afin qu'ils soient transmis sur Les N_T antennes de transmission et à travers les ressources orthogonales du Canal. D'un modulateur spatio-temporel s'avère une bonne idée afin de profiter

des

Ressources en espace, temps et fréquence présentes.

- Finalement, les symboles passent à travers le modulateur OFDM avant d'être Filtrés par le filtre limiteur de bande
- le signal analogique résultant est transmis à travers le canal radio, où il se trouve Affecté par les atténuations dues aux réflexions et aux réfractions du signal dans Le milieu de propagation.
- A la réception, le récepteur à antennes multiples est constitué d'un filtre adapté

Au filtre limiteur de bande utilisé à l'émission, du démodulateur OFDM, du Décodeur spatio-temporel, du démodulateur numérique, du décodeur canal et du Décodeur source. [22]

2.10 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons abordé la modulation multi-porteuses, en particulier l'OFDM et son processus de modulation/démodulation. Nous avons souligné l'importance de l'orthogonalité entre les sous-porteuses du système OFDM pour une utilisation efficace du spectre. En parlant de la transmission du signal, nous avons noté que celui-ci peut subir des atténuations et des retards lors de sa réception, ce qui peut entraîner des interférences entre les symboles. Pour résoudre ce problème, le préfixe cyclique est utilisé pour éliminer ces interférences.

Enfin, nous avons présenté la structure des systèmes MIMO/OFDM à l'aide d'un schéma récapitulatif, en expliquant le principe de fonctionnement de ces systèmes.

CHAPITRE 03 : Résultats de Simulation du système MIMO-OFDM

CHAPITRE 03 : Résultats de Simulation du système MIMO-OFDM

3.1. Introduction

En réponse à la demande croissante de multimédia à haut débit, des méthodes telles que l'augmentation de l'ordre de modulation et l'utilisation de multiples antennes ont été explorées pour améliorer l'efficacité spectrale. L'OFDM (multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence) est largement utilisé dans les systèmes de communication modernes pour ses avantages en termes d'efficacité spectrale, de robustesse contre les interférences et de mise en œuvre simple via la FFT. L'OFDM est particulièrement efficace dans les canaux sélectifs en fréquence. [10] [11]

Le MIMO, en multiplexage spatial, augmente les débits mais devient sélectif en fréquence dans les environnements multipath. L'OFDM peut transformer ces canaux sélectifs en canaux plats, améliorant ainsi l'efficacité. La combinaison MIMO-OFDM, qui exploite la robustesse de l'OFDM et la diversité du MIMO, est prometteuse pour les réseaux sans fil de nouvelle génération.

3.2. Mesure de performance d'un système de transmission

3.2.1. Taux d'erreur binaire (BER)

Le taux d'erreur binaire est le principal indicateur de la qualité de la transmission numérique. Il est défini comme le rapport entre le nombre de bits erronés et le nombre total de bits reçus. Ce taux indique le nombre d'erreurs survenues avant la modulation et juste après la démodulation, et il augmente en raison de diverses perturbations telles que des équipements ou réseaux défectueux, un mauvais alignement d'une antenne, ou la longueur du canal.

3.2.2. Rapport signal sur bruit (SNR)

Ce terme fait référence au signal perçu après le processus de démodulation. Le bruit total inclut celui provenant du réseau de transmission ainsi que le bruit intégré au signal de modulation sous forme de bruit d'amplitude, de bruit de phase, d'interférences inter-symboles et d'autres dégradations de la modulation. Il est calculé à l'aide de l'une des formules ci-dessous :

$$(S/N) \text{ (dB)} = 10 \log (P_s / P_N) \quad (3.1)$$

$$S/N = P_s / P_N \quad (3.2)$$

PS : Puissance du signal en W.

PN : Puissance de bruit en W.

3.2.3. Constellation reçu

Les constellations reçues sont plus au moins bruitées et dispersées selon la sévérité du canal et l'intensité du bruit. Nous donnons ci-dessous les constellations en émissions selon le type de modulation considéré (BPSK, QPSK, 16QAM et 64QAM). Les diagrammes de constellations de ces modulations sont décrits sur la figure suivante :

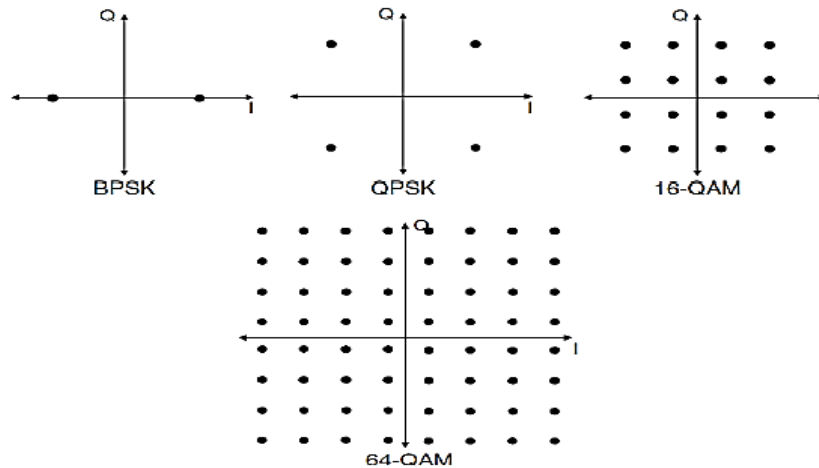


Figure 3.1: Constellations des modulations : BPSK, QPSK, 16QAM et 64QAM

3.3. Modèles de canaux utilisés en simulation

3.3.1. Le canal AWGN

Le canal de bruit gaussien blanc additif (AWGN) est un modèle de canal universel utilisé pour analyser les schémas de modulation. Dans ce modèle, le canal ajoute simplement un bruit blanc gaussien au signal qui le traverse. Cela signifie que la réponse en amplitude du canal est plate (avec une largeur de bande illimitée ou infinie) et que la réponse en phase est linéaire pour toutes les fréquences. Ainsi, les signaux modulés passent à travers sans perte d'amplitude ni distorsion de phase des composantes fréquentielles. Il n'y a pas de décoloration. La seule distorsion provient du bruit gaussien blanc additif. Le canal

AWGN est un canal théorique utilisé uniquement à des fins d'analyse. Le signal reçu $r(t)$ est le résultat du signal transmis $s(t)$ et d'un bruit blanc gaussien additif $n(t)$:

$$R(t) = s(t) + n(t) \quad (3.3)$$

3.3.2. Le canal Rayleigh

La distribution de Rayleigh peut approximativement représenter la nature constructive et destructive des composantes de trajets multiples dans les canaux à évanouissements plats en l'absence de visibilité directe, c'est-à-dire lorsqu'il n'existe aucun chemin direct entre l'émetteur et le récepteur. Le signal reçu peut être simplifié pour :

$$R(t) = s(t)*h(t) + n(t) \quad (3.4)$$

Où $h(t)$ est la matrice de canaux aléatoires ayant une distribution de Rayleigh et $n(t)$ est le bruit additif gaussien blanc.

3.4. Simulation du système MIMO-OFDM

Les systèmes MIMO-OFDM maximisent l'utilisation de la diversité spatiale et fréquentielle pour améliorer les performances de communication. Nous considérons un système MIMO utilisant la modulation OFDM, simulé dans 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. Le schéma des blocs constituant les différentes architectures d'un système MIMO-OFDM seront illustrés à tour de rôle.

3.4.1. Simulation du système MISO-OFDM

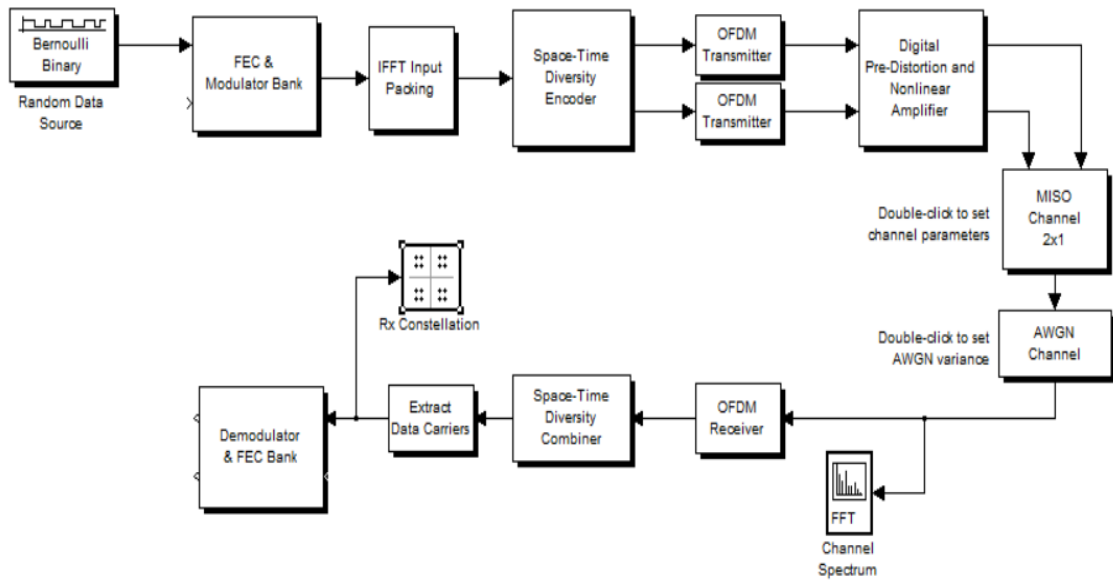


Figure 3.2: Schéma bloc d'un système MISO-OFDM sous Simulink.

Le trajet parcouru par le message de sa source à sa destination est le suivant :

- ✚ **Source numérique** : Le message est généré par le générateur de Bernoulli qui génère une suite binaire pouvant être transmise.
- ✚ **Modulateur** : La modulation est assurée par block destiné à cet égard le bloc (Inverse Fast Fourier Transformer ramène génère les sous porteuse qui vont être réparties par le bloc assurant la diversité spatiale temporelle.
- ✚ **Empaquetage par diversité spatiale temporelle** : L'empaquetage par diversité spatiale temporelle répartit les sous-porteuses sur plusieurs antennes et à différents moments dans le temps. Cela permet d'améliorer la résistance aux interférences et aux évanouissements du signal.
- ✚ **Transmetteur OFDM** : Le transmetteur OFDM convertit le signal empaqueté par diversité spatiale temporelle en un signal OFDM (Orthogonal Fréquence Division Multiplexing). Le bloc OFDM assure l'insertion d'un intervalle de garde de taille D au début du bloc, en recopiant la fin du bloc. Cette insertion a deux objectifs : absorber l'interférence inter-symboles (IES) due au canal de propagation et rendre le canal non sélectif en fréquence pour chaque sous-porteuse. La taille de l'intervalle de garde doit donc être supérieure à l'étalement maximal des retards. Le second objectif est de rendre la convolution entre le signal OFDM et le canal cyclique, ce qui se fait en recopiant la fin du signal dans

l'intervalle de garde, donnant ainsi au signal OFDM son caractère cyclique, d'où le nom de préfixe cyclique

- ✚ **Amplificateur de pré-distorsion et non linéaire** : L'amplificateur de pré-distorsion et non linéaire amplifie le signal OFDM tout en compensant les distorsions non linéaires introduites par l'amplificateur de puissance.
- ✚ **Antenne** : L'antenne transmet le signal OFDM dans l'espace.
- ✚ **Canal** : Le canal est le milieu traversé par le signal. Dans le cas de la communication par satellite, le canal est le vide spatial. Le signal peut être affecté par les interférences, les conditions atmosphériques et l'activité solaire.
- ✚ **Récepteur OFDM** : Le récepteur OFDM convertit le signal OFDM en un signal empaqueté par diversité spatiale temporelle.
- ✚ **Combinateur de diversité spatiale temporelle** : Le combinateur de diversité spatiale temporelle combine les sous-porteuses reçues par les différentes antennes et à différents moments dans le temps.
- ✚ **Démodulateur** : Le démodulateur extrait le signal numérique du signal modulé. A travers la banque de décodeurs FEC.

3.4.2. Blocs d'émission su système MISO-OFDM

Nous détaillons ci dessous les différents blocs en émission.

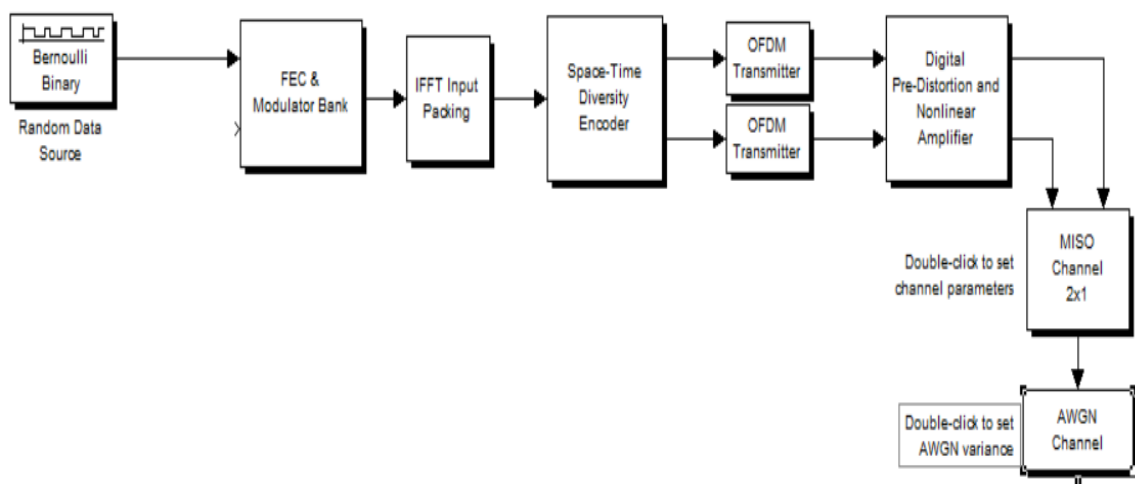
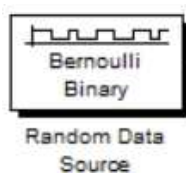


Figure 3.3: Schéma bloc d'émission MISO-OFDM

Bernoulli Binary :



Le premier bloc du système est le générateur de bits aléatoires. Ce bloc génère une séquence d'entiers aléatoires en série, chacun étant compris dans l'intervalle $[0, M-1]$.

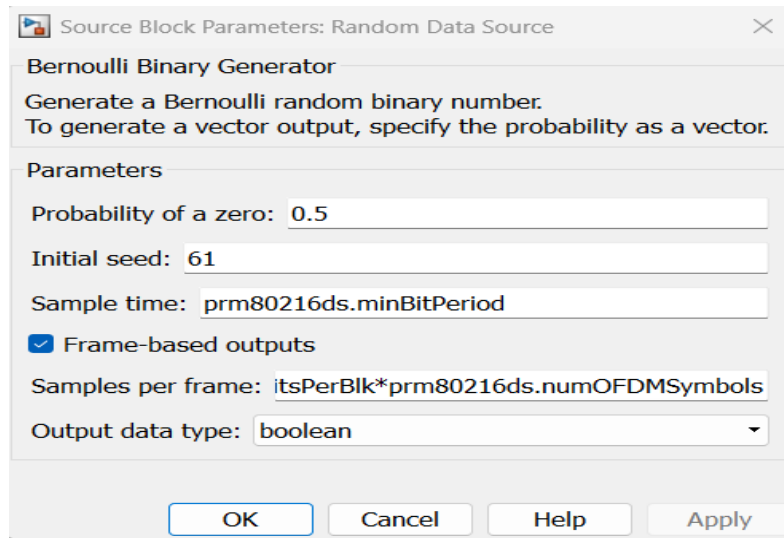
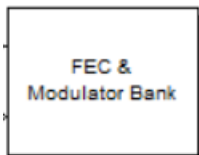


Figure 3.4: Paramètres du bloc 'Bernoulli Binary'

FEC & modulator Bank :



Cette banque de modulateurs fait référence à une collection de modulateurs utilisés dans le système, souvent pour multiplexage de plusieurs flux de données ou canaux. Chaque modulateur de la banque peut fonctionner sur une fréquence différente ou avec des schémas de modulation différents.

Le processus de variation d'un signal porteur pour transmettre des données. Les techniques de modulation courantes incluent la modulation d'amplitude (AM), la modulation de fréquence (FM), la modulation de phase (PM), la modulation d'amplitude en quadrature (QAM) et le déplacement de phase (PSK).

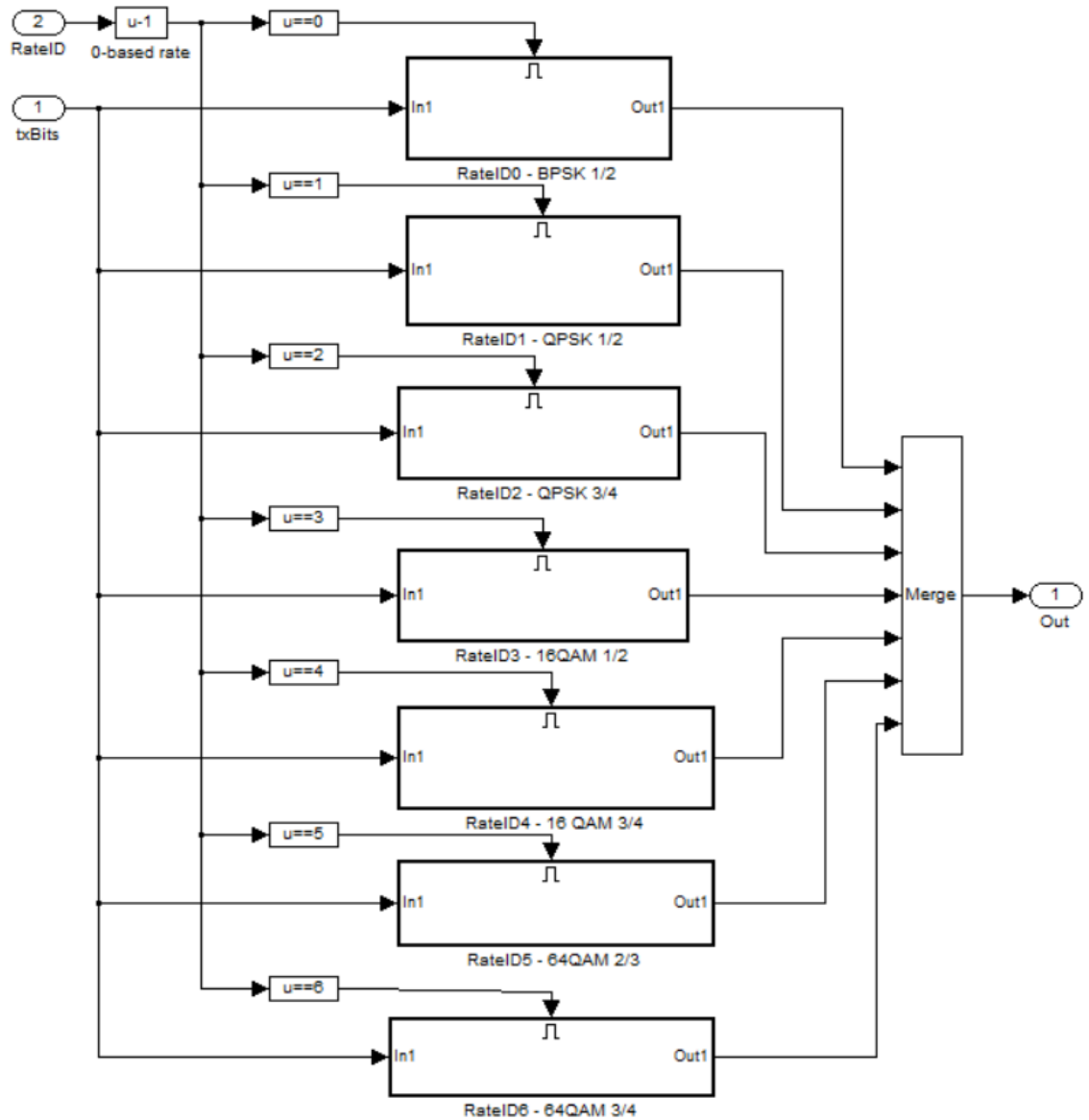


Figure 3.5: Paramètres du bloc FEC & modulator Bank

IFFT Input packing :



La Transformation de Fourier Rapide Inverse (IFFT), le "packing" ou l'organisation des données en entrée est essentiel pour obtenir des résultats corrects lors de la conversion du domaine fréquentiel au domaine temporel.

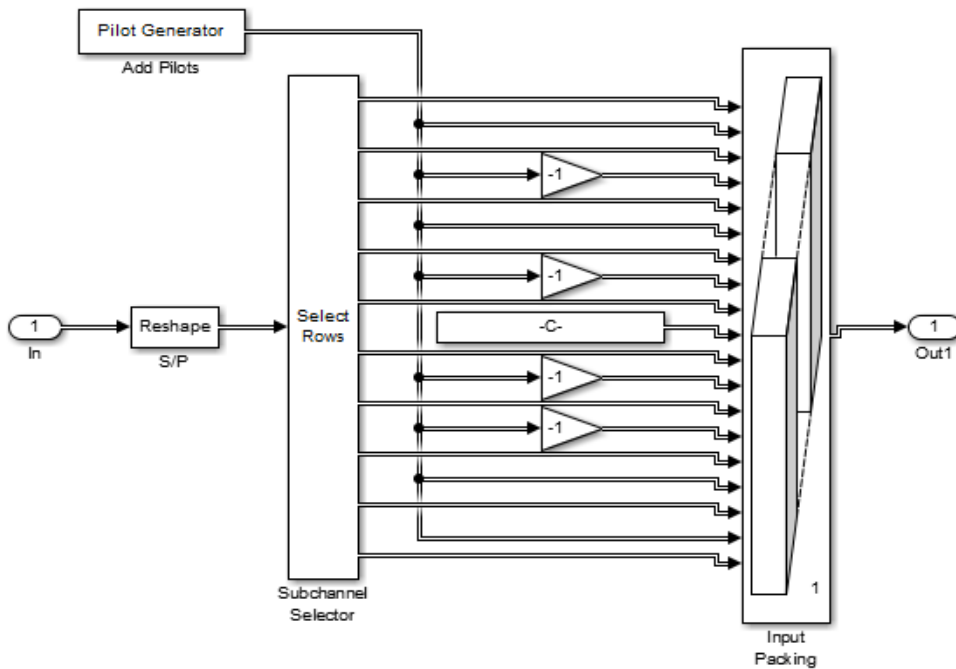
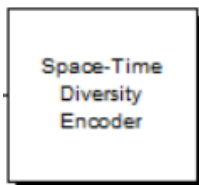


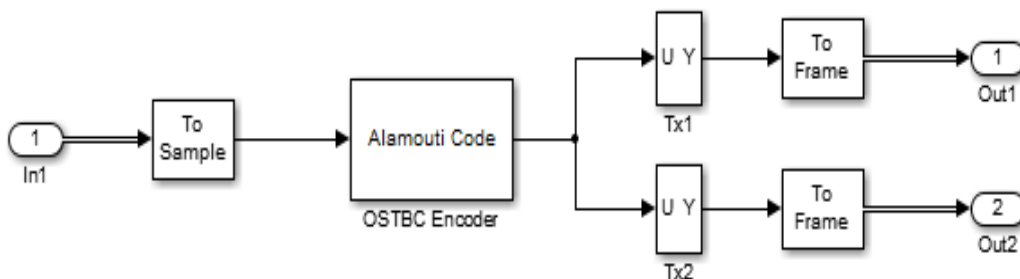
Figure 3.6: Paramètres du bloc IFFT Input packing

Space-Time Diversity Encoder :



L'encodeur de diversité espace-temps est utilisé pour améliorer la fiabilité et la performance de la transmission de données sur les canaux sans fil en exploitant la diversité spatiale et temporelle, en utilisant l'encodeur OSTBC

Nous avons deux antennes à la sortie et une à l'entrée.



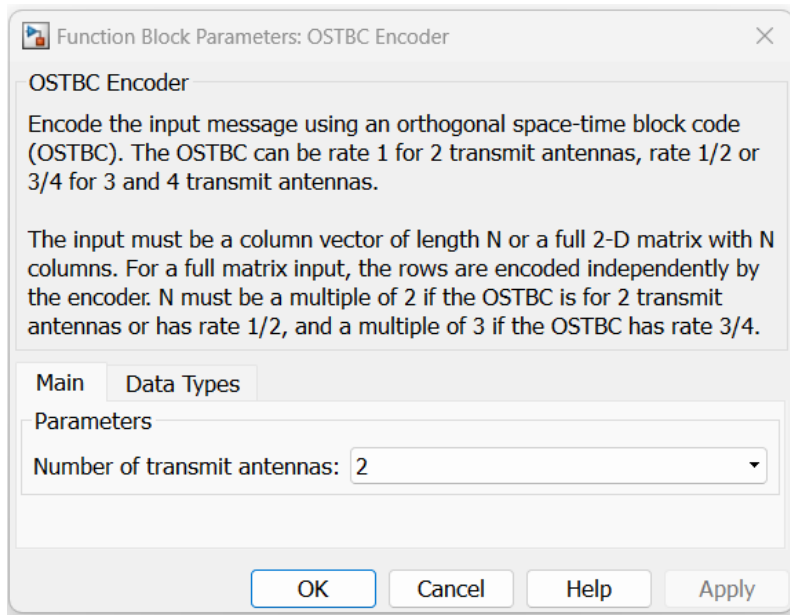
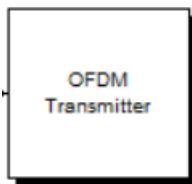


Figure 3.7: Paramètres du bloc *pace-Time Diversity Encoder*

OFDM transmitter :



L'émetteur OFDM comprend des étapes préliminaires telles que le codage de canal, la segmentation des données et la génération de signaux appropriés pour la transmission sans fil.

Dans lequel les données sont transmises sous la forme d'une combinaison de signaux orthogonaux à bande étroite appelés sous-porteuses. L'OFDM s'appuie sur une modulation à porteuse unique telle que QAM et peut transmettre à des débits de données similaires. Cependant, l'OFDM est plus robuste aux évanouissements sélectifs en fréquence et simplifie l'égalisation au niveau du récepteur.

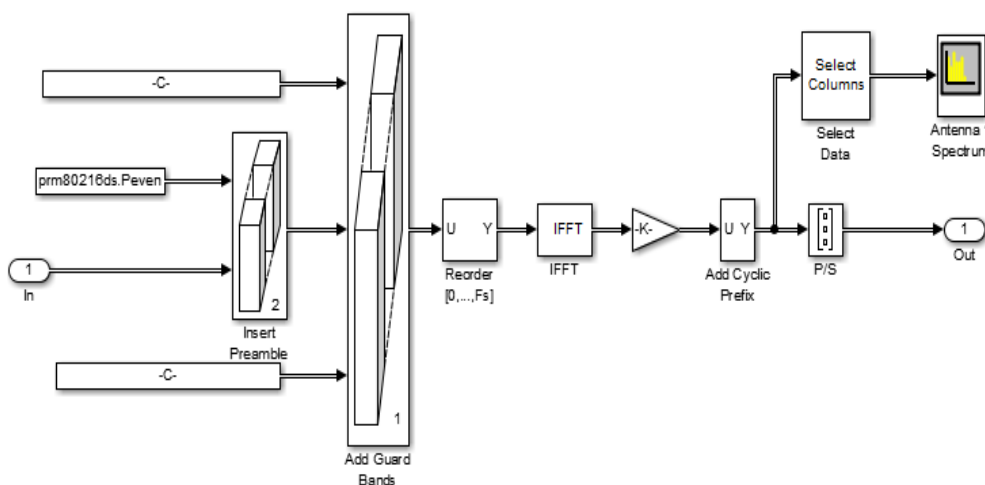
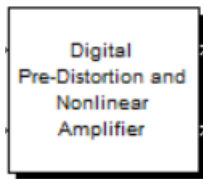


Figure 3.8: Paramètres du bloc *OFDM transmitter*

✚ Digital Pre-Distortion and Nonlinear Amplifier :



Le DPD permet de compenser la distorsion introduite par les amplificateurs non linéaires, tandis que la modélisation des amplificateurs non linéaires permet de comprendre et d'atténuer les effets de distorsion dans les signaux. Ensemble, ces techniques contribuent à améliorer la qualité du signal en sortie et à optimiser les performances des systèmes de communication.

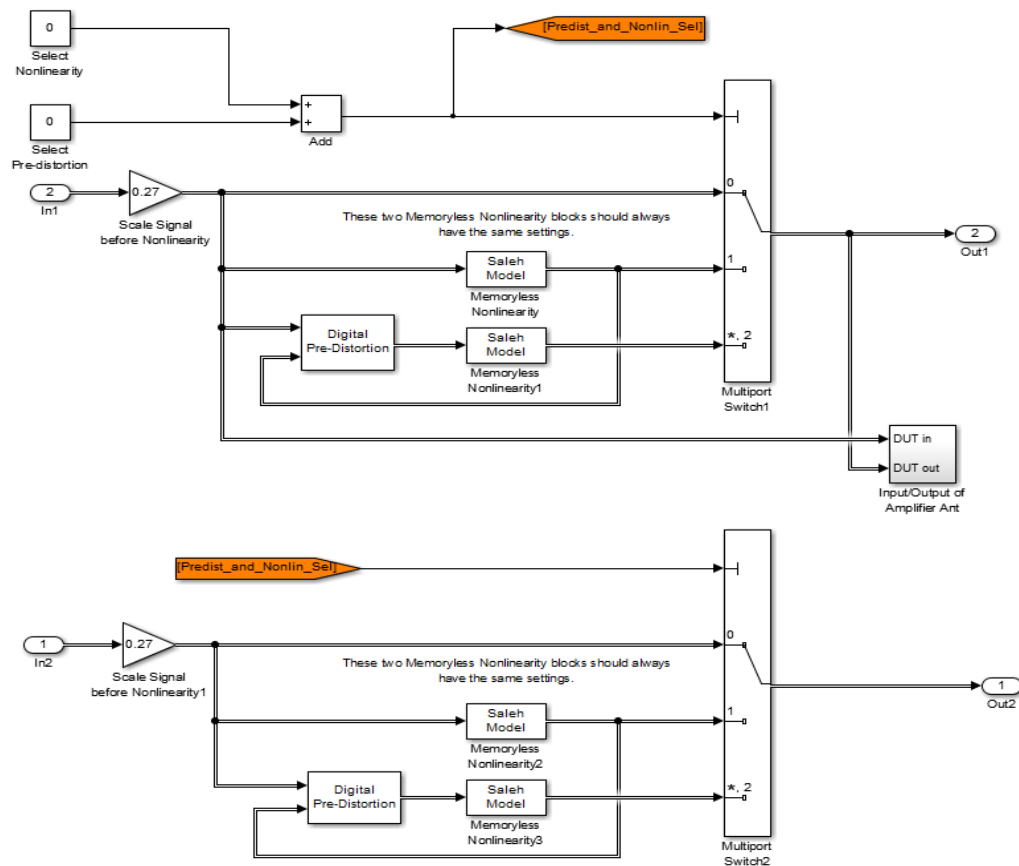
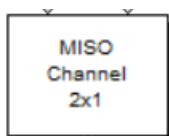


Figure 3.9: Paramètres du bloc Digital Pre-Distortion and Non liner Amplifier

✚ MISO Channel 2*1:



Le MISO, plusieurs signaux d'entrée sont combinés en un seul signal de sortie. La notation "2x1" indique généralement deux canaux d'entrée et un canal de sortie.

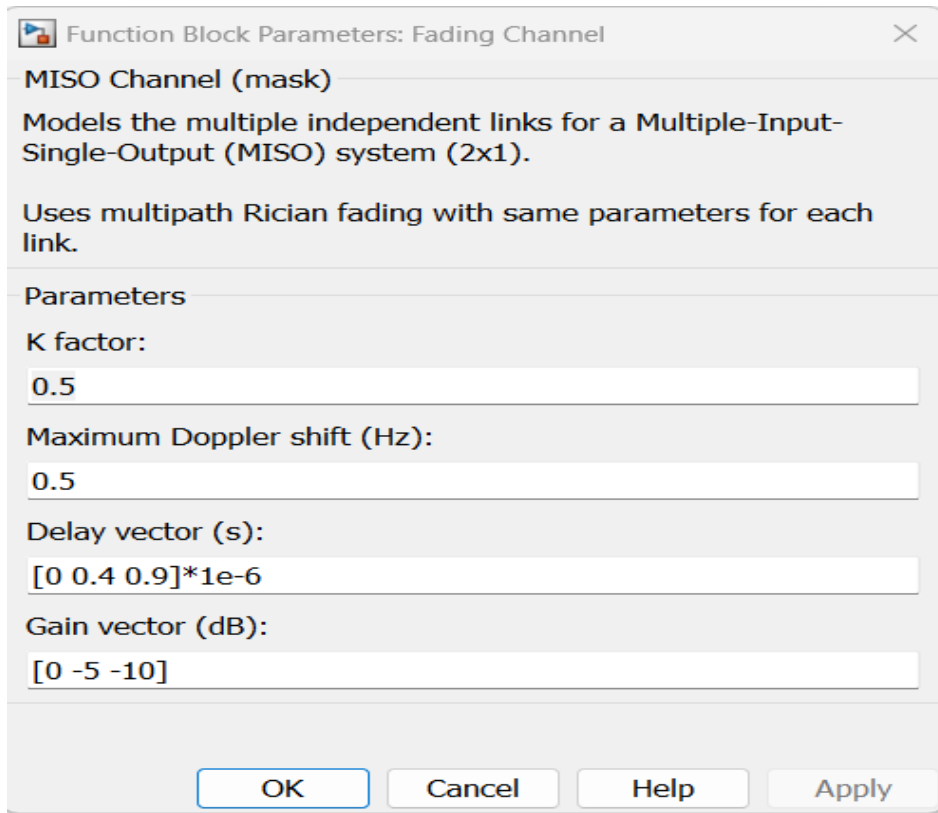


Figure 3.10: Paramètres du bloc du Channel MISO

Blocs de réception MISO-OFDM :

À la réception, les opérations inverses sont effectuées :

- Conversion parallèle-série.
- Conversion série-parallèle de taille P pour obtenir des blocs de $P + \Delta$ symboles.
- Suppression de l'intervalle de garde correspondant aux Δ premiers échantillons du bloc.
- Transformée de Fourier directe de taille P.
- Conversion parallèle-série

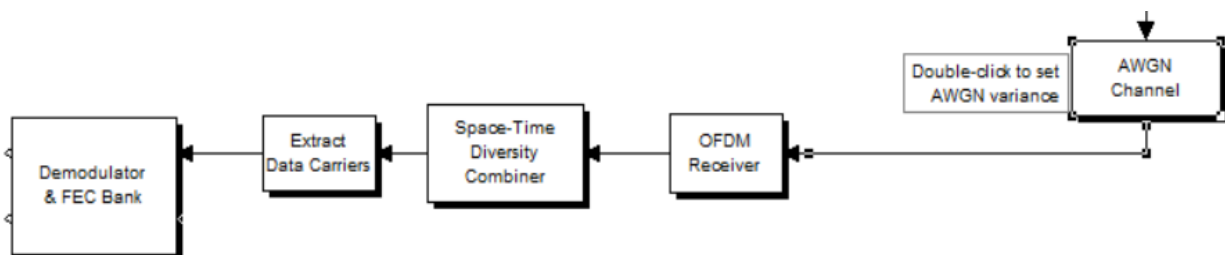


Figure 3.11: Schéma bloc d'émission MISO-OFDM

AWGN Channel:

Le canal AWGN est un modèle de canal important utilisé en théorie de l'information. Il représente les effets du bruit aléatoire sur un signal transmis. Le SNR est un paramètre important pour évaluer les performances d'un canal AWGN.

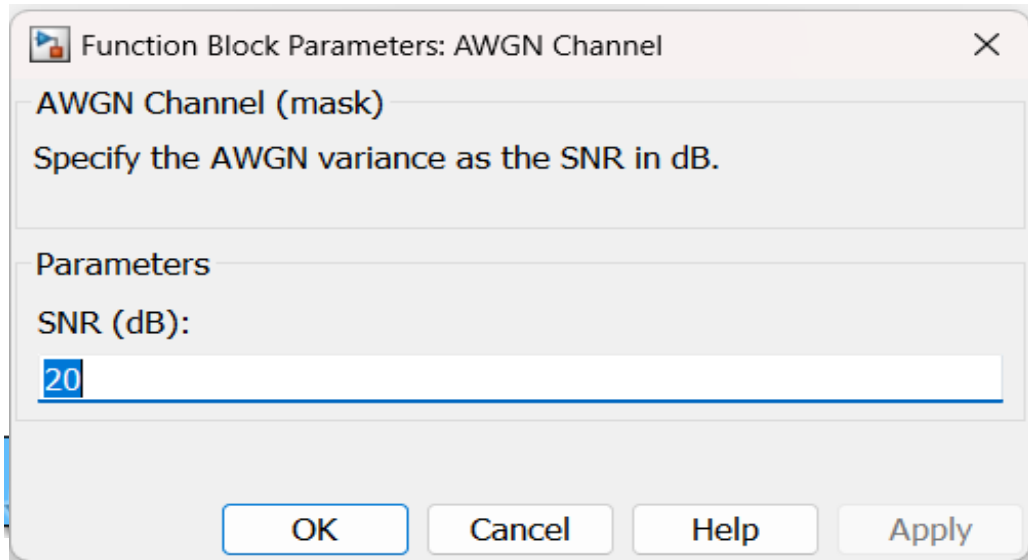


Figure 3.12: Paramètres du bloc AWGN Channel

OFDM Receiver :



Le récepteur OFDM joue un rôle crucial dans la récupération du signal transmis en démodulant et en décodant les données. Comme illustré par le diagramme de bloc simplifié, Le bloc de démodulation démodule le signal pour récupérer les données d'origine. Cela implique la conversion du signal à valeurs complexes en un signal à valeurs réelles, puis l'extraction des bits de données, Le bloc de décodage décode les bits de données pour récupérer le message d'origine. Cela peut impliquer la correction d'erreurs, le récepteur OFDM se compose de plusieurs blocs fonctionnels clés, chacun jouant un rôle essentiel dans le processus de réception.

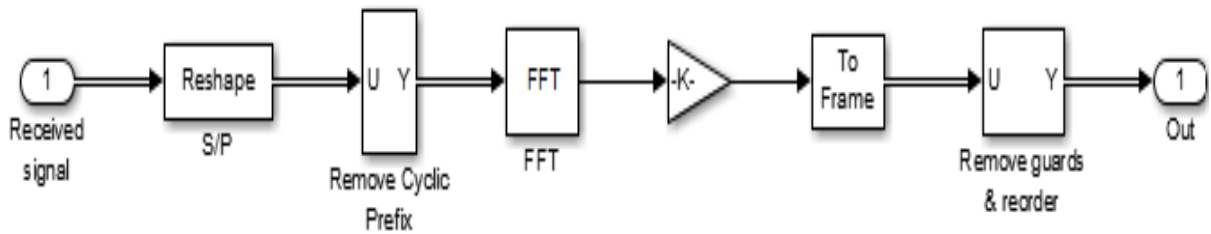
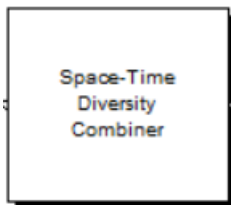


Figure 3.13: Paramètres du bloc OFDM Receiver

+ Space-Time Diversity Combiner :



Le bloc OSTBC Combiner combine le signal d'entrée (de toutes les antennes de réception) et le signal d'estimation de canal pour extraire les informations logicielles des symboles codés à l'aide d'un OSTBC. L'estimation du canal d'entrée peut ne pas être constante pendant la transmission de chaque bloc de mots de code et l'algorithme de combinaison utilise uniquement l'estimation pour la première période de symbole par bloc de mots de code. Un démodulateur ou un décodeur de symboles suivrait le bloc Combiner dans un système de communication.

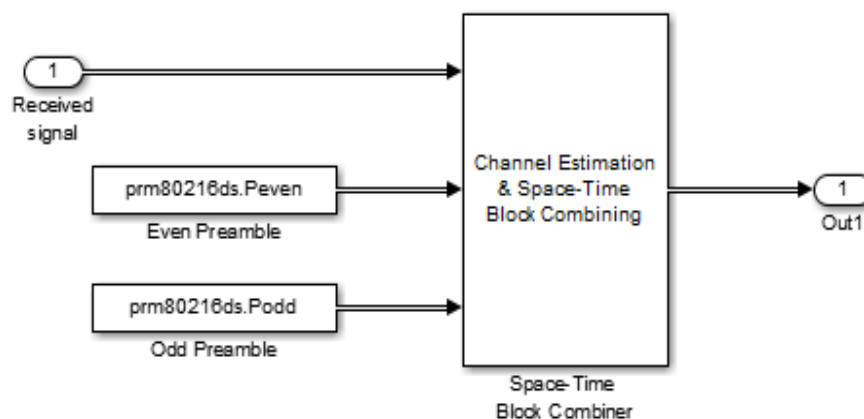


Figure 3.14: Paramètres du bloc Space-Time Diversity Combiner

✚ Extract Data carriers :



Ce bloc présente un diagramme de constellation Rx. Un diagramme de constellation Rx pour représenter le signal reçu qui montre l'amplitude et la phase du signal reçu à chaque instant d'échantillonnage des symboles. Le diagramme montre le signal reçu comme un ensemble de points sur le plan complexe. L'amplitude de chaque point est représentée par sa distance à l'origine, et la phase de chaque point est représentée par son angle par rapport à l'axe réel positif.

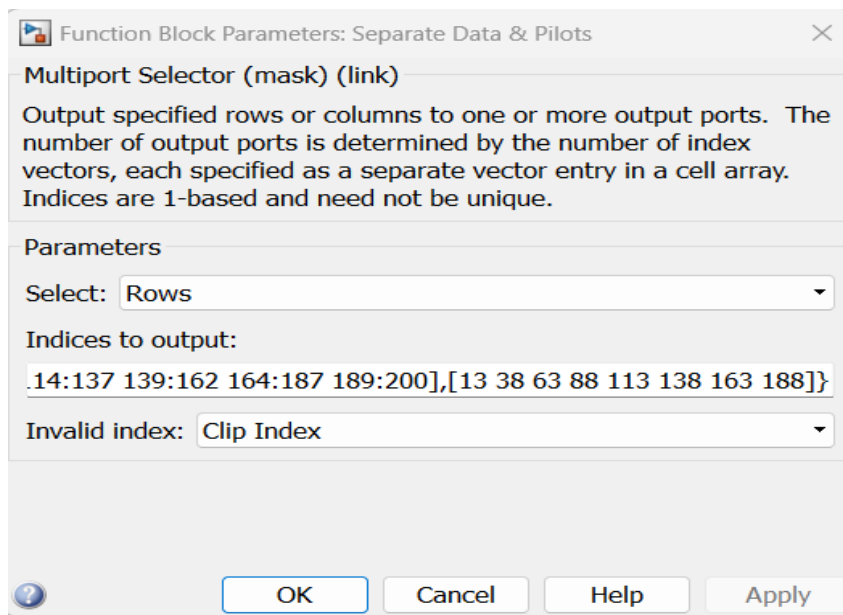
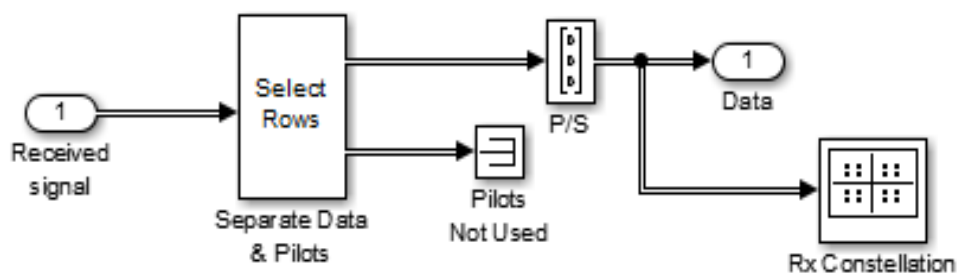
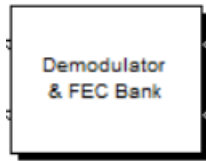


Figure 3.15: Paramètres du bloc *Extract Data carriers*

Demodulator & FEC Banc :



Le démodulateur FEC représente un système d'estimation des spécifications de modulation et de taux de code de Reed-Solomon (RS-CC). Il est conçu pour analyser le signal reçu et extraire les informations de modulation et de taux de RS-CC. Le système se compose de plusieurs blocs principaux.

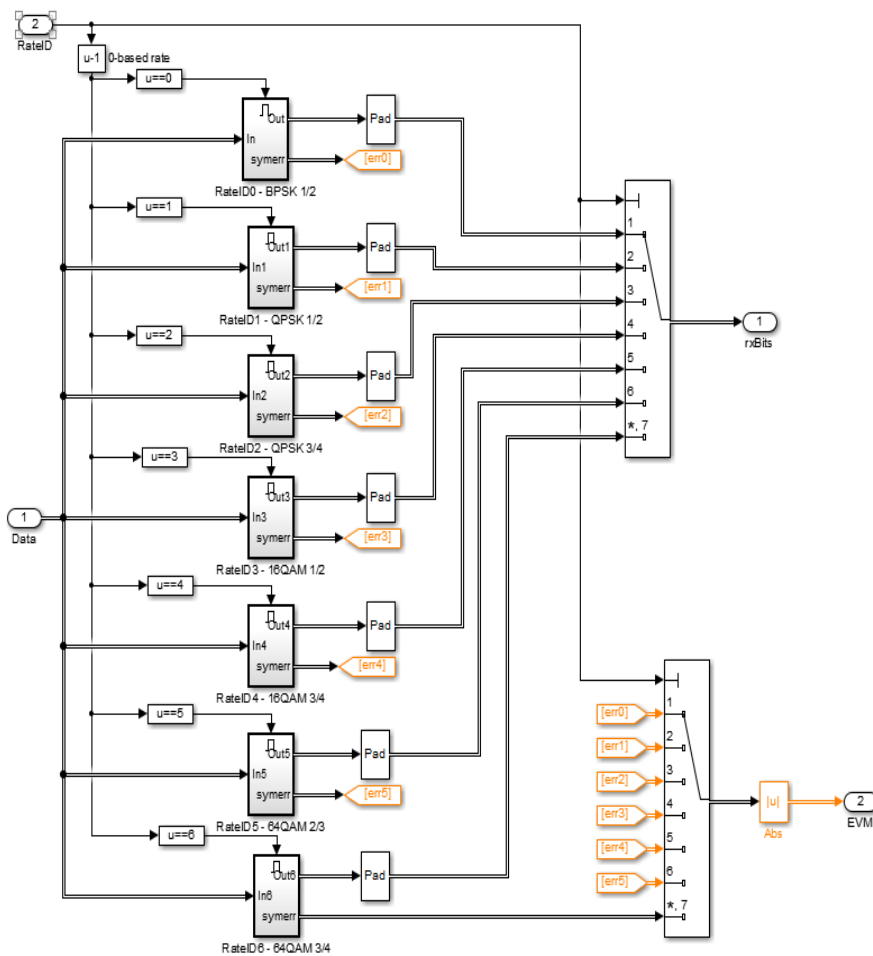


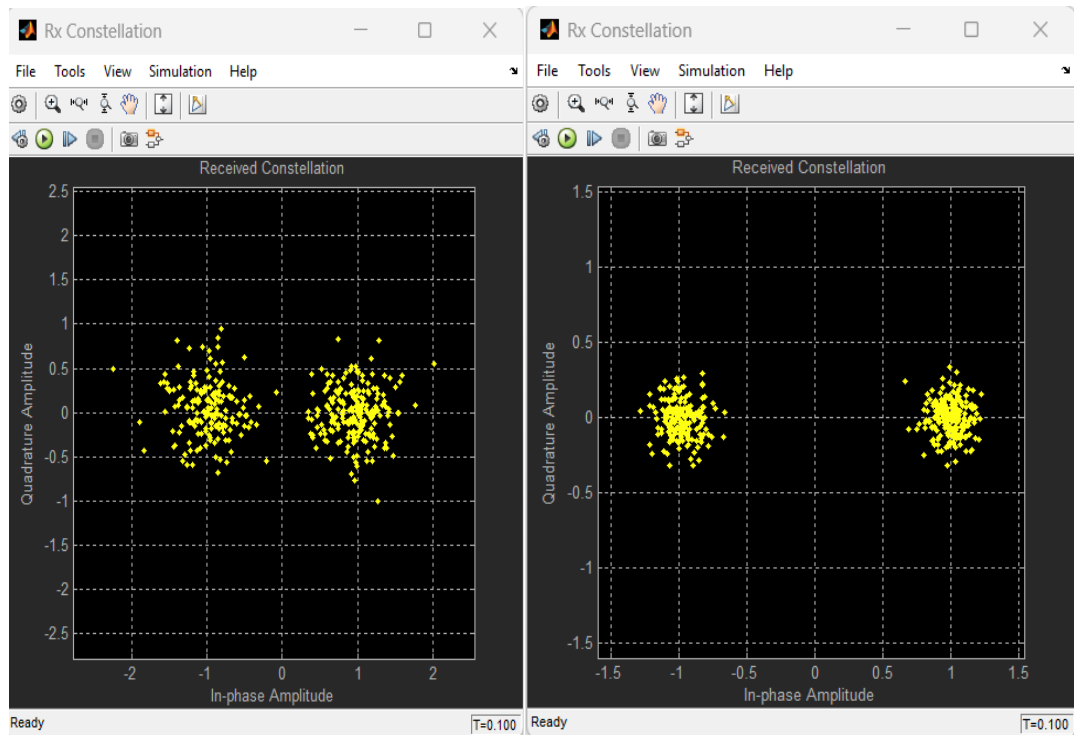
Figure 3.16: Paramètres du bloc démodulation & FEC Banc

3.5. Mesures des performances du système MISO-OFDM

Pour évaluer les performances du système MISO-OFDM, nous réaliserons des simulations dans l'environnement MATLAB afin de comparer les performances du système pour les différents types de modulation en termes de taux d'erreur binaire (BER) et de rapport signal sur bruit (SNR) dans diverses conditions.

3.5.1. Constellation de la modulation BPSK en sortie du système MISO-OFDM

La figure représente la constellation de la modulation BPSK pour le système MISO-OFDM. On note que la dispersion des symboles est d'autant plus forte pour le faible rapport signal sur bruit (SNR=10dB) cependant n'engendrent pas des erreurs de décision. Les symboles pour le SNR=20dB se délimitent dans leurs zones de départ, et sont proches de ceux émis.



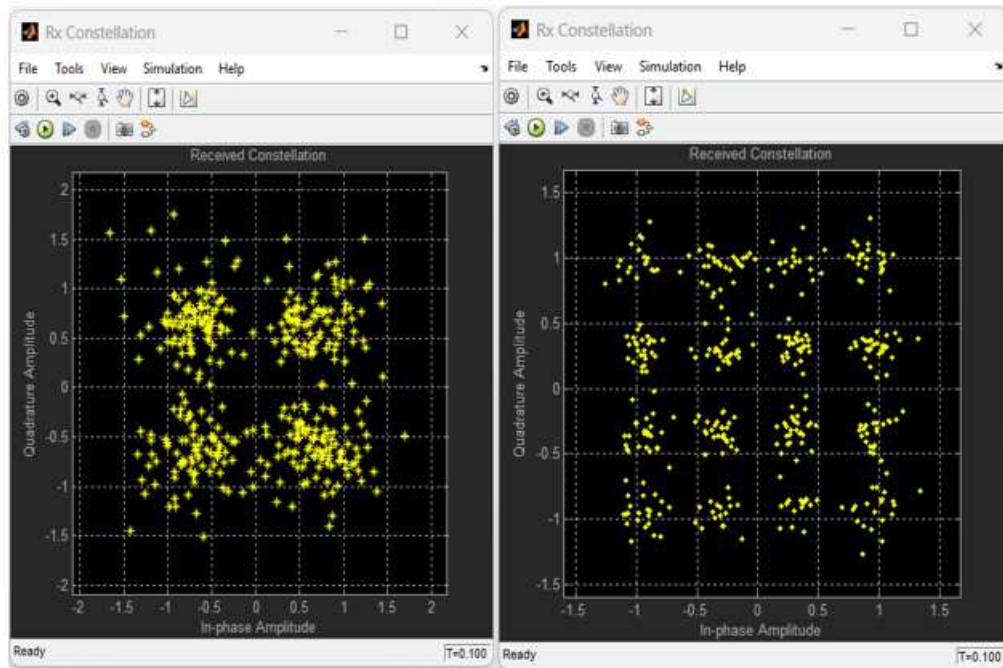
(a) Symboles reçus, SNR=10

(b) Symboles reçus, SNR=20

Figure 3.17: Symboles reçus BPSK, (a) SNR=10dB, (b) SNR=20 dB

3.5.2. Constellation de la modulation QAM en sortie du système MISO-OFDM

La figure montre la constellation de MISO-OFDM pour la modulation QAM. On observe que la dispersion des symboles est plus prononcée pour un faible rapport signal sur bruit (SNR = 10 dB) où l'on utilise 4 QAM, mais cela ne conduit pas à des erreurs de décision. Les symboles pour un SNR de 20 dB restent dans leurs zones initiales et sont proches des symboles émis où l'on utilise 16 QAM en augmentant le SNR les constellations des symboles s'améliore considérablement spécialement au-delà de la valeur de SNR de 30dB. Justifiant ainsi que lorsque les conditions de la transmission sont bonne c'est-à-dire absence de bruit et d'interférence les symboles ne subissent pas de perturbations.



(a) Symboles reçus, SNR=10 (4QAM)

(b) Symboles reçus, SNR=20 (16QAM)

Figure 3.18: Symboles reçus QAM (a) quatre états (4-QAM), SNR=10dB (b) Seize états (16QAM), SNR=20 dB.

3.5.3. Taux d'erreur et type de modulation du système MISO-OFDM

Le taux d'erreur est calculé pour une variété de valeurs du rapport SNR pour les modulations la courbe du BER est représentée ci-dessous.

SNR (dB)	5	10	15	20	25
Modulation	BPSK	4 QAM	4 QAM	16 QAM	16 QAM
Taux d'erreur (BER)	0.002093	5.74 e-5	3.83e-05	0.000000	0.000000

Tableau 3.1: Taux d'erreur et type de Modulations

3.5.4. Spectre du signal MISO-OFDM

Nous représentons ci-dessous les spectres de puissance en fonction de la fréquence (en MHz) des signaux MISO OFDM avant et après canal (*Figure 3.19 et Figure 3.20*). Les graphiques montrent le niveau de puissance à différentes fréquences du signal.

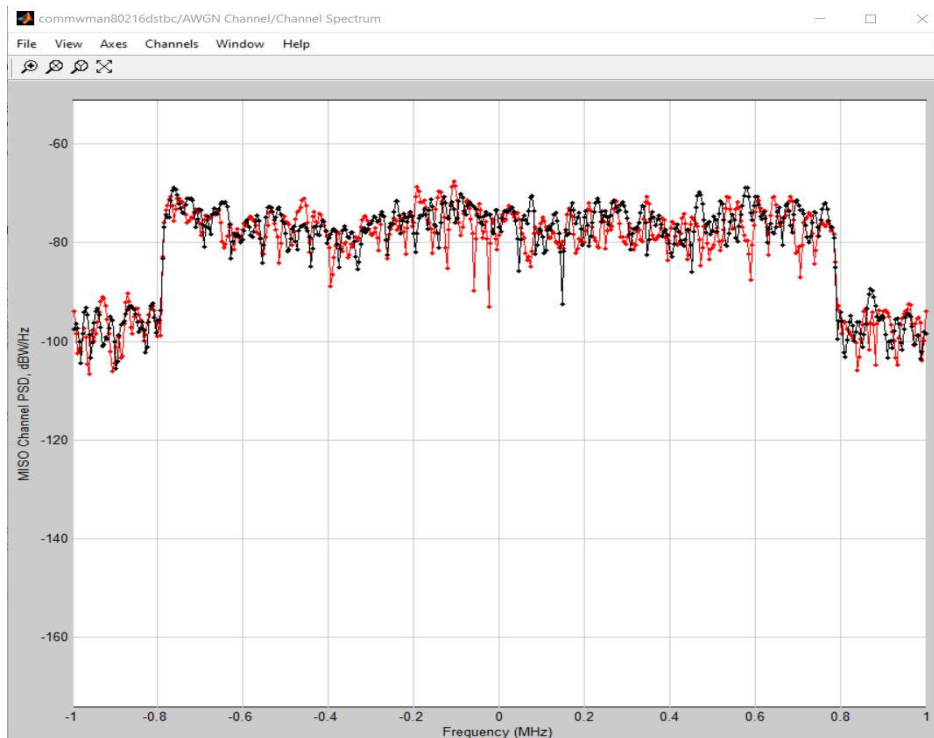


Figure 3.19: Spectre du signal reçu avant canal

Les fluctuations de puissance sur les différentes fréquences indiquent comment le signal a été affecté par le canal de transmission, y compris les effets d'atténuation, de bruit, et

d'interférences. Ce type de graphique est souvent utilisé pour analyser les performances du canal et la qualité du signal reçu avant de passer aux étapes de démodulation et de décodage.

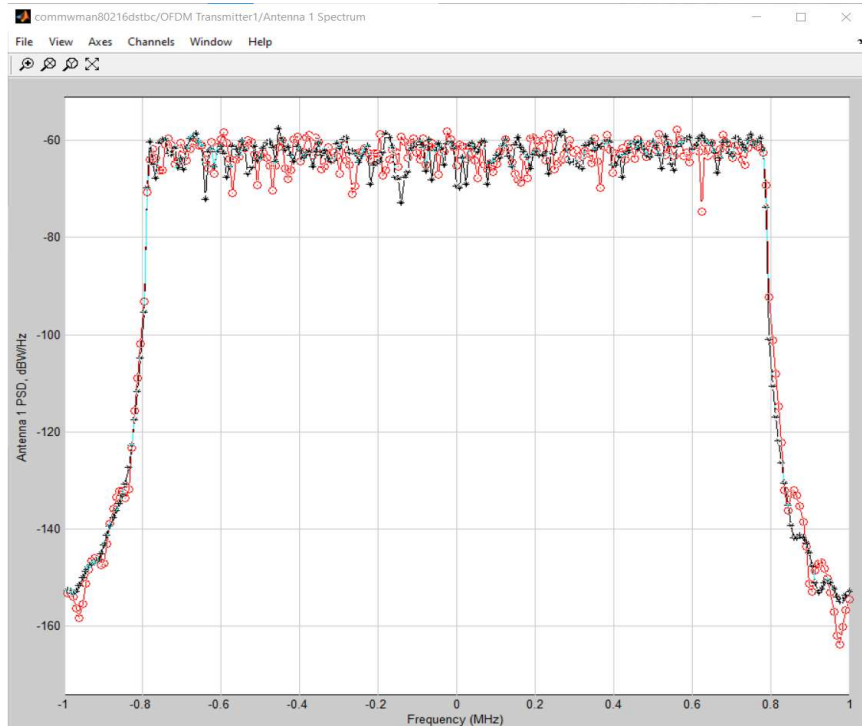


Figure 3.20: *Spectre du signal reçu après canal*

La figure 3.20 montre la relation entre l'amplitude du signal d'entrée et l'amplitude du signal de sortie après avoir traversé un composant non linéaire. Ceci permet d'évaluer les distorsions non linéaires introduites par l'amplificateur ou tout autre composant non linéaire. Idéalement, la relation devrait être linéaire, signifiant que l'amplification est proportionnelle à l'amplitude d'entrée. Les déviations de la linéarité indiquent des distorsions non linéaires, ce qui peut affecter la qualité du signal OFDM en augmentant l'interférence inter-symbole (ISI) et en dégradant les performances globales du système.

3.6. Description du modèle SISO-OFDM

Le modèle SISO-OFDM représenté par la figure 3.21 est celui proposé par le toolbox de Mathworks TM SIMULINK®.

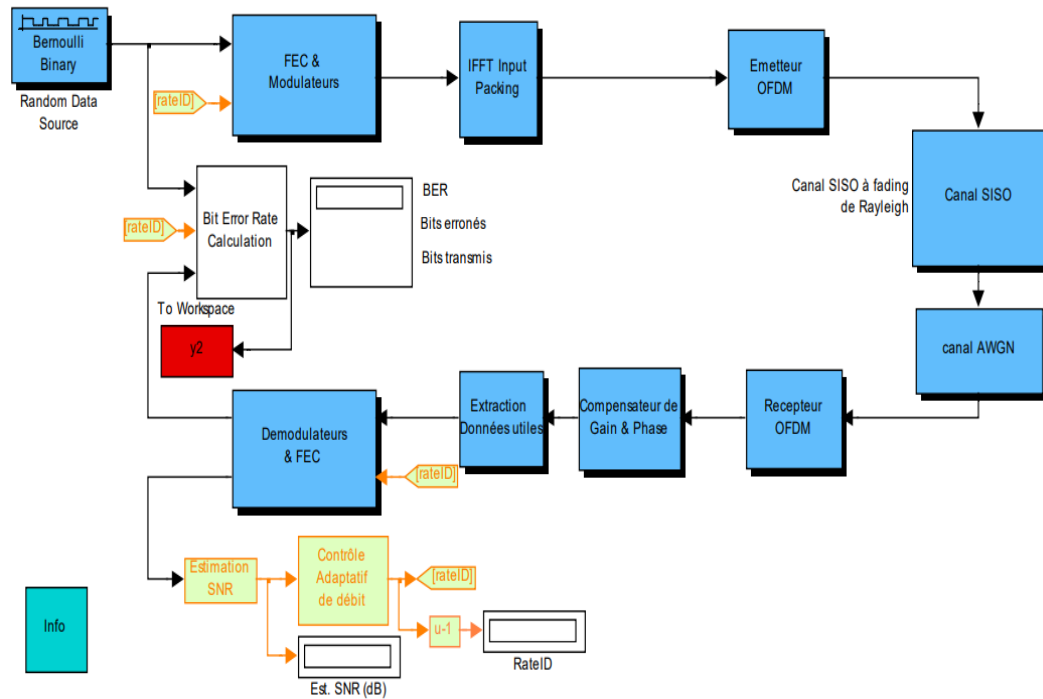
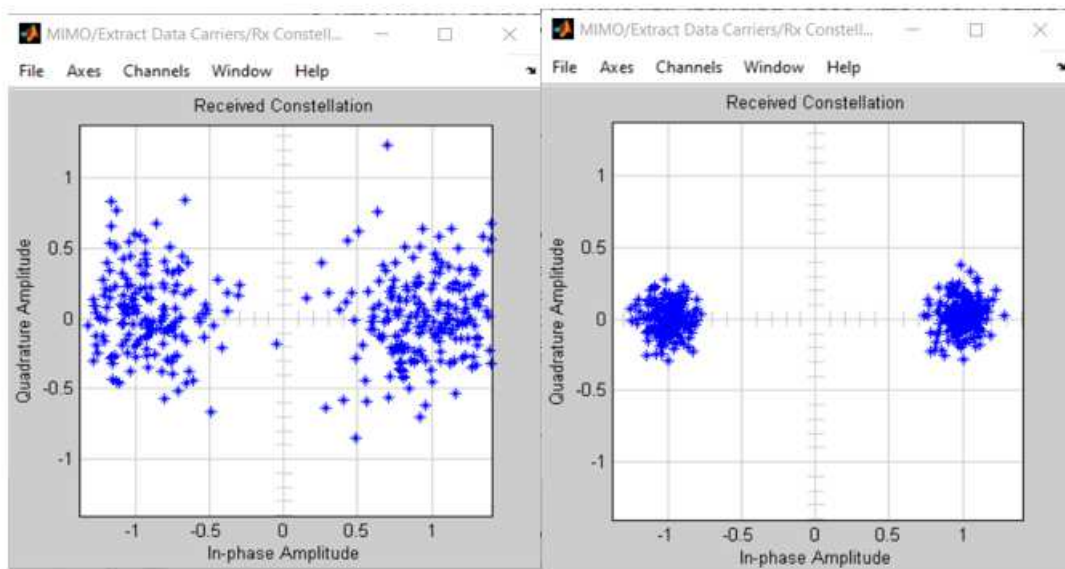


Figure 3.21: Schéma bloc d'un système SISO-OFDM sous Simulink

3.6.1. Constellation de SISO-OFDM, modulation BPSK

De la même manière que dans le cas du système MISO-OFDM on présente les constellations des modulations BPSK, 4 QAM et 16 QAM pour le système SISO-OFDM.



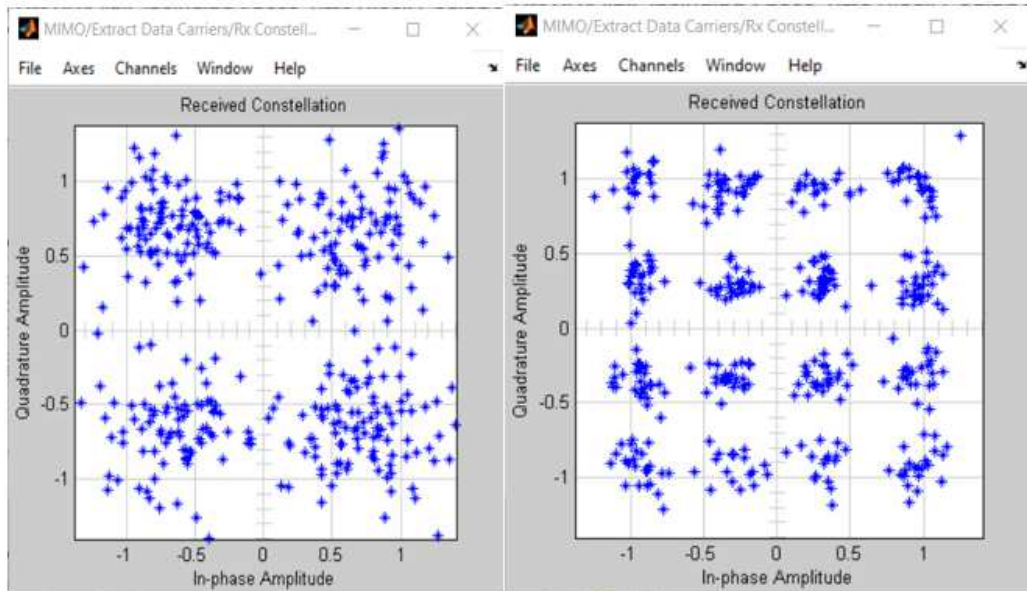
(a) Symboles reçus, SNR=10

(b) Symboles reçus, SNR=20

Figure 3.22: Symboles BPSK, (a) Symboles reçus SNR=10dB, (b) Symboles reçus SNR=20 dB

3.6.2. Constellation du système SISO-OFDM, modulation QAM

Nous observons une dispersion des symboles pour les faibles rapports signal sur bruit (SNR = 10 dB). Les symboles sont délimités dans leurs zones initiales et sont proches des symboles émis pour un SNR de 20 dB. Les constellations des symboles s'améliore d'avantage pour les valeurs du SNR dépassant 30dB.



(a) Symboles reçus, SNR=10 (4QAM)

(b) Symboles reçus, SNR=20 (16 QAM)

Figure 3.23: Symboles QAM, (a) Symboles reçu SNR=10dB (4QAM), (b) Symboles reçus SNR=20 dB (16QAM)

3.6.3. Taux d'erreur et type de modulation du système SISO-OFDM

Le taux d'erreur est calculé pour une variété de valeurs du rapport SNR pour les modulations la courbe du BER est représentée ci-dessous.

SNR (dB)	5	10	15	20	25
Modulation	BPSK	4 QAM	4 QAM	16 QAM	16 QAM
Taux d'erreur (BER)	6,803 e-4	5.744 e-5	3.064 e-5	0.000000	0.000000

Tableau 3.2: Taux d'erreur du Modulations BPSK et QAM

3.6.4. Capacité d'un système MIMO-OFDM

Nous procédons à la mesure de la capacité du canal MIMO-OFDM en fonction du rapport signal sur Bruit (SNR) (Figure 3.23).

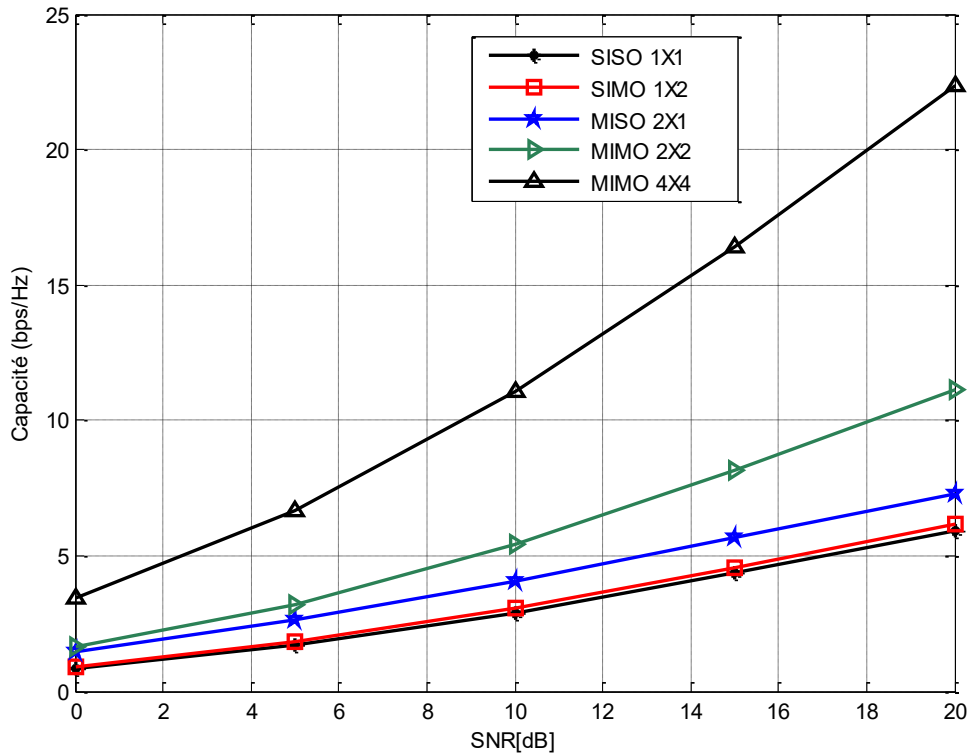


Figure 3.24: Capacité d'un système MIMO-OFDM

Nous remarquons travers de cette courbe que la capacité du canal MIMO-OFDM augmente considérablement en fonction du nombre d'antennes et ceci en émission et en réceptions. Cette capacité est d'autant plus grande valeurs du SNR.

3.6.5. Taux d'erreur du système MIMO-OFDM

Nous procédons également aux calcule de BER pour le système MIMO-OFDM en fonction du rapport signal sur Bruit (SNR) (Figure 3.24).

Pour les faibles valeurs du SNR (5 dB), le BER est voisin de la valeur de 10^{-2} pour le système SIMO 1X2. Ce taux d'erreur continue à diminuer significativement à 10 dB.

Similairement pour des SNR plus élevés (15 dB et 20 dB), le BER diminue de manière significative jusqu' à atteindre des valeurs inférieures à la valeur de 10^{-4} .

Le système SIMO 1X2 présente une meilleure performance relativement au système SISO-OFDM pour toutes les valeurs du SNR, particulièrement il fournit un gain de 5,8 dB en SNR à une valeur de BER de 10^{-2} .

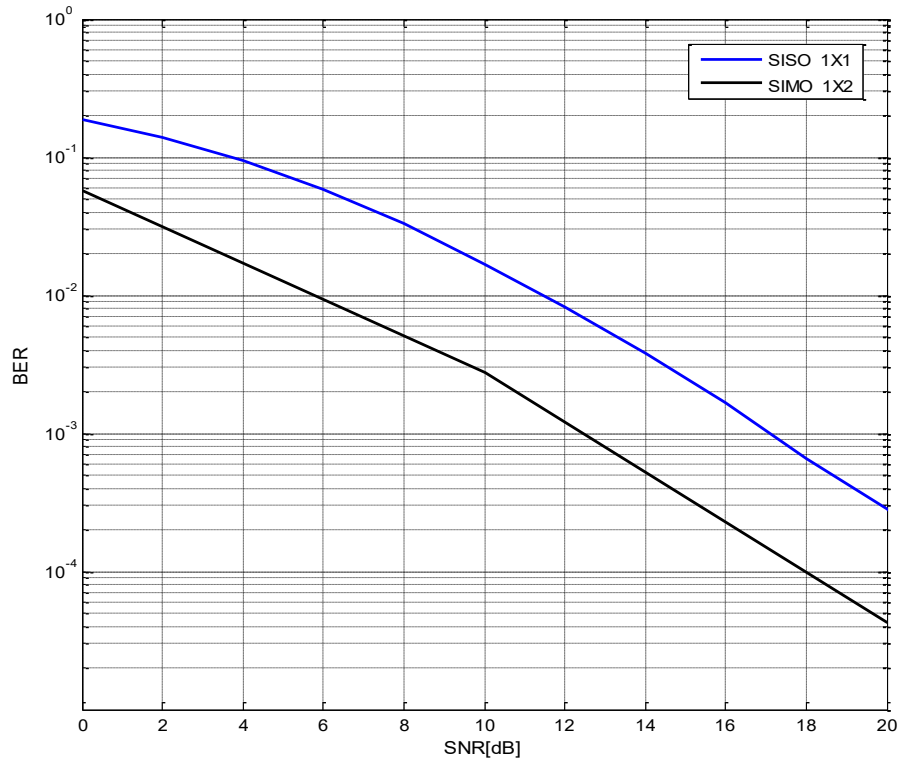


Figure 3.25: Courbes de BER des systèmes SISO et SIMO

3.7 Conclusion

Ce chapitre a exploré la simulation du système MIMO-OFDM ainsi que ces différentes configurations à l'aide du SIMULINK & MATLAB, dans le but de valider les concepts théoriques étudiés. Nous avons simulé divers systèmes combinés, notamment le système SISO-OFDM sans codage STBC, ainsi que les systèmes MISO-OFDM et MIMO-OFDM avec codage STBC, afin d'identifier le système le plus performant. Les résultats des simulations ont révélé plusieurs points clés :

Une augmentation de la taille de la constellation entraîne une dégradation des performances de transmission. Il est possible de maximiser la taille de la constellation tout en maintenant une qualité de transmission acceptable jusqu'à un certain point. La

capacité d'un système MIMO est nettement supérieure à celle d'un système MISO et encore plus comparée à celle d'un système SISO, grâce à une utilisation optimale de la technique de multiplexage spatial. Dans les modèles de canal multi-trajets le système de communication MIMO-OFDM se montre supérieur aux autres systèmes combinés, en raison de l'exploitation optimale des techniques de diversité, ce qui améliore la qualité de transmission.

Conclusion générale

Le but de ce mémoire était l'étude de la technologie MIMO-OFDM en générale et les techniques Des chacun .Après on a expliqué la relation entre chaque technique, et on a proposé une analyse graphique sur certains des problèmes cruciaux de simulation ce qui a été accompli à l'aide d'un logiciel MATLAB le système SISO-OFDM et la capacité des différentes configurations du système MIMO dans le but de confirmer ce qu'on a vu dans la théorie. Ensuite, nous avons simulé les différents systèmes combinés à savoir, le système SISO-OFDM et les systèmes MISO-OFDM et MIMO-OFDM, dans le but de constater le système le plus performant pour différents modèles de canal multi-trajets.

Nous avons présenté au premier chapitre un aperçu sur les télécommunications numériques, en mettant l'accent sur les réseaux sans fil. Nous avons examiné différents types de ces réseaux et passé en revue les techniques de multiplexage.

Nous avons consacré un focus particulier sur les systèmes MIMO-OFDM au chapitre 2. La combinaison de l'OFDM avec les systèmes MIMO permet d'offrir des communications haut débit à travers les canaux sélectifs en fréquence. L'intégration des MIMO-OFDM dans les communications sans-fil apporte des améliorations en taux d'erreur et de la qualité de la transmission.

Au chapitre 03 nous avons présenté les simulations des différents architectures MIMO, leurs performances respectives sont misées en valeurs. Nous avons montré que la diversité à travers le système MIMO-OFDM améliore la qualité du signal et du taux d'erreur par bit BER. Les simulations que nous avons réalisées nous ont permis de mettre en valeur les améliorations obtenues par la diversité du point de vue du taux d'erreur binaire et rapport signal à bruit (SNR).

REFERENCES

Références

- [1] M.Hadjer « **SN-CAS : Contribution des réseaux de capteurs à la conscience des contextes des systèmes** » L'université de HADJ LAKHDAR - BATNA, 2014.
- [2] B.Karima, A.Amina « **ETUDE et réalisation d'un N réseau WiFi hotspot dans le service public** » L'université de MOULOUD MAMMERI, 2012.
- [3] A.Abderrahmane « **Evaluation des performances du système de transmission WiMAX** » L'université de SAAD DAHLED DE BLIDA, 2008 .
- [4] Yan Grunenberger « **Réseaux sans fil de nouvelle génération : architectures spontanées et optimisations inter-couches** » INSTITUT POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE, 2008.
- [5] B.Sarah « **La mise en œuvre, dans une chaîne de transmission optique, à haut débit, de filtres optiques à longueur d'onde centrale réglable** » L'UNIVERSITE DJILALI LIABES, SIDI BEL-ABBES, 2015.
- [6] N.Abid, L.Charif « **Étude et simulation de détecteurs linéaires Multi-utilisateurs CDMA** » L'UNIVERSITE HASSIBA BENBOUALI DE CHLEF, 2016.
- [7] A.Agoune, B.Difallah « **Analyse de la Suppression du Bruit pour les Systèmes SAC-OCDMA avec les Codes à Inter-Corrélation Fixe** » L'UNIVERSITE Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, 2020.
- [8] H.SOUHILA, H.ASMAA « **Dé bruitage d'un canal de transmission OFDM par K-means** » L'UNIVERSITE Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, 2021.
- [9] B. R. Saltzberg, "Performance of an efficient Parallel Data Transmission System," IEEE Trans. Communications, 1967
- [10] C. ALEXANDRE/ D. LE RUYET "Modulations Multiporteuses " CNAM
- [11] BAKIR .HADJ ALLI, "Exploitation de l'association des techniques MIMO-OFDM pour la transmission dans les réseaux locaux sans fil" L'université de tlemcen, 2012
- [12] R. W. CHANG, « **Synthesis of band-limited orthogonal signals for multichannel datatransmission** ».Bell System Technical Journal, Annés 1966.

REFERENCES

- [13] TIDJANI .Adam Khamis, « **OFDM** » UNIVERSITE CATHOLIQUE DE L'AFRIQUE DE LOUEST 2019
- [14] 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.
- [15] Frédéric .Launay, « **Les réseaux de mobiles 4G et 5G** » L'université de poitiers 2022
- [16] A.Rachini « **Etude de la synchronisation temporelle dans les systèmes MIMOOFDM appliquées aux réseaux mobiles** » L'université Bretagne ,2014
- [17] A.saiba , A. Loubany « **Une approche intelligente pour les systèmes OFDM à modulation adaptative**» L'université libanaise , 2013
- [18] TIDJANI .Adam Khamis, « **OFDM** » UNIVERSITE CATHOLIQUE DE L'AFRIQUE DE LOUEST 2019
- [19] Dieter Van Welden, Heidi Steendam, Marc Moeneclaey DIGCOM research group, « **Iterative DA/DD Channel Estimation forKSP-OFDM** » L'university Sint-Pietersnieuwstraat 41, 9000 GENT, BELGIUM
- [20] D.Astharini, T.Bastian, R.Mustika, O.Samijayani, R.Safitri, « **Zero padding and cyclic prefix for ofdm on multipath rayleigh** » L'universitas Al Azhar Indonesia, Jakarta, 2015
- [21] Boumechache .younes, Messaoudi. Fares , « **Etude de la communication sans fils multi porteuse UFMC** » L'niversité oum el bouaghi, 2021
- [22] ALLAOU .safia « **Simulation et performances d'algorithmes pour l'accès aux ressources à base de F-OFDM** » L'université A.MIRA-BEJAIA, 2020
- [23] H. Jiang and P. A. Wilford, "A hierarchical modulation for upgrading digital broadcasting systems," IEEE Transaction on Broadcasting, vol. 51, pp. 222-229, June 2005.
- [24] P. W. Wolniansky, G. J. Foschini, G. D. Golden and R. A. Valenzuela, "V-BLAST: an architecture for realizing very high data rates over the rich- scattering wireless channel," In Proceeding of International symposium on Signals, Systems and Electronics, pp. 259-300, October 1998.
- [25] S.Ferouani "Etude et Implémentation d'un Système MIMO dans un Contexte OFDM," 2010.

REFERENCES

[26] BENDIMERAD .Fethi Tarik, « **MIMO et Accès Multiples Avancés pour Réseaux Sans Fil** » L'université Abou-Bekr Belkaid - Tlemcen 2013

[27] Frédéric .Launay, « **Les réseaux de mobiles 4G et 5G** » L'université de poitiers 2022

[28] Mr BELKESSAM MOUSSA, « **Etude et Evaluation des performances des systèmes de communications sans fil MIMO-OFDM** » L'université mouloud mammerri tizi-ouzou 2012

[29] DAACHI. Dalila, “**Etude des systems MIMO-OFDM communication sans fil**” l'université de bejaya 2011

[30] BENOSMAN. Radia, SIDHOUM. Amel “**Etudes et simulation des performances des systems MIMO en configurations STBC et V-BLAST**” L'université Abou Bekr Belkaid 2015.