

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

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

FILIERE : TELECOMMUNICATION



Mémoire

**Présenté pour l'obtention du diplôme de
master**

**Option : système de télécommunication
(STLC)**

Par : Saoud Noui

Hadjab mohamed Elaid

Intitulé

**Etude des Performance d'un système MIMO-
OFDM pour les communications sans fil**

Soutenu devant le jury composé de :

Président : Dr : LALAOUI Lahouaoui

Université de M'sila

Rapporteur : Dr : ZERDOUMI Zohra

Université de M'sila

Examineur : Dr : KHALFA Ali

Université de M'sila

Année Universitaire : 2020-2021

Dédicace

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

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

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

Mohamed et NOUI

Remerciements

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

Remercier absolument.

Nous remercions tout d'abord notre encadreur M^{me}: Zerdoumi Zahra de nous avoir apporté ses valeureux conseils et soutiens durant la réalisation de ce mémoire.

Nous remercions

Également les membres de jury de nous avoir fait l'honneur en acceptant

D'examiner et de juger notre travail.

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

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

Résumé

On observe de nos jours un intérêt considérable pour de nouvelles technologies sans fil capables de réaliser des hauts débits, comme l'OFDM qui offre une forte protection pour les canaux à trajets multiples. Les perturbations qui interviennent sur ce type de canaux induisent des erreurs de transmission pour assurer un taux d'erreur minimal.

Dans ce travail, Nous combinons la technologie MIMO et celle de l'OFDM capable d'offrir une protection améliorée aux trajets multiples, et une robustesse développée grâce à l'entrelacement temporel des données transmis et un codage de correction d'erreurs.

Les résultats obtenus montrent que le MIMO-OFDM avec codage STBC est plus performant que la technique SISO-OFDM sans codage et que la capacité de canal augmente proportionnellement avec le nombre d'antennes.

Mots-clés : les systèmes MIMO, OFDM (Orthogonal frequency division), codage STBC.

Abstract

A huge interest is shown nowadays for new wireless technologies able to carry high throughput, such as OFDM which offers strong protection for multipath channels.

Distortions in such channels lead to transmitting errors which are challenged by the System coding in order to ensure a minimal error rate.

The present work propose a MIMO-OFDM System able to offer an enhanced protection for multipath channels by inserting guard times and robustness built through the temporal interleaving of transmitted data and a coding for error correction.

The results obtained show that the MIMO- OFDM with coding STBC are more powerful than the SISO-OFDM technique without coding and then the capacity of channel increases proportionally with the number of antennas.

Keywords: MIMO systems, SISO systems, Orthogonal frequency division multiplexing OFDM, STBC coding.

ملخص

في الوقت الحاضر ، هناك اهتمام كبير بالتقنيات اللاسلكية الجديدة القادرة على تحقيق معدلات بيانات عالية ، مثل OFDM الذي يوفر حماية قوية للقنوات متعددة المسارات. تؤدي الاضطرابات التي تحدث في هذا النوع من القنوات إلى حدوث أخطاء في الإرسال لضمان الحد الأدنى من معدل الخطأ. في هذا العمل ، نجمع بين تقنيتي MIMO و OFDM القادرة على توفير حماية مُحسَّنة متعددة المسارات ، وقوة تم تطويرها من خلال تشذير الوقت للبيانات المرسلة وتشفير تصحيح الأخطاء. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن MIMO-OFDM مع تشفير STBC أكثر كفاءة من SISO-OFDM بدون تشفير وأن سعة القناة تزداد بشكل متناسب مع عدد الهوائيات.

الكلمات المفتاحية: أنظمة MIMO ، OFDM (تقسيم التردد المتعامد) ، تشفير STBC.

Dédicace.....	I
Remerciements.....	II
Résumé.....	III
Table des matières.....	VI
Liste des figures.....	IX
Liste des Tableaux.....	XII
Liste des Acronymes.....	XIII
Introduction Générale.....	1
1.1 Introduction :	3
1.2 Réseau sans fil :	3
1.2.1 Définition :	3
1.2.2 Les catégories des réseaux sans fils :	3
1.2.3 Selon la zone de couverture :	4
1.2.4 Selon l'infrastructure :	6
1.3 WiMAX :	9
1.4 Les avantages et les inconvénients des réseaux sans fil [7]	9
1.4.1 Les avantages du déploiement d'un réseau sans fil	9
1.4.2 Les inconvénients des réseaux sans fils.....	10
1.5 Les techniques de Multiplexage [9].....	10
1.5.1 L'accès multiple par répartition de fréquence FDMA	11
1.5.2 L'accès multiple par répartition de codes CDMA [12].....	13
1.6 Canal de communications.....	15
1.6.1 Caractéristique d'un canal	16
1.7 Types et modèles de canaux.....	17
1.7.1 Canal avec bruit blanc gaussien aditif.....	17
1.7.2 Canal à évanouissements	18
1.7.3 Le modèle du canal de Rayleigh.....	20
1.8 Sélectivité d'un canal de communication	20
1.8.1 Canal sélectif en fréquence	21
1.8.2 Canal sélectif en temps.....	22

1.8.3	Canal non sélectif	22
1.9	La probabilité d'erreur et le taux d'erreur.....	23
1.10	Rapport signal sur bruit (SNR) [18]	24
1.11	Conclusion.....	24
2	La technique MIMO-OFDM.....	26
2.1	Introduction	26
2.2	Introduction à la modulation OFDM	26
2.3	Historique de la technique OFDM.....	26
2.4	Modulation mono porteuse [22]	27
2.5	Modulation multi porteuse	27
2.6	Présentation de la technologie OFDM.....	28
2.7	Principe de l'OFDM.....	30
2.7.1	Principe de modulation	31
2.7.2	Principe de démodulation	33
2.7.3	Notion d'orthogonalité.....	35
2.7.4	Interférence inter symboles et Interférence inter porteuses [28]	36
2.8	Implémentation numérique.....	39
2.8.1	Implantation numérique du modulateur	39
2.8.2	Implantation numérique du démodulateur	40
2.9	Avantages et inconvénients de l'OFDM [27] :	42
2.10	L' association MIMO-OFDM	42
2.10.1	Présentation détaillée du system MIMO-OFDM.....	46
2.10.2	Capacité MIMO-OFDM [26]	47
2.10.3	Intérêt de la combinaison	48
2.10.4	Les normes qui utilisent la MIMO-OFDM	49
2.11	Conclusion.....	49
3	Simulations et Résultats.....	51
3.1	Introduction :.....	51
3.2	Présentation de Matlab.....	51
3.3	Simulation et performance d'un Système SISO-OFDM.....	51
3.3.1	Description des différents blocs en émission	52
3.3.2	Description des différents blocs en réception.....	56
3.4	Paramètres de la simulation SISO-OFDM.....	58
3.4.1	Les performances du système SISO-OFDM	58
3.5	Les performances du système MIMO-OFDM.....	58

3.5.3	Paramètres d'un Système MIMO-OFDM	62
3.5.4	Les performances du système MIMO-OFDM	62
3.6	La capacité des systèmes (SISO - MIMO).....	64
3.7	Conclusion.....	65
Conclusion Générale.....		66
Bibliographie.....		68

Figure 1.1 : Classification des réseaux sans fil.....	4
Figure 1.2 : Le modèle des réseaux mobiles avec infrastructure.....	7
Figure 1.3 : Réseau en mode ad hoc.....	8
Figure 1.4 : Le changement de la topologie des réseaux ad hoc.....	8
Figure 1.5 : Réseau WIMAX.....	9
Figure 1.6 : Multiplexage des possibilités d'accès à un canal.....	11
Figure 1.7 : La technique de multiplexage FDMA.....	12
Figure 1.8 : Répartition des périodes dans le cas d'un multiplexage TDMA.....	13
Figure 1.9 : La technique de multiplexage CDMA.....	14
Figure 1.10 : Principe d'utilisation des codes orthogonaux en CD.....	15
Figure 1.11 : Modèle d'un canal de transmission.....	16
Figure1.12 : Modèle du canal BBAG.....	18
Figure 1.13 : Milieu de transmission avec deux obstacles.....	19
Figure 1.14 : Modèle d'un canal avec évanouissement.....	20
Figure1.15 : Le modèle du canal de Rayleigh.....	20
Figure1.16 : Canal sélectif en fréquence.....	21
Figure1.17 : Comparaison montrant un canal non sélectif en fréquence.....	22
Figure1.18 : Différentes sélectivités du canal.....	23
Figure 2.1 : format de modulation à porteuse unique.....	27
Figure 2.2 : Modulations multi-porteuses.....	28
Figure2.3 : Exemple de quatre fréquences orthogonales.....	29
Figure2.4 : La décomposition en sous –porteuses issues de l'IFFT.....	30
Figure 2.5 : Principe de l'OFDM.....	31
Figure2.6 : Schéma de principe du modulateur OFDM.....	32
Figure2.7 : Spectre des différentes porteuses.....	33
Figure2.8 : le schéma du principe de démodulation OFDM.....	34
Figure2.9 : Principe d'orthogonalité des sous-porteuses.....	35
Figure 2.10 : Propagation des trames OFDM sans intervalle de garde	37

LISTE DES FIGURES

Figure 2.11 : Insertion d'un intervalle de garde en temps pour.....	38
Figure 2.12 : Modulateur OFDM numérique.....	40
Figure 2.13 : Démodulateur OFDM numérique.....	40
Figure 2.14 : Schéma bloc d'un système OFDM.....	41
Figure 2.15 : Model du système MIMO-OFDM ($N_t * N_r$).....	44
Figure 2.16 : Transmetteur MIMO-OFDM.....	46
Figure 2.17 : Récepteur MIMO-OFDM.....	47
Figure 3.1 : chaine de transmission SISO-OFDM en Simulink.....	52
Figure3.2 : Insertion des pilotes et DC nulles.....	54
Figure3.3 : Modèle Simulink d'un système MIMO-OFDM.....	59
Figure3.4 : Codeur spatio-temporel.....	60
Figure3.5 : combiner spatio-temporel.....	61
Figure3.6 : Courbes de taux d'erreur binaire (BER) system MIMO-OFDM.....	63
Figure3.7 : Capacité des systèmes SISO et MIMO.....	64

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Classification des réseaux sans fil.....	6
Tableau 3.1 : Paramètres de la simulation.....	58
Tableau 3.2 : Résultats 16QAM.....	58
Tableau 3.3: Paramètres d'un Système MIMO-OFDM.....	62
Tableau 3.4 : Résultats 16QAM.....	62
Tableau 3.5 : Résultats 64QAM.....	63

Liste des acronymes

AWGN: Additive White Gaussian Noise.

BBGA : Bruit Blanc Gaussien Additif

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

BBAG : Bruit Blanc Additif Gaussien.

CP : Cyclic Préfix

CAN : Convertisseur Analogique Numérique

DVB-T: Digital Video Broadcasting Terrestrial DWT

FDMA: Frequency Division Multiple Access.

FFT: Fast Fourier Transform.

FSK: Frequency Shift keying.

GPRS: General Packet Radio Service.

GSM: Global System for Mobile communications.

HiperLan : High Performance LAN.

H-BLAST : H-Erreur Quadratique Moyenne Minimale

ISI: interferences inter symbol

ICI: Inter Carrier Interference.

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineer.

IES: Interferences Entre Symboles.

LOS: Line of Sight.

MIMO: Multiple Input Multiple Output

MAN: Metropolitan Area Network.

MAQ : Modulation d'Amplitude en Quadrature.

NLOS: None Line of Sight.

OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing.

Liste des acronymes

PSK: Phase Shift Keying.

QAM: quadrature amplitude modulation

QPSK: quadrature Phase Shift Keying.

RF: Radio Frequency.

SISO: Single Input Single Output

SNR: Signal to Noise Ratio.

STBC: **S**pace-Time Block Code

TDM: Time Division Multiplexing.

TDMA: Time Division Multiple Access.

TFD : Transformée de Fourier Discrète.

TFDI : Transformée de Fourier Discrète Inverse.

UMTS: Universal Mobile Telecommunications System.

Wi-MAX: Worldwide Interoperability for Microwave Access.

WIFI: Wireless Fidelity.

WIMAX: Worldwide Interoperability for Microwave Access.

WLAN: Wireless Local Area Network.

WMAN: Wireless Metropolitan Area Network.

W-OFDM: Wideband OFDM.

WPAN: Wireless Personal Area Network.

WWAN: Wireless Wide Area Network.

Les télécommunications sans fil constituent un sujet considérablement étudié par un grand nombre de chercheurs, l'objectif est d'obtenir une communication sans fil de haute qualité et à haut débit, permettant de se déplacer tout en restant connecté. Dans cette optique, les effets de la sélectivité en fréquence et des interférences multi-trajets doivent être combattus de manière adéquate. Récemment, il a été proposé de combiner des systèmes de modulation OFDM et les techniques MIMO (Multiple Input Multiple Output) pour atteindre cet objectif.

La modulation OFDM (multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence) est généralement utilisée dans les systèmes où la fréquence du canal de propagation dans la bande de fréquence considérée est très sélective. L'OFDM utilise des sous-porteuses orthogonales pour transmettre l'information (multiplexage fréquentiel). La technique OFDM est efficacement implémentée par la Transformée de Fourier Inverse (IFFT : Inverse Fast Fourier Transform). Toutes ces qualités ont fait de l'OFDM un succès qui prend de plus en plus de l'ampleur. D'ailleurs l'OFDM est largement utilisé dans une variété de normes, telles que IEEE® 802.11 (WIFI), IEEE® 802.16 (WIMAX) et Hiper MAN.

La technologie MIMO, qui utilise plusieurs antennes pour la transmission et la réception, a connu une croissance significative. La dimension spatiale permet le multiplexage pour répondre aux fortes contraintes de trafic des applications multimédia. Cette dimension spatiale permet également d'exploiter la diversité, réduisant ainsi l'impact des évanouissements. Utilisez des techniques de codage appropriées à cette fin, telles que le codage espace-temps. La technologie MIMO a été utilisée dans la norme IEEE® 802.11n.

La combinaison MIMO et OFDM permet de profiter des avantages des deux méthodes : la robustesse du lien sur le canal sélectif en fréquence de l'OFDM et la robustesse du canal décorrélé dans l'espace MIMO codé, qui permet de répondre aux besoins des systèmes de télécommunications modernes.

L'objectif de ce mémoire est l'étude des systèmes MIMO-OFDM et l'évaluation de leurs performances dans un environnement dispersif. Les deux techniques à savoir l'OFDM et MIMO-OFDM seront implémentées à l'aide de l'outil de simulation SIMULINK de MATLAB. Leurs performances respectives seront mises en valeur à travers des simulations extensives, pour mettre en valeur l'intérêt et l'apport de l'une relativement à

Introduction Générale

L'autre. Le présent mémoire est organisé comme suit :

- ✚ Une introduction générale.
- ✚ Le premier chapitre présente des généralités sur les télécommunications.
- ✚ Le deuxième chapitre traite les principes de base des systèmes OFDM et leurs combinaisons avec les systèmes MIMO.
- ✚ Le troisième chapitre présente les résultats des simulations des différents modèles traités à savoir l'OFDM et MIMO-OFDM.
- ✚ Une conclusion générale.

Chapitre 01 :

Généralité sur les télécommunications

1.1 Introduction :

Nous avons assisté à la croissance exponentielle des réseaux cellulaires basés sur une combinaison de technologies filaires et sans fil. Dans les réseaux cellulaires tels que les téléphones mobiles, chaque antenne couvre une zone définie, et lorsque l'utilisateur se déplace, le téléphone mobile change de cellule. On dit que ce type de réseau dispose d'une infrastructure fixe bien définie. Dans ce chapitre, nous décrivons généralement les différentes architectures et principales technologies de multiplexage des systèmes de télécommunication sans fil. Nous allons également étudier différents modèles de canaux de transmission et indicateurs de performance utilisés pour évaluer la qualité de la transmission.

1.2 Réseau sans fil :

1.2.1 Définition :

Un réseau sans fil est un ordinateur ou un réseau numérique qui connecte différentes stations ou systèmes entre eux par ondes radio. Un réseau sans fil peut être couplé à un réseau de télécommunications pour établir des connexions entre les nœuds. La norme la plus courante dans les réseaux sans fil aujourd'hui est IEEE802.11. Le rayonnement des ondes géographiques est relativement limité, compte tenu de la faible puissance de transmission des solutions matérielles actuelles. Pour cette raison, les réseaux sans fil se sont développés principalement pour créer des réseaux internes spécifiques, soit comme réseau d'entreprise, soit comme réseau domestique [1].

1.2.2 Les catégories des réseaux sans fils :

Un réseau sans fil est un réseau dans lequel au moins deux nœuds peuvent communiquer sans fil. Ces réseaux de communication permettent aux utilisateurs de profiter de tous les services réseau traditionnels quelle que soit leur situation géographique. Les réseaux sans fil peuvent être classés selon deux normes. Le premier est la couverture du réseau. Selon la norme, il existe quatre catégories : réseau personnel, réseau local, réseau métropolitain et réseau étendu. Le deuxième critère est l'infrastructure et le modèle utilisés. Concernant cette norme, nous pouvons diviser les réseaux sans fil en : réseaux avec infrastructure et réseaux sans infrastructure, comme le montre la figure (1.1) suivante [2] :

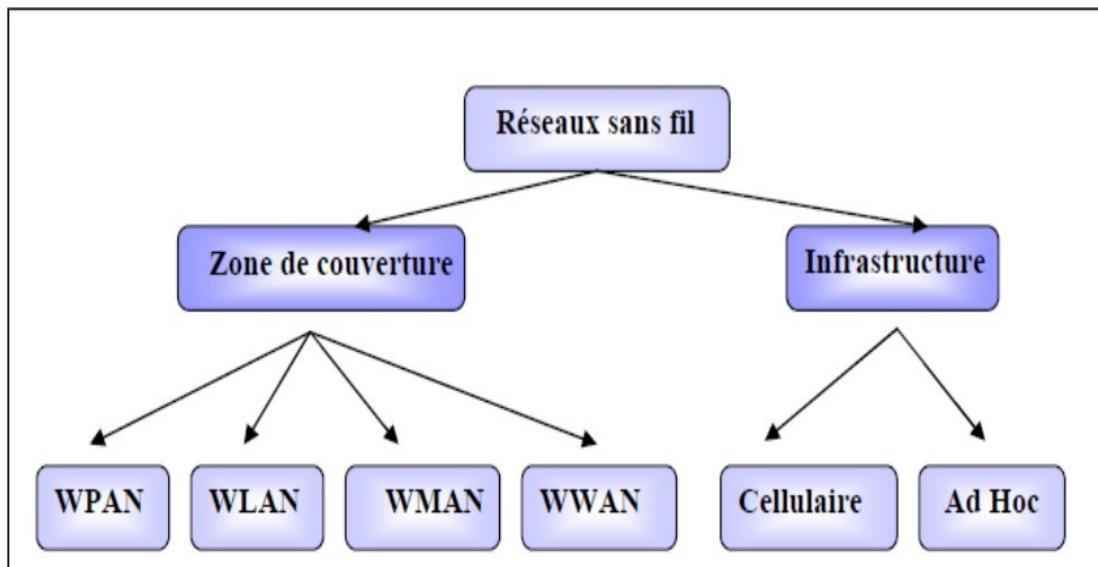


Figure1.1 : Classification des réseaux sans fil.

1.2.3 Selon la zone de couverture :

Les réseaux sans fil se divisent en plusieurs catégories différentes selon la taille de la zone géographique à couvrir (figure 1.2), [3] Chacune de ces catégories regroupe différentes normes de communication qui permettent de connecter facilement des appareils à dix mètres ou à plusieurs kilomètres.

Vise à toujours fournir aux clients une large gamme de services, tout en garantissant une meilleure vitesse et une meilleure qualité de service.

1.2.3.1 Réseaux personnels sans fil (WPAN)

Le réseau personnel sans fil (WPAN) est un réseau sans fil à courte distance (de l'ordre de plusieurs dizaines de mètres) [3]. Le but de ce type de réseau est de connecter des périphériques (imprimantes, téléphones portables, etc.) à un ordinateur sans liaison filaire, ou de permettre à la liaison sans fil entre deux machines de ne pas être éloignée l'une de l'autre. Nous avons cité plusieurs technologies utilisées dans WPAN : Bluetooth, HomeRF, ZigBee, infrastructure de liaison.

1.2.3.2 Réseaux locaux sans fil (WLAN)

Le WLAN (Wireless Local Area Network) peut être comparé à un réseau câblé de type LAN, qui se compose de points d'accès qui forment une zone de couverture radio (c'est-à-dire une portée d'environ cent mètres) [4]. Le fonctionnement cellulaire WLAN permet d'interconnecter les terminaux présents dans la zone de couverture avec les points d'accès connectés au réseau fixe. La principale raison de cette forte croissance est la facilité de mise en œuvre des réseaux sans fil et le moindre coût de la

technologie, Il existe plusieurs catégories concurrentes on cite : Le WIFI et le HIperLAN2.

1.2.3.3 Réseaux métropolitains sans fil (WMAN)

Les réseaux métropolitains sans fil (WMAN pour Wireless Métropolitain Area Network), Connus également sous le nom Boucle Local Radio (BLR), le WMAN sont basés sur la norme IEEE 802.16 et offre un débit de 1 à 10 Mbit/s pour une portée de 4 à 10 km. Ils peuvent être considérés comme un cas particulier des WWAN avec des technologies voisines. Ils sont des réseaux destinés à connecter aussi bien des entreprises que des particuliers à leurs opérateurs (téléphonie fixe, internet, télévision. . .). Le rôle de WMAN est de couvrir la zone dite du dernier kilomètre pour fournir un accès à Internet haut débit aux zones non couvertes par les technologies filaires classiques.

1.2.3.4 Les réseaux étendus sans fil (WWAN)

Les réseaux WWAN (pour Wireless Wide Area Network) également connu sous le nom de réseau cellulaire mobile, affectent une bande de fréquence à chacune des cellules et réutilisent cette bande de fréquence dans les cellules suffisamment éloignées les unes des autres. Ils sont des réseaux sans fil étendus avec des couvertures à l'échelle nationale ou mondiale

Les principes technologies utilisées sont les suivant :

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

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

Tableau 1.1 : Classification des réseaux sans fil

1.2.4 Selon l'infrastructure :

L'environnement mobile est un système composé de sites mobiles, qui permet aux utilisateurs d'accéder aux informations où qu'ils se trouvent. Les réseaux mobiles ou sans fil peuvent être divisés en deux catégories : les réseaux avec infrastructure et les réseaux sans infrastructure.

a) Réseaux cellulaires (avec infrastructure)

Ce type de réseaux se compose des éléments suivants [3] :

- Les "sites fixes" du réseau filaire.
- Les "sites mobiles", réseaux sans fils

Certains sites fixes (appelés stations de base (SB)) sont équipés d'interfaces de communication sans fil pour une communication directe avec des sites mobiles situés dans une zone géographique limitée (appelées cellules), comme le montre la figure suivante :

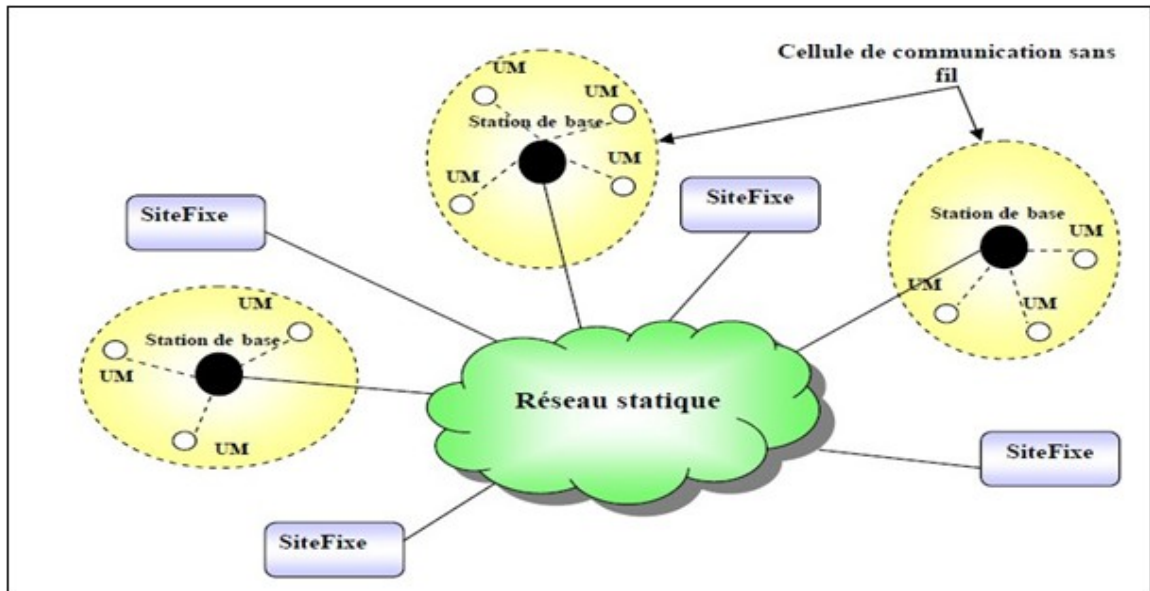


Figure1.2 : Le modèle des réseaux mobiles avec infrastructure.

b) Réseaux ad hoc (sans infrastructure) :

L'évolution récente de la technologie dans le domaine de la communication sans fil et l'apparition des unités de calculs portables (les laptops par exemple), poussent aujourd'hui les chercheurs à faire des efforts afin de réaliser le but des réseaux

"L'accès à l'information n'importe où et n'importe quand"

Le concept des réseaux mobiles ad hoc essaie d'étendre les notions de la mobilité à tous les composants de l'environnement.

Ici, contrairement aux réseaux sans fil basés sur les points d'accès (avec infrastructure), aucune administration centralisée n'est disponible, ce sont les hôtes mobiles elles-mêmes qui forment, d'une manière ad hoc, une infrastructure du réseau. Aucune

Supposition ou limitation n'est faite sur la taille du réseau ad hoc, le réseau peut contenir des centaines ou des milliers d'unités mobiles.

Les réseaux ad hoc sont idéals pour les applications caractérisées par une absence (ou la non fiabilité) d'une infrastructure préexistante, tel que les applications militaires et les autres applications de tactique comme les opérations de secours (incendies, tremblement de terre...) et les missions d'exploration [2] ; [5].

Un réseau ad hoc, connu aussi sous le nom de MANET (Mobile Ad hoc Network), est un réseau dont la topologie ne bénéficie d'aucune infrastructure fixe préexistante ou administration [3].

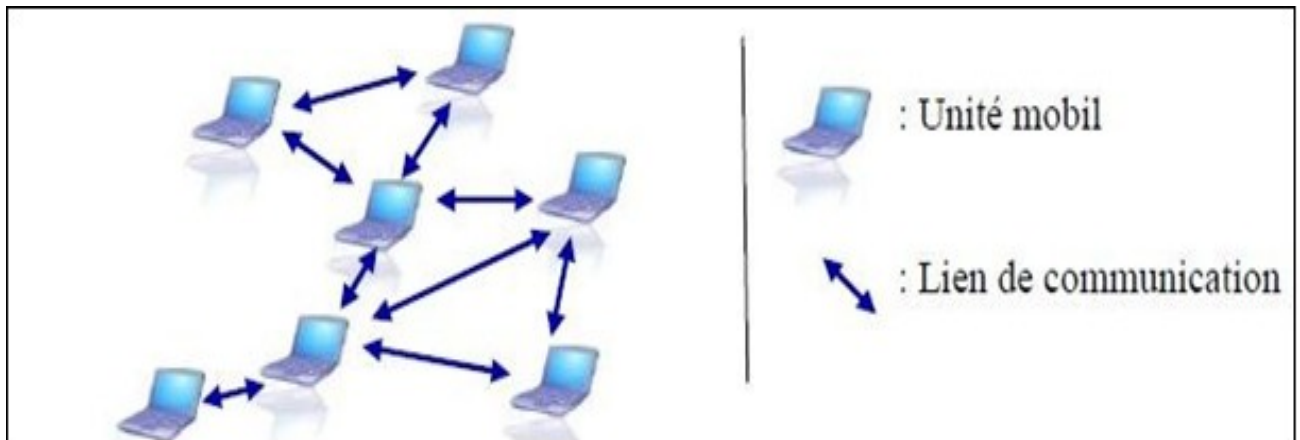


Figure1.3 : Réseau en mode ad hoc.

Un réseau ad hoc est un réseau sans fil auto-configurable. Lorsque deux machines mobiles ou plus se retrouvent dans le même secteur géographique, elles doivent se reconnaître pour pouvoir s'échanger des données. Le réseau doit se configurer automatiquement ; périodiquement ou à la demande pour assurer la liaison entre ces machines [5].

Le réseau auto-organisé doit être facile à déployer, les nœuds peuvent rejoindre et quitter le réseau de manière complètement dynamique sans avertir le réseau, et si possible, cela peut également être fait sans interrompre la communication entre les autres nœuds du réseau. La topologie des réseaux ad hoc est dynamique et décentralisée.

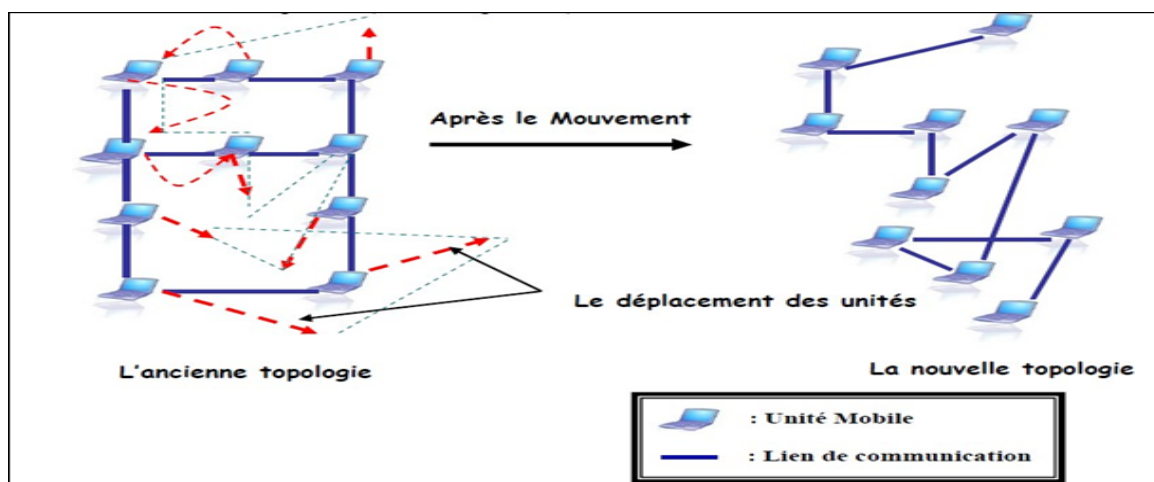


Figure1.4 : Le changement de la topologie des réseaux ad hoc.

Il peut changer de Manière aléatoire et l'unité mobile peut se déplacer à volonté. Par conséquent, la déconnexion de ces unités est très fréquente [5].

1.3 WiMAX :

WiMAX (Global Interoperability for Microwave Access) est une norme basée sur la norme de transmission radio IEEE 802.16 [6]. Il émet et reçoit des données à une vitesse maximale de 70 Mbits / s dans une bande de fréquences radio de 2 à 66 GHz dans un rayon de 50 km. Les amendements à la norme IEEE 802.16 sont divisés en deux catégories : WIMAX fixe : également connu sous le nom IEEE 802.16-2004, il est conçu pour une utilisation fixe avec des antennes installées sur le toit (comme les antennes de télévision). Le WIMAX fixe fonctionne dans les bandes de fréquences 2,5 GHZ et 3,5 GHZ, ce qui nécessite une licence d'exploitation, ainsi que la bande de fréquences gratuite 5,8 GHZ. WIMAX mobile (anglais portable WIMAX), également connu sous le nom d'IEEE 802.16e, prévoit la possibilité de connecter des clients mobiles au réseau Internet. Par conséquent, le WiMAX mobile ouvre la voie aux téléphones mobiles sur IP ou aux services mobiles à haut débit plus larges.

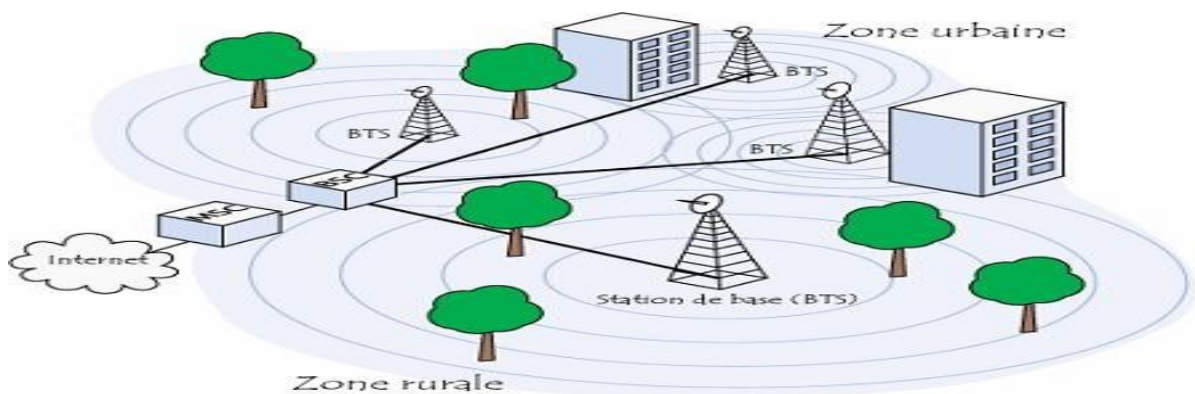


Figure1.5 : Réseau WIMAX

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

1.4.1 Les avantages du déploiement d'un réseau sans fil

- La portabilité : un ordinateur portable ou un ordinateur de poche suffit pour se connecter.
- Le choix du lieu de connexion, sous contrainte d'être toujours sous la couverture du réseau.

- La flexibilité : la connexion est indépendante de la marque ou des caractéristiques techniques des appareils connectés. Seules les cartes réseaux doivent garantir une compatibilité avec la norme à laquelle elles font référence
- La facilité : pas de câble signifie moins d'encombrement. Les appareils sur le marché tendent à se connecter automatiquement.
- La mobilité : les utilisateurs peuvent se déplacer sans couper la connexion au réseau.
- Le prix : ils tendent à baisser suivant l'évolution du marché. Il est difficile d'acheter un ordinateur portable sans carte réseau sans fil intégrée
- , moins de câble à déployer, et donc une diminution de l'investissement en câble ainsi que la charge de travail lors de l'installation.
- Facilité et souplesse de déploiement : qu'il y ait 10 ou 15 machines utilisateurs, la différence n'est pas aussi critique qu'avec un réseau filaire,
- Termes d'espace de connexion (et pas en termes d'analyse réseau)
- Le prix : Une solution sans fil peut-être largement moins chère pour une entreprise.

1.4.2 Les inconvénients des réseaux sans fils

- ✓ **Qualité et continuité du signal** : ces notions ne sont pas garanties du fait des problèmes pouvant venir des interférences, du matériel et de l'environnement.
- ✓ **Sécurité** : la sécurité des réseaux sans fil n'est pas encore tout à fait fiable du fait que cette technologie est novatrice.
- ✓ **Limitation de propagation** : le signal subit un affaiblissement dû à la réflexion, réfraction, diffraction et absorption.
- ✓ **Bande passante** : limitée dans les réseaux sans fil, par conséquent débits encore inférieurs à ceux des réseaux filaires [8].

1.5 Les techniques de Multiplexage [9]

Le multiplexage est l'opération de regroupement de plusieurs canaux, chacun affecté à la communication, de manière à les transmettre simultanément sur le même support physique (câble, liaison radio, satellite, etc.) sans leur mélange ni interférence mutuelle. A la réception, le meilleur démultiplexage possible doit permettre de séparer ces canaux et de leur redonner leur forme d'origine. Ce partage des ressources disponibles nécessite que

chacune d'elles soit isolée des autres, il est donc nécessaire de s'assurer que les ressources sont orthogonales.

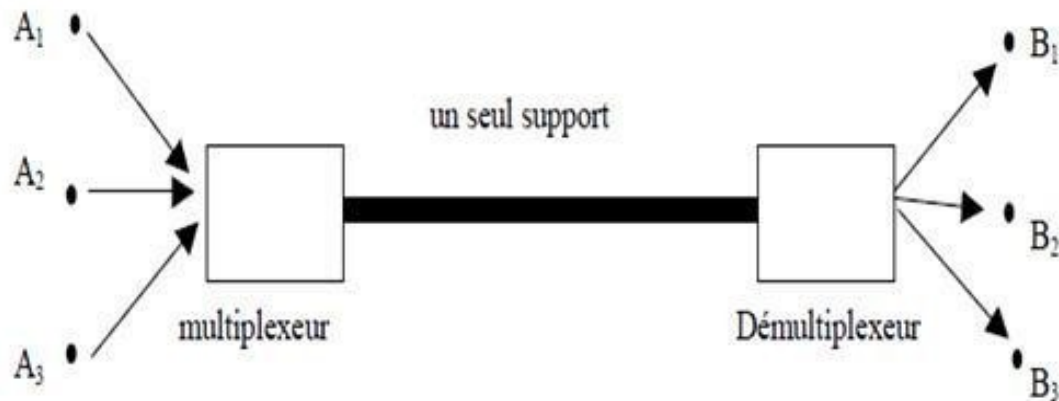


Figure 1.6 : Multiplexage des possibilités d'accès à un canal.

Il existe essentiellement quatre formes d'accès multiple ou multiplexage :

FDMA : Frequency Division Multiple Access ou « AMRF » Accès multiple par répartition de fréquence ou multiplexage fréquentiel.

TDMA : Time Division Multiple Access ou « AMRT » Accès multiple par répartition du temps ou multiplexage temporel.

CDMA : Code Division Multiple Access ou « AMRC » Accès multiple par répartition de codes ou multiplexage de code.

SDMA : Space Division Multiple Access ou « AMRS » Accès multiple par répartition spatiale ou multiplexage spatial.

Enfin, une nouvelle technique d'accès multiple, spécifique à la transmission dans les fibres Optiques, s'est récemment apparue : le WDMA (Wavelength Division Multiple Access). On parle donc de propagation des fenêtres optiques disponibles sur la même fibre.

1.5.1 L'accès multiple par répartition de fréquence FDMA

Les utilisateurs se partagent le canal en fréquence. Cette technique est marquée des plus anciennes : elle a été mise en œuvre depuis environ un siècle. Chaque utilisateur à qui on a alloué un canal de fréquence peut émettre et recevoir en continu, mais seulement dans la bande de fréquence qui lui est attribuée. A la réception, l'utilisation d'un filtre passe-bande sélectif est nécessaire pour démoduler le signal qui correspond à un unique usager tout en évitant les interférences avec les signaux présents dans d'autres domaines fréquentiels [10]

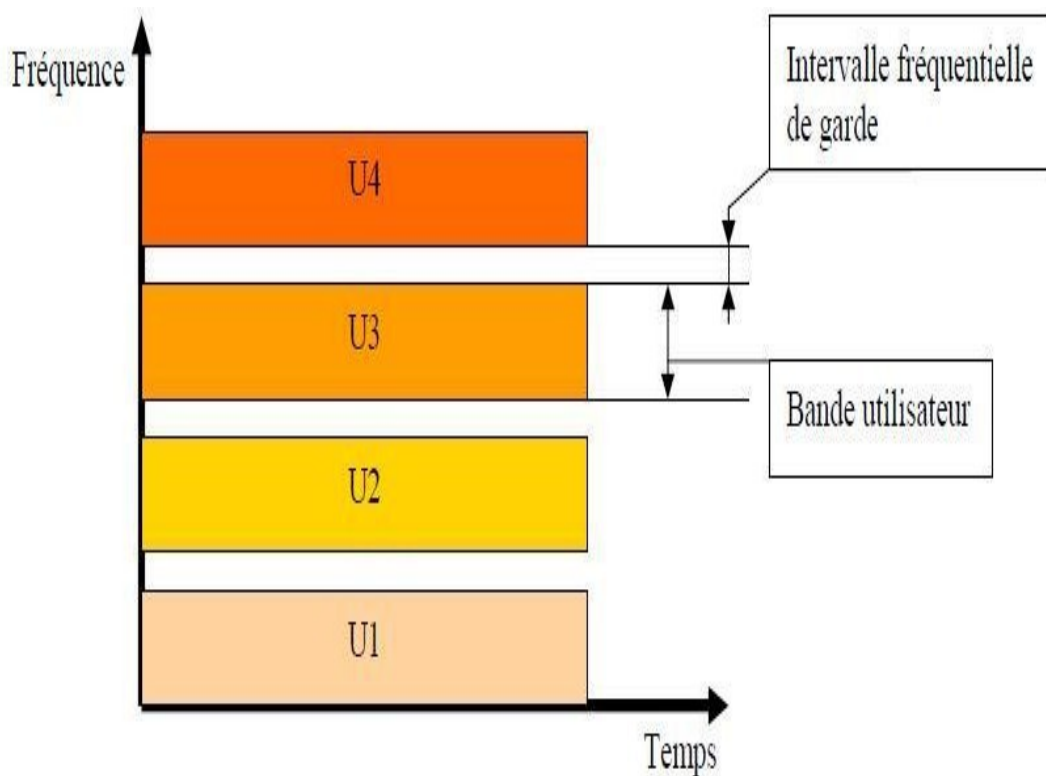


Figure 1.7: La technique de multiplexage FDMA

MULTIPLEXAGE : Nous commençons par générer N porteuses avec des intervalles de fréquence égaux à 2 fois la bande passante utile des signaux à multiplexer (au moins). Ensuite, nous multiplions la porteuse avec le signal pour transposer les signaux à différentes fréquences. En résumé, nous appelons le résultat de la somme un "signal composite".

DÉMULTIPLEXAGE : chaque porteuse est multipliée par un signal composite, puis un filtre passe-bas est réalisé autour de bandes de fréquences utiles pour restituer le signal démultiplexé. Il est impératif de générer les porteuses avec précision et d'assurer une bonne modulation car ces deux éléments sont essentiels dans la technique FDMA. Un problème important est également l'augmentation de la dynamique du signal complexe par rapport à l'un des signaux [11].

- **L'accès multiple à répartition du temps TDMA**

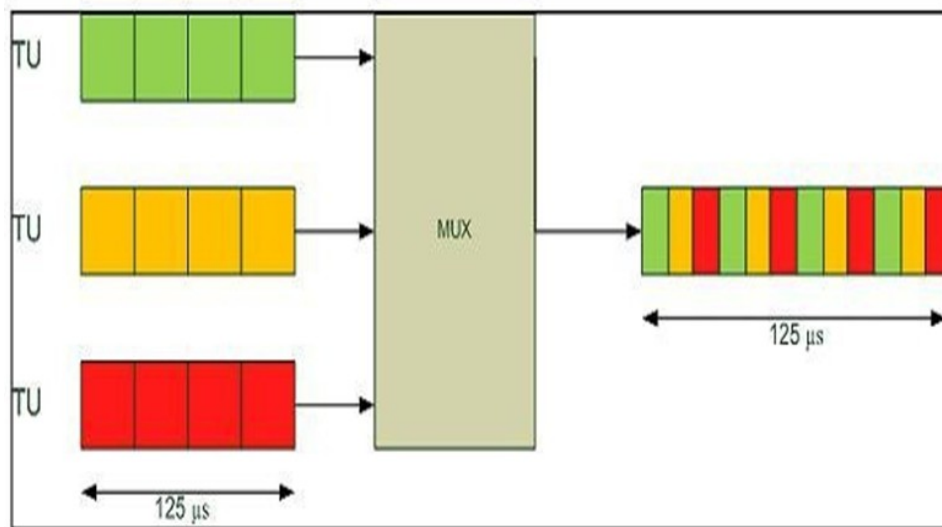


Figure 1.8: Répartition des périodes dans le cas d'un multiplexage TDMA.

Le multiplexage temporel réparti des signaux indépendants dans des créneaux temporels distincts.

MULTIPLEXAGE : tout d'abord des signaux de synchronisation doivent être générés. Ces signaux permettent de faire un échantillonnage. Les échantillons de chaque signal sont pris successivement : c'est au fait de la répartition temporelle que revient le nom de ce multiplexage.

Une fois échantillonnés, les signaux sont sommés, d'une manière à former le signal composite qui est le résultat du multiplexage temporel.

DEMULTIPLEXAGE : afin de retrouver les signaux initiaux on doit les démultiplexer, on multiplie notre signal composite par les différents signaux de synchronisation. On récupère ainsi les signaux échantillonnés.

Pour retrouver l'énergie du signal initial, nous devons bloquer leurs amplitudes entre chaque échantillon (Sample & hold). Un filtrage passe bas permet enfin de récupérer le signal initial [11].

1.5.2 L'accès multiple par répartition de codes CDMA [12]

Le CDMA est classé parmi les techniques d'accès multiple par étalement de spectre. En effet, comme nous allons le voir, chaque utilisateur peut émettre et recevoir tout le long de la bande de fréquence du canal de transmission.

Le principe est le suivant : une clé (ou code) correspond à chaque utilisateur, à l'aide de cette clé son message est codé avant d'être émis

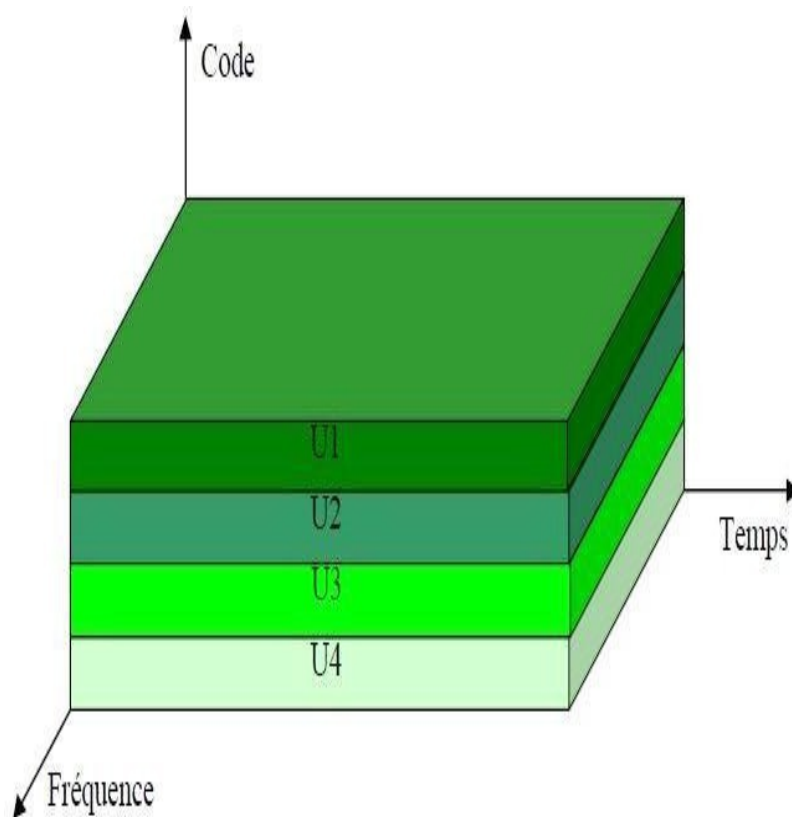


Figure 1.9 : La technique de multiplexage CDM

Pour la diffusion numérique, vous pouvez envisager d'autoriser N canaux à transmettre des informations simultanément sur la même bande passante. Les utilisateurs qui ont accès au système peuvent échanger des données en continu sur toute la bande de fréquences disponible. Par conséquent, la distinction de N canaux doit être effectuée par des codes orthogonaux entre eux (codes dont la corrélation mutuelle est nulle), les éléments de ces codes sont appelés chips ou chips. De cette manière, on obtient un multiplexage de code par "étalement de spectre" : chaque utilisateur émet et reçoit en utilisant son propre code, et le code sépare les données à transmettre. Le débit de code est supérieur au débit de données. Chaque récepteur effectue une opération pour corréler les signaux multiplexés qu'il reçoit avec une séquence convenue. Il en résulte donc qu'il reproduit les données qui lui sont destinées, la corrélation de tous les autres signaux résultant du multiplexage est nulle. Les émissions résultantes aux autres utilisateurs sont considérées étant un pseudo-bruit à large bande [10].

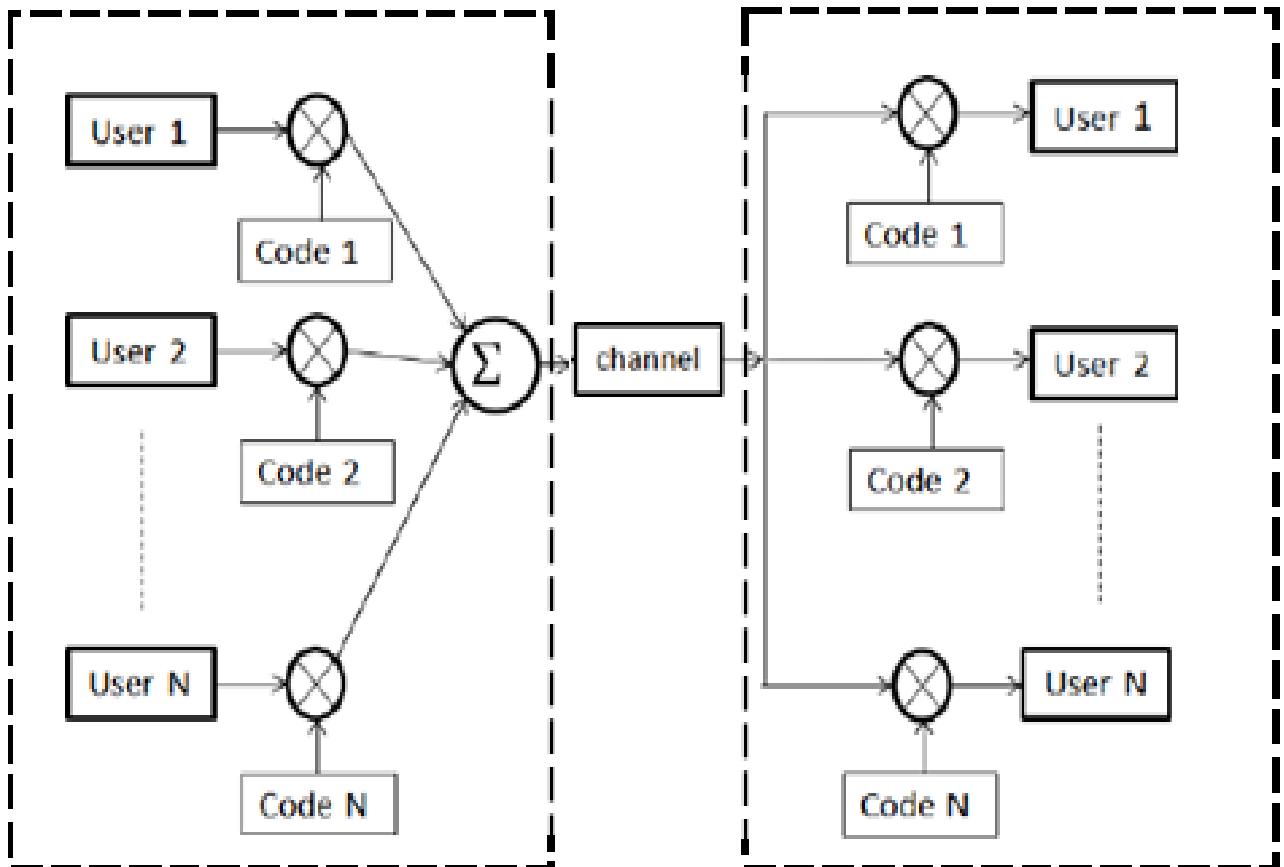


Figure 1.10 : Principe d'utilisation des codes orthogonaux en CDMA.

1.6 Canal de communications

Un canal de communications est un médium physique qui est utilisé pour la transmission d'un signal à partir d'un transmetteur jusqu'au récepteur. Il est également possible de procéder via des ondes électromagnétiques dans le sans-fil. Quel que soit le mode de transmission, une constante demeure, c'est que des perturbations aléatoires non prévisibles affectent le signal transmis avant sa réception. On utilise les processus stochastiques pour fins de modélisation d'un canal de communications dû aux incertitudes inhérentes au processus. Un des problèmes communs est la présence de bruits additifs ; ils ont diverses causes dont le bruit thermique des composantes constituant l'appareil récepteur par exemple. L'effet du bruit peut être atténué par l'augmentation de puissance du signal transmis. Toutefois, certaines limitations peuvent l'empêcher. La bande passante disponible est également une limitation majeure, non seulement due aux composantes physiques, mais par les restrictions législatives et la demande très élevée pour cette ressource limitée. [13]

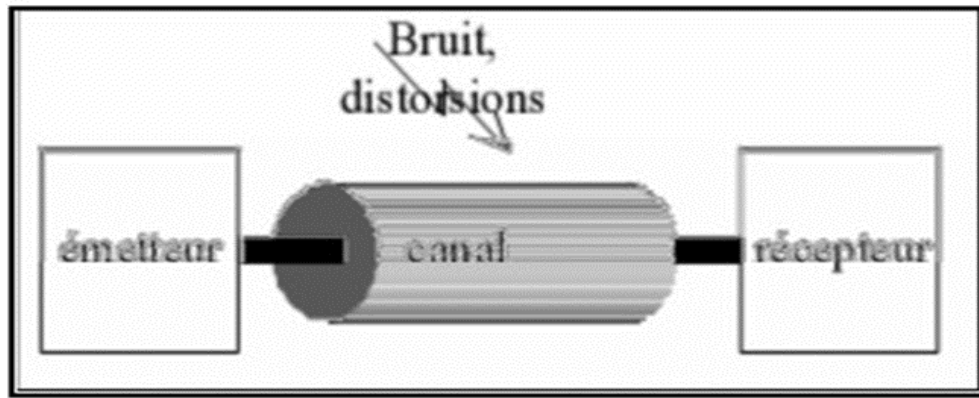


Figure 1.11: Modèle d'un canal de transmission.

1.6.1 Caractéristique d'un canal

Les systèmes de communication sans-fil sont limités en performances et en capacité principalement à cause de deux facteurs liés au canal de transmission : [14]

1.6.1.1 Bruit additif

Le bruit définit les signaux aléatoires et non désirés, voire parasites, se superposant aux signaux utiles. Le bruit additif est l'un des problèmes les plus communément rencontrés dans la transmission. Il est généré par les composants internes du système de communication, et principalement par le bloc radio fréquence RFFE (Radio Frequency Front-End) du récepteur. De plus, il est généralement modélisé par un bruit blanc Gaussien additif (BBGA) ayant une puissance constante.

La modélisation mathématique la plus simple pour une voie de transmission est le canal à bruit additif. Dans ce modèle, le signal transmis $x(t)$ est corrompu par un processus aléatoire de bruit additif $n(t)$. L'atténuation du canal est donc facilement incorporée au modèle. Quand le signal subit une atténuation, le signal reçu $y(t)$ est donné par (1.01) :

$$y(t) = \alpha x(t) + n(t) \quad (1.01)$$

1.6.1.2 Evanouissement et trajets multiples

Un signal émis par une antenne radio se propage soit dans toutes les directions (si l'antenne est omnidirectionnelle), soit dans un ensemble de directions bien précis, si l'antenne est directive. Le signal émis subit des réflexions, des réfractions, des diffusions autour des obstacles se trouvant dans l'environnement de propagation entre la source et la destination. Comme exemples des obstacles, nous citons les bâtiments, les arbres, les voitures, pour l'environnement d'extérieur, sinon pour l'intérieur, nous citons les meubles, les murs etc. Ainsi, le récepteur voit des versions multiples du signal émis, de puissances atténuées et avec certains retards [14]. L'évanouissement que connaît une communication

sans-fil est en fait une atténuation de la puissance du signal perceptible due à diverses causes selon le type d'évanouissement rencontré. La performance du système peut donc être très dégradée par l'évanouissement, mais heureusement, plusieurs techniques peuvent aider à la contrer. L'évanouissement se compose d'effets combinés de multiples parcours de propagation, de mouvements rapides des unités émettrices et réceptrices, et des obstacles. Cet évanouissement décrit les fluctuations rapides de l'amplitude du signal reçu sur une courte période de temps, un phénomène causé par l'interférence d'au moins deux versions du signal transmis qui arrivent au récepteur avec un léger décalage dans le temps. La performance d'un système de communication peut être très dégradée par l'évanouissement. La propagation par trajet multiple est l'un des problèmes les plus difficiles à combattre associés aux trajets mobiles. [15]

1.7 Types et modèles de canaux

Il existe une multitude de modèles des canaux de propagations. Dans cette étude nous nous intéressons aux types de canaux suivants : [14]

1.7.1 Canal avec bruit blanc gaussien aditif

Le modèle de canal le plus couramment utilisé pour la transmission numérique analogique est également le canal de bruit blanc additif gaussien, qui est également l'un des modèles les

Plus faciles à générer et à analyser. (BBAG). Ce bruit modélise le bruit interne (bruit thermique dû à des défauts de l'appareil) et le bruit externe (bruit d'antenne). Cependant, ce modèle est plus lié à la transmission filaire car il représente une transmission presque parfaite de l'émetteur au récepteur. Supposons qu'on a envoyé le signal $x(t)$, le signal reçu s'écrit alors :

$$y(t) = \alpha x(t) + n(t) \quad (1.01)$$

Où $n(t)$ représente le BBAG, caractérisé par un processus aléatoire gaussien de moyenne nulle, de variance σ^2 et de densité spectrale de puissance bilatérale $\Phi = \frac{N_0}{2}$

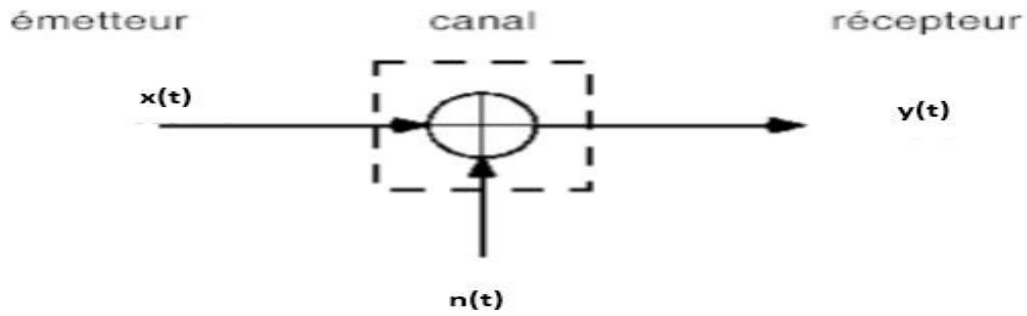


Figure 1.12: Modèle du canal BBAG

Le rapport S/B est appelé rapport signal sur bruit et permet de quantifier le niveau de bruit par rapport au signal. Ce rapport est mesurable et il permet d'évaluer les performances d'un système dans un milieu bruité (BBAG). Toutefois, on préfère exprimer les performances d'un système en terme d'énergie du bit transmis E_b par rapport au bruit N_0 . Ce rapport est difficilement accessible par la mesure. Il convient alors de passer du rapport S/B au rapport $\frac{E_b}{N_0}$ par la formule :

$$\frac{S}{B} = \log_2(M) \frac{E_b}{N_0} \quad (1.02)$$

N_0 étant la densité spectrale de puissance du bruit E_b représente l'énergie émise par bit.

M représente les états possibles que peut prendre un symbole

Le signal reçu $y(t)$ est la résultante du signal émis $x(t)$ avec l'ajout du bruit $n(t)$ modélisé par une fonction de densité de probabilité gaussienne définie par la formule :

Suivante :

$$f_w(w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(w-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1.03)$$

Avec, w : variable aléatoire, μ : moyenne, σ : variance de la distribution Gaussienne

1.7.2 Canal à évanouissements

Les communications radio ont souvent besoin d'un modèle plus élaboré prenant en compte les différences de propagation du milieu, appelées encore atténuations ou évanouissements, qui affectent la puissance du signal. Cette atténuation du signal est principalement due à un environnement de propagation riche en échos et donc caractérisé par de nombreux multi trajets, mais aussi au mouvement relatif de l'émetteur et du récepteur entraînant des variations temporelles du canal.

Le phénomène de multi trajets s’observe lorsque l’onde électromagnétique portant le signal modulé se propage par plusieurs chemins de l’émetteur au récepteur. Les transmissions intramuros, avec toutes les perturbations liées aux parois du bâtiment, et les communications radio-mobiles, dont les multi trajets sont causés par les montagnes, immeubles et autres voitures, sont les exemples les plus courants d’environnements propices aux multi trajets, illustrer par la figure ci-dessous

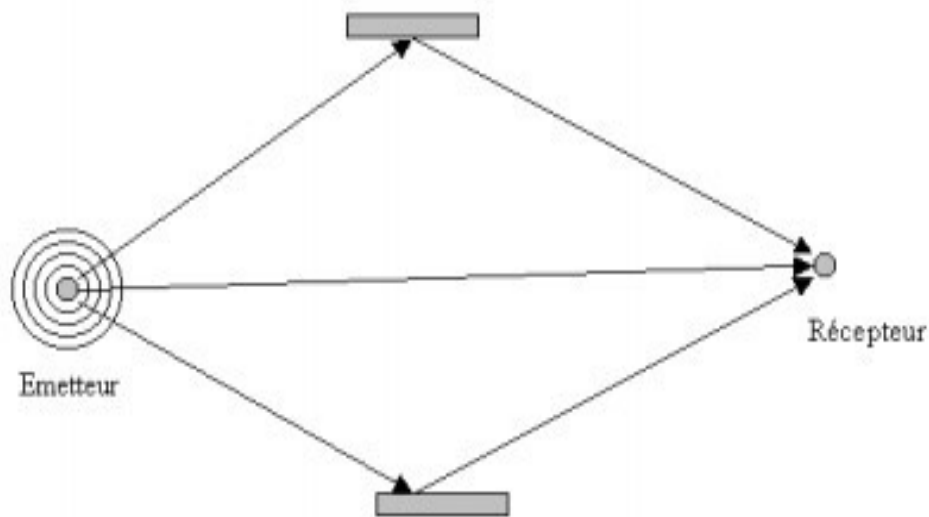


Figure 1.13: Milieu de transmission avec deux obstacles

Ces derniers apparaissent toutefois dans d’autres milieux, et les transmissions acoustiques sous-marines par exemple doivent ainsi affronter de nombreux multi trajets dus à la surface de l’eau et aux fonds marins. En ce qui concerne les variations temporelles du canal, on peut distinguer deux classes, l’étalement temporel et l’effet Doppler, pouvant par ailleurs constituer une base pour la classification des canaux à évanouissements.

Dans ce type de canal, seuls les évanouissements qui affectent les signaux sont pris en compte.

Il est décrit par l’équation :

$$r(t) = h(t; td) * S(t) \quad (1.04)$$



Figure 1.14: Modèle d'un canal avec évanouissement

1.7.3 Le modèle du canal de Rayleigh

C'est un canal qui modélise à la fois un évanouissement et un bruit additif. Ce canal théorique peut également modéliser un canal sélectif en fréquence (et éventuellement en temps). Ce modèle est décrit par le schéma ci-dessous

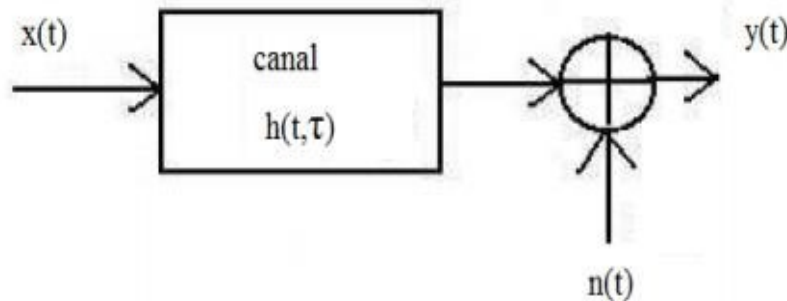


Figure 1.15: Le modèle du canal de Rayleigh

Conséquent, à la sortie du canal, on a :

$$y(t) = x(t) * h(t, \tau) + n(t) \quad (1.05)$$

Ce modèle n'est valable que pour des propagations à trajet multiple sans trajet direct c'est-à-dire en absence de visibilité directe entre l'émetteur et le récepteur ou Non Line Of Sight (NLOS) et où la moyenne de la réponse impulsionnelle du canal est considérée comme nulle.

La densité de probabilité $p_\alpha(\alpha)$ de l'évanouissement α ($\alpha \geq 0$) est définie par :

$$p_\alpha(\alpha) = \frac{2\alpha}{\Omega} e^{\left(\frac{-\alpha^2}{\Omega}\right)} \quad (1.06)$$

Avec, $\Omega = E[\alpha^2]$, qui représente le moment d'ordre deux ou l'énergie moyenne du canal.

1.8 Sélectivité d'un canal de communication

Pour mieux comprendre sélectivité d'un canal de communication nous allons d'abord définir ce qu'on appelle la bande de cohérence et le temps de cohérence.

- La bande de cohérence B_C d'un canal radio mobile est la bande de fréquence sur laquelle les caractéristiques de propagation d'un signal sont corrélées, et elle peut être approximée par :

$$B_C \approx \frac{1}{\tau_{max}} \quad (1.07)$$

- Le temps de cohérence T_c est la durée sur laquelle les caractéristiques du canal radio mobile peuvent être considérés comme invariantes dans le temps, et elle peut être approximée par :

$$T_c \approx \frac{1}{2f_{D_{max}}} \quad (1.08)$$

La reconstruction des signaux transmis nécessite quelques suppositions pour un traitement numérique adéquat en aval. Les valeurs de la bande de cohérence et la fréquence de cohérence définissent la sélectivité du canal. Les multi-trajets ainsi que les déplacements de l'émetteur et/ou du récepteur sont les sources d'une sélectivité fréquentielle et temporelle. [16]

1.8.1 Canal sélectif en fréquence

Nous parlons de canal sélectif en fréquence quand le signal transmis $x(t)$ occupe une bande de fréquence plus grande que la bande de cohérence du canal de propagation (définie comme l'inverse du temps de retard maximum du canal de propagation, appelé encore delay spread). Dans ce cas, les composantes fréquentielles de $x(t)$ séparées de la bande de cohérence subissent des atténuations différentes et le récepteur distingue plusieurs trajets multiples.

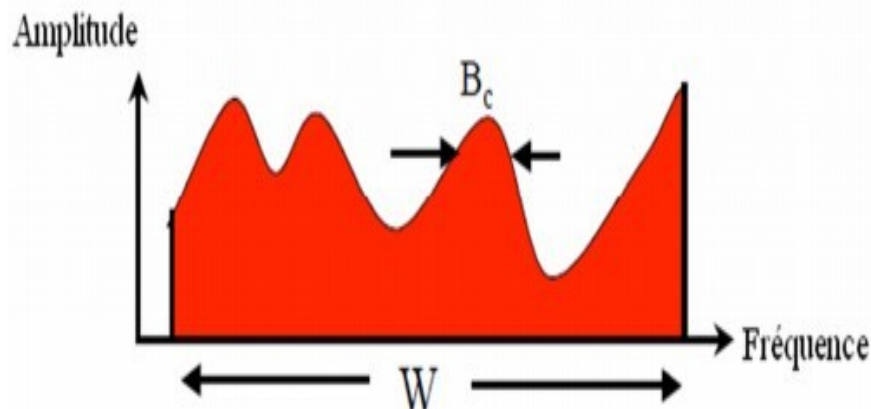


Figure 1.16: Canal sélectif en fréquence.

1.8.2 Canal sélectif en temps

On désigne par canal sélectif en temps, un canal avec évanouissements à haute corrélation due à des temps rapprochés et sans corrélation avec espace temporel suffisant. Ce type d'évanouissement causera des interférences entre les symboles envoyés et ainsi, une dégradation de la probabilité d'erreur. Nous parlons d'un canal sélectif en temps si la durée T_s de transmission d'un symbole est plus grande que T_c

1.8.3 Canal non sélectif

Cette fois-ci, si la bande du signal est très petite par rapport à la bande cohérente, alors le canal est dit non sélectif en fréquence. D'une autre manière, nous pouvons aussi parler du cas où le retard de propagation des trajets multiples est inférieur à la période symbole. Dans ce cas le récepteur est capable de distinguer un seul trajet de propagation et ainsi le canal est dit aussi non- sélectif en fréquence, c'est-à-dire que toutes les composantes spectrales du signal émis sont affectées de la même façon par le canal. Puis la nature des atténuations vues des différentes antennes de réception sont supposées indépendantes et suivent une loi de Rayleigh. [16]

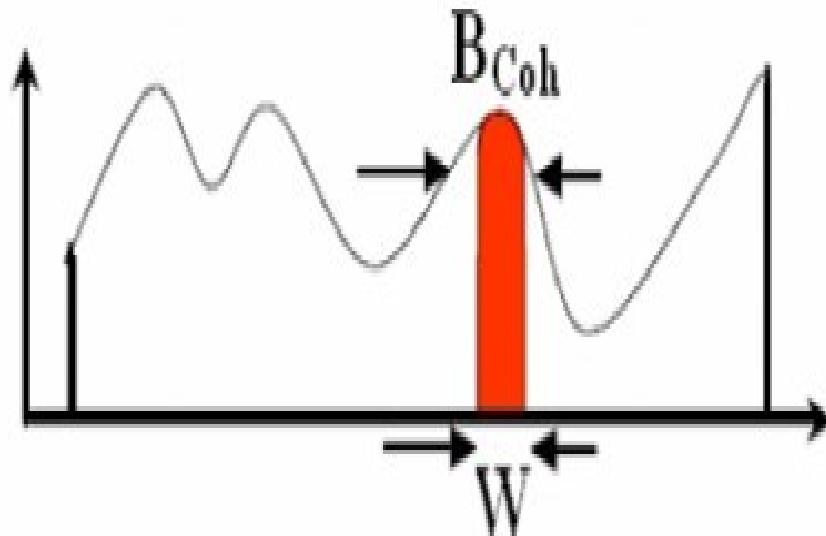


Figure 1.17: Comparaison montrant un canal non sélectif en fréquence

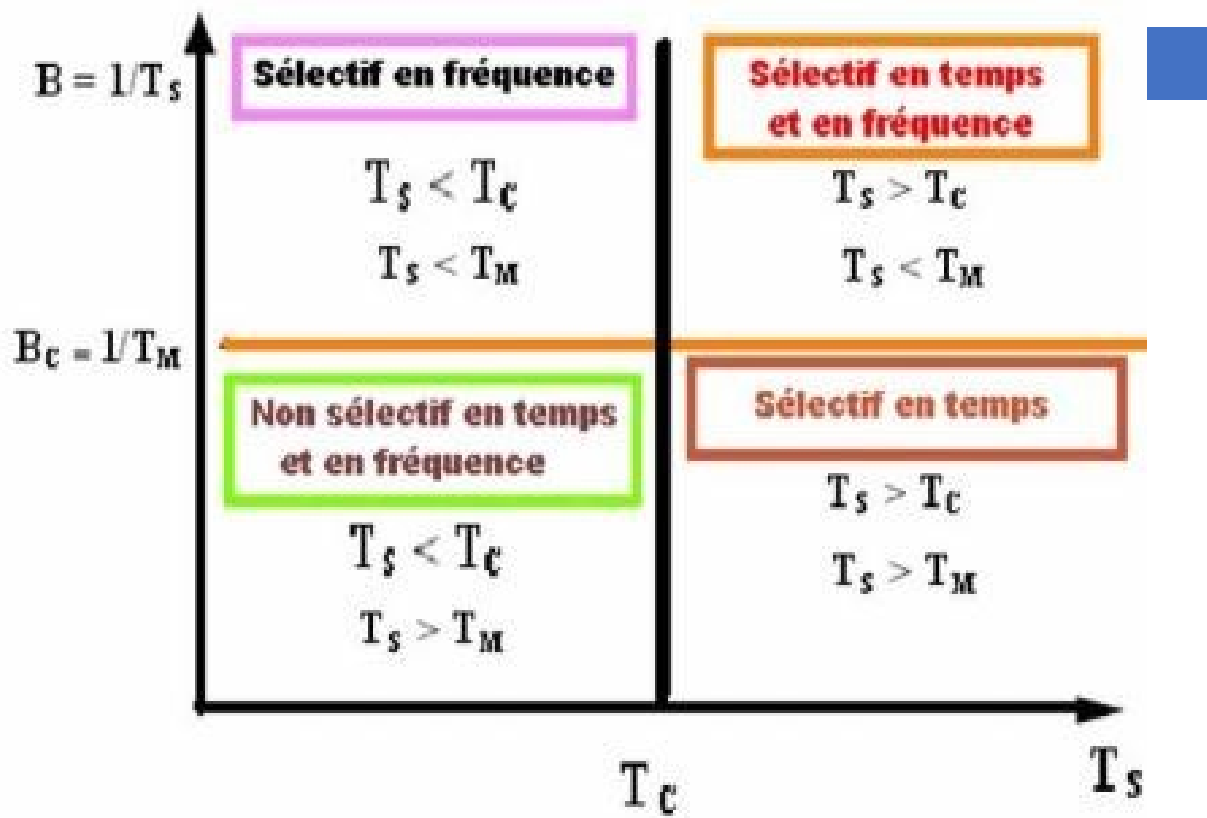


Figure 1.18: Différentes sélectivités du canal

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

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

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

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{E_b}{N_o}} \quad (1.09)$$

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

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

$$\operatorname{Erfc}(X) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_X^{\infty} \exp(-U^2) du \quad (1.10)$$

Il est à noter que la probabilité d'erreur (P_e) est une valeur théorique, et une estimation sans biais de cette dernière est effectuée en mesurant le taux d'erreur sur les bits (BER) par bit. BER est défini comme le rapport du nombre de bits en erreur au nombre de bits transmis. Ce taux détermine le nombre d'erreurs qui se produisent immédiatement avant la modulation et immédiatement après la démodulation. Le taux d'erreur augmentera en raison des interférences causées par l'équipement, la défaillance du réseau, l'antenne et le

pointage incorrect du canal. Il est à noter que si le nombre de bits transmis tend vers l'infini, le BER tend vers Pe [17]

1.10 Rapport signal sur bruit (SNR) [18]

Le rapport signal / bruit, abréviation de rapport signal / bruit (SNR), est largement connu et est l'indicateur de performance le plus populaire dans les systèmes de télécommunication. Le terme désigne le signal démodulé Le bruit total est le bruit du réseau de transmission plus le bruit intégré dans le signal modulé et les autres dégradations de la modulation. Le SNR est exprimé comme suit [8] :

$$SNR = \frac{P_S}{P_N} \quad (1.11)$$

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

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \frac{p_s}{p_N} \quad (1.12)$$

1.11 Conclusion

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

Chapitre 2 : La technique MIMO-OFDM

2 La technique MIMO-OFDM

2.1 Introduction

La combinaison du système MIMO avec OFDM est considérée comme une solution prometteuse pour augmenter la capacité du système de communication sans fil et résister au phénomène des trajets multiples. En pratique, cela conduit à la diversité, ce qui minimise la possibilité d'évanouissement de plusieurs canaux indépendants simultanément dans le temps, la fréquence et l'espace. Cependant, avec l'avènement de MIMO associé à l'OFDM, les trois paramètres peuvent être améliorés simultanément [19]. De plus, bien que la technique multi antennes puisse être combinée avec n'importe quelle technique de modulation ou d'accès multiple, des recherches récentes suggèrent que la combinaison MIMO-OFDM est la plus efficace. Elle a constitué le fondement de tous les réseaux sans fil des dernières générations.

Dans ce chapitre, nous décrirons d'abord la modulation OFDM afin d'étudier l'association de cette dernière avec la technologie MIMO pour former la technologie MIMO-OFDM.

2.2 Introduction à la modulation OFDM

L'un des principaux problèmes des télécommunications est d'adapter les informations à envoyer au canal de propagation. Afin de résoudre le problème des canaux sélectionnés en fréquence, une technique de démodulation intelligente a vu le jour, qui comprend l'utilisation de la modulation multi-porteuse, dans laquelle les blocs d'informations sont modulés par transformée de Fourier. Ces dernières années, cette technologie appelée OFDM a rencontré un franc succès et existe dans toutes les futures normes (Wi-MAX, LTE, IEEE802.11a). La technologie OFDM a l'énorme avantage de convertir un canal à trajets multiples large bande en un ensemble de sous-canaux à un seul trajet, et il est très facile d'égaliser. La technique de modulation OFDM est utilisée dans la diffusion audio numérique (DAB pour "Digital Audio Broadcasting ") et dans la diffusion vidéo numérique (DVB pour "Digital Vidéo Broadcasting "). Elle est en phase de normalisation dans le LTE ("Long Term Evolution") pour la future norme de réseau mobile de quatrième génération (4G) [20].

2.3 Historique de la technique OFDM

La modulation multi-porteuse a été introduite à la fin des années 50, sa première utilisation était dans des systèmes de communications hautes fréquences militaires. Quelques années

Plus tard elle a été améliorée avec l'apparition du concept des signaux orthogonaux à bande limitée, concept que l'on appellera par la suite "Orthogonal Frequency Division Multiplexing" (OFDM).

La difficulté majeure d'implantation de la modulation réside alors dans la nécessité de disposer d'une banque d'oscillateurs sinusoïdaux en émission pour générer les sous-porteuses et autant de démodulateurs cohérents en réception. Cette difficulté rend alors impossible l'exploitation des communications multi-porteuses et les transmissions OFDM ne suscitent alors qu'un intérêt académique.

En 1971, Weinstein et Ebert proposent l'utilisation de la transformée de Fourier discrète afin de générer la modulation et la démodulation des signaux multi-porteuses. Cette avancée est alors déterminante pour les communications OFDM puisque les avancées dans le domaine du traitement des signaux numériques éliminent peu à peu les contraintes matérielles liées à la modulation [21]. L'OFDM est une modulation particulièrement appréciée pour les transmissions sans-fil à hauts-débits.

On comprend alors facilement l'engouement pour cette technique depuis les années 90 ; bien qu'historiquement, le concept existe depuis 1960.

2.4 Modulation mono porteuse [22]

Dans la modulation mono-porteuse, chaque symbole élémentaire d'information occupe toute la bande spectrale disponible sur un intervalle de temps minimale.

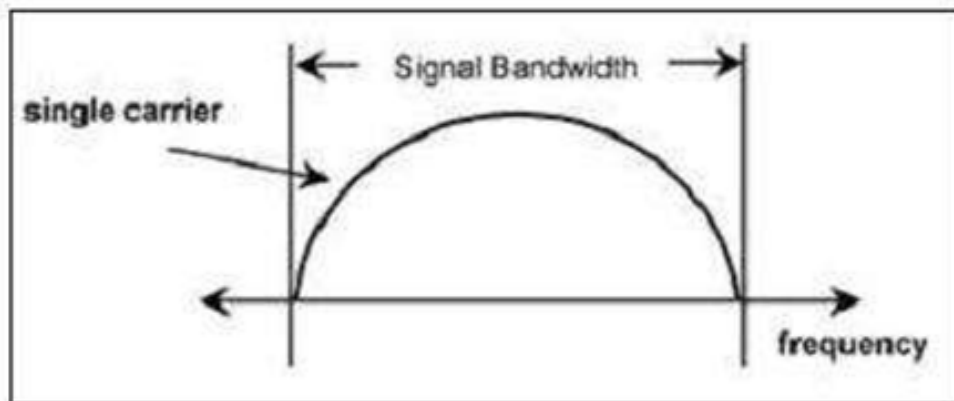


Figure 2.1 : format de modulation à porteuse unique.

2.5 Modulation multi porteuse

La technologie dite multi-porteuse implique la transmission de données numériques en modulant simultanément les données numériques sur un grand nombre de porteuses. Ce sont des technologies de réutilisation des fréquences qui existent depuis longtemps. Le

Le principe est de diviser la totalité de la bande passante allouée pour la transmission en un nombre limité de sous-porteuses. Des informations seront envoyées sur chacune de ces sous-porteuses. En effet, la séquence binaire contenant les informations à transmettre sera répartie sur N sous-porteuses orthogonales. L'espacement entre les sous-porteuses est choisi de sorte que les sous-porteuses soient mathématiquement orthogonales les unes aux autres.

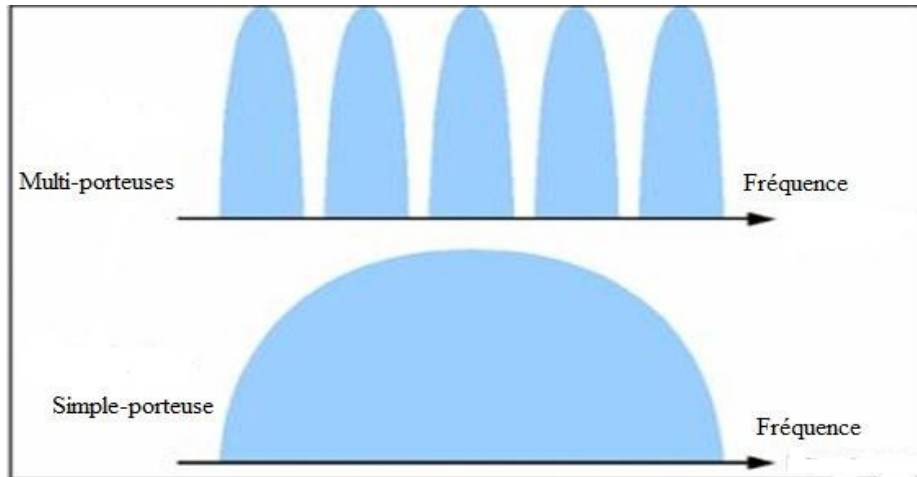


Figure 2. 2: Modulations multi-porteuses

La modulation est réalisée généralement dans le domaine électromagnétique en modifiant l'amplitude, la fréquence, ou la phase du signal transmis. IEEE 802.11 utilise des modulations de phase et d'amplitude.

Les principales modulations utilisées par IEEE 802.11 sont les suivantes [23] :

- ✚ BPSK : 1 bit est transmis par symbole ;
- ✚ QPSK : 2 bits sont transmis par symbole ;
- ✚ QAM : 4 ou 6 bits sont transmis par symbole .

2.6 Présentation de la technologie OFDM

La nouveauté apportée par le système OFDM est l'utilisation de plusieurs sous-porteuses, de fréquences orthogonales, réparties sur une certaine bande de fréquences. L'orthogonalité des fréquences est très importante, car c'est elle qui assure l'absence d'interférences entre les sous- porteuses (ICI). La performance de ce système dépend donc beaucoup de la synchronisation des fréquences entre le transmetteur et le récepteur, afin d'assurer l'orthogonalité, mais ce n'est normalement pas problématique.

Il suffit que l'espacement entre les fréquences soit de $1/T_s$, où T_s est la durée d'un symbole, pour que les fréquences soient orthogonales, telles que les quatre illustrées dans la Figure 2.01.

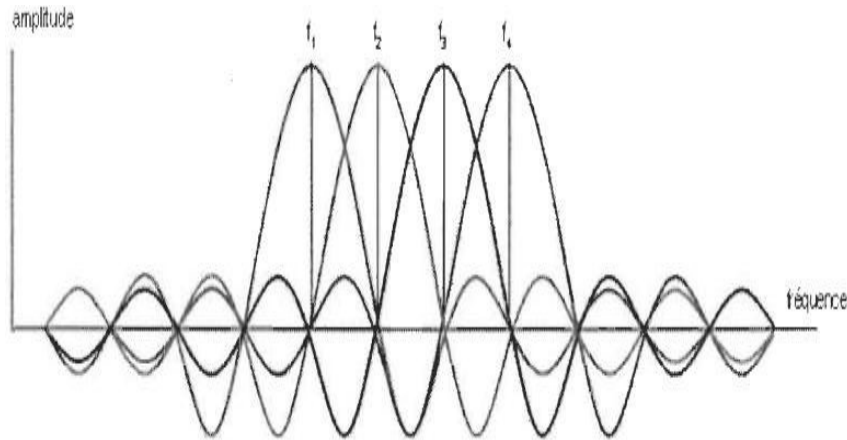


Figure 2.3: Exemple de quatre fréquences orthogonales

L'orthogonalité des fréquences garantit donc qu'une porteuse n'empiète pas sur une autre porteuse, car elle doit être nulle à la fréquence de l'autre porteuse. Dans le système OFDM, l'ISI est beaucoup plus bas que le système à un seul transporteur. En effet, la transmission de plusieurs messages en parallèle permet d'envoyer ces informations plus lentement à la même vitesse. Par rapport au délai de transmission, cela nous permet d'avoir une durée de symbole plus longue, c'est pourquoi l'ISI est réduit. Habituellement, un intervalle de garde est à nouveau ajouté entre les symboles pour minimiser à nouveau l'ISI autant que possible. Un autre avantage inhérent au système OFDM est que l'on peut traiter le canal sélectif en fréquence comme une fonction de fréquence plutôt que comme une constante pour une sous-porteuse donnée. [24]

La raison est que la largeur de bande d'une sous-porteuse est très petite, ce qui fait qu'effectivement, la variation rattachée aux canaux sélectifs en fréquence est minimale, et pratiquement négligeable. Cette hypothèse simplifiera beaucoup les calculs, et le système dans son ensemble, tout en restant très près de la réalité. Le multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM) est une technique de modulations multi porteuses à base de FFT. D'un point de vue implémentation numérique,

Les systèmes L'OFDM transmet les données par blocs : le flux de données d'origine avec un débit de R est multiplexé en N flux parallèles avec un débit de R / N . Les données étant transmises sur N canaux différents, elles sont en effet multiplexées en fréquence.

Afin d'effectuer cette transmission, le schéma OFDM ne transmet pas de données en série comme un système à porteuse unique, mais transmet des données par blocs en introduisant une redondance (appelée intervalle de garde) dans les informations utiles. [Vingt-et-un] Le principe de base de l'OFDM est de traiter la convolution du signal transmis par le canal dispersif dans le domaine temporel comme le produit du signal transmis par le canal sélectif dans le domaine temporel. [24]

- Les symboles complexes sont formés dans le domaine fréquentiel et convertis dans le domainetemporel par une transformée de Fourier inverse discrète,
- Le signal est convolué avec le canal multi-trajets dans le domaine temporel,
- Les échantillons reçus dans le domaine temporel sont convertis dans le domaine fréquentielpar une transformée de Fourier discrète.

Le canal est compensé au récepteur dans le domaine fréquentiel par simple multiplication parl'inverse de la réponse fréquentielle du canal.

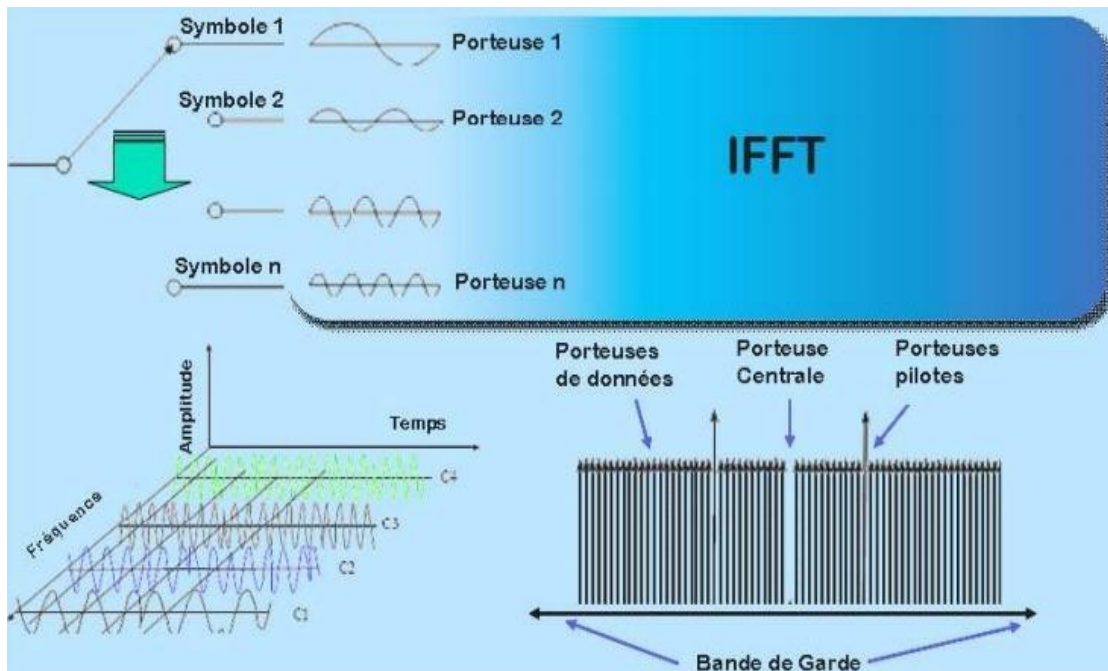


Figure 2.4: La décomposition en sous –porteuses issues de l’IFFT

2.7 Principe de l’OFDM

Les modulations multi porteuses comme l'OFDM consistent à répartir les symboles sur un grand nombre de porteuses à bas débit. Chaque symbole occupant alors toute la bande passante disponible pendant la transmission

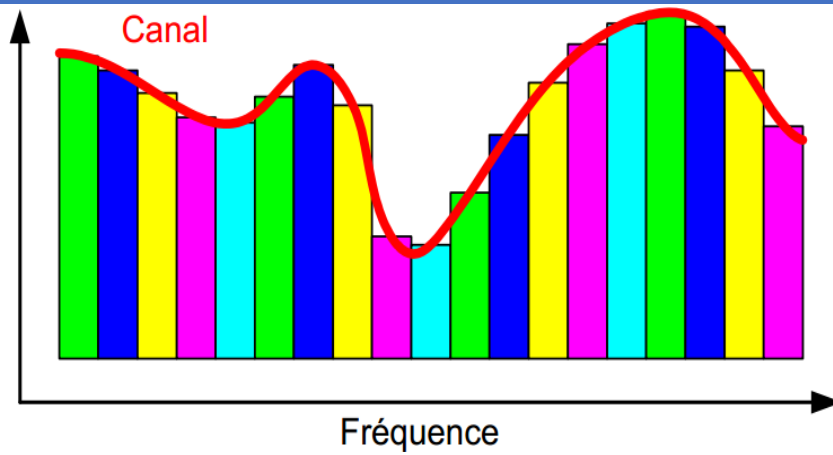


Figure 2.5: Principe de l'OFDM

Ces symboles seront divisés en N colonnes plus lentes, et auront alors une durée de $T_S = N \cdot T_{Si}$, où T_{Si} est la période de la colonne de symboles initiale. La réduction du débit de symboles entraîne une réduction de l'interférence entre symboles de rapports N . Par conséquent, lorsque le débit de symboles envoyé sur un canal sans fil avec une réponse impulsionnelle de $250 \mu s$ est de $10 \text{ m symboles } s^{-1}$, l'interférence de symbole $K = 250 / 0,1 = 2500$ symboles. Ensuite, le processus d'égalisation est effectué par blocs, ce qui est très compliqué. Par contre, en répartissant ces symboles sur $N = 2048$ porteuses, moins de 2 symboles sont interférés, ce qui simplifie grandement l'égalisation.[25]

2.7.1 Principe de modulation

Le principe de modulation OFDM est de répartir les données à transmettre sur les N porteuses, en effet, on groupe les symboles c_k par paquets de N . Les C_k sont des nombres complexes définis à partir des éléments binaires par une constellation souvent de modulation MAQ à 4, 16, 64, 2^q états. La séquence de N symboles $c_0, c_1, \dots, c_{N-1}$ constitue un symbole OFDM. Le k -ième train de symboles parmi les N trains module un signal de fréquence f_k . Le signal modulé du train k s'écrit sous forme complexe [26] :

$$P_n(t) = C_k e^{j2\pi f_k t} \quad (2.01)$$

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

$$S(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{j2\pi f_k t} \quad t \in [0, T_s] \quad (2.02)$$

Où T_s est la durée de symbole OFDM.

Voici alors le schéma du principe de modulation OFDM :

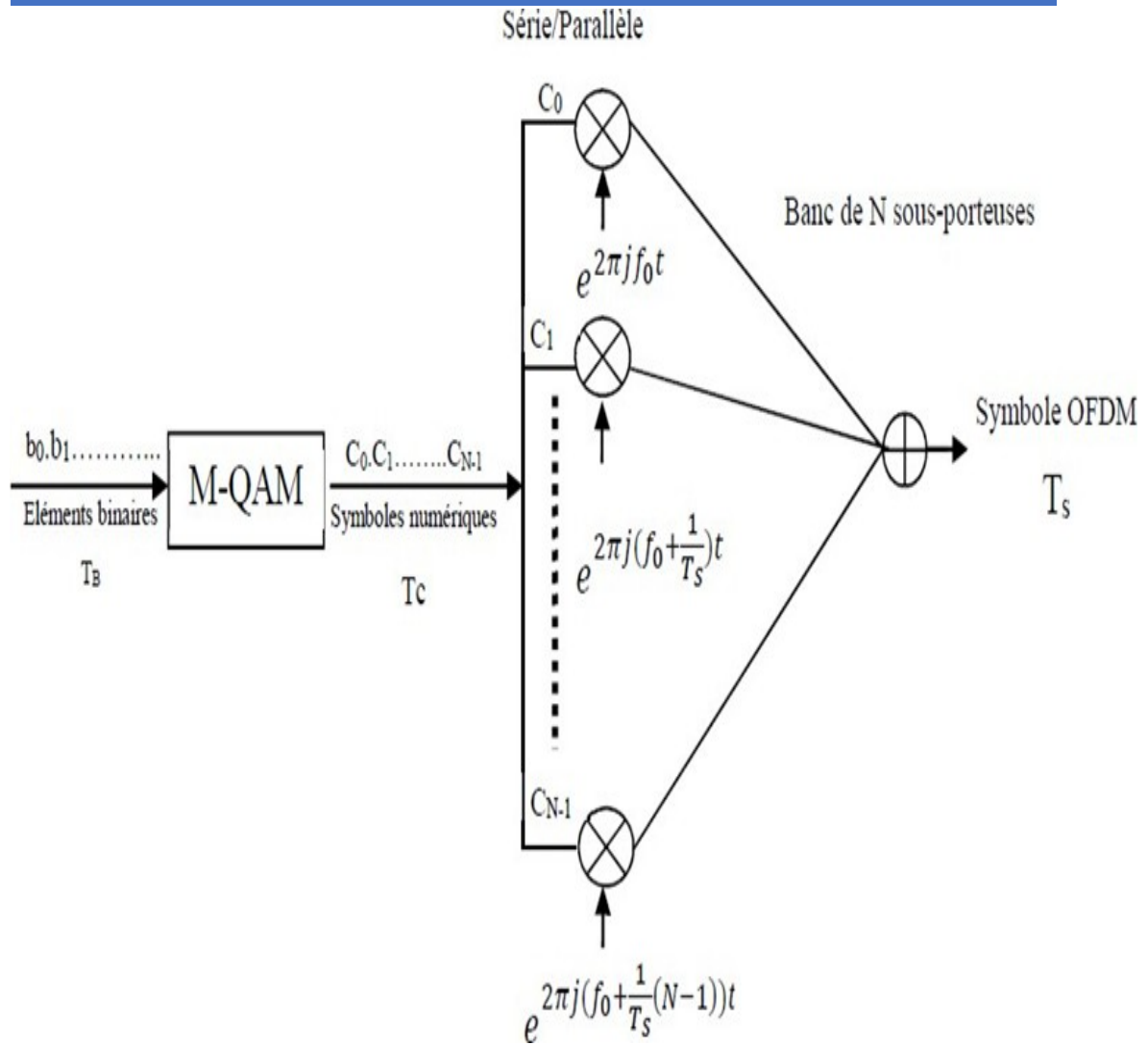


Figure 2.6: Schéma de principe du modulateur OFDM

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

$$f_k = f_0 + \frac{k}{T_s} \quad (2.03)$$

Voici le spectre à la sortie du modulateur OFDM :

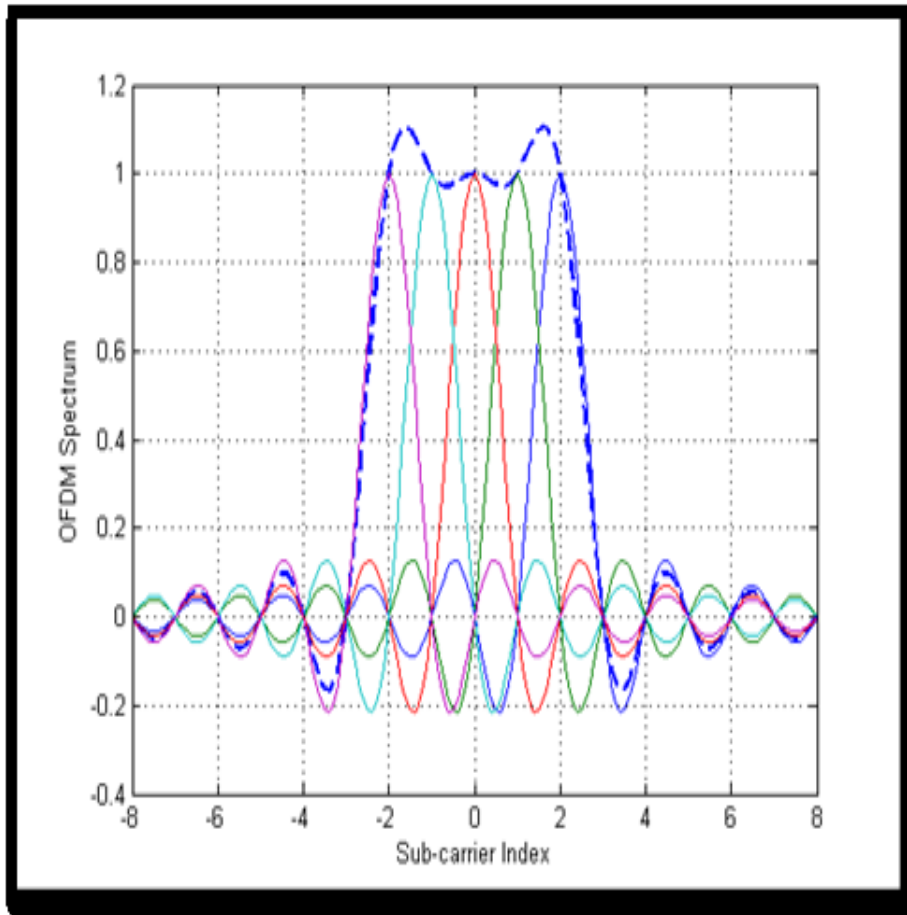


Figure 2.7 : Spectre des différentes porteuses

Ainsi, lorsque l'échantillonnage est effectué précisément à la fréquence f_k d'une sous-porteuse, il n'y a aucune interférence avec les autres sous-porteuses. C'est ce qui permet de recouvrir les spectres des différentes porteuses et d'obtenir ainsi une occupation optimale du spectre. Le nombre de sous-porteuses N est choisi de manière à remplir les deux conditions primordiales $T_s \gg T_m$ afin de pouvoir considérer le canal plat, et $T_s \ll 1/B_d$. [26]

2.7.2 Principe de démodulation

Voici le schéma du principe de démodulation OFDM

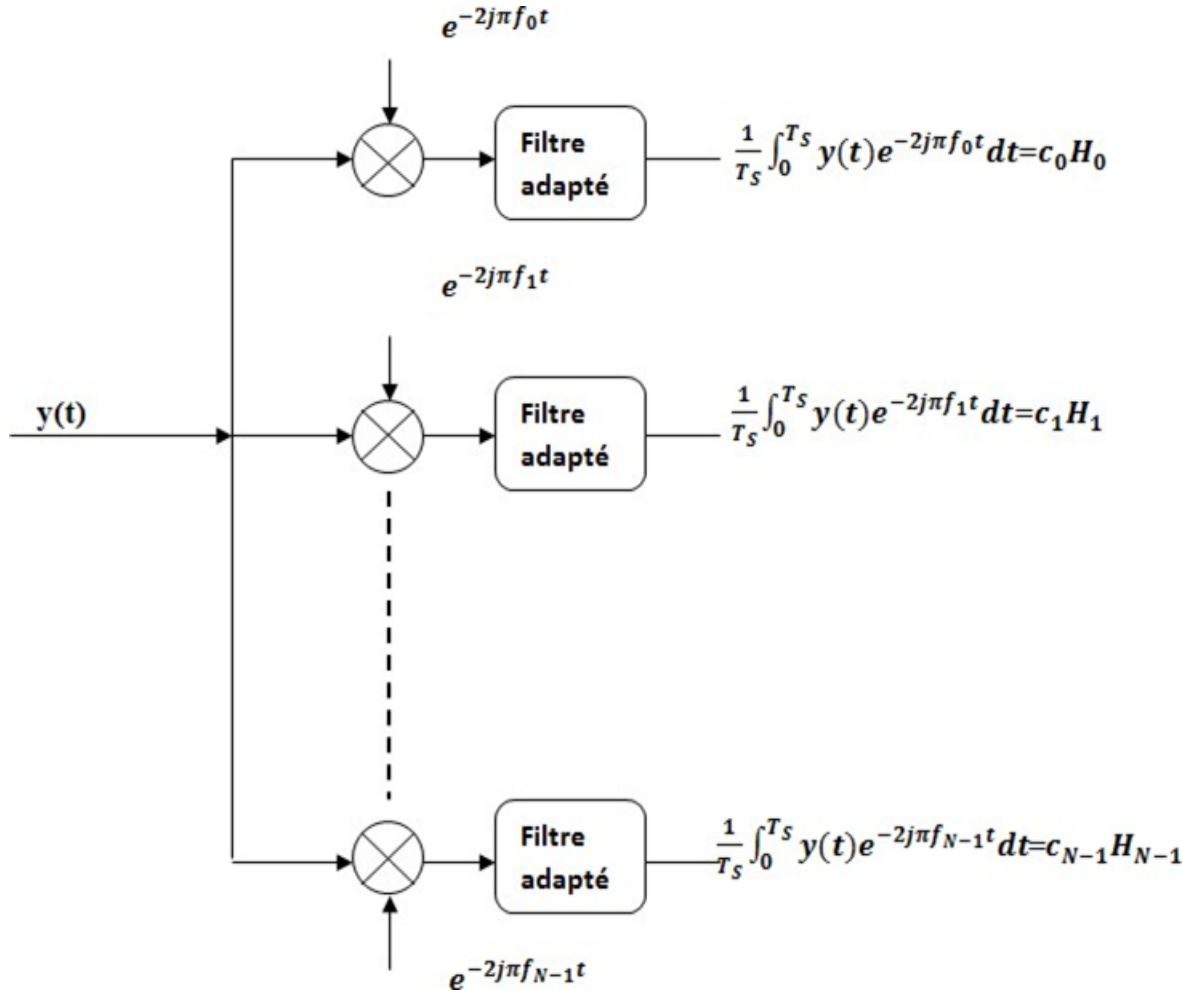


Figure 2.8 : le schéma du principe de démodulation OFDM

En réception, le signal reçu s'écrit comme suit :

$$y(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k H_k(t) e^{j2\pi\left(f_0 + \frac{k}{T_s}\right)t} \quad (204)$$

$H_k(t)$ est la fonction de transfert du canal à la fréquence f_k et au temps t . La fonction change lentement et on peut supposer qu'elle reste constante pendant la période T_s ($T_s \ll 1/B_d$). La démodulation classique comprendra la démodulation du signal le long de N sous-porteuses selon le schéma classique. [26]

2.7.3 Notion d'orthogonalité

En OFDM, les sous-porteuses sont conçues de manière à être orthogonales entre elles [27]. Ensuite, au sommet de chaque spectre de sous-porteuse, la puissance de tous les autres spectres est nulle (Figure 2.09). Et cela permet d'avoir un chevauchement entre le spectre de différentes sous-porteuses et d'éviter les interférences entre sous-porteuses, même si elles sont continuées. Sur la Figure (2.09 b), vous pouvez voir que cette bande de fréquences a été occupée de manière optimale car le spectre de fréquences de cette bande de fréquences est plat.

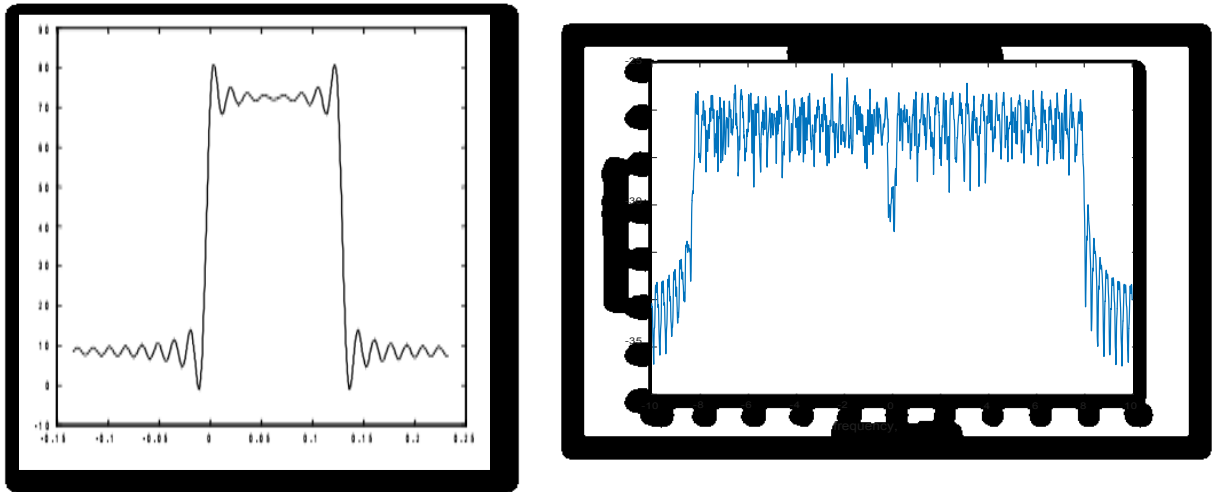


Figure 2.9 Principe d'orthogonalité des sous-porteuses

Mathématiquement : si on considère deux fonctions $f(t)$ et $g(t)$ l'orthogonalité de ces deux fonctions peut être définie sur un intervalle $[a, b]$ comme :

$$\int_a^b f(t) \cdot g(t) dt = 0 \quad (2.05)$$

c.à.d. $f(t)$ et $g(t)$ sont disjointes sur ce segment $[a, b]$, elles sont mutuellement indépendantes.

Si on applique cette condition d'orthogonalité sur deux symboles modulés P_{n_1}, P_{n_2}

Résultants de la modulation des sous porteuses n_1, n_2 . Et on considère les symboles complexes

$C_1 = C_2 = 1$ dans l'équation (2.01), on peut aboutir à la relation suivante :

$$\int_0^T P_{n_1}(t) \cdot P_{n_2}(t) dt = \int_0^T (e^{-2j\pi f_{n_1}t}) \cdot (e^{2j\pi f_{n_2}t}) dt \quad (2.06)$$

$$\int_0^T e^{-2j\pi \frac{(n_2-n_1)}{T} t} dt = \begin{cases} 1 & n_1 = n_2 \\ 0 & n_1 \neq n_2 \end{cases} \quad (2.07)$$

L'équation (2.07) montre que toutes les sous-porteuses d'une trame OFDM sont orthogonales. Cette condition est importante pour que le signal OFDM soit libre d'ICI (Inter Carrier Interférence).

Chaque sous-porteuse a une réponse en fréquence dans l'onde fondamentale du fait de la fenêtre temporelle de la fonction de grille de sa durée T.

Le lobe principal de la réponse sinusoïdale fondamentale a une grande amplitude et une durée de $1 / T$, et a plusieurs lobes secondaires. L'orthogonalité fait correspondre chaque amplitude maximale du lobe central à une sous-porteuse.

L'amplitude des autres lobes correspondant aux autres lobes La sous-porteuse est nulle. Lors de la récupération du signal, la décision correspond au sommet de chaque lobe principal. Nous évitons la perte d'efficacité spectrale en réduisant l'espace entre les sous-porteuses, ce qui réduit l'occupation des informations sur la bande du signal.

2.7.4 Interférence inter symboles et Interférence inter porteuses [28]

Les trajets multiples peuvent intervenir avantageusement dans l'amélioration de la capacité du canal et l'efficacité spectrale, ils peuvent de même avoir un effet néfaste sur le canal de transmission en provoquant des échos à la réception. Puisque lors de transmission, nombreux symboles sont transmis les uns après les autres, et ces multi-trajets causent des délais de transmission différents, alors les symboles déjà envoyés interfèrent avec les symboles présents etc'est ça ce qu'il est nommé l'interférence inter symboles (ISI). Comme il est illustré dans la figure 2.10, si on considère deux trajets, un principal et un autre retardé pour une trame

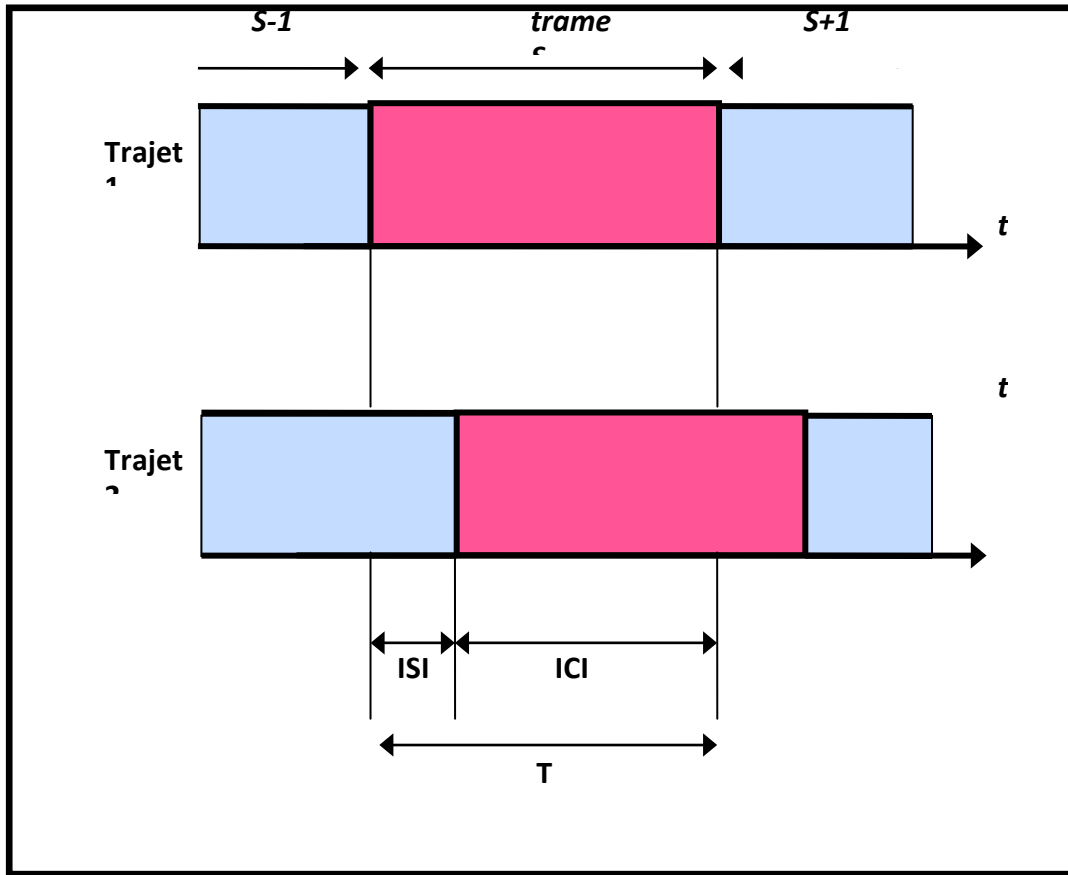


Figure 2.10 : Propagation des trames OFDM sans intervalle de garde

On observe que, le dépassement de la trame retardée S-1 de la période d'intégration T du signal issu de trajet principal est considéré comme une interférence inter-symboles (ISI), qui produit une réduction importante de la performance de transmission.

En outre, l'effet de l'écho de la trame S sur elle-même incite une interférence entre porteuses (ICI). Ces deux défauts provoquent plus ou moins une perte d'orthogonalité des sous porteuses. Et pour pallier à ce problème, il faut préserver l'orthogonalité en insérant une zone

Morte entre chaque deux symboles consécutifs transmis, cette zone est appelée intervalle de garde, afin d'assurer que les avances et les retards des trames adjacentes s'influent pas en réception.

Comme indiqué dans la suite, L'intervalle de garde peut être inséré de deux façons, la première est la Complétion à zéros (Zéro Padding) et l'autre connue comme le Préfixe cyclique [28]

2.7.4.1 Le Préfixe cyclique

Chapitre 2 : La technique MIMO-OFDM

Le préfixe cyclique consiste à prolonger le symbole OFDM en copiant ses dernières composantes dans l'avant de ce même symbole. La durée de ce préfixe ou de cet intervalle doit être supérieure au retard maximum induit par le canal de transmission. Donc, les derniers échos de ce symbole auront lieu

Pendant cet intervalle, dit de garde. Et le symbole suivant ne sera plus perturbé par le précédent.

La durée de symbole OFDM devient alors, $T_s = T + T_G$ ou T_G est l'intervalle de garde et T est la période d'intégration du symbole. Comme illustré dans la figure III.4, les trames adjacentes à S n'interfèrent pas pendant la période d'intégration T du symbole. Les ISI sont alors évitées puisque toutes les composantes arrivées dans la période T_s sont issues des mêmes trames en fonction des échos. Donc, l'intervalle de garde est un élément essentiel pour éviter les ISI et ICI, ainsi que pour préserver l'orthogonalité et améliorer la qualité de transmission.[27]

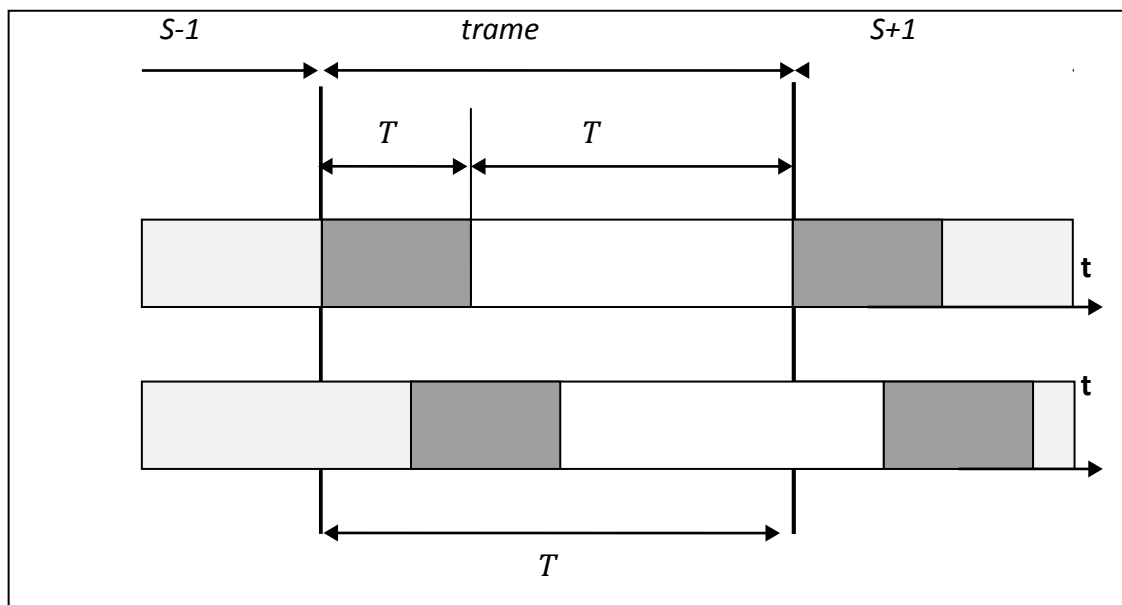


Figure 2.11 : Insertion d'un intervalle de garde en temps pour OFDM.

2.7.4.2 La Complétion à zéros (Zéro Padding) [28]

Cette méthode est utilisée pour remplir l'intervalle de garde entre deux symboles à zéro. Puisque ZP est rempli de zéros, la longueur réelle du symbole contenant ZP doit être plus courte que la longueur réelle du symbole contenant CP. En conséquence, la longueur de la fenêtre de transmission rectangulaire sera plus courte, et le spectre existant sous la forme d'une sinusoïde deviendra donc plus large. Cela signifie que la densité spectrale de puissance du symbole comprenant le ZP a la plus petite ondulation dans la bande et la plus

grande puissance hors bande par rapport au symbole comprenant le CP. Par la suite, une puissance d'émission de crête fixe permet une puissance d'émission élevée.

2.8 Implémentation numérique

L'implantation numérique des informations réduit efficacement les erreurs de transmission. De plus, elle permet d'intégrer des codes correcteurs d'erreurs pour bien protéger le signal de différentes perturbations

Une implantation simpliste de ce schéma doit être évitée en raison de la complexité matérielle qui nécessite N modulateurs et démodulateurs selon le nombre de sous-porteuses N. [28]

2.8.1 Implantation numérique du modulateur

Voici le signal à la sortie $S(t)$:

$$S(t) = \sum_{K=0}^{N-1} C_k e^{j2\pi f_k t} \quad (2.08)$$

Si on remplace f_k par sa valeur $f_k = f_0 + k \Delta f$ Avec $\Delta f = \frac{1}{T_s}$ L'équation (2.02)

$$\text{Devient alors : } S(t) = \sum_{K=0}^{N-1} C_k e^{j2\pi(f_0 + \frac{k}{NT_s})t}$$

$$\leftrightarrow e^{j2\pi f_0 t} \cdot \sum_{K=0}^{N-1} C_k e^{j2\pi \frac{k}{NT_s} t} \quad (2.09)$$

En discrétisant ce signal et en le numérisant en bande de base à l'instant $t = nT_s$. On

$$S[n] = \sum_{K=0}^{N-1} C_k e^{j2\pi \frac{kn}{N}} = \mathbf{TFDI}(C_k) \quad (2.10)$$

Ce développement analytique montre que les modulateurs OFDM à l'émission peuvent être constitués par une transformée de Fourier Discrète Inverse ($IDFT$) ou par la transformée de Fourier Rapide Inverse ($IFFT$) des C_k . Conduisant au schéma suivant :

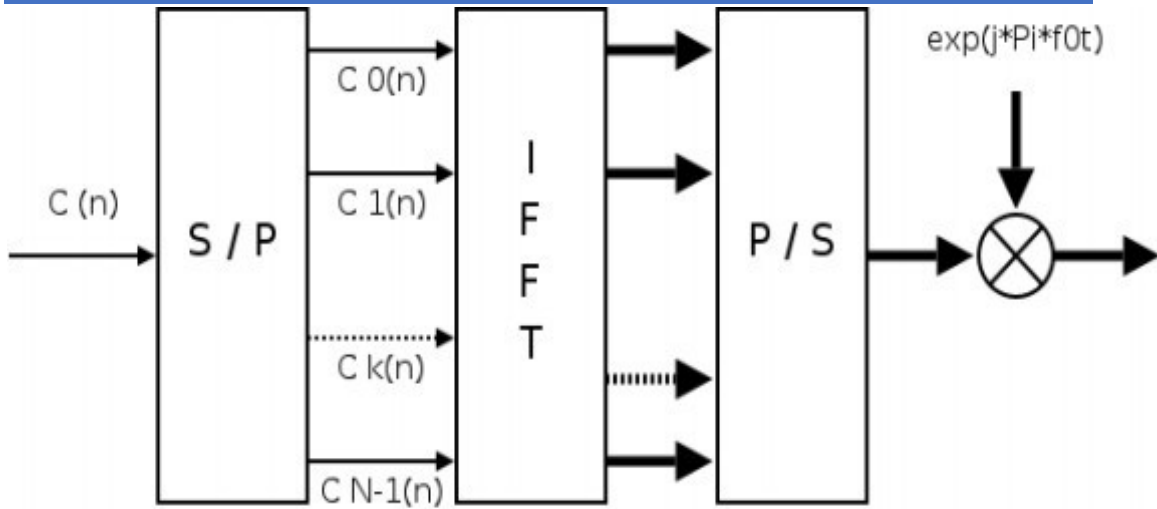


Figure 2.12 : Modulateur OFDM numérique.

2.8.2 Implantation numérique du démodulateur

En réception, le signal discrétisé reçu est sous la forme :

$$z_n = \sum_{k=0}^{N-1} C_k H_k(t) e^{j2\pi \frac{kn}{N}} \quad (2.11)$$

C'est la transformée de Fourier inverse discrète de $C_k H_k$. Par conséquent, la démodulation comprend l'exécution de la transformation de Fourier discrète (*TFD*) ou de la transformation de Fourier rapide (*FFT*). Nous obtenons le schéma suivant pour un démodulateur OFDM

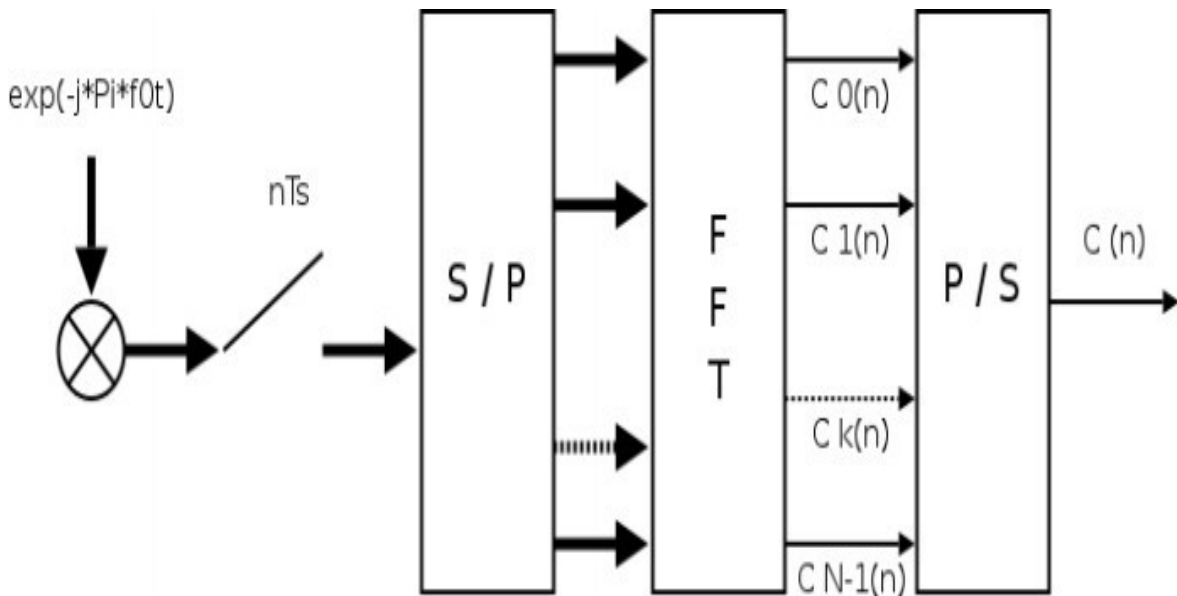


Figure 2.13: Démodulateur OFDM numérique

Le schéma suivant montre une chaîne de transmission à base d'une modulation OFDM

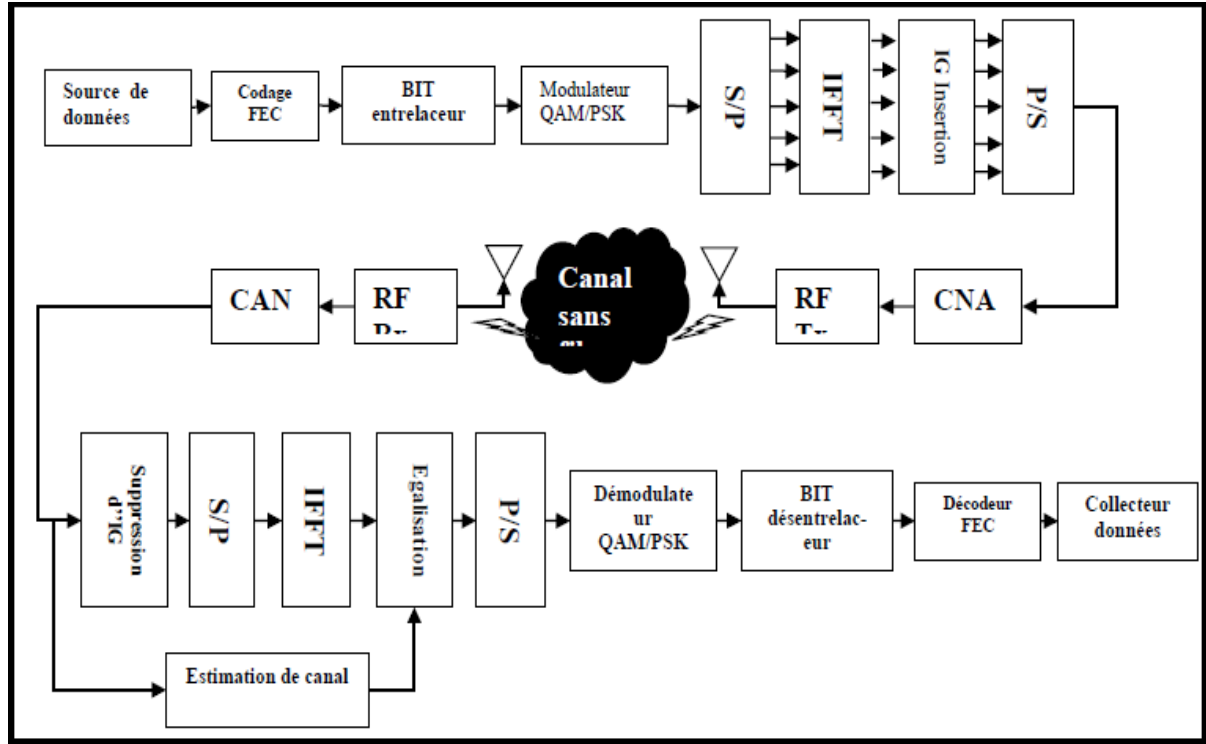


Figure 2.14 : Schéma bloc d'un système OFDM [29].

BER d'un système OFDM :

BER (en anglais Bit Error Rate) qui signifie le taux de bits erronés, qui est un facteur essentiel pour l'évaluation de la qualité des communications numérique.

Les expressions analytiques du BER d'un système OFDM pour une modulation M -QAM dans un canal AWGN et un canal de Rayleigh sont, respectivement, données par :

- **Canal AWGN :**

$$p_e = \frac{2(M-1)}{M \log_2(M)} Q \left[\sqrt{\frac{6 E_b}{N_0} \cdot \frac{\log_2(M)}{M^2-1}} \right] \quad (2.12)$$

- **Canal de Rayleigh :**

$$p_e = \frac{(M-1)}{M \log_2(M)} Q \left[\sqrt{\frac{3 \gamma \log_2(M)/(M^2-1)}{3 \gamma \log_2(M)/(M^2-1) + 1}} \right] \quad (2.13)$$

Où $\gamma = E_b/N_0$ et M est l'ordre de la modulation. Tandis que $Q(.)$ est la fonction standard définie par :

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{+\infty} e^{-t^2/2} dt \quad (2.14)$$

Notant que le SNR_t en temps diffère de celui en fréquence SNR_f , et sont liés par l'équation suivante :

$$SNR_t = SNR_f + 10 \log\left(\frac{N_{used}}{N}\right), [db] \quad (2.15)$$

Tel que N_{used} représente le nombre de sous porteuses utilisées et N représente la taille de la FFT.

2.9 Avantages et inconvénients de l'OFDM [27] :

Contrairement au système mono-porteuses, les systèmes OFDM, ou à multi-porteuse présentent plusieurs avantages faisant d'elle une technique prometteuse pour les transmissions à haut débit. L'une des grands avantages est la simplicité d'égalisation due à la diminution des taux de transmission et l'ajout de préfixe cyclique qui permet de d'éliminer les IES. En outre, le chevauchement entre les sous-porteuses permet de maintenir une grande efficacité spectrale.

Tant que l'orthogonalité est maintenue entre les sous-porteuses, l'ICI est négligeable (peut être supprimé), et cela conduit à une transmission sans distorsion. L'OFDM est aussi, très susceptible aux problèmes de décalage en fréquence (Frequency Offset), et le problème de synchronisation. En fait, ce décalage en fréquence engendre des interférences qui peuvent détruire l'orthogonalité entre les sous-porteuses. Cette technique souffre aussi, de problème de PAPR (Peak to Average Power Ratio) et le problème des émissions hors bande (OOB) qui sera traité dans ce travail de thèse.

2.10 L'association MIMO-OFDM

L'une des techniques les plus efficaces dans l'amélioration de l'efficacité spectrale est l'utilisation des antennes multiples à l'émission et à la réception (MIMO). Cette technique exploite le phénomène de multi trajets pour combattre les évanouissements. Elle offre une augmentation de capacité et une résistance accrue aux interférences. Dans une analyse des performances du système MIMO sur des canaux sélectifs en fréquence, il est montré que le gain de codage diminue considérablement, lorsque le retard de propagation devient relativement élevé. Ainsi, un traitement supplémentaire est nécessaire afin d'améliorer la

Performance du code. Dans une autre étude, On montre que tant que le décodage à maximum de vraisemblance est effectué sur le récepteur, au moins le même gain de diversité peut être obtenu sur le canal sélectif en fréquence et sur le canal non sélectif en utilisant le code spatio-temporel. C'est-à-dire que le meilleur code spatio-temporel est requis sur le canal sélectif en fréquence pour obtenir un gain de diversité très important sur le canal non sélectif en fréquence. Le décodage MT étant très compliqué, une solution doit être trouvée pour améliorer les performances du codage spatio-temporel sur les canaux sélectifs en fréquence. L'une des solutions est de réduire l'ISI. La première façon d'atténuer l'ISI est d'utiliser un égaliseur adaptatif, mais cela augmentera la complexité.

Une autre méthode consiste à utiliser la modulation OFDM. L'OFDM peut simplifier l'égalisation des canaux à large bande. Sa principale caractéristique est la sélectivité en fréquence. La méthode consiste à diviser la large bande sélective en fréquence en plusieurs sous-bandes étroites non sélectives, et à y parvenir en augmentant la durée, les symboles et en éliminant l'ISI. La combinaison de ces deux technologies bien connues combine les avantages de la capacité et de la robustesse du système MIMO avec l'égalisation simple fournie par l'OFDM. Par conséquent, les nouveaux systèmes de communication sans fil à haut débit tirent parti des avantages de ces deux technologies. En effet, en raison des performances de cette combinaison (comme 802.11n, 802.11ac, 802.11ah).

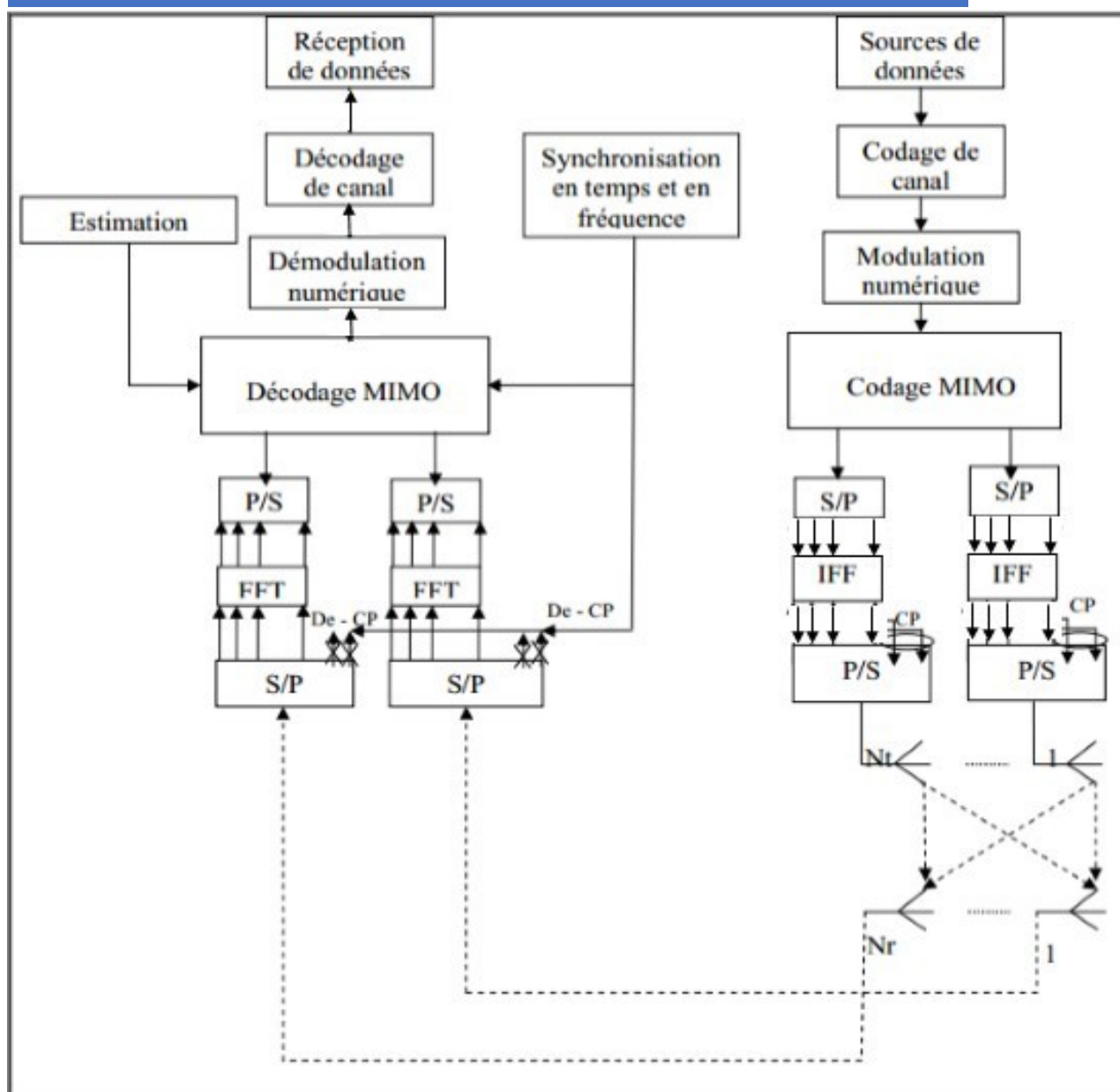


Figure 2.15: Model du système MIMO-OFDM

La combinaison des systèmes MIMO avec l'OFDM est considérée comme une sans fil et de résistance aux phénomènes de trajets multiples. En effet, cela résulte en une diversité à la fois temporelle, fréquentielle et spatiale minimisant la possibilité d'évanouissement de plusieurs canaux indépendants. Nous considérons un système MIMO utilisant la modulation OFDM, où l'émetteur et le récepteur sont munis respectivement de M et N antennes émettrices et réceptrices. La modulation OFDM a pour principe de répartir le flux binaire à haut débit sur un ensemble de P sous-porteuses transmettant chacune des débits réduits. La figure suivante décrit le schéma d'une transmission MIMO / OFDM. L'émission comprend les étages suivants :

Chapitre 2 : La technique MIMO-OFDM

- ✚ Conversion série-parallèle de taille P afin d'obtenir des blocs de P symboles.
- ✚ Transformée de Fourier inverse de taille P .
- ✚ Insertion d'un intervalle de garde de taille D en début de bloc où la fin du bloc est recopiée.

L'insertion de l'intervalle de garde a deux objectifs. Le premier est d'absorber l'IES apportée par le canal de propagation et de rendre le canal non sélectif en fréquence pour chaque sous porteuse. Pour cette raison, la taille de l'intervalle de garde doit être choisie plus grande que l'étalement maximal des retards. Le deuxième objectif est de rendre cyclique la convolution entre le signal OFDM et le canal. Pour cela, la fin du signal est recopiée dans l'intervalle de garde : le signal OFDM devient ainsi cyclique d'où le nom du préfixe cyclique. Dans le schéma OFDM, c'est l'ajout de cette extension cyclique à chaque bloc qui permet de prendre en compte le caractère sélectif du canal.

En réception, les opérations duales suivantes sont effectuées :

- ✚ Conversion parallèle série.
- ✚ Conversion série parallèle de taille P afin d'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.

2.10.1 Présentation détaillée du system MIMO-OFDM

La chaîne de transmission du système MIMO-OFDM sera décrite en détail. Notre système est composé d'antennes d'émission N_r et d'antennes de réception N_t . C'est l'une des techniques les plus efficaces pour améliorer l'efficacité spectrale (capacité ou débit binaire) des communications radio. Il utilise plusieurs antennes pour l'émission et la réception. Nous considérons ici un système MIMO utilisant la modulation OFDM. Les antennes sont disposées de la manière la plus courante, appelée Uniform Linear Array (ULA) en anglais, c'est-à-dire qu'elles sont alignées à une distance relative $\Delta = \lambda/2$ et régulièrement espacées entre deux antennes adjacentes, où λ est la longueur d'onde. Nous commencerons par définir les principaux composants du système MIMO-OFDM. Comme tout système de télécommunications, il se compose d'émetteurs, de canaux et de récepteurs, eux-mêmes constitués de plusieurs éléments.

2.10.1.1 Transmetteur MIMO-OFDM

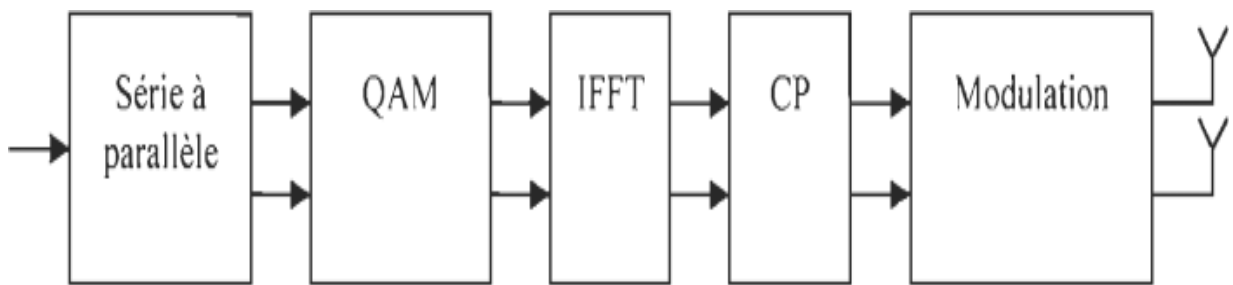


Figure 2.16: Transmetteur MIMO-OFDM

Dans ce transmetteur MIMO-OFDM, la première étape c'est de faire passer la chaîne de données d'entrée, qui est à l'origine en série, en parallèle, afin de les répartir sur autant de séries qu'il y aura d'antennes de transmission.

Les données ainsi mises en parallèle seront ensuite encodées selon une constellation QAM. En effet, nous avons à l'entrée de bloc QAM des valeurs de $[0, \dots, N_{QAM} - 1]$ où N_{QAM} est le nombre de symboles possibles dans la constellation que nous avons choisie.

Nous appliquons ensuite l'IFFT sur ces valeurs, donnant pour sortie des valeurs complexes. Un préfixe cyclique (cyclic préfix ; CP) est apposé au début de chaque groupe de données OFDM, contenant une copie des dernières données. C'est à ce point que le signal est réparti sur les antennes de transmission et pour être envoyé

2.10.1.2 Récepteur MIMO-OFDM

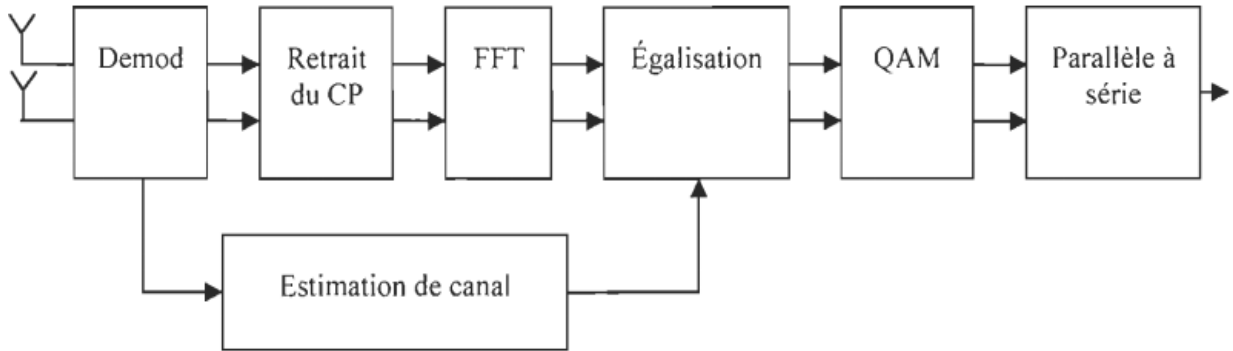


Figure 2.17: Récepteur MIMO-OFDM

D'abord, pour retrouver les données numériques, Le signal reçu est d'abord démodulé, ensuite, après avoir retiré le préfixe cyclique, la FFT est appliquée pour retourner dans le domaine fréquentiel. C'est ensuite que l'égalisation a lieu. Par contre, pour la plupart des techniques, il est nécessaire de connaître le canal pour pouvoir procéder à la détection.

2.10.2 Capacité MIMO-OFDM [26]

Les systèmes de transmission de type MIMO permettent d'atteindre des capacités très importantes grâce à l'exploitation de la diversité spatiale du canal. Mais la transmission est limitée par la durée symbole qui doit être grande devant la durée de la réponse impulsionnelle du canal, ce qui limite le débit dans le cas d'un canal avec de longs échos. L'utilisation d'une modulation OFDM classique dans un système MIMO permet de s'affranchir de cette contrainte simplement en assurant un temps de garde supérieur au dernier écho du canal. Nous supposons que l'émetteur (avec M antennes) et le récepteur (avec N antennes) sont parfaitement synchronisés et que l'instant de décision est optimal. De même le canal est supposé avoir été estimé par le récepteur et la puissance totale émise est équirépartie entre les M émetteurs. Nous montrons que le système MIMO/OFDM équivalent en bande de base peut être vu comme P branches parallèles et indépendantes d'un système MIMO mono porteuse. Le principe d'un système MIMO-OFDM est présenté à la figure 2.14. Les données à émettre sont démultiplexées en M voies indépendantes, pour être émises sur chaque antenne via un modulateur OFDM. En réception, le signal de chaque sous porteuse est séparé, antenne par antenne, à l'aide de N démodulateurs OFDM. Pour chaque sous porteuse, le signal des différentes antennes est Démodulé avec un récepteur MIMO classique. Au final les données des P récepteurs MIMO sont multiplexées

dans l'ordre initial. Le canal MIMO large bande est modélisé par P matrices H_p ($N \times M$), chaque matrice correspondant à la

Réponse du canal pour la fréquence du p sous porteuse. Si S_p est le vecteur symbole émis par la sous porteuse, alors le vecteur reçu correspondant par la suite de l'application des codes espace-temps sur chaque sous canal. [26] Le modèle du signal pour la p sous porteuse s'écrit de la façon suivante

$$r_p = H_p S_p + n_p \quad (2.16)$$

La capacité théorique représente la capacité du canal, calculée :

$$C = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P c_p \quad (2.17)$$

C_p représentant la capacité du canal pour la sous porteuse p . Elle est obtenue de la façon suivante :

$$C_p = \xi \log_2(1 + \rho_p) \quad (2.18)$$

Où ρ_p le RSB de la sous-porteuse p et $\xi = T_U / (T_U + \Delta)$ qui tient compte de la perte d'efficacité spectrale dans le temps de garde.

La capacité C_p étendue au canal MIMO-OFDM est donnée par :

$$C_p = \xi \log_2(\det [I_{N+p} H_p H_p^*]) \quad (2.19)$$

D'un point de vue théorie de l'information, la capacité d'un système MIMO-OFDM est égale à la capacité du canal MIMO sélectif en fréquence (en faisant abstraction de la perte en efficacité spectrale due à l'insertion de l'intervalle de garde). L'intérêt de L'association MIMO- OFDM réside dans le fait que cette modulation élimine le phénomène de l'IES donc à la réception le signal sera optimisé et nous aurons une bonne qualité de signal, pour cela nous allons voir cette amélioration dans la partie de simulation en mesurant le taux d'erreur bit (TEB).

2.10.3 Intérêt de la combinaison

En télécommunication, le but c'est d'avoir en même temps un débit maximal et un taux d'erreur minimal, mais dans la pratique ces deux critères de performances sont

Contradictoires, alors il faut toujours faire du compromis, mais le fait de combiner la

technique MIMO à la modulation OFDM peut nous satisfaire pour atteindre une meilleure performance en termes de débit et en termes de taux d'erreur binaire.

2.10.4 Les normes qui utilisent la MIMO-OFDM

- WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access)
- Génération 5G

2.11 Conclusion

Les systèmes multi-antennaires deviennent indispensables dans les systèmes de nouvelle technologie. Dans ce chapitre, nous avons décrit en premier lieu la technologie OFDM, suivi de la technologie MIMO afin de combiner ces deux technologies nommée technologie MIMO-OFDM. Nous avons vu que l'intérêt d'utiliser l'OFDM est de transformer un canal MIMO à évanouissement en un ensemble de canaux à bande étroite, caractérisés par une simple atténuation d'où l'utilisation optimale du spectre de fréquences consiste à répartir l'information à transmettre sur un grand nombre de sous porteuses orthogonales. Dans le chapitre 3 nous allons simuler la performance de la technologie MIMO-OFDM.

Chapitre 3 : Simulations et Résultats

3 Simulations et Résultats

3.1 Introduction :

Dans les chapitres précédents, nous avons présenté les bases théoriques du canal radio, du système OFDM et du système MIMO, ensuite, nous avons combiné les deux systèmes afin d'exploiter leurs avantages.

Dans ce chapitre, nous évaluons les performances des différents systèmes à savoir, le système SISO-OFDM et MIMO-OFDM dans le but de constater le système le plus performant. Pour atteindre cet objectif, nous utilisons le logiciel SIMULINK de MATLAB® R2018a.

Nous avons considéré deux types de canaux de communication en cascade, un canal AWGN et un canal de Rayleigh. Pour la simulation des systèmes SISO-OFDM et MIMO-OFDM, nous avons exploité et modifié le modèle de simulation à la figure 3.1 et 3.3 qui représentent la couche physique de la transmission SISO-OFDM combinée avec un système MIMO-OFDM (STBC).

3.2 Présentation de Matlab

Matlab (MAtrix LABoratory) est un logiciel interactif, développé par Math Works Inc., spécifiquement pour le traitement des données numériques. Il dispose fonctions graphiques puissantes, par exemple la visualisation d'objets mathématiques complexes. Matlab intègre les calculs numériques, la visualisation des résultats et la programmation dans un environnement qui peut être développé davantage. Matlab intègre des outils mathématiques classiques, tels que : Calculs matriciels, opérations de fonctions, graphiques. Simulink est un logiciel intégré à MATLAB qui fournit un contexte graphique interactif pour la modélisation, la simulation et l'analyse du système. Il comprend une riche bibliothèque de blocs prédéfinis pour les opérations permettant de réaliser le modèle graphique du système.

3.3 Simulation et performance d'un Système SISO-OFDM

Nous avons implémenté le système de transmission SISO-OFDM sous Simulink. Le système se compose de deux parties de base, à savoir la partie émission (modulation SISO-OFDM) et la partie réception (démodulation SISO-OFDM), comme c'est illustré à la Figure (3.1).

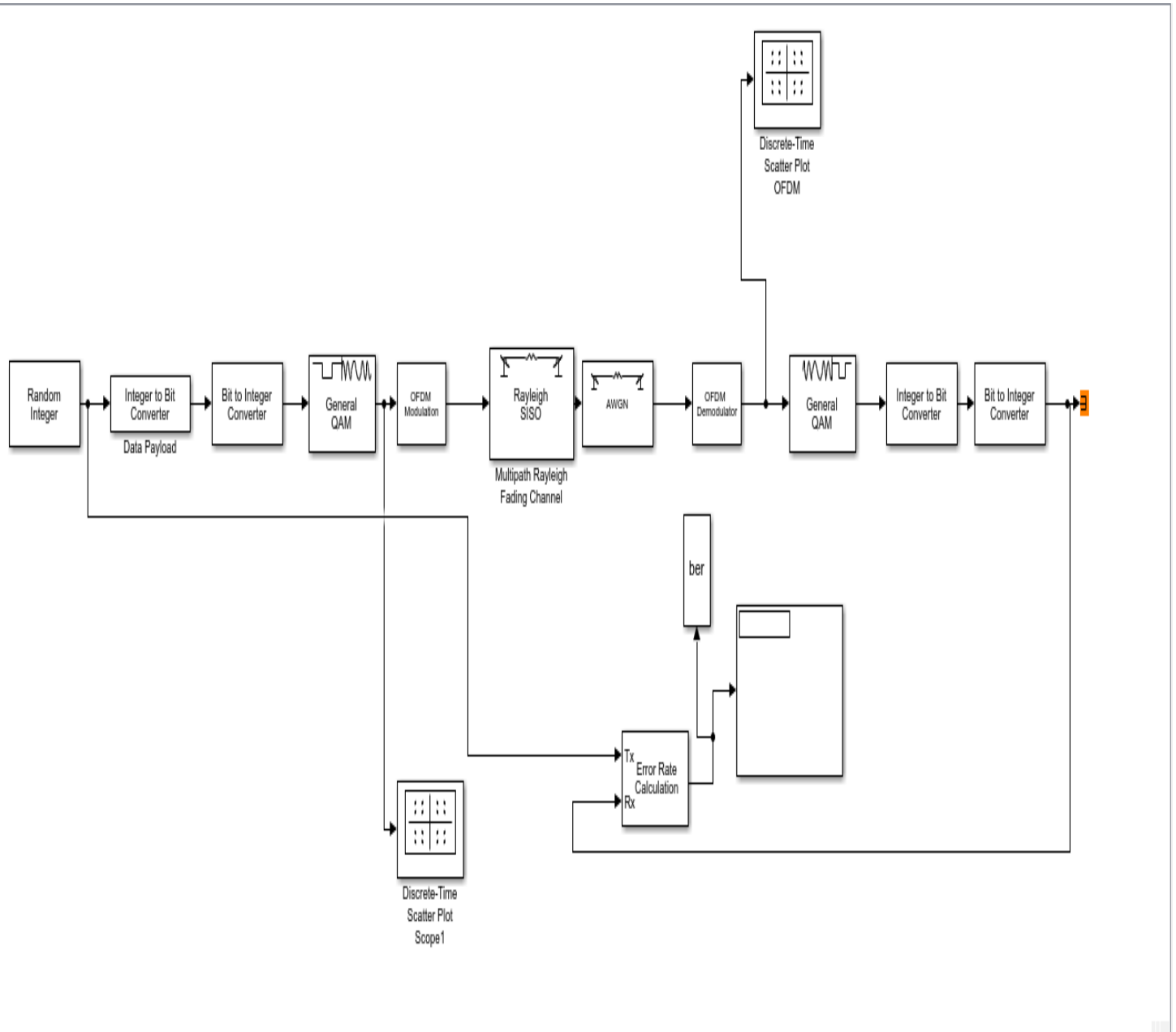


Figure 3.1 : Chaine de transmission SISO-OFDM en Simulink

3.3.1 Description des différents blocs en émission

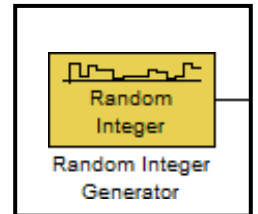
Dans la partie transmission, nous générons des éléments binaires aléatoires, puis les distribuons sur différentes sous-porteuses, puis utilisons des modulateurs pour la modulation, donc l'information a une constellation très spécifique. A chaque entrée, une transformée de Fourier rapide inverse (IFFT) est appliquée pour moduler la sous-porteuse, puis une conversion parallèle/série est effectuée. Ensuite, nous ajoutons l'intervalle de garde en

tant que préfixe cyclique, et l'assemblage sera prêt pour la transmission. La mise en œuvre de l'émetteur OFDM dans SIMULINK comprend les blocs suivants, et nous avons une description claire de chaque bloc.

✓ Random Integer Generator :

Le premier bloc du système OFDM est le générateur de bits aléatoires, Ce bloc génère des nombres aléatoires d'entiers en série dans l'intervalle $[0, M-1]$. Avec les paramètres suivants :

- 4 états d'entiers pour la modulation QPSK ,16 pour la modulation 16-QAM.
- 192 entiers par trame.

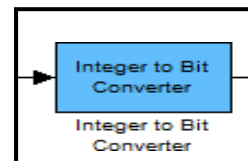


✓ Integer to bit converter :

Convertir des entiers en bits numériques. Ce module dessine chaque valeur entière sous la forme d'un ensemble de M bits, et la longueur résultante du vecteur de sortie est M fois la longueur du vecteur d'entrée. Dans notre exemple, nous choisirons 4 bits car l'entrée est constituée de 16 états possibles.

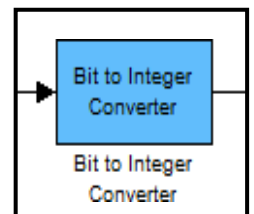
✓ Convertit le nombre entier à des bits numériques.

Le bloc trace chaque valeur de nombre entier à un groupe de M bits, la longueur du vecteur de sortie résultant est M fois la longueur du vecteur d'entrée. Dans notre cas on va choisir 4 bits car l'entrée est composée de 16 états possibles.



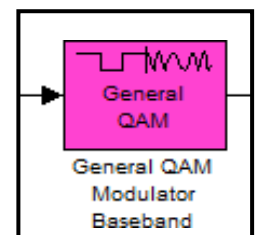
✓ Bit to Integer Converter :

Pour la conversion bit à entier, les mêmes paramètres doivent être modifiés, c'est-à-dire que le nombre de bits de chaque entier est égal à 4 bits. Notez que l'avantage d'utiliser des blocs entiers à bit et bit à entier est que les bits sont extraits de la source pour les comparer avec les bits du récepteur afin que nous puissions calculer le taux d'erreur binaire



✓ Modulation 16-QAM :

Utilisez le diagramme de constellation sur la matrice de points rectangulaire pour utiliser la modulation d'amplitude en quadrature multi-aire. La sortie est une représentation en bande de base du signal modulé. Ce module accepte les signaux d'entrée vectoriels scalaires ou colonnes



Toutes les sous-porteuses disponibles dans la bande de fréquences ne sont pas attribuées aux données utilisateur. Certaines sous-porteuses sont utilisées pour d'autres raisons, telles que :

Les sous-porteuses disponibles dans une bande ne sont pas toutes attribuées aux données des utilisateurs, il existe quelques-unes utilisées pour d'autres raisons telles que :

Sous-porteuse DC : Porteuse centrale, marquant le centre de la bande de fréquence OFDM.

- ✚ Pilot Sub-Carriers : utilisé pour transmettre la séquence PILOT, très utile pour estimer le canal de propagation. La fonction des blocs suivants est d'intégrer ces différentes sous-porteuses :
- ✚ Nous intégrerons un sous-porteur DC et 10 sous-porteurs pilotes au milieu du cadre.
- ✚ Select Rows : En disposant chaque groupe en sortie, les 192 symboles reçus en entrée sont réduits de 10.
- ✚ Entre 10 sets, nous intégrerons nos sous-porteuses pilotes et les porteuses intermédiaires seront centrées. Le nombre d'échantillons requis pour la FFT est égal à une puissance de 2.
- ✚ La technique du zéro-remplissage, permet le zéro-remplissage de 201 à 256.

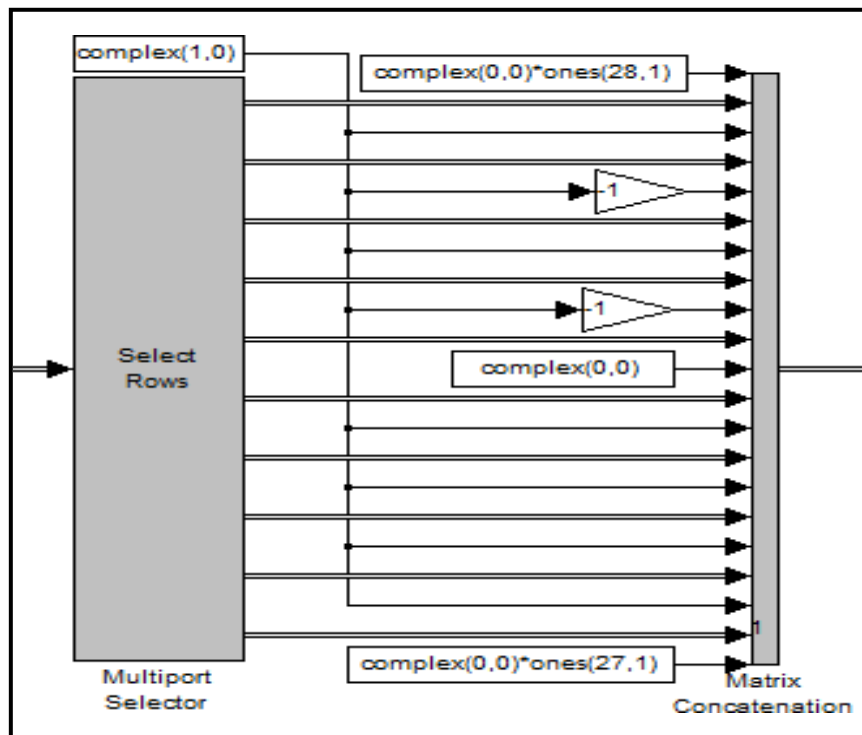


Figure 3.2: Insertion des pilotes et DC nulles.

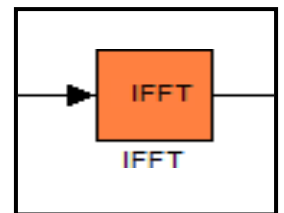
Le module Sélecteur multiport extrait plusieurs sous-ensembles de $M \times N$ lignes ou colonnes de la matrice d'entrée u et propage chaque nouvelle sous-matrice vers un port de sortie distinct. Ce bloc traite une entrée

vectorielle de longueur M non dirigée comme une matrice $M \times 1$. Divisez les 192 symboles reçus à son entrée par 10 et placez chaque groupe dans une sortie. Parmi les 10 ensembles, nous intégrerons nos sous-porteuses pilotes et la porteuse centrale au milieu, qui sont rassemblées par le bloc Matrix Concaténation.

✓ IFFT :

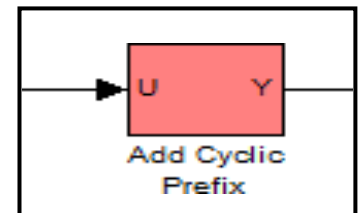
L'IFFT est une méthode de conversion des données du domaine fréquentiel vers le domaine temporel et fournit une méthode simple de modulation des données sur N sous-porteuses orthogonales.

La sortie IFFT est essentiellement la somme de toutes les ondes sinusoïdales orthogonales N qui lui sont entrées, donc IFFT est le bloc le plus important de la chaîne de modulation OFDM, et la taille de l'IFFT sélectionnée est de 256.



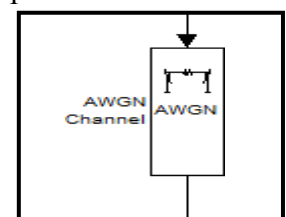
✓ Add Cyclic Prefix:

Le préfixe cyclique utilisé dans OFDM est utilisé comme bande de garde entre chaque symbole OFDM pour éliminer les interférences entre symboles. Le processus d'ajout d'un préfixe cyclique est inclus dans un Symboles avec des terminaisons répétées. A ce niveau, on a généré un signal OFDM, l'étape suivante est l'envoi d'un signal dans un canal.



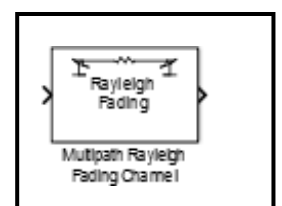
✓ Canal AWGN :

Le bloc AWGN Channel modélise le bruit blanc gaussien. Ce bloc nous permet de choisir le paramètre rapport signal sur bruit (SNR) et la puissance du signal d'entrée. La valeur du SNR peut être modifiée pour déterminer la limite pour laquelle on commence à avoir un taux d'erreur élevé.



✓ Canal de Rayleigh SISO :

Module modélise le canal de propagation de l'évanouissement de Rayleigh. Le module accepte uniquement des signaux complexes basés sur des trames à son entrée. Ce bloc affecte le signal d'entrée via l'effet de fréquence Doppler et l'effet multi-trajets, de sorte que la constellation d'entrée est fortement déformée, il est



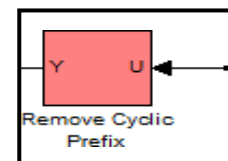
donc difficile d'égaliser.

3.3.2 Description des différents blocs en réception

Le récepteur OFDM comprend des blocs qui sont appariés avec ceux qui apparaissent dans la transmission. Les informations reçues sont aussi proches que les informations envoyées, indiquant que le système de transmission est faible et efficace. La mise en œuvre du récepteur OFDM sous SIMULINK comporte les blocs suivants, et nous décrivons clairement chaque bloc.

✓ Remove Cyclic Prefix:

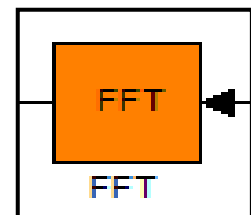
La sortie finale de la modulation est un vecteur de 320 éléments, car nous avons ajouté un préfixe cyclique de 64 éléments (256-193), alors il faut extraire les 64 premiers lors de la réception, ce qui se fera à l'aide du bloc suivant :



✓ FFT :

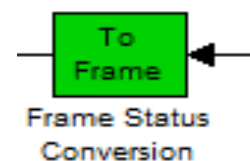
Au niveau du récepteur, un bloc FFT est utilisé pour traiter le signal reçu et l'amener dans le domaine fréquentiel. Idéalement, la sortie de la FFT sera symboles d'origine qui ont été envoyés à l'IFFT à l'émetteur.

A la sortie du préfixe cyclique la taille du vecteur est 256, qui sera directement traitée par le bloc FFT.



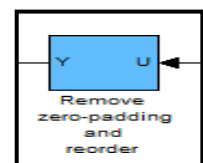
✓ Frame conversion :

On utilise ce bloc pour regrouper les données en trame de 256 éléments.



✓ Remove zero-padding:

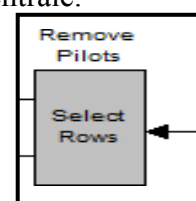
Pour éliminer les zéros de bourrage qui ont été introduits dans la transmission OFDM à cause de l'FFT on a utilisé les paramètres suivants :



✓ Select Rows :

Sans les zéros de bourrage nous avons 200 éléments, alors pour avoir la même trame de la source on doit enlever les symboles provenant des sous-porteuses pilotes et la sous porteuse centrale.

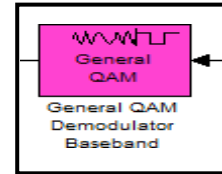
Pour cela, il faut tout d'abord détecter l'emplacement exact de chaque sous porteuse à enlever et cela en raisonnant sur le découpage qu'on a fait au niveau de



la modulation.

✓ QAM démodulateur

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



✓ Blocs de constellation et taux d'erreur :

L'outil Simulink permet de tester les performances des systèmes en examinant les diagrammes de constellations et en calculant le taux d'erreur binaire. Le bloc (Error Rate calculation) compare les bits émis et les bits reçus après démodulation. Le bloc (constellation diagram) permet de tracer les constellations des symboles en émission et en réception.

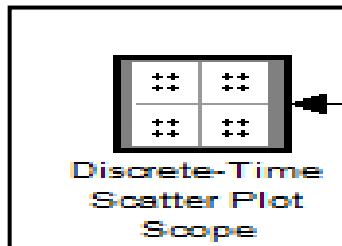
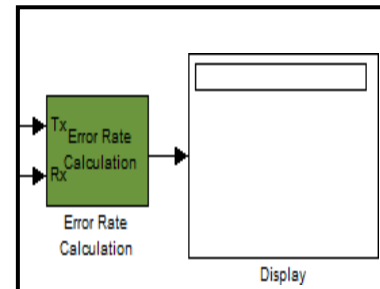


Diagramme de constellation.



Calcul du taux d'erreur

3.4 Paramètres de la simulation SISO-OFDM

Modulation	16-QAM
Technique de modulation	OFDM
Nombre de sous porteuses OFDM	64
Nombre de symboles OFDM dans la simulation	1
Durée du préfixe cyclique	1/8
Type de canal	AWGN

Tableau 3.1 : Paramètres de la simulation SISO-OFDM

3.4.1 Les performances du système SISO-OFDM

Le taux d'erreur est calculé pour une variété de valeurs du support SNR pour les modulations QAM. Les valeurs du BER sont regroupées au Tableau 3.1 :

SNR (dB)	BER
0	0.9558
2	0.9462
4	0.8371
6	0.7271
8	0.6271
10	0.6315
12	0.4375
14	0.3371
16	0.0375
18	0.0027
19	0.00023
20	0.00075

Tableau 3.2 Taux d'erreur (BER), système SISO-OFDM 16QAM

3.5 Les performances du système MIMO-OFDM

Le modèle MIMO-OFDM est présenté par la figure 3.4. Le système compte deux blocs additionnels par rapport au modèle SISO-OFDM, à

Conclusion Générale

savoir, le codeur spatio-temporel et le combineur de diversité spatio-temporel.

On remarque deux voies matérialisant la diversité spatiale donc deux blocs OFDM et un canal de Rayleigh MIMO présentant deux entrées et deux sorties.

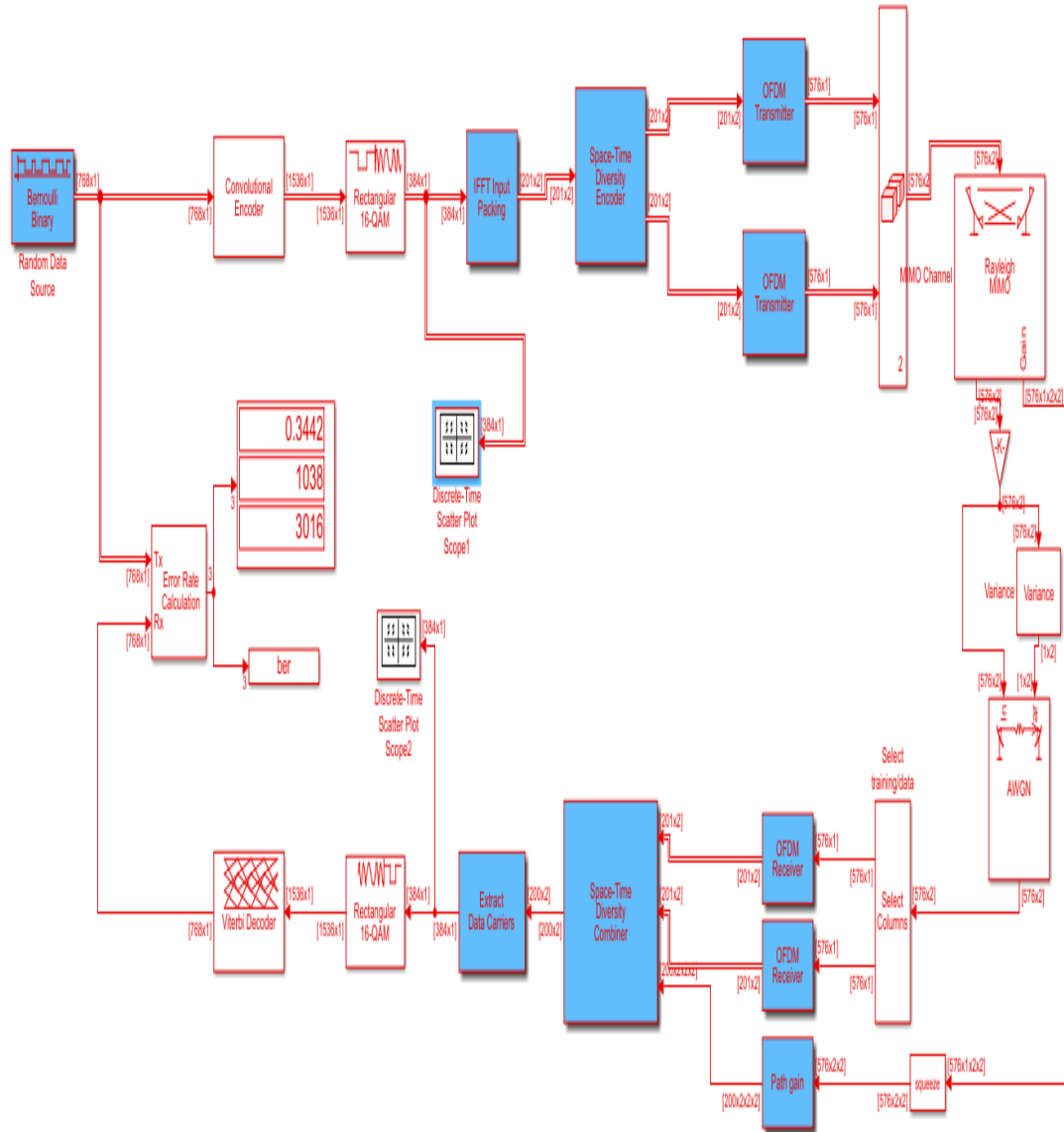


Figure 3.3 : Modèle Simulink du système MIMO-OFDM

3.5.1 Description des différents blocs en émission

On décrit les blocs d'un système MIMO-OFDM à l'émetteur qui ne sont pas décrit précédemment pour le système SISO-OFDM

Conclusion Générale

✓ Codeur spatio-temporel :

Ce bloc reçoit les données du bloc IFFT Input Packing, pour lesquelles il effectue un codage spatio-temporel en bloc STBC (technique d'Alamouti). Chacune des deux sorties du bloc alimente un émetteur OFDM.

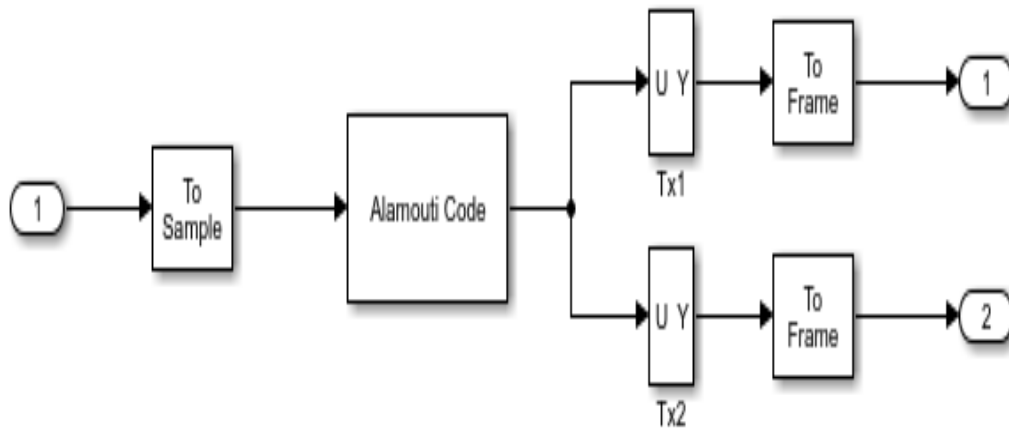
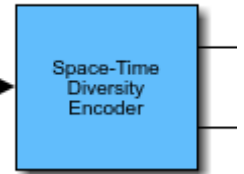
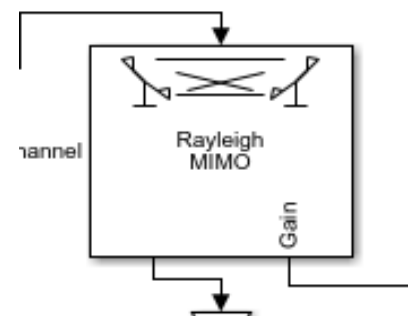


Figure 3.4 : Codeur spatio-temporel

✓ Canal MIMO 2x2 à fading de Rayleigh :

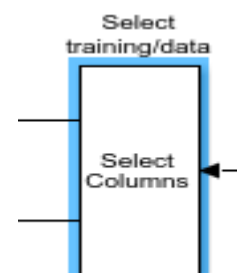
Le bloc présente une simulation d'un canal MIMO (2x2) à fading de Rayleigh corrélé avec des coefficients égaux à 0.5 entre les deux antennes à l'émission et entre les deux antennes à la réception.



3.5.2 Description des différents blocs en réception

✓ Sélecteur des colonnes

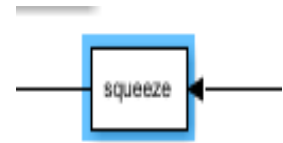
Sortez les lignes ou les colonnes spécifiées vers un ou plusieurs ports de sortie. Le nombre de ports de sortie est déterminé par le nombre de vecteurs d'index, chacun étant spécifié comme une entrée de vecteur distincte dans un tableau de cellules. Les indices sont basés sur 1 et n'ont pas besoin d'être uniques.



Conclusion Générale

✓ Squeeze

Supprimer les dimensions singleton du signal d'entrée multidimensionnel. Une dimension singleton est une dimension dont la taille est 1. Par exemple, un signal $2 \times 1 \times 3$ devient un signal 2×3 . Les signaux 1-D et 2-D passent sans changement.



✓ Combineur spatio-temporel :

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 des symboles qui sont codés à l'aide d'un OSTBC. L'estimation du canal d'entrée peut ne pas être constante au cours de chaque transmission de bloc de mots codés et le signal de combinaison n'indique que l'estimation de la première période de symbole par bloc de mots codés.

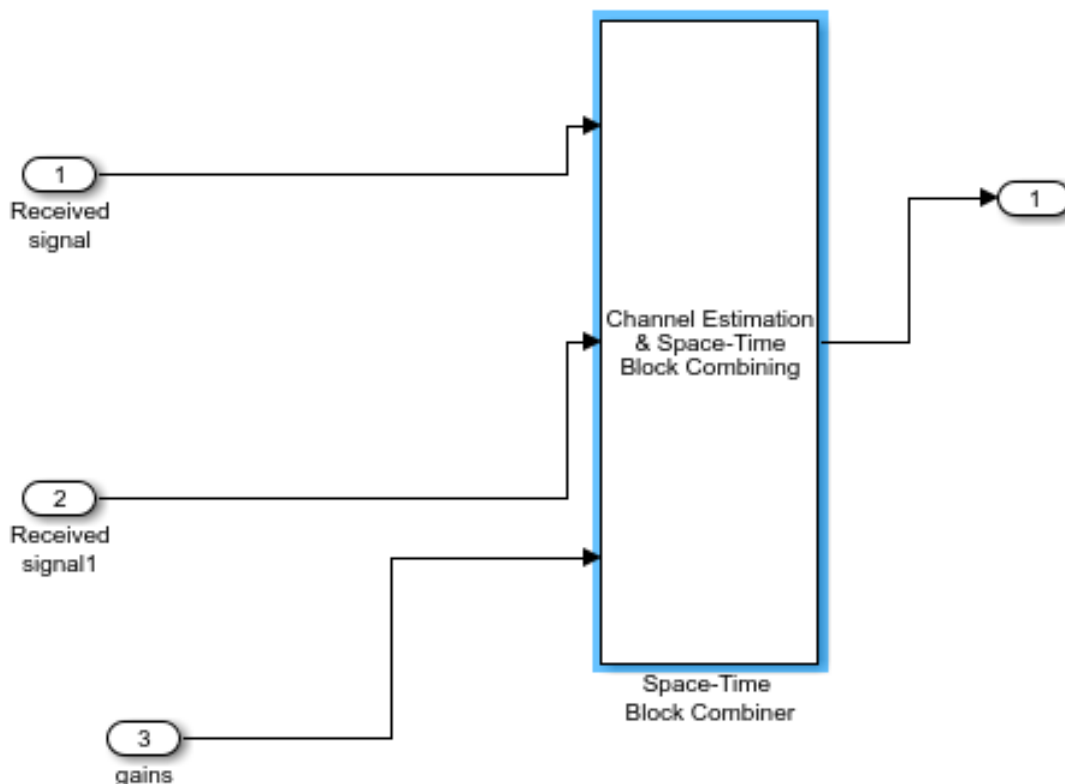
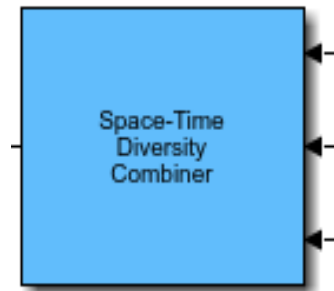


Figure 3.5 : : Combineur spatio-temporel

3.5.3 Paramètres d'un Système MIMO-OFDM

Nombre d'antenne d'émission	2
Nombre d'antenne de réception	2
Modulation	16-QAM, 64-QAM
Technique de modulation	OFDM
Nombre de sous porteuses OFDM	64
Nombre de symboles OFDM dans la Simulation	1
Type de canal	Rayleigh

Tableau 3.3: Paramètres du système MIMO-OFDM

3.5.4 Les performances du système MIMO-OFDM

Le taux d'erreur par bit (BER) pour le système MIMO-OFDM st calculé pour une variété de valeurs du support SNR pour les modulations 16 QAM (Tableau 3.4) :

SNR (dB)	BER
0	0.3400
1	0.3300
3	0.3000
5	0.2600
7	0.2100
9	0.1500
11	0.1000
13	0.0500
15	0.0200
16	0.0100
17	0.0050
19	0.0005
20	0.0001

Tableau 3.4 Taux d'erreur (BER), système MIMO-OFDM 16 QAM

Conclusion Générale

Le taux d'erreur par bit (BER) pour le système MIMO-OFDM st calculé pour une variété de valeurs du support SNR pour les modulations 64 QAM (Tableau 3.5) :

SNR(dB)	BER
0	0.4000
1	0.3900
3	0.3600
5	0.3200
7	0.3000
9	0.2500
11	0.1900
13	0.1400
15	0.1000
17	0.0600
19	0.0300
21	0.0100
23	0.0020
25	0.0002

Tableau 3.5 Taux d'erreur (BER), système MIMO-OFDM 64 QAM

Le taux d'erreur augmente legerement pour la modulation 64 QAM en comparaison avec celui de la modulation 16 QAM etant donné l'augmentation du nombre d'état de la modulation 64 QAM et parconsequents l'augmentation des interferences entre les symboles.

Les courbes du BER sont tracées sur la figure 3.7 Nous pouvons lire sur ces courbes que le système MIMO-OFDM pour la modulation 16 QAM engendre le BER le plus minimal en comparaison avec le système MIMO-OFDM pour la modulation 64 QAM.

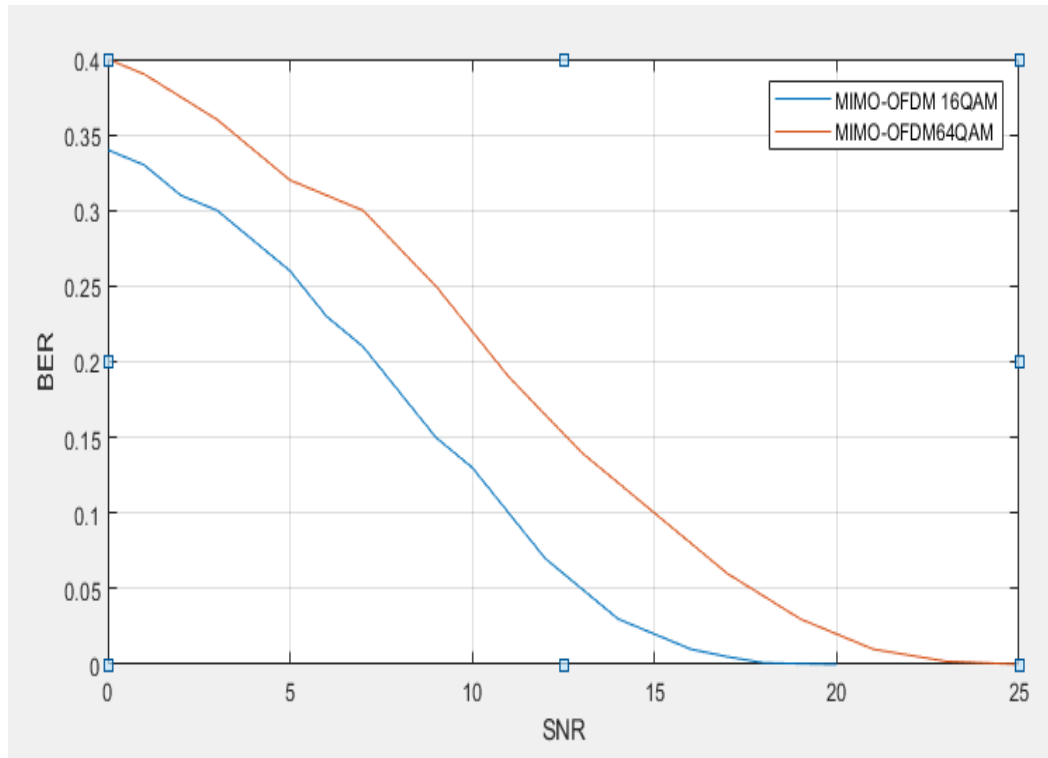


Figure 3.6 : Courbes de taux d'erreur binaire (BER) system MIMO-OFDM

3.6 La capacité des systèmes (SISO - MIMO)

La courbe de la figure 3.8 calcule la capacité du canal SISO et MIMO et nous montre qu'à Chaque fois qu'on augmente la diversité matérialisée par le nombre d'antennes, la capacité augmente aussi d'une manière linéaire avec le rapport signal sur bruit le SNR.

Dans le cas du système SISO, la capacité varie d'environ 4 à 16 bps/Hz. Elle est encore très faible et croît lentement avec le SNR, ce qui illustre bien les limites de la transmission SISO.

Dans le cas du MIMO (2x2) la capacité varie environ de 3 à 25 bps/Hz. Ensuite, la capacité MIMO augmente plus rapidement, et finalement le gain dépasse 50 % lorsque le SNR est de 25 dB.

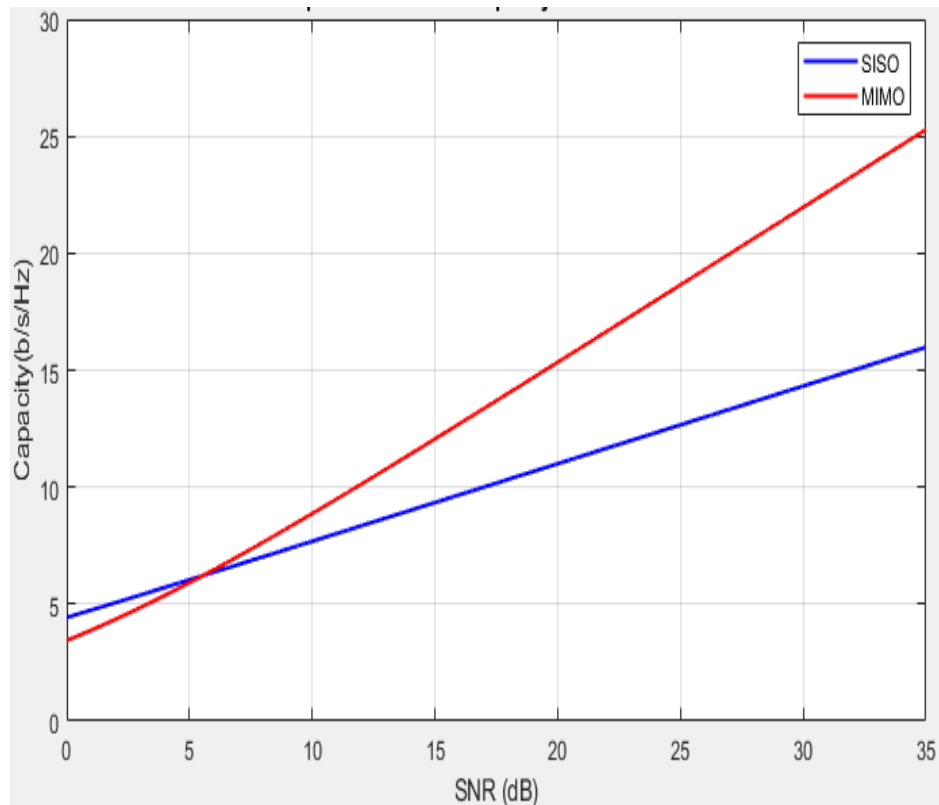


Figure 3.7: Capacité des systèmes SISO et MIMO

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit les résultats de simulation de la transmission de signaux codés MIMO-OFDM à travers le canal.

Nous avons débuté par évaluer les performances du système SISO OFDM ensuite celles du système MIMO-OFDM (STBC). Les résultats montrent que l'ajout de plus d'antennes à l'émission et à la réception améliore la robustesse du système MIMO-OFDM.

Ce dernier résiste à la sélectivité des canaux en raison de l'existence de l'OFDM, et résiste aux trajets multiples en raison de la diversité spatiale admissible matérialisés par les antennes en émission et en réception.

Ce travail a été initié dans le contexte, portant sur l'étude des technologies de transmission utilisant des réseaux d'antennes pour l'émission et la réception (MIMO) et associées à la modulation OFDM. Nous avons discuté des concepts OFDM et MIMO séparément afin d'introduire le système MIMO-OFDM, et nous avons décrit les principaux éléments constituant les deux systèmes. Ensuite, nous avons approfondi chacune des technologies et étudié les performances d'un système MIMO utilisant la modulation OFDM.

Dans un premier temps, nous avons présenté des généralités sur les systèmes de télécommunications sans fil et exposé les catégories des réseaux sans fils ainsi que leurs avantages et inconvénients, les différents modèles de canaux rencontrés en pratique ont été examinés, notamment le canal à évanouissement et trajet multiple qui caractérise les communications radio mobiles.

Dans un deuxième temps nous avons exposé l'étude de la technique OFDM et les principes de son utilisation et son implémentation. Nous avons également présenté la technique MIMO et exposé l'association MIMO-OFDM en combinant les deux systèmes afin d'exploiter leurs avantages.

Nous avons implémenté les systèmes de transmissions à base de l'OFDM et MIMO-OFDM sous SIMULINK la combinaison des deux systèmes permet d'exploiter leurs avantages respectifs. A travers les résultats de simulations, nous avons évalué leurs performances en taux d'erreur minimal (BER) ainsi qu'en capacité des deux systèmes.

La technique OFDM diminue considérablement le phénomène des interférences en offrant des courbes de constellations non bruitées et un taux d'erreur acceptable, toutefois la technique MIMO-OFDM offre les meilleurs résultats en termes de constellations reçues et de taux d'erreur achevés. Nous montrons aussi que la capacité d'un système MIMO-OFDM est grande devant celle d'un système SISO-OFDM.

Nous avons constaté à travers nos simulations que notre approche basée sur la combinaison de la modulation multi-porteuse OFDM et du MIMO est désormais considérée comme une solution à fort potentiel pour les futurs systèmes de radiocommunication. Etant donné qu'elle jouit des avantages des deux méthodes.

Conclusion Générale

Comme perspective aux travaux que nous avons accompli dans ce mémoire, nous suggérons d'adjoindre à la technique MIMO-OFDM la technique dite d'égalisation (supervisée ou non supervisée), pour augmenter d'avantage les performances des systèmes.

- [1] Garguet-duport, B. (2004). Les réseaux sans fil (WI-FI). Techni. Cités. ISBN : 2-84866-019-8. 165p
- [2] Belkheir Khaled et Haned Ahmed; « Réseaux WIFI ad hoc ». Mémoire d'ingénieur ; Institut de télécommunication d'Oran ; Juin 2008.
- [3] A. Choumane, « Synthèse d'un canal de propagation par système multi antennes pour la caractérisation de terminaux mobiles à diversité », Université de Limoges, 2011 .
- [4] D. Khedidja « simulation comparative des techniques fbmc et ofdm pour les reseaux 5g » université de Tlemcen (Abou Bekr Belkaid) Juin2016.
- [5] Arnaud Bournel, « Introduction aux systèmes de télécommunications », Université PARISXI, 2001-2002.
- [6] Jeremy Laine et Philippe Vigneron, « Télécommunications numériques le CDMA », 2000-2001.
- [7] M. Coulon, « *Canal de Propagation* » Dép. TCO-Réseaux, 2008
- [8] A. Boyer, « *Canaux De Transmission Bruites* », Octobre 2013
- [9] K. P Bagadi, « MIMO-OFDM channel estimation using pilot carries», International Journal of Computer Applications (0975 – 8887), Vol 2, 2010.
- [10] J. D. Parsons, « *The Mobile Radio Propagation Channel* », vol. 2. Wiley, Octobre 2000
- [11] Hanzo, T. Keller « OFDM and MC-CDMA for Broadband multiuser communications, WLAN and Broadcasting », Wiley and Sons, 2nd edition, 2006
- [12] M. L. Doeltz, E. Heald et D.L. Martin, "Binary data transmission techniques for linear systems," 1957.
- [13] H. Sampath, S. Talwar, J. Tellado, V. Erceg, and A. Paulraj, "A fourth-generation MIMO-OFDM broadband wireless system: design, performance, and field trial results," *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, pp. 143 - 149, November 2002
- [14] Erik. Dahlman, Stefan. Parkvall, and Johan. Sköld, "4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband "Academic Press is an imprint of Elsevier, Oxford, OX5 1GB, UK, 2011

- [15] S.B. Weinstein and P.M. Ebert, "Data transmission by frequency division multiplexing using the Discrete Fourier Transform", IEEE Trans. Commun. Technol., Vol. 19, n. 5, Octobre 1971
- [16] Yan G. (2008). Réseaux sans fils de nouvelle génération : architecteurs spontanées et optimisation inter-couches. Institut Polytechnique de Grenoble. These de doctorat
- [17] M. Debbah, «*OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing* », France
- [18] V. Hrushikesh, «Orthogonal Frequency Division Multiplexing», The Department of Electrical Engineering at the State University of New York Stony Brook, November 1999.
- [19] P. GRUYER, Simon PAILLARD, « *Modélisation d'un modulateur et démodulateur OFDM* », Université de Bretagne 12 décembre 2005.
- [20] Y. Li and G. L. Stuber, Orthogonal Frequency Division Multiplexing for Wireless Communications.: Springer, 2006.
- [21] sofî naima « Etude et optimisation d'un système de communications sans fil MIMO-OFDM pour des applications WIFI et WIMAX », Université Tlemcen, 2019.
- [22] Y. S. Cho, J. Kim, W.Y. Yang, and C. G. Kang., MIMO-OFDM Wireless Communication with Matlab. Asia: John Wiley & Sons, 2010.
- [23] B. Lu and X. Wang, "Space-time code design in OFDM systems," IEEE GLOBECOM'00, pp. 1000–1004, Nov. 2000.
- [24] V. Tarokh, A. Naguib, N. Seshadri, and A. R. Calderbank, "Space-time codes for high data rate wireless communication: Performance criteria in the presence of channel estimation errors, mobility, and multiple paths," IEEE Trans. Commun, vol. 47, no. 2, pp. 199–207, Feb 1999
- [25] B. Bellalta, L. Bononi, R. Bruno, and A. Kassler, "Next generation IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks: Current status, future directions and open challenges," Computer Communications, vol. 75, pp. 1-25, February 2016.
- [26] A. van Zelst, T.C.W. Schenk, «Implementation of a MIMO OFDM based Wireless LAN System», Accepted for publication in IEEE Transactions on Signal Processing. Netherlands, May 2004

- [27] H.A Bakir, « Exploitation de l'association des techniques MIMO-OFDM dans les réseaux sans fil », Mémoire de Magister, Université d'Algérie, 2012.
- [28] K. P Bagadi, « MIMO-OFDM channel estimation using pilot carries», International Journal of Computer Applications (0975 – 8887), Vol 2, 2010.