



Université ABBES LAGHROUR Khenchela
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Industriel
جامعة عباس لغرور خنشلة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الهندسة الصناعية



N° Série :.....

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Télécommunications

Spécialité : Systèmes des Télécommunications

THEME

Etude des Performances d'un Système MIMO-OFDM Dans Les Communications Sans Fil

Réalisées par : - **KHELIFI Khaoula.**
- **SOUALHI Aziza.**

Devant Le Jury :

Président:	Dr. BOUMAARAF Abdelali.
Rapporteur:	Dr. CHERGUI Laid.
Examineur:	Dr. BENFAROUJ Hafiza.

Promotion 2022/2023

Dédicace

Je dédie ce modeste travail particulièrement à :
À maman et Papa je les remercie pour leur soutien, leur patience et leurs conseils en toutes circonstances
Je n'oublie pas, grand-mère, tante, que Dieu ait pitié d'eux
Et mon oncle et sa femme.
J'exprime également ma gratitude à ma chère sœur Iman et à mes frères Omar et rabie
Sans oublier aussi la femme de mon frère Hiba Rahman
Et aux petits anges, Mouafek et Rahim
À mon collègue Khelifi Khaoula
À mes chers amis, chacune son nom pour leurs aides précieuses Surtout à mes copines : F.SOUAD, B.CHAHINEZ, M.RABIA, N.KARIMA, R.NOURHOUDA, G.HOURIA, H.AMEL.
Ma promotion de Magister Télécommunications 2023/2024.
À tout ceux que je n'ai pas cité leurs noms mais je n'oublie jamais leurs aides.

AZIZA

Dédicace

Loué soit Dieu, qui nous a accordé le succès et le remboursement et nous a aidés à terminer ce travail, Grâce à lui d'abord.

Après cela, je dédie mon diplôme et ma réussite à mes chers parents, qui ont été ma principale source de soutien et source d'encouragement et de motivation tout au long de la période d'études, Que Dieu les protège pour moi et prolonge leur vie et j'espère être une source de fierté pour vous toujours et à jamais.

J'adresse également mes salutations et mes sincères remerciements à mes belles sœurs, Widad, Samra, Hiba Al-Rahman, mes chers frères Salah et Tarek, et ma tante Alima et son mari, mon oncle Al-Ayashi, qui étaient tous toujours là pour partager mes joies et mes peines.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à notre superviseur, M. Laid chergui, qui n'a ménagé aucun effort pour m'aider et Remerciez également ma binôme Aziza.

Je remercie également mes amis qui m'ont soutenu tout au long de cette période difficile Sawzan, Racha, Ahlam et Ghaniya, au premier rang desquels mon ami proche qui se distingue de tout, et la plus belle chose que j'ai acquise de toute l'université, ma douce et belle amie Chaima.

Khaoula

Remerciements

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 Mr: CHRGUI LAID 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.

ملخص

كان لنظام MIMO-OFDM تأثير ثوري على الاتصالات الحديثة. أدى هذا المزيج من التقنيات إلى تحسين قدرة وموثوقية وكفاءة أنظمة الاتصالات اللاسلكية بشكل كبير. من خلال استغلال التنوع المكاني الذي توفره هوائيات MIMO المتعددة واستخدام OFDM لتقسيم الإشارة إلى موجات حاملة فرعية متعامدة ، زاد MIMO-OFDM سعة الطيف وتقليل التداخل وتحسين جودة الإرسال.

أظهرت نتائج عمليات المحاكاة التي أجريناها أن سعة MIMO أعلى من قدرة أنظمة SISO و SIMO و MISO وأنها تزداد مع عدد الهوائيات. علاوة على ذلك ، وجدنا أن نظام MIMO-OFDM يعمل بشكل أفضل وأكثر كفاءة من نظام SISO-OFDM.

كلمات مفتاحية : MIMO و OFDM و TEB.

Résumé

Le MIMO-OFDM a eu un impact révolutionnaire sur les communications modernes. Cette combinaison de technologies a permis d'améliorer considérablement la capacité, la fiabilité et l'efficacité des systèmes de communication sans fil. En exploitant la diversité spatiale offerte par les antennes multiples du MIMO et en utilisant l'OFDM pour répartir le signal en sous-porteuses orthogonales, le MIMO-OFDM a permis d'augmenter la capacité du spectre, de réduire les interférences et d'améliorer la qualité de transmission.

Les résultats des simulations que nous avons menées ont montré que la capacité du MIMO est supérieure à celle des systèmes SISO, SIMO et MISO et qu'elle augmente avec le nombre d'antennes. De plus, nous avons découvert que le système MIMO-OFDM fonctionne mieux et il est plus efficace que le système SISO-OFDM.

Mots-clés: MIMO, OFDM et TEB.

Abstract

MIMO-OFDM has had a revolutionary impact on modern communications. This combination of technologies has dramatically improved the capacity, reliability and efficiency of wireless communication systems. By exploiting the spatial diversity offered by MIMO's multiple antennas and using OFDM to split the signal into orthogonal subcarriers, MIMO-OFDM has increased spectrum capacity, reduced interference and improved transmission quality.

The results of the simulations we conducted showed that the capacity of MIMO is higher than that of SISO, SIMO and MISO systems and that it increases with the number of antennas. Moreover, we found that the MIMO-OFDM system performs better and it is more efficient than the SISO-OFDM system.

Keywords: MIMO, OFDM and TEB.

Sommaire

Dédicaces	
Remerciements	
Résumé	
Sommaire	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Listes des acronymes et abréviations	
Introduction Générale	
Chapitre 01 : Etude de la technique de transmission OFDM	1
1.1. Introduction	2
1.2. Multiplexage dans les communications Numérique	2
1.2.1. Multiplexage temporel	3
1.2.2. Multiplexage fréquentiel	4
1.3. Multiplexage par division fréquentielle et orthogonale OFDM	5
1.3.1. Principe de base	6
1.3.1.1. Modulation OFDM	6
1.3.1.2. Démodulation OFDM	7
1.3.1.3. Intervalle de garde OFDM	8
a. Le préfixe cyclique	8
b. La Complétion à zéros	9
1.3.1.4. Notion d'orthogonalité	10
a. Rappel théorique	10
b. Application au procédé OFDM : l'orthogonalité temporelle	11
c. Application au procédé OFDM : l'orthogonalité fréquentielle	12
1.4. Mesure de performance	13

1.4.1. Taux d'erreur binaire (BER)	13
1.5. Fonctionnement d'un système OFDM	14
1.5.1. Emetteur	14
1.5.1.1. Partie numérique (cas de transmission)	14
1.5.1.2. Partie analogique	15
1.5.2. Récepteur	16
1.5.2.1. Partie analogique (cas de réception)	16
1.5.2.2. Partie numérique (cas de réception)	17
1.6. Avantages d'OFDM	18
1.7. Inconvénients des systèmes OFDM	19
1.8. Conclusion	20
1.9. Références bibliographiques	21
Chapitre 2 : Etude des systèmes MIMO	23
2.1. Introduction	23
2.2. Généralités sur les antennes	24
2.2.1. Définition de l'antenne	24
2.2.2. Le rôle des antennes	24
2.2.2.1. Antenne d'émission	24
2.2.2.2. Antenne de réception	24
2.2.2.3. Réciprocité	25
2.2.3. Types d'antennes	25
2.2.3.1. Les antennes filaires	25
2.2.3.2. Antenne d'ouverture	25
2.2.3.3. Les antennes micro-ruban	26
2.2.3.4. Les antennes Réseaux	26

2.2.3.5.	Les antennes réfléchissantes	26
2.2.3.6.	Les Antennes de Lentilles	27
2.2.4.	Les caractéristiques des antennes	27
2.2.4.1.	Les Caractéristiques de rayonnement	27
a.	Diagramme de rayonnement	27
b.	Polarisation	28
c.	Efficacité de rayonnement et efficacité totale	29
d.	Le Gain	29
e.	Directivité	30
2.2.4.2.	Les caractéristiques électriques	30
a.	Largeur de bande	30
b.	L'impédance d'entrée	31
2.2.5.	Définition de Système MIMO	31
2.2.6.	Les Principes du système MIMO	32
2.2.6.1.	Diversité fréquentielle	33
2.2.6.2.	Diversité temporelle	33
2.2.6.3.	Diversité spatiale	33
2.2.7.	Modèle théorique d'un système MIMO	33
2.2.8.	Types particuliers du MIMO	35
2.2.9.	Capacité des systèmes multi-antenne	36
2.2.9.1.	Capacité du SISO	36
2.2.9.2.	Capacité du canal MIMO déterministe	36
a.	Capacité du canal : Cas de CSI connu au niveau de l'émetteur	37
b.	Capacité du canal MIMO en absence du CSI	38
2.2.9.3.	Capacité du canal SIMO	39
2.2.9.4.	Capacité de canal MISO	39
2.2.9.5.	Capacité dans le cas d'un canal aléatoire	40
2.2.9.6.	Capacité de coupure	40

2.2.10. Avantages de la technologie MIMO	41
2.2.11. Les Techniques de MIMO	41
2.2.11.1. Technique de diversité spatiale MIMO	42
2.2.11.2. Technique de Multiplexage spatial	42
2.2.11.3. Technique de formation faisceaux (La technique Beamforming)	42
2.2.12. Les types de codage MIMO	43
2.2.12.1. Le multiplexage par répartition de fréquence orthogonale OFDM	43
2.2.12.2. Le multiplexage par division spatiale	43
2.2.12.3. Codes Spatio-Temporels en Bloc	44
2.2.13. Domaine d'utilisation de technologie MIMO	44
2.3. Conclusion	45
2.4. Références Bibliographiques	46
Chapitre 3 : Conception d'un système MIMO-OFDM	47
3.1. Introduction	50
3.2. Panorama sur la technologie OFDM	50
3.2.1. Le principe de base d'OFDM	50
3.2.1.1. Interférence entre symboles (ISI)	51
3.2.1.2. Interférence entre sous porteuses (ICI)	51
3.2.2. Le Principe de fonctionnement de l'OFDM	52
3.2.3. Le domaine d'utilisation d'OFDM	53
3.2.3.1. Radio diffusion numérique DAB	53
3.2.3.2. Diffusion vidéo numérique terrestriel	54
3.2.3.3. Réseaux Local sans fil WLAN (IEEE 802.11)	55
3.2.3.4. Les réseaux métropolitains sans fil (IEEE 802.16)	56
3.3. Les canaux de transmission MIMO	56
3.3.1. Canal gaussien	58

3.3.2. Le canal de Rice	59
3.3.3. Canal de Rayleigh	59
3.4. Association MIMO-OFDM	60
3.4.1. Dans le multiplexage spatial de MIMO-OFDM	61
3.4.2. Un code espace-temps (STC)	61
3.5. Capacité du système MIMO-OFDM	62
3.6. Les performances MIMO_OFDM	62
3.7. Conclusion	63
3.8. Références bibliographies	64
Chapitre 4 : Simulations et discussions	68
4.1. Introduction	68
4.2. Comparaison des capacités de canal des systèmes SISO, SIMO, MISO et MIMO	68
4.2.1. Discussion	69
4.3. Implémentation de Système MIMO-OFDM	72
4.3.1. Simulation d'un système SISO basé sur l'OFDM	73
4.3.1.1. Description du système SISO_OFDM	73
4.4. Conclusion	78
Conclusion Générale	79

Liste des figures

Chapitre 01

Figure 1.1. Multiplexage dans les communications Numérique.

Figure 1.2 Le multiplexage temporel.

Figure 1.3. Le multiplexage fréquentiel.

Figure 1.4. Technique OFDM.

Figure 1.5. Schéma de principe de la modulation OFDM.

Figure 1.6. Schéma de principe du démodulateur OFDM.

Figure 1.7. Symboles OFDM avec des intervalles de garde

Figure 1.8. Insertion d'un intervalle de garde en temps pour OFDM.

Figure 1.9. Zéro padding.

Figure 1.10. Principe de l'orthogonalité.

Figure 1.11. Exemple d'une base orthogonale.

Figure 1.12. Exemple d'une base orthogonale dans le domaine temporel.

Figure 1.13. (a) spectre d'une sous porteuse (b) spectre d'un signal OFDM.

Figure 1.14. Exemple d'une base orthogonale dans le domaine fréquentiel.

Figure 1.15. Schéma bloc simplifié d'un émetteur-récepteur OFDM.

Figure 1.16. Insertion des sous-porteuses dans l'IFFT.

Chapitre 02

Figure 2.1. Principe de transmission par onde électromagnétique.

Figure 2.2. Antenne filaire.

Figure 2.3. Exemples d'antennes d'ouverture.

Figure 2.4. Diagramme de rayonnement classique d'une antenne directive.

Figure 2.5. Opérations de base d'une antenne d'émission.

Figure 2.6. Système MIMO.

Figure 2.7. Principe du système MIMO.

Figure 2.8. Système MIMO $n_t \times n_r$.

Figure 2.9. Architecture de base des SISO, MISO, SIMO et MIMO.

Figure 2.10. Illustration de l'algorithme d'allocation de puissance dit Water-filling.

Figure 2.11. Système de transmission MIMO à multiplexage spatial.

Figure 2.12. Principe de la formation de faisceaux.

Figure 2.13. Système MIMO à codage espace-temps.

Chapitre 03

Figure 3.1. Principe de l'OFDM.

Figure 3.2. Comparaison d'un signal FDM et d'un signal OFDM.

Figure 3.3. Passage du domaine fréquentiel au domaine temporel dans un système OFDM.

Figure 3.4. Le concept de multi-porteuse et conversion série-parallèle.

Figure 3.5. Schéma simplifié d'un système de transmission DAB.

Figure 3.6. Bloc émetteur d'un standard DVB-T.

Figure 3.7. La structure des symboles OFDM dans WiMAX.

Figure 3.8. La propagation de l'onde avec le phénomène de trajets multiples.

Figure 3.9. Modèle du canal AWGN.

Figure 3.10. Canal Rice.

Figure 3.11. Modèle du canal Rayleigh.

Figure 3.12. Schéma simplifié d'un système MIMO-OFDM avec un codage ST.

Figure 3.13. BER pour MIMO_OFDM utilisant l'égaliseur ZF pour le canal AWGN.

Chapitre 04

Figure 4.1. La comparaison entre la capacité SISO, SIMO, MISO, MIMO.

Figure 4.2. les capacités du canal MIMO à différentes nombre d'antenne.

Figure 4.3. le schéma bloc de système SISO_OFDM.

Figure 4.4. Insertion du préfix cyclique.

Figure 4.5. Suppression du préfix cyclique.

Liste des tableaux

Chapitre 01

Tableau 1.1. Paramètres d'un système OFDM dans le standard IEEE 802.16a.

Chapitre 03

Tableau 3.1. caractéristiques de quelques standards IEEE 802.11.

Chapitre 04

Tableau 4.1. Le nombre des antennes dans l'émission et réception des systèmes multi_antenne.

Tableau 4.2. Le changement de les capacités de canal SISO, SIMO, MISO, MIMO en fonctionné par le SNR.

Tableau 4.3. la capacité de canal MIMO en fonction du nombre d'antennes.

Tableau 4.4. Les paramètres de système SISO-OFDM.

Listes des acronymes et abréviations

3G: troisième Génération.

4G: Quatrième Génération.

A

ABW: Absolute Band width.

ADSL: Asymmetric Digital Subscriber Line.

AM: Amplitude Modulation.

AWGN: Additive White Gaussian Noise.

B

BBAG: Bruit Blanc Additif Gaussien.

BER: Bit Error Rate.

BPSK: Binary Phase Shift Keying.

C

CDMA: Code Division Multiple Access.

CP: Cyclic Prefix.

CCI: Co-canal Interference.

CSI: Channel State Information.

D

DAB: Digital Audio Broadcasting.

DAC: Discretionary Access Control.

DSL: Digital Subscriber Line.

DVB-T: Digital Video Broadcast – Terrestrial.

F

FAI: Fournisseur d'Accès à Internet.

Listes des acronymes et abréviations

FBW: Fractional Band width.

FFT: Fast Fourier Transform.

FDM: Frequency Division Multiplexing.

FDMA: Frequency Division Multiple Access.

FM: Frequency Modulation.

I

IFFT: inverse Fast Fourier Transform.

ICI: Inter carrier interférences.

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

IEP: Interférence entre porteuses.

IES: Interférence entre Symbole.

ISI: Inter symboles interferences.

H

HD: High Definition.

HSPA: High Speed Packet Access.

L

LTE: Long-Term Evolution.

M

MBWA: Mobile Broadband Wireless Access.

MISO: Multiple Input Single Output.

MIMO: Multiple Input Multiple Output.

MIMO_OFDM: Multiple Input Multiple Output_ Orthogonal Frequency
Division Multiplexing

O

OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing.

P

PAPR: Peak to Average Power Ratio.

Listes des acronymes et abréviations

Q

QAM: Quadrature Amplitude Modulation.

QPSK: Quadrature Phase Shift Keying.

R

RF: Radio-fréquences.

S

SDM: Spatial Division Multiplexing.

SIMO: Single Input Multiple Output.

SISO: Single Input Multiple Single.

SNR: Signal to Noise Ration.

STC: Space-Time Coding.

STBC: Space-Time Bloc Coding.

T

TEB: Taux d'erreur Binaire

TDM: Time Division Multiplex.

TDMA: Time Division Multiple Access.

V

VHF: Very High Frequency.

W

Wi-Fi: Wireless Fidelity.

WIMAX: World Interoperability for Microwave Access.

WLAN: wireless local area network.

WMAN: Wireless metropolitan area network.

Z

ZP: Zero Padding.

Introduction Générale

Introduction Générale

Le multiplexage par division fréquentielle et orthogonale (en anglais: orthogonal frequency division multiplexing (OFDM)) est devenu une technique populaire pour les transmissions sans fil.

L'OFDM a été adopté dans plusieurs normes sans fil telles que la diffusion audionumérique (en anglais : digital audio broadcasting (DAB)), la diffusion vidéo numérique (en anglais : digital video broadcasting (DVB-T)), la norme du réseau locale sans fil IEEE 802.11 (En anglais : wireless local area network (WLAN)) et la norme du réseau métropolitaine sans fil IEEE 802.16 (en anglais : Wireless metropolitan area network (WMAN)).

Plusieurs antennes peuvent être utilisées au niveau de l'émetteur et du récepteur, un arrangement appelé système entrées multiples sorties multiples MIMO (en anglais : multi-input multiple-output (MIMO)). Un système MIMO tire parti de la diversité spatiale obtenue par des antennes spatialement séparées dans un environnement de diffusion dense par trajets multiples. Les développements récents des techniques MIMO promettent une augmentation significative des performances des systèmes OFDM. Les systèmes MIMO-OFDM à large bande avec une efficacité de bande passante élevée sont réalisables pour les environnements WLAN/WMAN.

Dans ce mémoire, nous proposons une étude des performances d'un system MIMO-OFDM dans les communications sans fil et son implémentation sous MATLAB.

Notre mémoire est structuré comme suit :

Le premier chapitre donne une étude de la technique de transmission OFDM. Le deuxième chapitre traite les systèmes MIMO. Le troisième chapitre présente la conception d'un système MIMO-OFDM. Enfin, le quatrième chapitre expose les différentes simulations effectuées et les résultats obtenues ainsi qu'une discussion de ces derniers.

CHAPITRE 01

‘Etude de la technique de transmission OFDM’

1.1. Introduction

L'un des principaux problèmes des communications filaires et sans fil est l'encombrement des canaux de transmission utilisés. Pour cela, la méthode la plus réussie a été conçue pour résoudre ces problèmes, connue sous le nom de multiplexage, cette technologie est basée sur la collecte de nombreux canaux qui sont envoyés dans un seul passage ou un seul support en même temps. Au fil des années, ce mécanisme a évolué et de nombreuses technologies très avancées ont émergé, dont le principal est la technologie OFDM. Elle est considérée comme le choix idéal pour la prochaine génération en raison de sa capacité à gérer le produit de l'extension croissante du délai de bande passante et de son possession de grands avantages qui se reflètent sur le monde des communications avec des points positifs.

Dans ce chapitre, nous aborderons la définition du multiplexage et de ses différents types, puis nous entamons la technologie OFDM, nous nous concentrons sur sa définition, en mentionnant ses principes de base, une explication de son fonctionnement ainsi que ses avantages et ses inconvénients.

1.2. Multiplexage dans les communications Numérique [1]

C'est un moyen de transmettre les messages issus de plusieurs sources vers plusieurs destinataires (soit plusieurs voies) de manière simultanée et sur le même support physique. Le multiplexage (du latin multi, nombreux) a lieu lors de l'émission, et le démultiplexage lors de la réception. Ce sont souvent des impératifs économiques qui imposent cette pratique. On parlera également de technique d'accès multiple (sous-entendu, accès au support matériel de la transmission).

Il existe trois modes principaux de multiplexage :

1. Le multiplexage fréquentiel (en anglais : Frequency Division Multiple Access (FDMA)) ;
2. Le multiplexage temporel (en anglais : Time Division Multiple Access (TDMA)) ;

3. Le multiplexage de code (en anglais : Code Division Multiple Access (CDMA)).

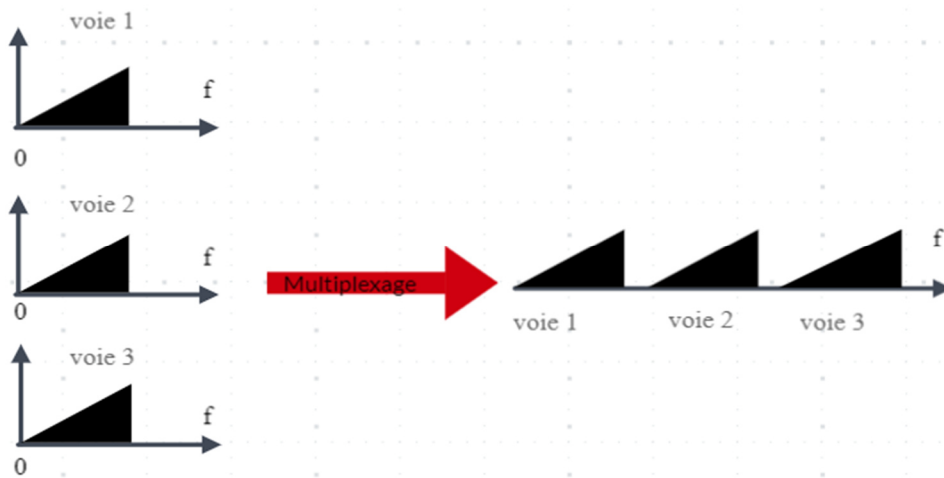


Figure 1.1. Multiplexage dans les communications Numérique.

1.2.1. Multiplexage temporel [2]

Le multiplexage temporel (en anglais : Time Division Multiplex (TDM)) consiste à répartir les voies périodiquement dans le temps par l'intermédiaire d'une modulation d'impulsions, les impulsions correspondant à une voie étant intercalées entre celles des autres voies. La constitution d'un multiplex temporel passe donc toujours par un échantillonnage synchrone des voies avec des impulsions décalées les unes par rapport aux autres (Figure 1.2).

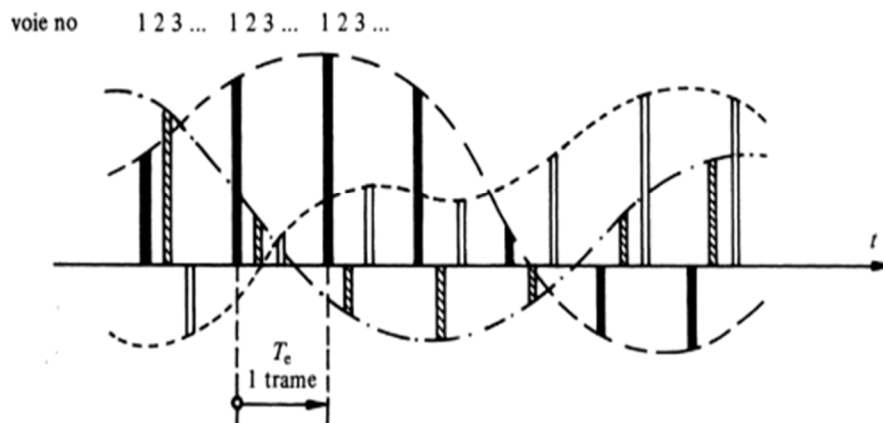


Figure 1.2. Le multiplexage temporel.

Les voies temporelles entrelacées forment une trame dont la durée correspond à la période d'échantillonnage T .

1.2.2. Multiplexage fréquentiel [2]

Le multiplexage dans le domaine fréquentiel (en anglais : Frequency Division Multiplexing (FDM)) est une technique de Multiplexage par répartition de fréquence. Elle est utilisée pour accroître les débits sur paires torsadées et plus particulièrement dans l'espace libre (Faisceau Hertzien). Le multiplexage fréquentiel consiste à partager la bande de fréquence disponible en un certain nombre de canaux ou sous-bandes plus étroites et à affecter en permanence chacun de ces canaux à un utilisateur. La Figure 1.3, montre le principe d'un multiplexage par répartition de fréquence.

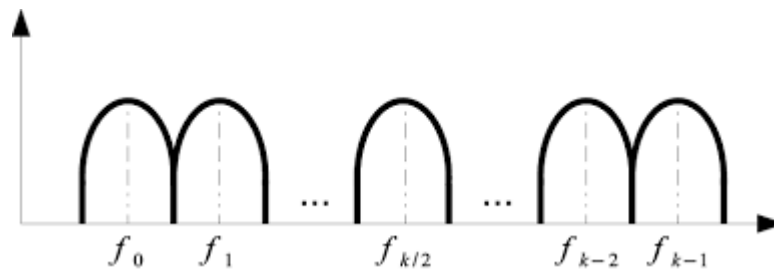


Figure 1.3. Le multiplexage fréquentiel.

Le multiplexage dans le domaine fréquentiel a connu un développement important donnant naissance à plusieurs techniques modernes comme la technique OFDM.

1.3. Multiplexage par division fréquentielle et orthogonale OFDM

Le Multiplexage par division fréquentielle et orthogonale (en anglais : Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)), est défini comme une méthode de codage des signaux numériques par division en fréquences orthogonales sur plusieurs sous-porteuses. L'OFDM envoie des données en utilisant un grand nombre de porteuses à bande étroite. La fréquence porteuse et l'espace temporel sont choisis de manière à ce que les porteuses soient orthogonales pour éviter les interférences. L'OFDM est implémenter par l'utilisation de l'algorithme rapide de la transformée de fourrier discrète (en anglais : Fast Fourier Transform (FFT)) et son inverse (en anglais inverse FFT (IFFT)).

La technologie OFDM permet une égalisation de faible complexité afin de lutter contre les canaux sélectifs en fréquence. Lorsqu'il existe plusieurs trajets, des canaux sélectifs en fréquence apparaissent et présentent un grand danger en raison du taux de transmission élevé. C'est la principale raison pour laquelle cette technologie a été largement adoptée dans la plupart des applications à grande vitesse [3].

Cette méthode de modulation est utilisée pour ses propriétés intéressantes, particulièrement pour les systèmes de transmission mobiles à haut débit de données tels que de WLAN, WIMAX et bien sûr le 4G LTE [4].

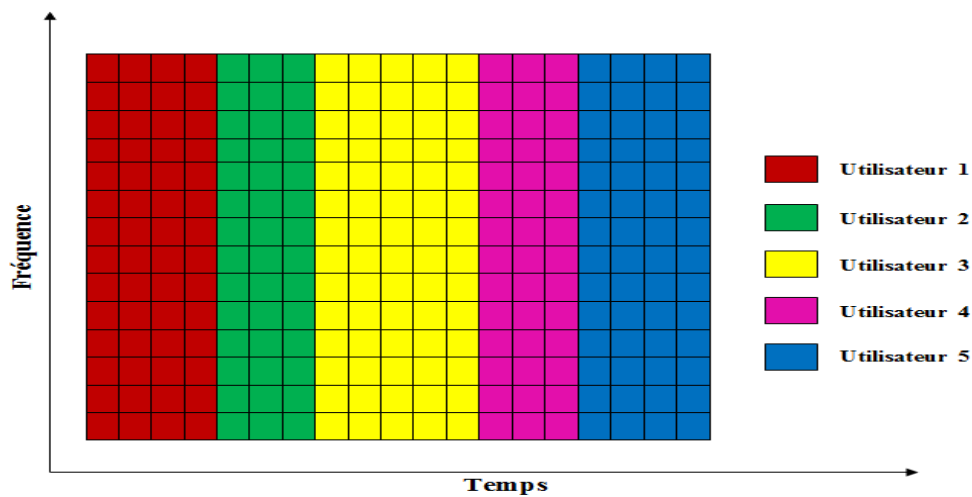


Figure 1.4. Technique OFDM [4].

1.3.1. Principe de base

1.3.1.1. Modulation OFDM [5]

Le principe du multiplexage est de grouper des données numériques par paquet de N symboles qu'on appellera symboles OFDM. Chaque symbole (M-PSK, M-QAM) du symbole OFDM est modulé par une fréquence porteuse différente.

Considérons les N symboles $[x_0, x_1, \dots, x_{N-1}]$ émis pendant une durée symbole T_u . Chaque symbole complexe est modulé par un signal à la fréquence f_k mais de durée N fois plus grande que T_s ($T_u = NT_s$).

Le signal $X(t)$ résultant de la modulation de tous les signaux modulés est la somme des signaux élémentaires, donné par :

$$X(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{j2\pi f_k t}, \text{ pour } t \in [kT_u, (k+1)T_u] \quad (1.1)$$

Avec $X(t)$ correspond au symbole OFDM. Le multiplexage en fréquence à la particularité d'être orthogonal en fixant l'espacement entre chaque fréquence à $1/T_u$. Alors le symbole OFDM peut s'écrire :

$$X(t) = e^{j2\pi f_0 t} \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{\frac{j2\pi k t}{T_u}}, \text{ avec } f_k = f_0 + \frac{k}{T_u} \quad (1.2)$$

Où

$X(t)$: Le signal émis, f_k : La fréquence de symbole, f_0 : La première fréquence porteuse, K : Le nombre des symboles et T_u : La durée de symbole.

Le schéma synoptique illustré sur la figure 1.5 représente le schéma bloc de la modulation OFDM. Les éléments binaires sont regroupés par paquets de n bits pour former des symboles QAM – 2^n . Par la suite, les symboles c_k sont mis en parallèle et sont modulés par la fréquence porteuse correspondante. Enfin, tous les signaux sont additionnés avant d'être émis.

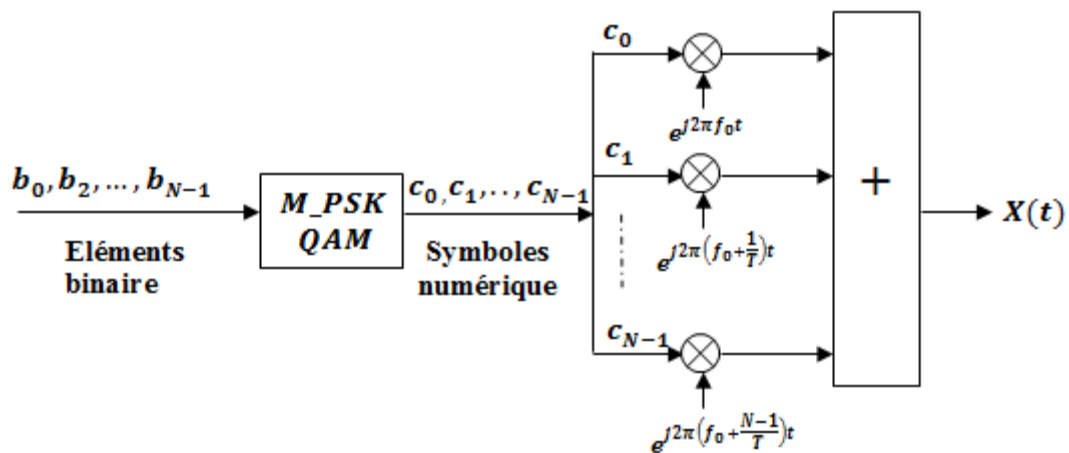


Figure 1.5. Schéma de principe de la modulation OFDM [6].

1.3.1.2. Démodulation OFDM [6]

Pour la démodulation, le signal parvenant au récepteur s'écrit sur une durée symbole T_s comme suit :

$$Y(t) = \sum_{K=0}^{N-1} c_k H_k(t) e^{j2\pi(f_0 + \frac{K}{T_s})t} \quad (1.3)$$

Où $H_k(t)$ est la fonction de transfert du canal autour de la fréquence $f_k = f_0 + \frac{K}{T_s}$ et au temps t , cette fonction varie lentement et on peut la supposer constante sur la période T_s . La démodulation classique consiste à démoduler le signal suivant les N sous-porteuses comme le montre le schéma de la figure 1.6.

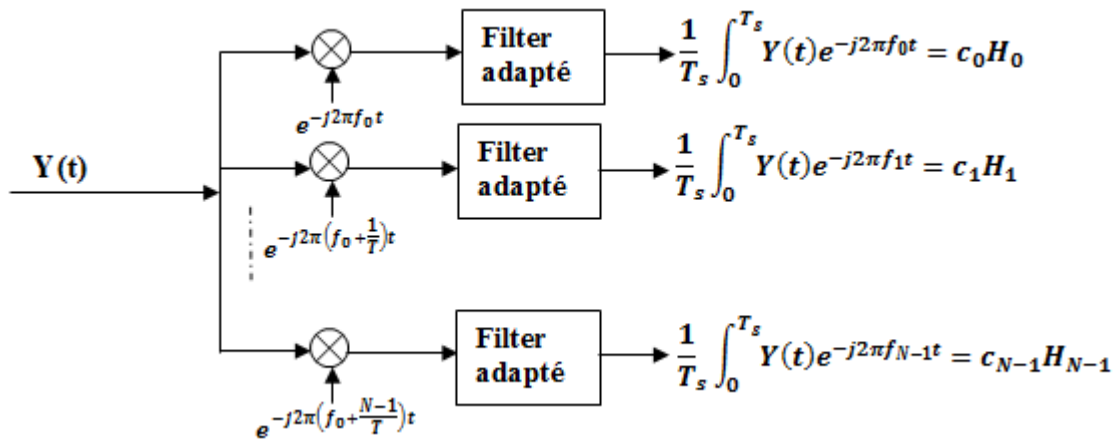


Figure 1.6. Schéma de principe du démodulateur OFDM [6].

En pratique, comme pour la modulation, on remarque que la démodulation peut être réalisée par une transformée de Fourier.

1.3.1.3. Intervalle de garde OFDM [7]

L'intervalle de garde est ajouté au symbole OFDM pour éliminer ou réduire le problème d'interférence entre symboles (en anglais : Inter symboles interférences (ISI)). Ce dernier est ajouté entre les trames OFDM, ce qui permet de réduire les interférences entre deux symboles. La figure 1.7 représente des trames OFDM avec des intervalles de garde.

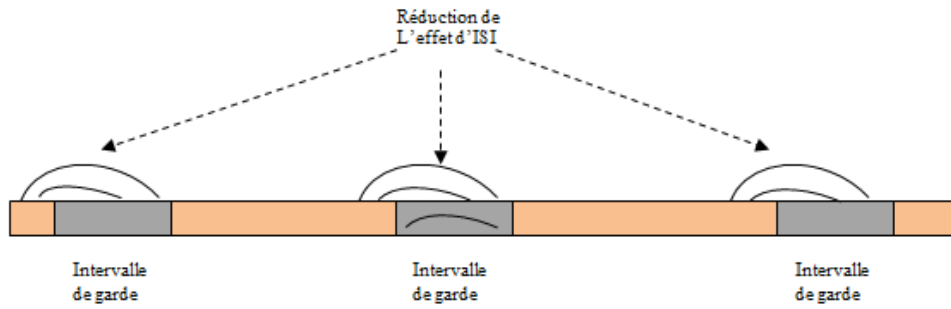


Figure 1.7. Symboles OFDM avec des intervalles de garde.

L'intervalle de garde est un élément essentiel pour éviter les ISI et les interférences entre porteuses (en anglais : Inter carrier interférences (ICI)), et de préserver l'orthogonalité et améliorer la qualité de transmission.

a. Le préfixe cyclique [8]

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 1.8, 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.

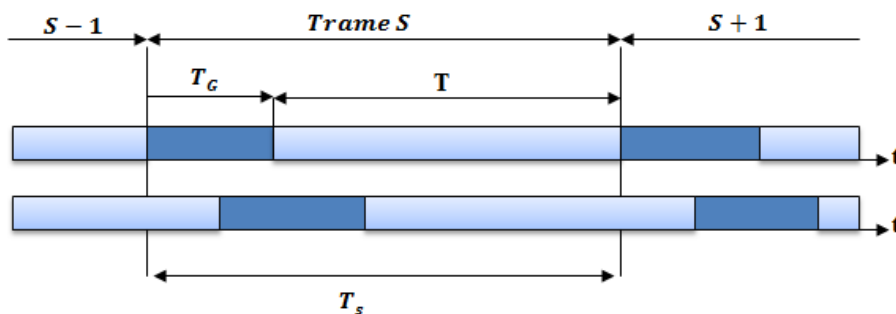


Figure 1.8. Insertion d'un intervalle de garde en temps pour OFDM.

b. La Complétion à zéros

La Complétion à zéros (en anglais : Zero Padding (ZP)) est une méthode sert à capitonner l'intervalle de garde entre deux symboles avec des zéros. Etant donné que le ZP est rempli de zéro, la longueur réelle d'un symbole contenant un ZP est forcément plus courte que celui contenant un CP. En conséquence, la longueur de la fenêtre rectangulaire de transmission sera plus courte, et le spectre qui est sous forme d'un sinus cardinal devient ainsi plus large. Cela implique qu'un symbole contient un ZP ait une densité spectrale de puissance avec la plus petite ondulation en bande, et la plus grande puissance hors bande, en comparant avec un symbole contient un CP. Permettant subséquemment une grande puissance utilisée pour la transmission avec une crête de puissance de transmission fixe.

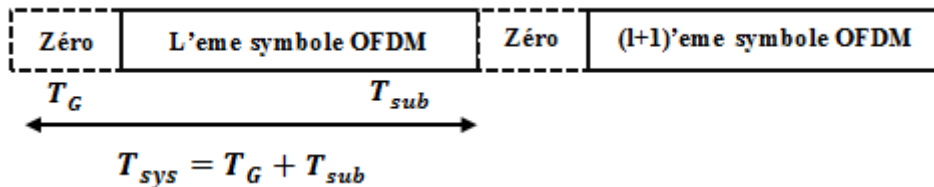


Figure 1.9. Zéro padding.

1.3.1.4. Notion d'orthogonalité [5]

L'orthogonalité est une propriété fondamentale qui consiste à transmettre des signaux d'informations multiples dans un même canal et permet de les détecter sans interférence. La technique de modulation OFDM autorise un fort recouvrement spectral entre les sous-porteuses. Cependant, les porteuses doivent respecter une contrainte d'orthogonalité dans les domaines temporel et fréquentiel au même temps pour un bon fonctionnement.

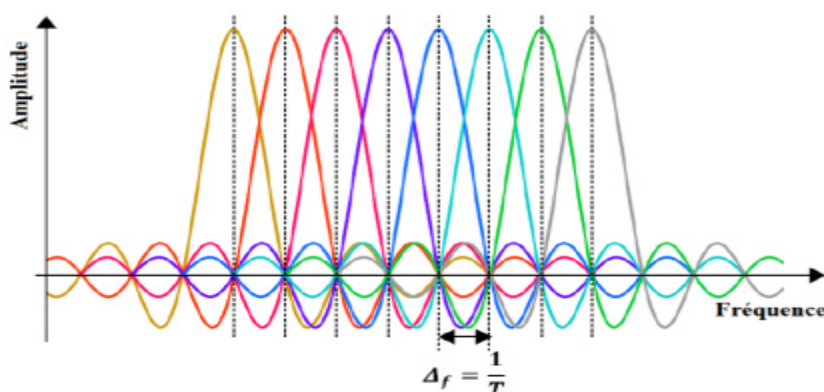


Figure 1.10. Principe de l'orthogonalité.

a. Rappel théorique [10]

On définit l'orthogonalité de deux fonctions $F_1(t)$ et $F_2(t)$ dans l'intervalle $[a, b]$ par la relation suivante :

$$\int_a^b F_1(t).F_2(t) = 0 \tag{1.4}$$

Cela signifie que ces deux fonctions sont disjointes sur le segment $[a, b]$. La réalisation d'une base orthogonale à N dimensions nécessite de trouver N fonctions $\{F_1(t), F_2(t), \dots, F_N(t)\}$ orthogonales deux à deux. Comme le montre la figure 1.11, l'exemple de l'ensemble de N fenêtres rectangulaires (fonctions porte $\Pi(t)$) régulièrement espacées d'un intervalle δ sur l'axe des temps constitue une base orthogonale.

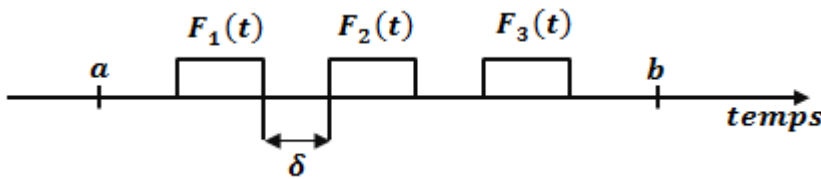


Figure 1.11. Exemple d'une base orthogonale.

Afin de transmettre des signaux d'informations multiples dans un même canal et de les détecter sans interférence, l'orthogonalité est la propriété fondamentale entre ces signaux.

b. Application au procédé OFDM : l'orthogonalité temporelle [6]

Le un signal OFDM est composé d'une somme de N sinusoïdes de fréquences $f_k = k/T$, transmises durant une durée T_s , k variant de 1 à N . Cette condition permettant, d'avoir un nombre entier de sinusoïdes sur chaque sous-porteuse durant T_s . Chaque sous-porteuse $S_k(t)$ réelle et non modulée peut se mettre sous la forme suivante :

$$S_k(t) = \begin{cases} \sin\left(2\pi \frac{k}{T_s} t\right) & \text{pour } 0 \leq t < T_s \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (1.5)$$

Ainsi deux sous-porteuses $S_i(t)$ et $S_j(t)$, de fréquences respectives f_i et f_j , définis par L'expression (1.5), sont orthogonales sur l'intervalle $[0, T_s]$, puisqu'elles vérifient l'équation (1.4).

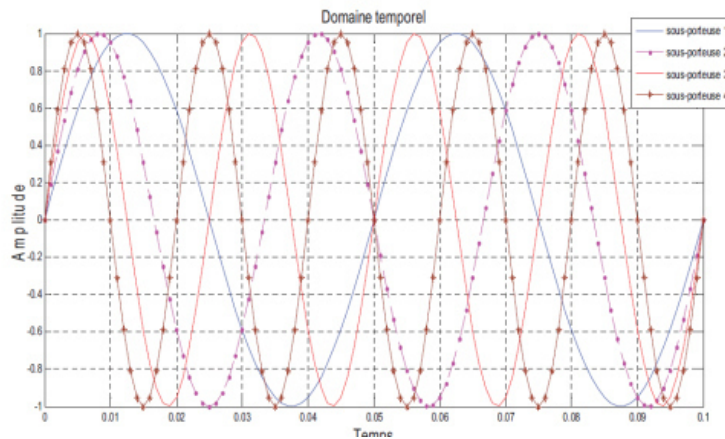


Figure 1.12. Exemple d'une base orthogonale dans le domaine temporel [11].

c. Application au procédé OFDM : l'orthogonalité fréquentielle [11]

On peut aussi percevoir la notion d'orthogonalité du signal OFDM dans le domaine fréquentiel. En effet, si chaque sous-porteuse $S_k(t)$ est transmise pendant la durée T_u , cela revient à appliquer à la sous-porteuse une porte de durée T_u , dont l'enveloppe spectrale est un sinus cardinal qui s'annule aux premières fréquences : $f_k - \frac{1}{T_u}$ et $f_k + \frac{1}{T_u}$, dont ces deux fréquences sont aussi respectivement égales à f_{k-1} et f_{k+1} et on obtient ainsi l'enveloppe spectrale représentée par la Figure 1.13 Le spectre (a) étant celui d'une sous porteuse k , de bande $\Delta f = \frac{1}{T_u}$ et le spectre (b) celui du signal OFDM a $N = 4$ sous-porteuses et qui s'étale sur :

$$B = N \cdot \Delta f = \frac{N}{T_u} \tag{1.6}$$

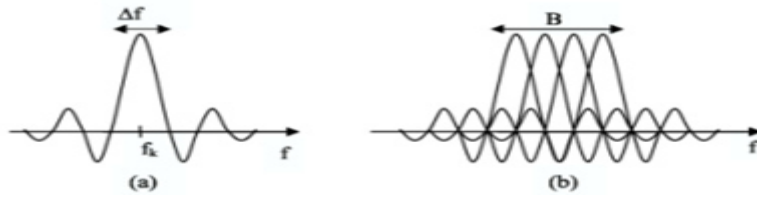


Figure 1.13. (a) spectre d'une sous porteuse (b) spectre d'un signal OFDM.

L'orthogonalité dans le domaine fréquentiel est réalisée puisque le maximum de chaque sous- porteuse correspond à un zéro des autres. Cette condition permet ainsi d'avoir une occupation spectrale idéale et d'éviter les interférences entre sous-porteuses.

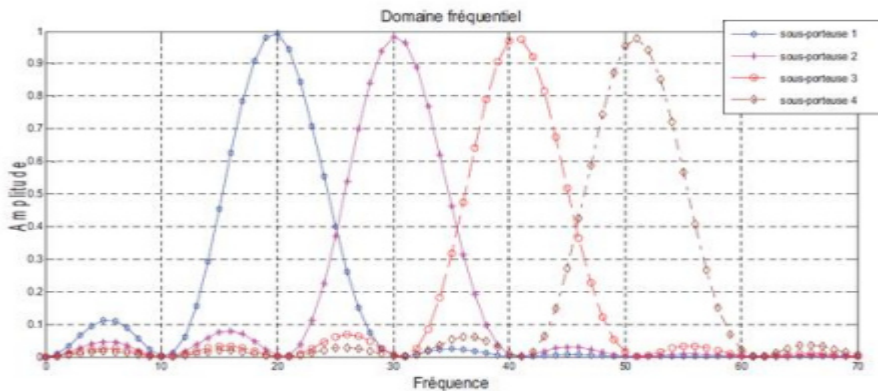


Figure 1.14. Exemple d'une base orthogonale dans le domaine fréquentiel.

1.4. Mesure de performance

1.4.1. Taux d'erreur binaire (BER)

Le taux de bits erronés (en anglais : Bit Error Rate (BER)) est un paramètre très important dans les communications numériques qui est utilisé pour étudier et donner une évaluation de la qualité du signal [12].

Les expressions analytiques du BER pour la signalisation M-QAM dans les canaux AWGN et Rayleigh sont respectivement données par :

$$P_e = \frac{2(M - 1)}{M \log_2 M} Q \left(\sqrt{\frac{6E_b}{N_0} \cdot \frac{\log_2 M}{M^2 - 1}} \right) \text{ canal AWGN} \tag{1.7}$$

$$P_e = \frac{(M - 1)}{M \log_2 M} \left(1 - \sqrt{\frac{3\gamma \log_2 M / (M^2 - 1)}{3\gamma \log_2 M / (M^2 - 1) + 1}} \right) \quad (1.8)$$

Canal d'évanouissement Rayleigh.

Où g et M désignent respectivement $E_b = N_0$ et l'ordre de modulation tandis que $Q(x)$ est la fonction Q standard définie comme :

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt \quad (1.9)$$

On note la différence de SNR dans le domaine temporel par SNR_t , par rapport au SNR dans le domaine fréquentiel est SNR_f , dans le cas où l'on n'utilise pas de sous-porteuses sur les N sous-porteuses totales (taille FFT) utilisées pour la transmission de données [13] :

$$SNR_t = SNR_f + 10 \log \frac{N_{used}}{N} \quad (1.10)$$

1.5. Fonctionnement d'un système OFDM [14]

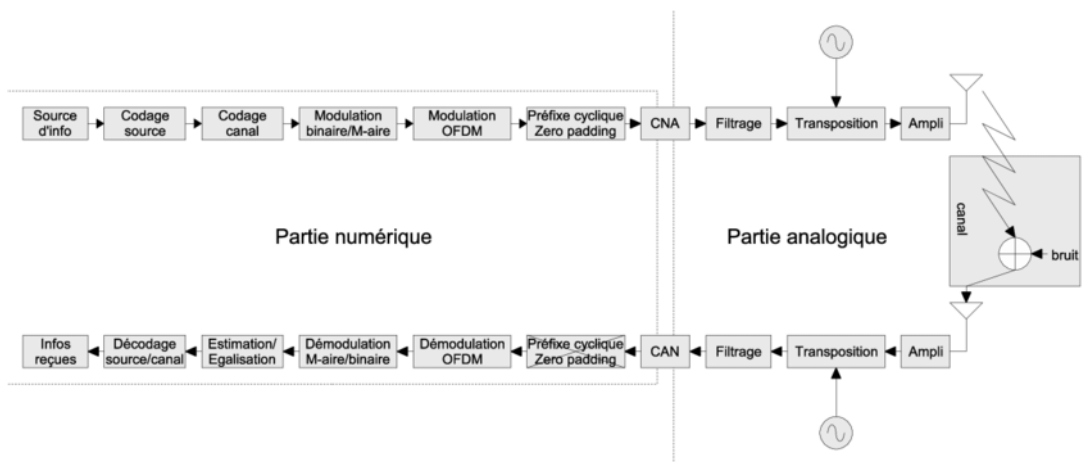


Figure 1.15. Schéma bloc simplifié d'un émetteur-récepteur OFDM [14].

1.5.1. Emetteur

Cette chaîne de transmission est constituée des éléments suivants :

1.5.1.1. Partie numérique (cas de transmission)

a. Source D'information

A cette étape interviennent des capteurs pour transformer l'information source forme physique (onde sonore, lumière, chaleur...) en un signal électrique.

b. Le signal de codage source

Cette étape se charge d'enlever la redondance dans les bits d'information.

c. Codage canal

Ce codage consiste à ajouter une redondance pour protéger les bits d'information.

d. Modulation binaire/Maire

Des symboles d'information sont générés suivant un alphabet (BPSK, QPSK, QAM-16, QAM-64 ...etc.), en modifiant l'amplitude et/ou la phase des bolées en fonction des paquets de bits d'information.

e. Modulation OFDM

Modulation multi porteuses comprenant une conversion série/parallèle, une IFFT et une conversion parallèle/série.

f. Insertion du préfixe cyclique ou du zero padding

Ajoute une redondance ou des zéros à chaque symbole OFDM permettant d'éviter l'interférence entre symboles OFDM utile et une égalisation simple du canal.

1.5.1.2. Partie analogique

a. Conversion numérique/analogique

Le signal numérique est converti en un signal électrique analogique.

b. Filtrage

Le signal électrique bande de base est filtré afin de supprimer les répétitions du spectre obtenues lors de la conversion numérique/analogique-Transposition. La transposition en fréquence est effectuée pour porter le signal de la bande de base autour de la fréquence porteuse. Cette transposition est obtenue grâce à un ou plusieurs oscillateurs locaux.

c. Amplificateur de puissance

La puissance du signal est augmentée pour qu'il puisse résister à l'atténuation du canal.

d. Antenne d'émission

Le signal électrique est transformé en une onde électromagnétique en espace libre.

Tableau 1.1. Paramètres d'un système OFDM dans le standard IEEE 802.16a [15].

La taille de la FFT	256
Nombre de sous-porteuses informatives	192
Nombre de sous-porteuses virtuelles	56
Nombre de pilotes	8

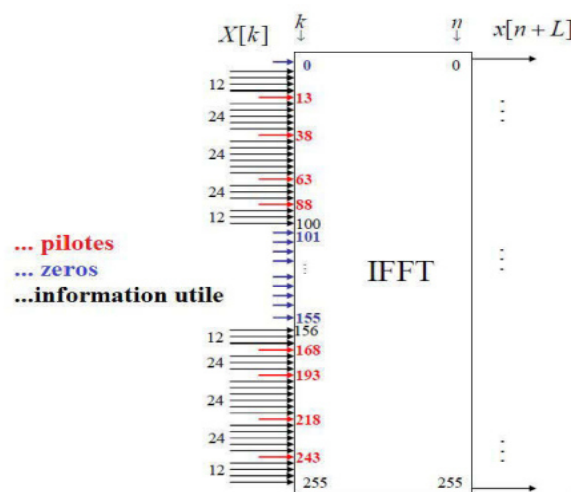


Figure 1.16. Insertion des sous-porteuses dans l'IFFT [15].

e. Canal de propagation [14]

Le canal correspond à l'environnement physique dans lequel l'onde du signal se propage ; dans le cas des télécommunications mobiles, ce milieu est l'air. Il introduit plusieurs sortes de distorsions comme l'effet Doppler ou l'effet multi trajets.

1.5.2. Récepteur [14]

1.5.2.1. Partie analogique

a. Antenne de réception

L'onde électromagnétique est transformée en un signal électrique, mais l'antenne capte aussi du bruit thermique dont la puissance est proportionnelle à la bande passante de l'antenne.

b. Amplificateur faible bruit

Le signal qui a subi l'atténuation du canal est amplifié.

c. Transposition

Le spectre du signal qui est centré autour de la fréquence porteuse est ramené en bande de base. Cette transposition est obtenue grâce à des mélangeurs et à un ou plusieurs oscillateurs locaux.

d. Filtrage

Le signal électrique bande de base est filtré afin d'éviter le repliement spectral lors de l'échantillonnage effectué par la conversion analogique/numérique.

e. Conversion analogique/numérique

Le signal électrique analogique est converti en un signal numérique.

1.5.2.2. Partie numérique (cas de réception)

Suppression du préfixe cyclique ou du zéro padding.

a. Démodulation OFDM

L'opération duale de la modulation est réalisée grâce à la FFT.

b. Estimation et Egalisation

La dispersion du canal est estimée grâce à des symboles connus du récepteur. Les symboles reçus affectés par le canal sont ensuite compensés.

c. Démodulation M-PSK/binaire

Les symboles reçus sont reconvertis en paquets de bits.

d. Décodage canal et décodage source

Cette étape supprime les redondances ajoutées à l'émission et corrige certaines erreurs. Les données sont ensuite décompressées en insérant les redondances enlevées lors du codage source à l'émission.

e. Informations

Les données sont transformées de forme électrique en forme physique.

1.6. Avantages d'OFDM [9]

1.6.1. Combattre l'ISI et réduction de l'IEP

L'utilisation du préfixe cyclique permet un double avantage. Le premier est l'élimination de l'ISI, due à l'occupation de l'intervalle de garde entre deux symboles OFDM. Le deuxième est de supprimer l'IEP, à cause du maintien de l'orthogonalité entre les sous porteuses. En revanche, l'introduction du CP coûte la perte d'une partie de l'énergie du signal puisqu'il ne transporte pas l'information.

La perte est mesurée par :

$$SNR_{perte} = -10 \log_{10} \left(1 - \frac{T_{CP}}{T_{sym}} \right) \quad (1.11)$$

T_{CP} : Longueur du CP.

T_{sym} : durée du symbole OFDM.

1.6.2. Efficacité spectrale

L'orthogonalité entre les sous-porteuses (sous porteuses espacées de $\frac{1}{T_{sym}}$) permet d'arranger les sous porteuses de manière à ce que les lobes latéraux des sous porteuses adjacentes se recouvrent sans pour autant créer de l'interférence entre porteuses (IEP) au niveau du récepteurs. L'occupation spectrale est alors réduite par rapport à une FDM (en anglais : Frequency Division Multiplexing) classique.

1.6.3. Simplicité d'implémentation

L'utilisation des algorithmes IFFT/FFT dans l'implémentation permet de réduire la complexité de calcul et les coûts des émetteurs/récepteurs OFDM.

1.6.4. Robustesse

Les systèmes OFDM sont plus robustes que les systèmes mono-porteuses dans les environnements sélectifs en fréquence.

1.6.5. Débit

Dans les canaux variant lentement dans le temps il est possible d'augmenter la capacité d'un système OFDM en adaptant le débit par sous-porteuse selon le SNR de cette sous porteuse particulière.

1.6.6. Intégration

Les systèmes OFDM peuvent intégrer les bénéfices des systèmes MIMO, des antennes intelligente set des modulations adaptatives.

1.7. Inconvénients des systèmes OFDM [9]

1.7.1. Synchronisation

L'OFDM est très sensible aux erreurs de synchronisation fréquentielle et temporelle. La source d'erreur de synchronisation fréquentielle est, d'une part, la différence entre les fréquences des oscillateurs locaux dans l'émetteur et le récepteur. D'autre part, l'étalement Doppler a cause de la mobilité de l'émetteur et du récepteur.

Pour optimiser les performances d'une liaison OFDM, une synchronisation minutieuse doit être maintenue au niveau symbole, fréquences porteuses et fréquence d'échantillonnage.

1.7.2. Rapport puissance crête à puissance moyenne (PAPR)

Rapport puissance crête à puissance moyenne (en anglais : Peak to Average Power Ratio (PAPR)) est proportionnel au nombre des sous-porteuses utilisées dans un système OFDM. Un PAPR important rend complexe l'implémentation des convertisseurs Analogique/Numérique (DAC et DCA). De même, la conception des amplificateurs RF devient difficile si le PAPR augmente. Pour réduire le PAPR, les techniques de fenêtrage et les techniques d'annulation de crête peuvent être utilisées.

1.7.3. Interférence Co-canal

L'utilisation de l'OFDM dans les systèmes de communication cellulaire induit l'apparition d'Interférence entre Co-Canal (CCI). Ces interférences peuvent être combattues par les techniques d'antennes adaptives.

1.8. Conclusion

Nous avons découvert que la technologie OFDM est une technologie efficace pour l'anti-interférence et l'élimination des canaux sélectifs en fréquence après avoir abordé les points les plus importants. Sur la base de ces avantages, l'OFDM est devenu la technologie de transmission sans fil la plus utilisée et la plus populaire, occupant les premières places par rapport à toutes les technologies anciennes.

1.9. Références bibliographiques

- [1] Jean-Marie Dilhac., ‘Introduction aux télécommunications’, PUM toulouse, 2012.
- [2] Pierre-Gérard Fontollet, ‘Systèmes de télécommunications’, PPUR France, 1996.
- [3] Boudouaya maria, Ben Salem Nour Elhouda, Bennaceur Besma, Trad Hadjer, ‘Etude et simulation des systèmes de MIMO (Application aux systèmes de Cinquième génération)’, Mémoire de Master Académique de l’université Echahid Hamma Lakhdar El-Oued, Spécialité : Systèmes de Télécommunication, 2022.
- [4] BACHATENE Amel, ‘Filtrage par réseaux de neurones des non linéarités dans une transmission OFDM’, Mémoire de Master en Electronique de l’université MOULOUD MAMMERRI_TIZI-OUZOU, Spécialité : Réseaux et Télécommunications, 2013/2014.
- [5] ABERBACHE Sarah, MACHTER Yasmina, ‘Réduction du PAPR en transmissions basées sur l’OFDM par application de la C-A-PTS’, Mémoire de Master de Université Abderrahmane Mira, Spécialité : Réseaux et Télécommunications, 2020 – 2021.
- [6] CHERIFI ABDELHAMID, ‘Analyse Et Evaluation Des Performance De la Modulation Multi porteuses Dans La Transmission d’information’, thèse de Doctorat de l’université ABDELHAID IBN BADIS de MOSTAGANEM, Spécialité : Génie Electrique, 2016-2017.
- [7] Lynda FARAH, Yousra AROUS, ‘Amélioration des performances des systèmes MIMO-OFDM’, Mémoire de Master de Université Mohammed Seddik Ben Yahia – Jijel, spécialité de Systèmes des Télécommunications, 2020.
- [8] SOFI Naima, ‘Etude et optimisation d’un système de communications sans fil MIMO-OFDM pour des applications WIFI et WIMAX’, Thèse de Doctorat 3^{ème} Cycle de l’Université Aboubakr Belkaïd Tlemcen, Spécialité : Télécommunications, 2019.
- [9] ATALLAH Eldjemai, ‘Performance d’un système MIMO-OFDM’, Mémoire Master Académique de l’Université Kasdi Merbah Ouargla, Spécialité: Systèmes des télécommunications, 2019.
- [10] LARBI Nacéra, ‘Détection multi-utilisateurs dans le contexte de communication mobile : Exploitation de la combinaison OFDM/CDMA’, Mémoire en vue de l’obtention du diplôme de Doctorat en science de l’université des sciences et de technologie d’Oran, spécialité de Electronique, 2015.

- [11] Boutaleb Amir et Bouraoui Nazim, 'Amélioration des performances des transmissions OFDM par le chaos', Mémoire de Master de l'université JIJEL, 2020/2021.
- [12] AIT TALEB Hamid, 'Synchronisation pour l'OFDM', Mémoire de mastère en électronique, 2012.
- [13] Yong Soo Cho, Jaekwon Kim, Won Young Yang, Chung G. Kang, 'MIMO-OFDM WIRELESS COMMUNICATIONS WITH MATLAB', John Wiley & Sons, 2010, ISBN 978-0-470-82561-7 (cloth).
- [14] CHORFI Abdelhak, BOUMAARAF Abdelhak, 'Etude des performances d'un système de transmission basé sur la technique MIMO_OFDM Pour un lien sans fil', Mémoire de master de l'université Abbas Laghrour kenchela, 2015/2016.
- [15] AIT T ALEB HAMID, 'MIMO-OFDM POUR LES COMMUNICATIONS SANS-FIL DANS LES MINES SOUTERRAINES', Mémoire Présenté comme exigence Partielle de Maitrise de l'université du QUÉBEC en ABITIBI-TÉMISCAMINGUE, 2017.

CHAPITRE 02

‘Etude des systèmes MIMO’

2.1. Introduction

Avec l'avènement de l'internet et la propagation rapide des technologies de l'informatiques et des appareils de communication, les réseaux sans fil sont devenus un moyen efficace de fournir un débit de données élevé à un coût inférieur à celui des technologies filaires (telles que les modems DSL ou câble).

Les antennes constituent un dispositif important dans les systèmes des réseaux sans fil. Les antennes se différencient dans leur architecture et désignent selon leur position dans les systèmes de communication. On distingue deux types d'antennes, à savoir les antennes d'émission et les antennes de réception. Dans les antennes classiques une seule antenne est utilisée au niveau de l'émetteur et une seule antenne est aussi utilisée au niveau du récepteur. Actuellement, la demande d'augmentation des débits de données continue de croître rapidement, et cela se traduit par une augmentation de la bande passante (augmentation de la capacité). Pour répondre aux demandes de haut débit exigées par les communications mobiles de dernières générations, une solution consiste à augmenter le nombre d'antennes à l'émission, donnant naissance à ce qu'on appelle système multi antenne (en anglais : Multiple input Multiple output (MIMO)).

Dans ce chapitre, nous aborderons deux parties importantes : des généralités sur les antennes et une deuxième partie qui est consacrée aux systèmes MIMO et ses éléments les plus importants.

2.2. Généralités sur les antennes :

2.2.1. Définition de l'antenne [1]

L'antenne est en fait un transformateur qui transforme des signaux électriques (tensions et courants d'une ligne de transmission) en ondes électromagnétiques (champs électriques et magnétiques), ou vice versa.

Il est considéré comme une partie essentielle du système radio, c'est pourquoi il est défini comme un appareil qui peut émettre et recevoir de l'énergie électromagnétique d'une manière efficace et souhaitée, et il est en métal. Le rayonnement d'une antenne peut couvrir une très grande surface, ce qui est bon pour la radiodiffusion télévisuelle et radiophonique et communications mobile.

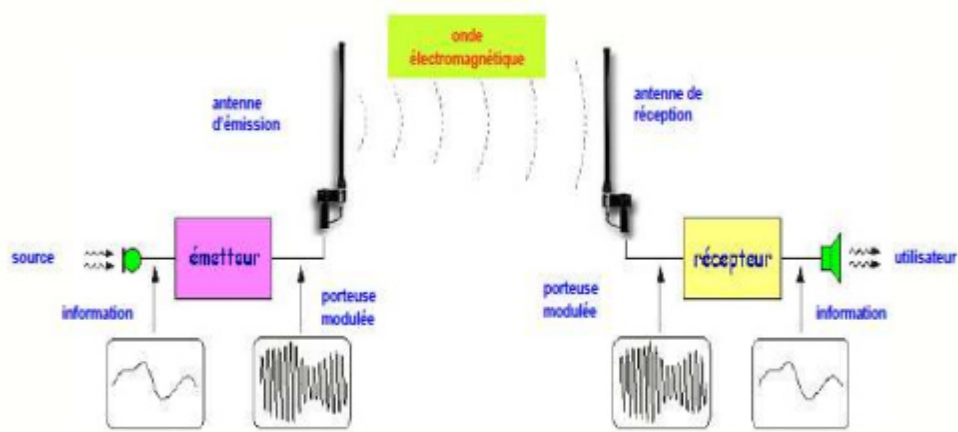


Figure 2.1. Principe de transmission par onde électromagnétique [2].

2.2.2. Le rôle des antennes [3]

2.2.2.1. Antenne d'émission

Afin d'assurer la propagation dans l'air, le générateur d'antenne d'émission convertit l'énergie électromagnétique dirigée depuis le générateur en énergie rayonnée, c'est à dire l'antenne d'émission est un transducteur.

2.2.2.2. Antenne de réception

L'antenne de réception joue le rôle de capteur et de convertisseur de la puissance rayonnée en énergie électromagnétique dirigée.

2.2.2.3. Réciprocité

La réciprocité est l'utilisation de l'antenne en réception ou en transmission en même temps et avec les mêmes caractéristiques de rayonnement, c'est-à-dire qu'il n'y aura presque aucune différence entre le rayonnement en transmission ou en réception et son fonctionnement sera mutuel.

2.2.3. Types d'antennes

Il existe plusieurs types d'antennes.

2.2.3.1. Les antennes filaires [4]

Les antennes filaires sont l'un des types d'antennes qui sont familiers aux gens ordinaires car on les voit presque partout sur les voitures, les bâtiments, etc. Il a deux formes : le fil droit (dipolaire) et la boucle. Les antennes en boucle doivent non seulement être circulaires, elles peuvent être rectangulaires, carrées, etc. Mais l'anneau circulaire est le plus populaire en raison de sa construction simple.



Figure 2.2. Antenne filaire [5].

2.2.3.2. Antenne d'ouverture [4]

Les antennes de ce type sont très utiles pour les applications aéronautiques et spatiales, car elles peuvent être très commodément encastrées dans la peau de l'aéronef ou de l'engin spatial. De plus, ils peuvent être recouverts d'un matériau diélectrique pour les protéger des conditions dangereuses de l'environnement.

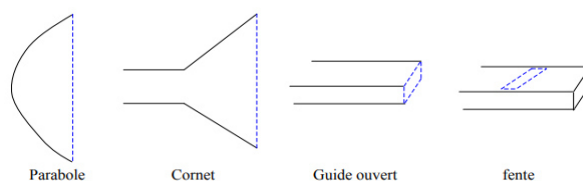


Figure 2.3. Exemples d'antennes d'ouverture [6].

2.2.3.3. Les antennes micro-ruban [4]

Les antennes micro-ruban sont devenues très populaires dans les années 1970, principalement pour les applications spatiales. Aujourd'hui, ils sont utilisés pour des applications gouvernementales et commerciales. Ces antennes consistent en un patch métallique sur un substrat mis à la terre. Les antennes micro-ruban sont à profil bas, s'adaptent aux surfaces planes et non planes, simples et peu coûteuses à fabriquer. Ces antennes peuvent être montées à la surface d'avions, d'engins spatiaux, de satellites, de missiles, de voitures et même de téléphones portables à hautes performances.

2.2.3.4. Les antennes Réseaux [4]

Le terme réseau est généralement réservé à la disposition dans laquelle les radiateurs individuels sont séparés de sorte que le rayonnement des éléments s'accumule pour donner un rayonnement maximum dans une ou plusieurs directions, minimum dans d'autres, ou autrement comme souhaité. Il est utilisé dans des applications à propriétés radioactives.

2.2.3.5. Les antennes réfléchissantes [4]

Les antennes réfléchissantes sont un type d'antenne très sophistiqué. Il est de très grandes dimensions, il permet d'atteindre le gain élevé nécessaire pour transmettre ou recevoir des signaux après des millions de kilomètres de voyage.

2.2.3.6. Les Antennes de Lentilles [4]

Les lentilles sont utilisées pour deux choses : collecter l'énergie divergente résultant d'accidents pour l'empêcher de se propager dans des directions indésirables, et convertir différentes formes d'énergie divergente en ondes planes, en formant correctement la géométrie et en choisissant le matériau de lentille approprié. Ils sont classés selon le matériau à partir duquel ils sont fabriqués ou selon leur forme géométrique.

2.2.4. Les caractéristiques des antennes

Les caractéristiques sont considérées comme une carte d'identification des antennes. Chaque antenne a des caractéristiques qui la distinguent des autres, Il y a deux types de caractéristique.

2.2.4.1. Les Caractéristiques de rayonnement [7]

Les Caractéristiques de rayonnement : sont des propriétés qui se rapportent exactement aux paramètres de l'onde électromagnétique provenant de l'antenne.

a. Diagramme de rayonnement [2]

La représentation graphique de la fonction caractéristique de l'antenne porte le nom de « diagramme de rayonnement ». C'est une représentation du rayonnement en 2D ou 3D de la puissance, du gain ou du champ électrique rayonné à grande distance qui est en fonction de θ (angle de Site : plan vertical) et φ (angle d'Azimut : plan horizontal).

Classiquement, on a pris l'habitude de représenter le diagramme de rayonnement dans deux plans perpendiculaires qui sont : le plan E et le plan H . En réalité, l'énergie rayonnée par une antenne est répartie inégalement dans l'espace, certaines directions sont privilégiées : ce sont les lobes de rayonnement.

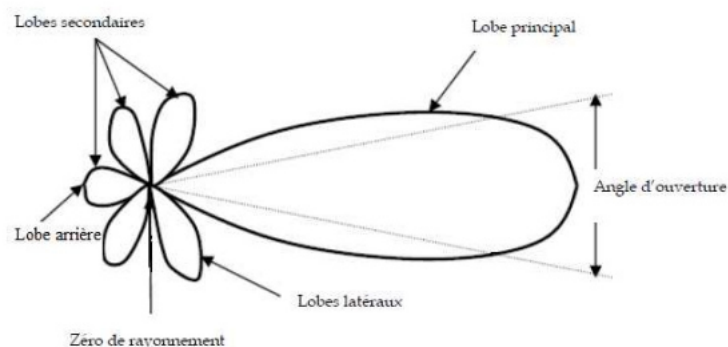


Figure 2.4. Diagramme de rayonnement classique d'une antenne directive.

- Un lobe principal: C'est le lobe de rayonnement contenant le maximum d'énergie et la direction du maximum de rayonnement.

- Un angle d'ouverture: L'angle d'ouverture d'une antenne est l'angle de direction pour lequel la puissance rayonnée est la moitié de la puissance rayonnée dans la direction la plus favorable.
- Des lobes secondaires: Tous les autres lobes sont appelés lobes secondaires. Ils représentent le rayonnement de l'antenne dans les directions indésirables.
- Un lobe arrière (rayonnement arrière): C'est le lobe secondaire présent dans la direction opposée à 180° du lobe principal.

Dans la plupart des systèmes antennaires, les lobes secondaires sont indésirables. Une bonne conception d'antenne doit permettre de minimiser les lobes secondaires.

b. Polarisation [8]

La polarisation est l'orientation physique de l'élément sur l'antenne qui émet réellement l'énergie RF, c'est donc la polarisation des champs rayonnés produits par une antenne, évaluée en champ lointain. Les antennes sont souvent classées comme "à polarisation linéaire" ou "antenne à polarisation circulaire ". Une antenne omnidirectionnelle, par exemple, est habituellement une antenne polarisée verticalement.

c. Efficacité de rayonnement et efficacité totale [8]

L'efficacité d'une antenne appelé aussi efficacité de rayonnement est le rapport de la puissance injectée dans la structure de l'antenne par rapport à la puissance rayonnée par cette même antenne. Une antenne est dite efficace lorsque la plupart de la puissance présente à l'entrée de l'antenne est rayonnée. Une antenne à faible efficacité est obtenue lorsque la plupart de la puissance est absorbée sous forme de pertes à l'intérieur de l'antenne, ou réfléchi en raison de désadaptation d'impédance.

$$\eta_{ray} = \frac{P_{ray}}{P_{in}} \quad (2.1)$$

η_{ray} : L'efficacité de rayonnement de l'antenne.

P_{ray} : La puissance rayonnée.

P_{in} : La puissance d'entrée.

d. Le Gain [9]

Le gain d'une antenne est un paramètre qui prend en compte ses performances électriques pour exprimer sa propriété d'exprimer le rayonnement dans une direction donnée. Le gain d'une antenne peut se définir comme le rapport de la densité de puissance rayonnée par l'antenne sur la densité de puissance rayonnée par l'antenne isotrope de référence, dans la même direction, les deux antennes étant alimentées par la même puissance d'excitation. Le gain peut alors s'exprimer en dBi qui quantifie le gain en décibel et le «i» pour préciser la référence par rapport à une antenne isotrope fictive qui présente un gain de zéro décibel dans l'espace libre. Le gain s'exprime en fonction des angles d'orientation (θ, ϕ) selon l'expression (2.2) :

$$G(\theta, \phi) = \frac{4\pi \cdot U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (2.2)$$

$G(\theta, \phi)$: Le gain de l'antenne.

$U(\theta, \phi)$: La densité de puissance de l'antenne.

P_{in} : La puissance injectée dans l'antenne.

e. Directivité [10]

La directivité D d'une antenne est donnée par le rapport de l'intensité de rayonnement maximale (puissance par unité d'angle solide) $U(\theta, \phi)_{max}$ à l'intensité de rayonnement moyenne U_{moy} (moyenne sur une sphère).

$$D = \frac{U(\theta, \phi)_{max}}{U_{moy}} \text{ (sans dimension)} \quad (2.3)$$

D : La directivité.

$U(\theta, \phi)_{max}$: L'intensité de rayonnement maximale.

U_{moy} : L'intensité de rayonnement moyenne.

2.2.4.2. Les caractéristiques électriques [7]

Les caractéristiques électriques d'une antenne sont les caractéristiques qui font partie d'un circuit électrique.

a. Largeur de bande [11]

La largeur de bande de fonctionnement, nommée aussi bande passante d'une antenne, définit le domaine de fréquences dans laquelle le rayonnement de l'antenne présente les caractéristiques requises. La bande passante d'une antenne peut être donnée comme une largeur de bande de fréquence absolue (en anglais: Absolute Band width (ABW))

$$ABW = f_H - f_L \quad (2.4)$$

Une largeur de bande de fréquence relative (en anglais: Fractional Band width (FBW))

$$FBW = 2 \frac{f_H - f_L}{f_H + f_L} \quad (2.5)$$

f_H : La fréquence maximale.

f_L : La fréquence minimale.

b. L'impédance d'entrée [12]

L'impédance d'entrée Z_{in} est définie comme l'impédance présentée par une antenne à son point d'alimentation, ou le rapport de la tension au courant au point d'alimentation. Il peut être exprimé comme:

$$Z_{in} = R_{in} + jX_{in} \quad (2.6)$$

Z_{in} : Est l'impédance d'entrée de l'antenne.

R_{in} : Est la résistance de l'antenne.

X_{in} : Est la réactance d'antenne.

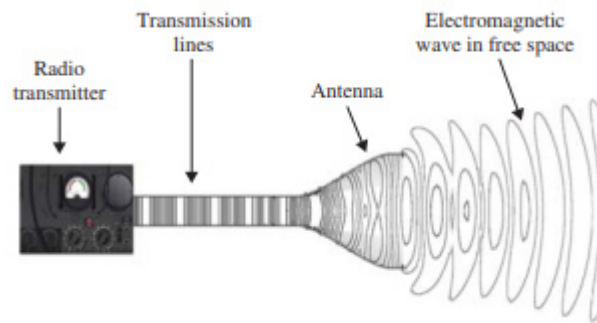


Figure 2.5. Opérations de base d'une antenne d'émission.

2.2.5. Définition de Système MIMO

Le système multi-entrées et/ou multi-sorties (en anglais : Multiple Input Multiple Output(MIMO)), a réussi à susciter beaucoup d'intérêt dans divers applications qui touchent différents domaines tels que les télécommunications, l'automatique et récemment les systèmes radars [13].

Les techniques MIMO sont apparus dans les années 90 grâce à Gerard. J. Foschini. Le but étant d'augmenter le débit et la portée des réseaux sans fil, elles se basent sur l'utilisation de plusieurs antennes aussi bien du côté de l'émetteur que celui du récepteur. La mise en place d'une telle structure permet au système utilisé d'atteindre des débits importants et cela sans changer la largeur de la bande allouée au signal ni sa puissance d'émission [14].

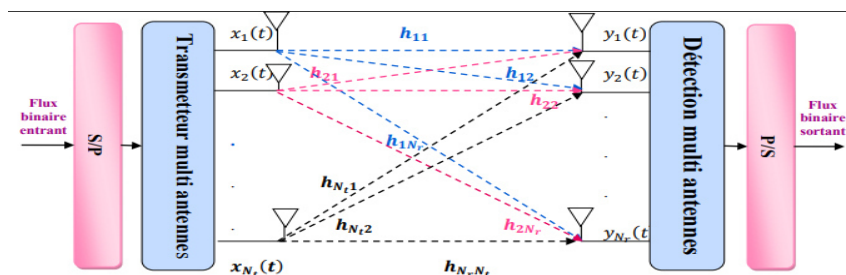


Figure 2.6. Système MIMO [15].

2.2.6. Les Principes du système MIMO

Les systèmes de communication traditionnels étaient basés sur une antenne émettrice et une antenne réceptrice (SISO). Cependant, le développement des services de communication mobile sans fil a nécessité davantage de transmissions de données (augmentation de la capacité de transmission). Ainsi, au lieu d'augmenter la capacité des systèmes SISO et de répondre à ces exigences, ils ont trouvé une meilleure solution, qui est l'utilisation de nombreuses antennes pour l'émission et la réception, appelées MIMO. Le système MIMO tire parti de l'environnement à trajets multiples en utilisant différents canaux de propagation générés par la réflexion et/ou la diffraction des ondes pour augmenter la capacité de transmission. D'où l'avantage d'obtenir des signaux indépendants sur les antennes [16]. Cependant, le signal peut être sujet à des évanouissements, des décalages fréquentiels ou même temporels. Pour améliorer les performances du signal, le système multi antenne utilise des techniques de diversité [14]. La diversité d'antennes est une technique permet de compenser les dégradations liées à la propagation des ondes dans des environnements avec trajets multiples [17].

Pour mettre en place ces améliorations, les systèmes MIMO exploitent les techniques qu'on va les décrire dans les sous sections suivantes.

2.2.6.1. Diversité fréquentielle

La transmission sur différentes longueurs d'ondes fait qu'elles accuseront différents délais et les évanouissements ne se produiront pas aux mêmes fréquences.

2.2.6.2. Diversité temporelle

La transmission est répétée dans le temps mais cela entraîne des délais.

2.2.6.3. Diversité spatiale

L'utilisation de plusieurs antennes qui recevront des signaux avec des trajets et donc des déphasages différents feront en sorte que les évanouissements (s'il en est) ne se reproduiront pas en même temps aux différentes antennes [18].

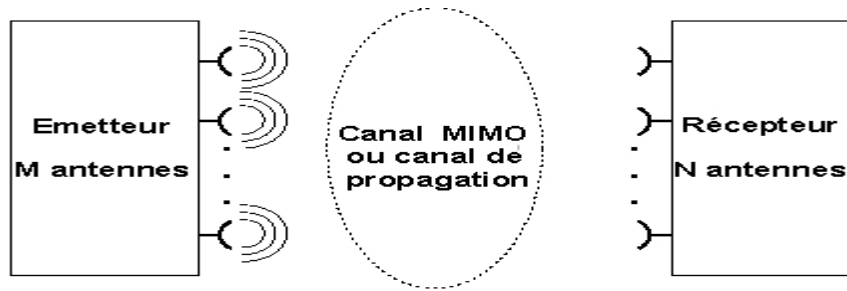


Figure 2.7. Principe du système MIMO [16].

2.2.7. Modèle théorique d'un système MIMO [19]

Un système MIMO comprend à n_t antennes d'émission et n_r antennes de réception comme est représenté dans la Figure 2.8, avec \mathbf{x} un vecteur de n_t symboles.

$$\mathbf{x} = [x_1 \dots x_t \dots x_{n_t}]^T \quad (2.7)$$

Il correspondant aux symboles à transmettre sur chacune des n_t antennes d'émission pendant une durée de symbole T_s , et \mathbf{H} est la matrice du canal de dimension $n_t \times n_r$.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & \dots & h_{1n_t} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{n_r 1} & \dots & h_{n_r n_t} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Correspondant au canal multi-antennes avec $h_{n_r n_t}$ le canal entre $n_t^{\text{ième}}$ antennes d'émission et $n_r^{\text{ième}}$ antennes de réception, et en considérant \mathbf{b} le vecteur de bruit des n_r antennes de réception tel que :

$$\mathbf{b} = [b_1 \dots b_t \dots b_{n_r}]^T \quad (2.9)$$

Alors le vecteur reçu s'exprime de la manière suivante :

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{b} \quad (2.10)$$

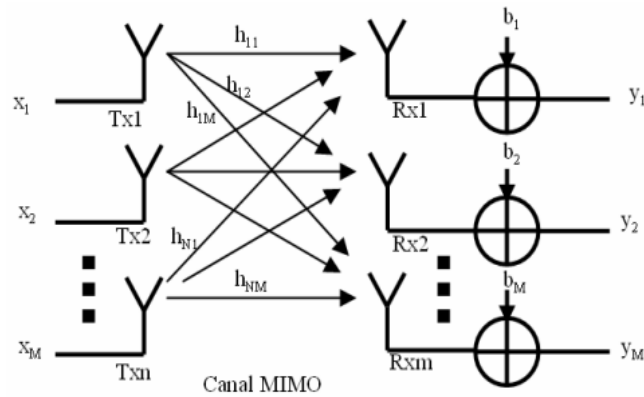


Figure 2.8. Système MIMO $n_t \times n_r$.

On considère généralement que le bruit est négligeable pour pouvoir reconstruire le signal transmis. Ainsi l'expression (2.10) peut s'écrire :

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} \quad (2.11)$$

Connaissant \mathbf{y} et \mathbf{H} , la relation qui permet de reconstruire \mathbf{x} est la suivante :

$$\mathbf{x} = \mathbf{H}^{-1}\mathbf{y} \quad (2.12)$$

Mathématiquement, résoudre cette dernière équation requiert que \mathbf{H} soit inversible ce qui veut dire que \mathbf{H} est de rang plein (sa dimension est égale à son rang). Physiquement, ceci se traduit par des atténuations et des déphasages différents subits par chaque signal transmis. C'est pour cela qu'il est essentiel d'avoir un environnement riche en multi-trajets pour bénéficier pleinement des apports d'un système MIMO.

2.2.8. Types particuliers du MIMO [20]

Nous utilisons le terme MIMO de deux manières différentes.

Au sens large pour désigner un système de communication doté de plusieurs antennes au niveau de l'émetteur, de récepteur ou les deux. Il y a 3 cas.

1. Lorsqu'il existe plusieurs antennes de réception mais une seule antenne d'émission, ce système est appelé système entrée unique et sorties multiples (en anglais : Single Input Multiple Output (SIMO)).

2. Lorsqu'il y a plusieurs antennes à l'émetteur et qu'une seule reçoit, nous appelons ce type de système un système à entrées multiples et sortie unique (en anglais : Multiple Input Single Output (MISO)).
3. Lorsqu'il y a plusieurs antennes à l'émetteur et que plusieurs antennes reçoivent, nous appelons ce type de système un système à entrées multiples et sorties Multiples (en anglais : Multiple Input Multiple Output (MIMO)).

Les deux extrémités du lien large, nous nous référons souvent aux systèmes MISO et SIMO en tant que types particuliers de configurations MIMO.

Au sens d'une manière particulière lorsqu'il s'agit de systèmes qui ont plusieurs antennes aux deux extrémités du lien. Ou d'une autre manière utilise plusieurs antennes à l'émetteur et plusieurs antennes à le récepteur, nous appelons MIMO(en anglais Multiple Input and Multiple Output).

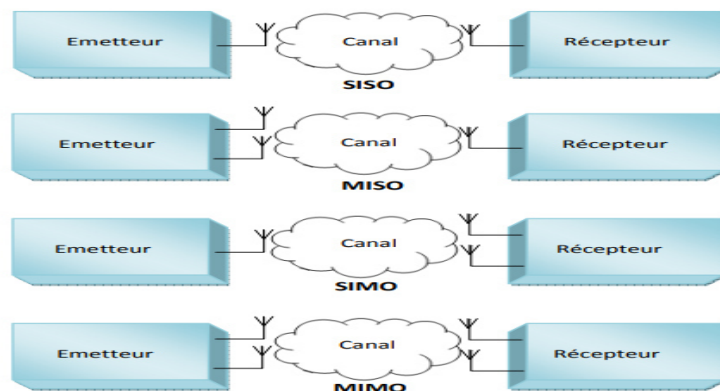


Figure 2.9. Architecture de base des SISO, MISO, SIMO et MIMO [21].

2.2.9. Capacité des systèmes multi-antenne [15]

Le premier intérêt des systèmes MIMO est d'augmenter la capacité. Cette notion de capacité est introduite par Shannon dans les années 40. Elle est définie comme étant le débit maximal possible que peut supporter le canal tout en assurant une probabilité d'erreur très faible. Pour montrer cet intérêt nous allons calculer les capacités des trois systèmes SISO, SIMO, MISO et MIMO, en considérant que le canal est non sélectif en fréquence, inconnu à l'émetteur et avec des coefficients indépendants et identiquement distribués.

2.2.9.1. Capacité du SISO [22]

La capacité de système SISO sans connaissant le CSI est:

$$C = \log_2(1 + \rho \cdot |h_{11}|^2) \text{ Bit/s/Hz} \quad (2.13)$$

ρ : Le rapport signal sur bruit à l'antenne de réception (SNR).

h_{11} : Un gain complexe aléatoire.

2.2.9.2. Capacité du canal MIMO déterministe [23]

Capacité du canal MIMO déterministe Pour un system MIMO avec n_t antennes en émission et n_r antennes en réception, un canal sans fil, invariable dans le temps, à bande étroite peut être représentée par une matrice $\mathbf{H}(n_r \times n_t)$ déterministe $\in \mathbb{C}^{n_r \times n_t}$. Considérons un vecteur de symboles transmis $\mathbf{s} \in \mathbb{C}^{n_t \times 1}$, constitué de n_t symboles d'entrée indépendants s_1, s_2, \dots, s_{n_t} . Alors, le signal reçu $\mathbf{y} \in \mathbb{C}^{n_r \times 1}$ peut être écrit sous forme matricielle comme suite :

$$\mathbf{y} = \sqrt{\frac{E_s}{n_t}} \mathbf{H} \mathbf{s} + \mathbf{z} \quad (2.14)$$

Où $\mathbf{z} = (z_1, z_2, \dots, z_{n_r})^T \in \mathbb{C}^{n_r \times 1}$ est un vecteur bruit, supposé Gaussien complexe symétrique et circulaire à moyenne nulle. On note que le vecteur bruit est décrit comme symétrique circulaire lorsque $e^{j\theta} \mathbf{s}$ à la même distribution que \mathbf{s} quel que soit θ . L'autocorrélation du signal vecteur transmit est définit comme :

$$R_{ss} = E\{\mathbf{s}\mathbf{s}^H\} \quad (2.15)$$

On note que $T_r(R_{ss}) = n_t$ lorsque la puissance transmise au niveau de chaque antenne est supposée égale à 1.

a. Capacité du canal : Cas de CSI connu au niveau de l'émetteur [15]

Dans le cas où l'émetteur a une connaissance de canal, il peut accomplir une méthode de combinaison optimale pendant le processus d'allocation de puissance. Une

des méthodes de calcul de la puissance optimale allouée pour les n_t sous canaux est d'utiliser l'algorithme de Water-filling illustré dans la figure 2.10.

Prenant en considération la supposition de la connaissance de CSI pour l'émetteur, on peut obtenir la formule de la capacité comme suit :

$$C = \sum_{k=1}^n \log_2 \left(1 + \frac{\rho \cdot \gamma_k}{n_t} \varepsilon_k^2 \right) \text{ bit/s/Hz} \quad (2.16)$$

Le coefficient γ_k correspond à la puissance assignée au $k^{\text{ème}}$ sous canal, il est donné par :

$$\gamma_k = E\{|x_k|^2\} \quad (2.17)$$

Et il satisfait la contrainte suivante :

$$\sum_{k=1}^n \gamma_k = n_t \quad (2.18)$$

Le but de l'algorithme de water-filling est de trouver γ_k optimal qui maximise la capacité donnée par l'équation 2.16.

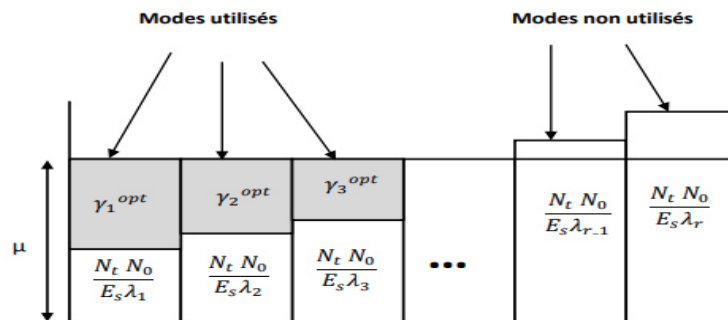


Figure 2.10. Illustration de l'algorithme d'allocation de puissance dit Water-filling.

b. Capacité du canal MIMO en absence du CSI [24]

Lorsque l'information sur le canal n'est pas disponible à l'émetteur, on peut répartir l'énergie également entre tous les antennes d'émission, c'est-à-dire que la fonction d'autocorrélation du vecteur de signal d'émission x est donnée comme :

$$R_{xx} = I_{n_t} \quad (2.19)$$

La capacité du canal MIMO s'exprime selon l'équation(2.20) :

$$C = \log_2(\det [I_{n_r} + (\rho / n_t) \mathbf{H}\mathbf{H}^*]) \quad \text{bit/s/Hz} \quad (2.20)$$

I_{n_r} : La matrice identité de dimension n_r

\mathbf{H} : La matrice du canal est considérée normalisée c'est-à-dire que les éléments de H ont une variance unitaire.

ρ : Le SNR (rapport signal/bruit) au niveau du récepteur.

2.2.9.3. Capacité du canal SIMO [25]

Pour un canal SIMO $n_t = 1$, donc $n = \min(n_r, n_t) = 1$, par conséquent, le CSI au transmetteur n'affecte pas la capacité du canal SIMO.

La formule de capacité peut être exprimée comme suit :

$$\sum_{K=1}^n \varepsilon_K^2 = \sum_{j=1}^{n_r} \sum_{i=1}^{n_t} |h_{i,j}|^2 \quad (2.21)$$

Puis

$$\sum_{K=1}^{n_t} \varepsilon_K^2 = \sum_{j=1}^{n_r} \sum_{i=1}^1 |h_{i,j}|^2 \Rightarrow \varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \dots + \varepsilon_r^2 = n_r \quad (2.22)$$

Cependant, depuis $n_t = 1$, Si l'on considère $|h_{1j}|^2 = 1$ et par conséquent il n'y a qu'un seul $\varepsilon_K^2 \neq 0$. Par conséquent, l'Équation(2.21) prend la forme :

$$\varepsilon_1^2 = n_r \quad (2.23)$$

$$C_{SIMO} = \log_2(1 + \rho \cdot \varepsilon_1^2) \quad \text{bit/s/Hz} \quad (2.24)$$

A par l'équation (2.23) ; on trouve l'équation suivante :

$$C_{SIMO} = \log_2(1 + \rho \cdot n_r) \text{ bit/s/Hz} \quad (2.25)$$

n : Le nombre total des antennes.

n_t : Le nombre des antennes au niveau du l'émetteur.

n_r : Le nombre des antennes au niveau du le récepteur

2.2.9.4. Capacité de canal MISO [25]

Pour un canal MISO $n_r = 1$, donc $n = \min(n_r, n_t) = 1$, Sans CSI au transmetteur, la formule de capacité peut être exprimée comme suit :

$$C_{MISO} = \log_2 \left(1 + \frac{\rho}{n_t} \cdot \varepsilon_1^2 \right) \text{ bit/s/Hz} \quad (2.26)$$

A par l'équation (2.23), on trouve l'équation suivante:

$$\sum_{K=1}^{n_r} \varepsilon_K^2 = \sum_{j=1}^1 \sum_{i=1}^{n_t} |h_{i1}|^2 \Rightarrow \varepsilon_1^2 = n_t \quad (2.27)$$

Donc :

$$C_{MISO} = \log_2(1 + \rho) \text{ bit/s/Hz} \quad (2.28)$$

En comparant l'équation (2.28) et l'équation (2.25), nous concluons

$$C_{SIMO} > C_{MISO} \quad (2.29)$$

Parce que : En effet, l'émetteur, contrairement au récepteur, ne peut pas exploiter le gain du réseau d'antennes car il n'a pas de CSI, et par conséquent, ne peut pas récupérer la direction du récepteur.

2.2.9.5. Capacité dans le cas d'un canal aléatoire [26]

Dans cette partie, on considère que le canal MIMO est aléatoire, ce qui est le cas, généralement. Donc, la matrice du canal \mathbf{H} est aussi aléatoire et sa capacité peut être donnée seulement par sa moyenne temporelle. Souvent, on considère le cas d'un

canal ergodique. La capacité du canal MIMO dans ce cas est donnée par l'équation (2.30):

$$C = E\{\max_{T_r(R_{xx})=n_t} \log_2 \det(I_{n_r} + \frac{E_x}{n_t n_0} \mathbf{H} \mathbf{R}_{xx} \mathbf{H}^H)\} \text{ pbs/Hz} \quad (2.30)$$

2.2.9.6. Capacité de coupure [23]

Une autre notion statistique de la capacité du canal est la capacité de coupure. La capacité de coupure est définie comme :

$$P_{coup}(R) = Pr(C(\mathbf{H}) < R) \quad (2.31)$$

En d'autres termes, le système est dit qu'il est en coupure si la probabilité d'erreur de décodage ne peut pas être rendue petite d'une façon arbitraire avec un taux de transmission de $R \text{ bps/Hz}$. Alors le ε -coupure de la capacité du canal est défini comme le plus large volume de données pour que la probabilité de coupure de l'équation (2.31) soit inférieure à ε autrement dit cela correspond à C_ε tel que:

$$P_r(C(\mathbf{H}) < C_\varepsilon) = \varepsilon \quad (2.32)$$

2.2.10. Avantages de la technologie MIMO [27]

Les avantages de la technologie MIMO qui permettent d'obtenir des gains de performances aussi importants sont le gain de matriciel, le gain de diversité spatiale, le gain de multiplexage spatial et la réduction des interférences. Nous expliquerons brièvement ci-dessous le bénéfice de chaque type de gain que nous avons évoqué.

- Le gain de matriciel améliore la résistance au bruit, améliorant ainsi la couverture et la portée d'un réseau sans fil.
- Le gain de diversité spatiale atténue l'évanouissement, améliorant ainsi la qualité et la fiabilité de la réception.
- Le gain de multiplexage spatial a l'avantage d'augmenter la capacité d'un réseau sans fil.

- La réduction et l'évitement des interférences améliorent la couverture et la portée d'un réseau sans fil.

Cependant, en utilisant la combinaison des avantages à travers un réseau sans fil se traduiront par une capacité améliorée, couverture et fiabilité.

2.2.11. Les Techniques de MIMO [28]

Les techniques MIMO utilisent un réseau d'antennes à l'émission et à la réception. Ces techniques présentent de bonnes performances dans les canaux à trajets multiples, mais ces derniers provoquent aussi les problèmes des interférences entre les symboles transmis (ISI). Les techniques MIMO mises en œuvre se divisent en trois catégories :

2.2.11.1. Technique de diversité spatiale MIMO

La diversité spatiale est une technique adaptée pour lutter contre les effets destructeurs des canaux sélectifs [29]. La diversité spatiale consiste à envoyer le même flux de données simultanément sur les différentes antennes à l'émission. A la réception, plusieurs répliques du signal sont reçues sur chacune des antennes et sont combinées de façon cohérente. La diversité spatiale présente une bonne efficacité quand les sous-canaux MIMO sont décorrélés les uns des autres. De plus, quand le nombre d'antennes à l'émission augmente, la puissance du signal reçu à un instant donné augmente, améliorant ainsi la détection du signal [28].

2.2.11.2. Technique de Multiplexage spatial [19]

Le système MIMO à multiplexage spatial exploite la diversité spatiale pour transmettre plusieurs flux d'information dans la même bande spectrale attribuée. L'information à transmettre est divisée selon le nombre d'antennes émettrices avec un codage canal. Ce codage permettra par la suite d'estimer la matrice \mathbf{H} du canal en réception. Ici les antennes rayonnent d'une manière aveugle sans aucune préférence de direction particulière

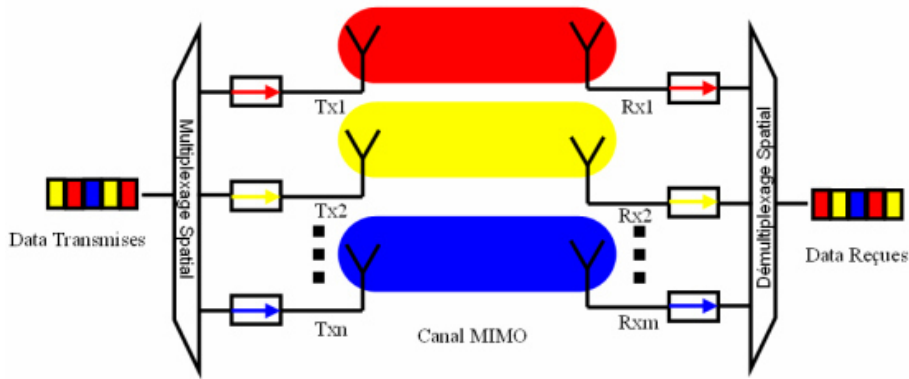


Figure 2.11. Système de transmission MIMO à multiplexage

2.2.11.3. Technique de formation faisceaux (La technique Beamforming) [30]

La formation de faisceaux ou beamforming est une technique de traitement de signal utilisée par les antennes intelligentes pour récupérer ou émettre des signaux dans des directions particulières avec un gain maximum.

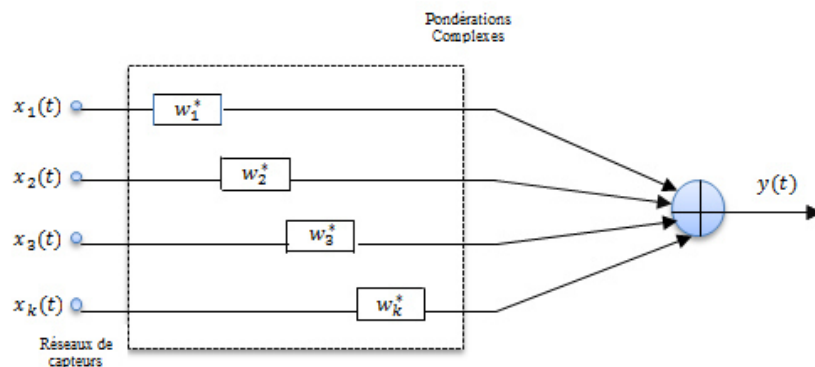


Figure 2.12. Principe de la formation de faisceaux.

On distingue deux types de réseau formateur de faisceaux : le réseau de formation analogique de faisceaux (Analog Beamforming) et le réseau de formation numérique de faisceaux (Digital Beamforming).

2.2.12. Les types de codage MIMO

2.2.12.1. Le multiplexage par répartition de fréquence orthogonale OFDM [31]

Consiste à diviser par un grand nombre de porteuses, le signal numérique que nous voulons envoyer. Pour que les fréquences des porteuses soient aussi proches que possibles et envoient ainsi le maximum d'information sur une partie spécifique de la

fréquence donnée, l'OFDM utilise les porteuses perpendiculaires entre elles. Les signaux des différentes porteuses se chevauchent mais grâce à l'orthogonalité, ils n'interfèrent pas entre eux. Ainsi, dans un environnement multi-trajets où certaines fréquences seront détruites par des perturbations, le système pourra toujours récupérer les informations perdues sur d'autres fréquences porteuses qui n'ont pas été détruites.

2.2.12.2. Le multiplexage par division spatiale [32]

Au cours duquel plusieurs flux de données indépendants (essentiellement des canaux virtuels) sont simultanément multiplexés dans un canal spectral. Le multiplexage par division spatiale (En anglais: Spatial Division Multiplexing (SDM)) peut améliorer le débit de façon significative, car le nombre de données spatiales résolues est plus important. Chaque flux spatial doit disposer de sa propre paire d'antennes de transmission/réception à chaque extrémité du lien radio. Il est important de noter qu'une chaîne de radiofréquences RF et qu'un convertisseur analogique-numérique distincts sont nécessaires pour chaque antenne du système MIMO. Les configurations qui nécessitent plus de deux chaînes d'antennes RF doivent être conçues avec attention pour maintenir des coûts peu élevés tout en répondant aux attentes en matière de performances.

2.2.12.3. Codes Spatio-Temporels en Bloc [33]

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

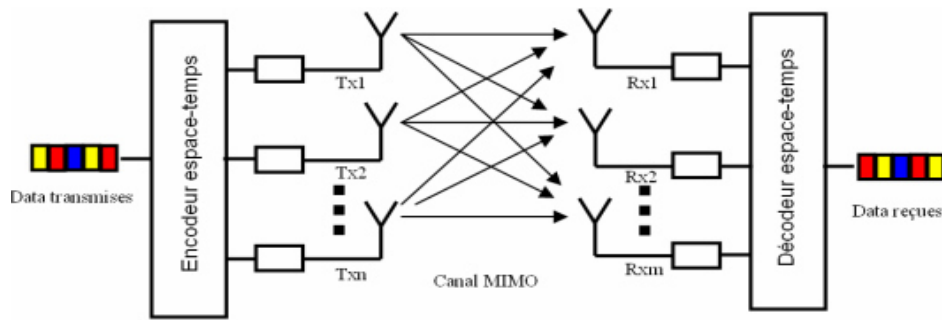


Figure 2.13. Système MIMO à codage espace-temps [19].

2.2.13. Domaine d'utilisation de technologie MIMO

La technologie MIMO est désormais au cœur de nombreuses normes et technologies sans fil de nouvelle génération existantes et émergentes comme :

1. La norme IEEE 802.11 (pour les réseaux locaux sans fil ou WLAN) et Principalement utilise les deux normes du Wi-Fi et sont : IEEE 802.11n et IEEE 802.11ac.
2. La norme IEEE 802.16 (pour réseaux métropolitains sans fil ou WMAN) et utilise essentiellement la norme de WiMax IEEE 802.16e, appelée aussi WiMax mobile.
3. La norme IEEE 802.20 (pour le haut débit mobile accès sans fil ou MBWA).
4. Les normes de téléphonie mobile HSPA⁺, LTE et LTE Advanced.
5. La Free Box v5 HD, ADSL et FAI Free utilisent la technique MIMO Pour transmettre la vidéo HD entre ses deux boîtiers, ainsi que pour la liaison avec les ordinateurs. Le Live box d'Orange utilise aussi du Wi-Fi en mode MIMO 4 × 4 pour connecter le box TV [27, 34].

2.3. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons couvert un panorama général sur les points les plus importants liés aux antennes (leur définition, leurs types et leurs caractéristiques de base), et nous avons également parlé du système MIMO, qui est un pilier de notre travail. Nous avons abordé les points suivants : sa définition, et expliqué la finalité de son utilisation à cause de laquelle le système SISO a été abandonné. Après cela, nous

avons mentionné ses types particuliers, ses principes, ses capacités, ses avantages et ses techniques et ses types de codage le plus utilisée dans ce système, et nous avons également abordé ses domaines d'utilisation.

Le système MIMO est un système plus que merveilleux qui est la dernière révolution dans le monde des communications sans fil, ce mécanisme a ouvert la voie à une amélioration substantielle du débit et de la qualité des liaisons numériques. De par ses nombreux avantages, auxquels s'ajoutent une bande passante limitée et d'une puissance limitée, ils en ont fait une technologie indispensable pour répondre à la demande croissante de données.

2.4. Références Bibliographiques

- [1] HUANG Yi ET BOYLE Kevin, ‘Antennas From Theory to Practice’, John Wiley & Sons, United Kingdom, 2008, ISBN 978-0-470-51028-5.
- [2] AZZAZ RAHMANI Salima, ‘Analyse et Conception Des Antennes Imprees Multi-bandes en Anneaux Concentriques Pour Les Réseaux De Télécommunications’, Thèse de doctorat de l’université Abou BakrBelkaid–Tlemcen, 2013.
- [3] Odile Picon et coll, ‘Les Antennes : Théorie, conception et application’, Dunod, Paris, 2009, ISBN 978-2-10-054245-1.
- [4] Constantine A. Balanis, ‘Antenna Theory Analysis and Design’, John Wiley & Sons, Inc, 2005, ISBN: 0-471-66782-X.
- [5] <https://www.vtt.mg/portfolio/la-plage-amparafara/antenne-filaire/>
- [6] <file:///C:/Users/PC-PC/Downloads/Documents/ouverture.pdf>
- [7] GUELLIL Nasser, ‘Etude et conception d’un réseau d’antennes beamforming à base de la matrice de Butler en utilisant ADS Momentum’, Mémoire de Master de l’université ABBAS –SETIF 1-.
- [8] Souai Sana, ‘Réseaux d’antennes miniatures super directifs reconfigurables basses fréquences pour l’IoT’, thèse de doctorat D’Université Côte d’Azur et de l’université Tunis ELMANAR, 2021.
- [9] NIANG Anna, ‘Antennes miniatures et structures électromagnétiques avec circuits non-Foster’, Thèse de doctorat de l’université Paris-Saclay Préparée à “ de l’université Paris-Sud ”, 2017.
- [10] John D. Kraus, Ronald J. Marhefka, ‘Antennas for All Applications’, McGraw-Hall, Inc, New Delhi, 1988.
- [11] CHAABANE Abdelhalim, ‘ Conception d’une antenne bip large bande a fort gain’, thèse de doctorat de l’Université Ferhat Abbas - Sétif 1, 2017.
- [12] Gao Steven (Shichang), Luo Qi ET Zhu Fuguo, ‘Circularly Polarized Antennas’, John Wiley & Sons, Ltd, United Kingdom, 2014, ISBN: 978-1-118-37441-2.
- [13] ZIANI Djamila, ‘Réseaux d’antennes MIMO ultra large bande pour système radar micro-onde’, Thèse Présentée pour l’obtention du grade de DOCTORAT 3^{ème} Cycle de l’Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –, Spécialité : Télécommunications, 2019.

- [14] BELHOUI Adil, 'Etudes théoriques et expérimentales de systèmes de transmissions MIMO-OFDM Mesures actives en environnements réels et maîtrisés dans un contexte WiMAX', Thèse pour obtenir le grade de Docteur de L'Université de Limoges, Spécialité : Télécommunications, 2009.
- [15] SOFI Naima, 'Etude et optimisation d'un système de communications sans fil MIMO-OFDM pour des applications WIFI et WIMAX', Thèse de Doctorat l'Université Aboubakr Belkaïd Tlemcen, Spécialité : Télécommunications, 2019.
- [16] DIALLO Aliou, 'Systèmes Multi-Antennes Pour Diversité et MIMO', Thèse pour obtenir le titre de Docteur en Sciences spécialité Electronique de l'UNIVERSITE de Nice-Sophia Antipolis, 2007.
- [17] LAHEURTE Jean-Marc, HIMDI Mohamed, 'Petites antennes : communications sans fil et terminaux', Lavoisier, 2011, ISBN : 2746240777, 9782746240773.
- [18] David Bensoussan et Anaïs Le Mouroux, ' Réseaux mobiles et satellitaires : Principes, calculs et simulations', Presses de l'Université du Québec, Canada, 2023, ISBN : 2760551520, ISBN : 9782760551527 (PDF)
- [19] MABROUK Kaïs, 'Conception et réalisation d'un système de Télécommunications MIMO Faisceaux en réception ; Calibrage aveugle du Démodulateur triphasé Zéro-IF et comparaison au démodulateur classique à 2 voies I et Q', Thèse présentée pour obtenir le grade de docteur de l'Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, Spécialité : Electronique et Communications, 2008.
- [20] Jerry R. Hampton, 'Introduction to MIMO Communications', Hardback, New York, ISBN 978-1-107-04283-4.
- [21] Bouchouka Nourdine et Bousbaine Smail, 'Etude de la diversité d'espace et de fréquence dans les transmissions sans fils', Mémoire de MASTER d'université Akli Mohand Oulhadj Bouira, 2017/2018.
- [22] E. Ghayoula, A. Bouallegue, R. Ghayoula et J-Y.Chouinard, 'Capacity and Performance of MIMO systems for Wireless Communications', JOURNAL de Engineering Science and Technology Review, 2014.
- [23] MEHASSOUEL Mustapha, 'APPLICATION DE LA TECHNOLOGIE MIMO A LA 4G DU MOBILE', Mémoire de Magister de l'FERHAT ABBAS –SETIF1-, Spécialité de Communication, 2014.

- [24] Yong Soo Cho, Jaekwon Kim, Won Young Yang, Chung G. Kang, 'MIMO-OFDM WIRELESS COMMUNICATIONS WITH MATLAB', John Wiley & Sons, 2010, ISBN 978-0-470-82561-7 (cloth).
- [25] George Tsoulos, 'MIMO System Technology for Wireless Communications', Taylor & Francis Group, London New York, 2006, ISBN-13: 978-0-8493-4190-8 (0-8493-4190-6).
- [26] AIT T ALEB Hamid, 'MIMO-OFDM POUR LES COMMUNICATIONS SANS-FIL DANS LES MINES SOUTERRAINES', Mémoire Présenté comme exigence Partielle de Maitrise de l'université QUÉBEC en ABITIBI-TÉMISCAMINGUE, 2017.
- [27] Ezio Biglieri, Robert Calderbank, Anthony Constantine's, Andrea Goldsmith Arogyaswami Paulraj et H. Vincent Poor, 'MIMO Wireless Communications', Cambridge University Press, New York, 2007, ISBN-13 978-0-511-26042-1 eBook(EBL), ISBN-10 0-511-26042-3 eBook(EBL), ISBN-13 978-0-521-87328-4 hardback, ISBN-10 0-521-87328-2 hardback.
- [28] RACHINI Ali, 'Etude de la synchronisation temporelle dans les systèmes MIMO-OFDM appliqués aux réseaux mobiles', thèse INSA Rennes sous le sceau de l'Université européenne de Bretagne en cotutelle avec l'Université Libanaise pour obtenir le titre de Docteur de L'INSA de Rennes, Spécialité : Electronique et Télécommunications, 2014.
- [29] MEFTAH Elhadi, Polycopié de cours destiné aux étudiants Master 1 en télécommunication de Matière Communications numériques avancées de l'université Hassiba Benbouali de Chlef, 2018 –2019.
- [30] CHAHBI Ismehene, 'Exploitation des antennes multiples pour l'optimisation dans les réseaux sans fil', Thèse de Docteur de Télécom & Management Sud Paris de l'Université Pierre et Marie Curie, Spécialité : Informatique et Télécommunications, 2014.
- [31] Lynda FARAH, AROUS Yousra, ' Amélioration des performances des systèmes MIMO-OFDM', Mémoire de Master de Université Mohammed Seddik Ben Yahia – Jijel, spécialité de Systèmes des Télécommunications, 2020
- [32] DJEFFAL Aziza et ZINAI Nadia, 'Etude et Realisation d'un simulateur de transmission MIMO-OFDM'. Mémoire de master de l'université de l'ARBI BEN M'HIDI d'OUM EL BOUAGHI, 2018.
- [33] ZERROUKI Hadj, 'CROSS-LAYER DESIGN ET ACCES MULTIPLE DANS LES RESEAUX SANS FIL MIMO: APPLICATION AU RESEAU WIMAX', Thèse de Doctorat de l'université Abou Bekr Belkaid, Spécialité de Télécommunications, 2013.

[34] GONTRAND Christian, 'Systèmes de communication : modulations numériques', ISTE éditions, London, 2020, ISBN : 1784056898, 9781784056896.

CHAPITRE 03

‘Conception d’un Système MIMO_OFDM’

3.1. Introduction

Le système MIMO-OFDM est considéré comme une infrastructure pour les réseaux sans fil pour les générations futures, en particulier pour les futurs systèmes de téléphonie mobile et est l'une des combinaisons les plus importantes réalisées par la science, en raison de sa force et l'efficacité de son fils dans l'utilisation du spectre.

Le système MIMO utilise l'atténuation de canal, qui est un problème majeur de la technologie OFDM, pour augmenter la capacité du réseau et ainsi améliorer les performances de l'OFDM. D'autre part, la technologie OFDM est capable de supporter le grand nombre d'antennes du système MIMO et donc forment un mélange intégré de tous les côtés.

Dans ce travail, nous aborderons les points suivants : un aperçu de la technologie OFDM, puis nous avons parlé des canaux multi_trajet les plus importants dans la transmission MIMO, puis nous nous sommes concentrés sur le système MIMO_OFDM et comment étudier son performance.

3.2. Panorama sur la technologie OFDM

3.2.1. Le principe de base d'OFDM

La technologie OFDM est une technologie de modulation multi-porteuse. Contrairement à la modulation à une seule porteuse, il convertit les flux de données en série en flux de données parallèles et effectue la modulation des données dans différentes sous-porteuses comme est montré dans la figure 3.1 [1].

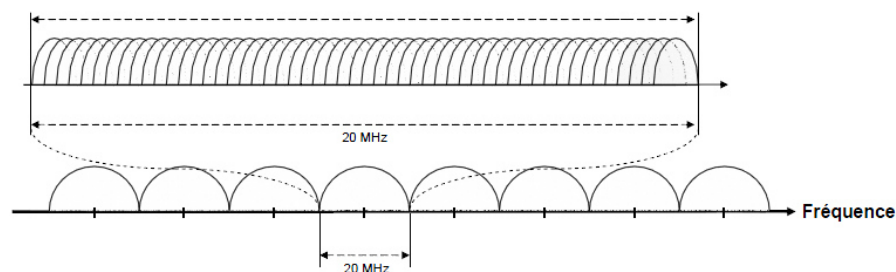


Figure 3.1. Principe de l'OFDM [2].

Cependant, lors de la transmission Les sous-porteurs se chevauchent et exposé à des interférences, et il existe deux types d'interférences, à savoir:

3.2.1.1. Interférence entre symboles (ISI)

On sait également que les signaux OFDM, lorsqu'ils sont émis, parcourent des chemins différents pour parvenir au récepteur, ce qui conduit à créer un retard de durées différentes dans l'arrivée de ces symboles, et ce retard se traduit par ce que l'on appelle des interférents entre symboles (IES).

3.2.1.2. Interférence entre sous porteuses (ICI)

Interférence entre porteuse (IEP) est causée par une perte d'orthogonalité fréquentielle suite à un décalage fréquentiel ce qui se traduit par la présence des symboles de données des sous-porteuses adjacentes dans la sous-porteuse actuelle [3].

Mais grâce à fonctionnalité l'orthogonalité elle a éliminé les interférences de tous types et elles n'interfèrent pas entre elles. L'orthogonalité permet également une haute efficacité spectrale, en effet la bande passante étant quasiment utilisée dans son intégralité [4], ce qui permet d'implémenter une simple implémentation au niveau de le modulateur et le démodulateur à l'aide de FFT (la transformée de Fourier rapide).

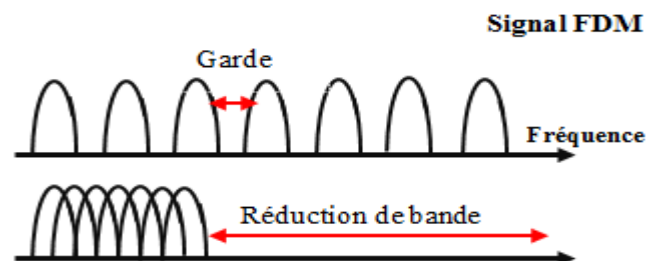


Figure 3.2. Comparaison d'un signal FDM et d'un signal OFDM [5].

L'algorithme FFT minimise le nombre d'opérations requises pour calculer matriciel la transformée discrète de Fourier. La FFT fonctionne pour n'importe quel nombre de points et il est utilisé pour traiter le signal reçu et le convertir en spectre fréquentiel. L'IFFT est l'opération inverse de FFT, On utilise à l'émission pour réaliser le passage du domaine fréquentiel au domaine temporel. La théorie de l'OFDM montre que l'IFFT de grandeur N , appliquée sur N symboles, réalise un signal OFDM, où chaque symbole est transmis sur N fréquences orthogonales. Les symboles sont les symboles de données de type BPSK (en anglais : Binary Phase Shift Keying), QPSK (en anglais: Quadrature Phase Shift Keying), QAM-16 (en anglais : Quadrature Amplitude Modulation), QAM-64 [4,6].

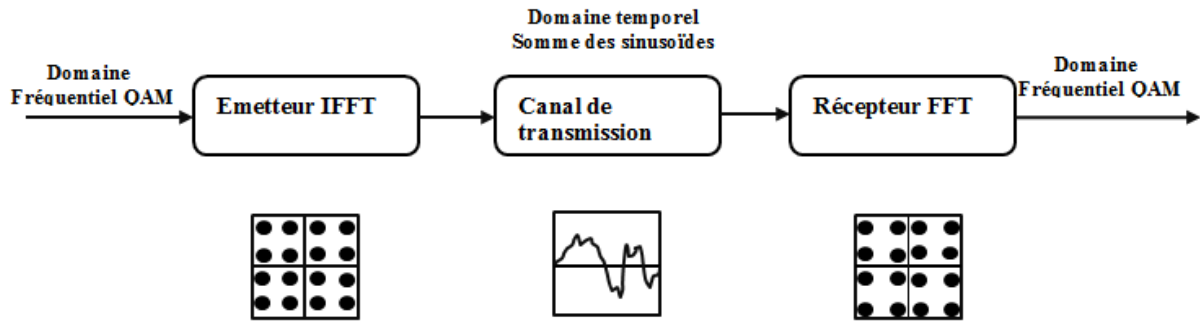


Figure 3.3. Passage du domaine fréquentiel au domaine temporel dans un système OFDM [4].

3.2.2. Le Principe de fonctionnement de l'OFDM [7]

L'OFDM est une technique de modulation dans laquelle des porteuses à faible débit sont combinées par l'émetteur en vue de transmettre un signal résultant haut débit. Implémenter un schéma de transmission multi porteuses en utilisant une accumulation de modulateur parallèle n'est pas vraiment efficace pour un traitement analogique, mais dans le domaine numérique la modulation multi porteuse est facilement implémentée grâce aux systèmes de traitement numérique. Cette technique après l'implémentation offre une grande flexibilité du point de vue du paramétrage et l'adaptabilité aux changements de l'environnement. Dans l'OFDM chaque sous-porteuse est une sinusoïde ayant une fréquence multiple entière de la fréquence de la sinusoïde fondamentale. Ainsi chaque sous-porteuse est comme une composante dans une série de Fourier du signal total. Ces sous-porteuses satisfont au critère d'orthogonalité entre sinusoïdes.

Les sous-porteuses transporteront un bas débit et possèdent une longue durée de symbole. Ceci élimine les interférences. Un bon paramétrage de la technique rend donc le canal radio mobile quasi non sélectif en fréquence et non dispersif en temps. En ajoutant des intervalles de gardes entre données utiles, l'effet du multi trajet est grandement atténué et l'orthogonalité maintenue au niveau du récepteur. Une étude comparative des applications multimédias grande vitesse montre que l'OFDM passe en tête à cause de son coût inférieur de service tout en fournissant bien plus de performances que les autres individuellement. L'expression mathématique d'un symbole OFDM composé de N sous porteuses sur une période T_{eff} (en secondes) est

$$x(t) = \frac{1}{\sqrt{T_{eff}}} \sum_0^{k-1} M_k e^{j2\pi kt/T} , \quad 0 \leq t \leq T_{eff} \quad (3.1)$$

M_k : est le $k^{ième}$ symbole complexe

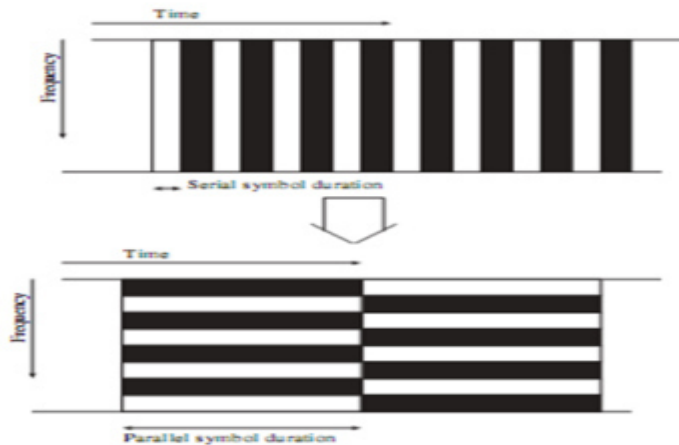


Figure 3.4. Le concept de multi-porteuse et conversion série-parallèle.

3.2.3. Le domaine d'utilisation d'OFDM

En raison de l'importance et avantages de la technique d'OFDM, elle est devenue un pôle d'attraction pour de nombreux systèmes comme les systèmes de radio et télédiffusion numérique et dans les réseaux de communications sans fil.

3.2.3.1. Radio diffusion numérique DAB [8]

Le Radio diffusion numérique (en anglais : digital audio broadcasting (DAB)) est un système de radiodiffusion numérique, C'est la plus avancée dans les systèmes de radiodiffusions, à savoir, les systèmes analogiques à base de la modulation de fréquence FM ou d'amplitude AM. DAB offre une meilleure qualité sonore, plusieurs programmes et services informatifs. Exploitable par des récepteurs fixes, mobiles ou portables, qui utilisent des simples antennes. La bande VHF est une ressource rare, donc il faut une technique de modulation qui exploite le mieux le spectre d'une modulation FM. Ceci est atteint par DAB qui multiplexe plusieurs programmes (d'une PCM 24 KHz/48 KHz) dans un ensemble, de bande passante de 1.536 MHz, où le nombre de programmes par ensemble est flexible et dépend de la largeur du bande requis par chaque programme.

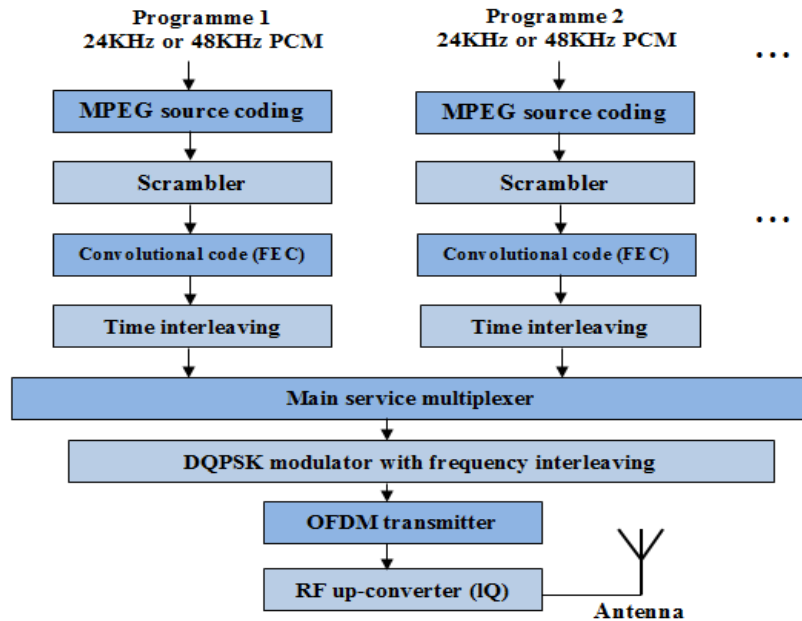


Figure 3.5. Schéma simplifié d'un système de transmission DAB [8].

3.2.3.2. Diffusion vidéo numérique terrestre [9]

Diffusion vidéo numérique terrestre (en anglais: Digital Video Broadcast – Terrestrial (DVB-T)) est la norme de télévision numérique la plus utilisée, partout dans le monde, pour les transmissions de télévision terrestre. Il permet une utilisation beaucoup plus efficace du spectre des fréquences radioélectriques disponibles que les transmissions analogiques classiques.

Le DVB-T fait usage de nombreuses technologies modernes pour lui permettre de diffuser de la vidéo de haute qualité. Un des éléments clés de l'interface radio ou de l'air est le choix du système de modulation. Conformément à de nombreux modes de transmission actuels, le DVB-T utilise l'OFDM.

Bande passante du canal : Il est possible d'adapter la bande passante de la transmission à la bande passante disponible et aux espacements entre les canaux. Trois cas de bande passante sont disponibles (6, 7 ou 8 MHz).

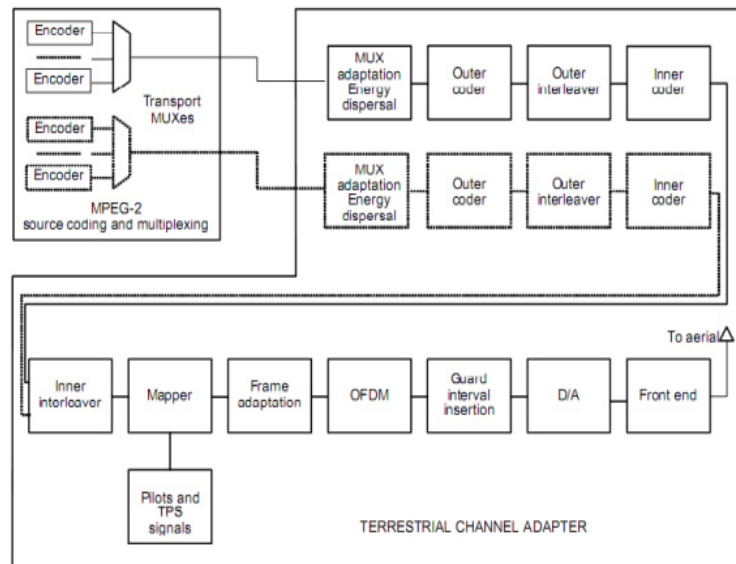


Figure 3.6. Bloc émetteur d'un standard DVB-T [8].

3.2.3.3. Réseaux Local sans fil WLAN (IEEE 802.11) [10]

Un réseau local sans fil (en anglais: Wireless local area network (WLAN)) peut être implémenté comme une extension à un réseau câblé préexistant ou comme une entité indépendante. Chaque ordinateur du réseau sans fil muni d'une carte réseau adéquate peut émettre (et recevoir) des données vers (et depuis) un point d'accès réseau. Deux grandes familles se partagent le domaine des WLAN résultant des travaux menés aux Etats-Unis et en Europe. La première famille est celle du WiFi (en anglais: Wireless Fidelity) nom donné à la norme IEEE 802.11b qui est actuellement la plus populaire pour offrir des débits jusqu'à 11 Mbit/s pour des distances de 10 à 100 m. La seconde famille est celle de l'HiperLAN2 et de IEEE 802.11a basée sur l'OFDM plus robuste aux distorsions sélectives en fréquence du canal, offrant des débits jusqu'à 54 Mbit/s mais au prix d'une complexité plus grande.

Tableau 3.1 : caractéristiques de quelques standards IEEE 802.11 [8].

	Standards IEEE			
	802.11a	802.11b	802.11g	802.11n
Débit maximum	54 Mbps	11 Mbps	54 Mbps	600 Mbps
Fréquence	5 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4/5 GHz
Modulation	OFDM	DSSS	OFDM	OFDM
Cannals (FCC/ETSI)	21/19	11/13	11/13	32/32
Ratification	1999	1999	2003	2009

3.2.3.4. Les réseaux métropolitains sans fil (IEEE 802.16) [11]

Les réseaux métropolitaine sans fil (en anglais : Wireless metropolitan area network (WMAN)) sont déployés pour couvrir une zone plus importante que les réseaux WLAN, par exemple une ville entière. La norme la plus connue dans cette catégorie est le “WIMAX“ ou IEEE 802.16. Le WIMAX (en anglais: World Interoperability for Microwave Access) est une solution pour des connexions sans fil à haut débit sur des zones de couvertures de plusieurs kilomètres à des débits de l'ordre de 70Mbit/s pour une distance de 50 kilomètres.

La norme 802.16-2004 est utilisée et basée sur l'OFDM.

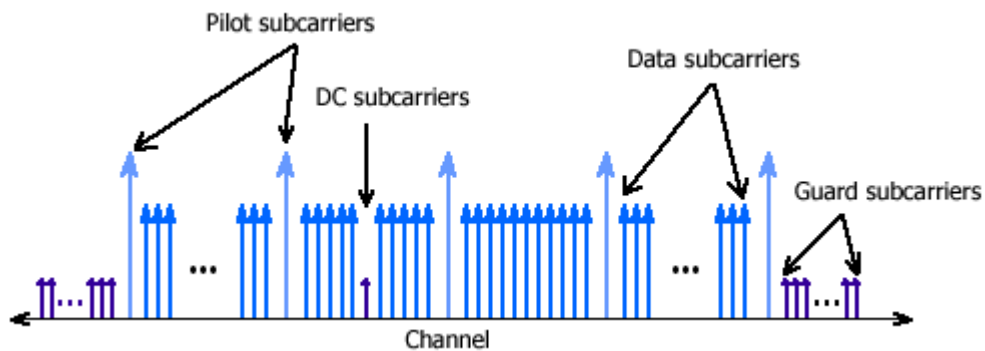


Figure 3.7. La structure des symboles OFDM dans WiMAX [12].

3.3. Les canaux de transmission MIMO [13]

Le multi trajet est un phénomène qui se produit dans les systèmes sans fil en général et dans les systèmes MIMO en particulier qui l'exploitent pour obtenir de bonnes performances en termes de capacité, comme lors de la propagation de l'onde électromagnétique à laquelle il est soumis un grand nombre d'interactions avec l'environnement, à la suite desquelles les ondes empruntent des chemins différents avant d'atteindre le récepteur et ne parcourent pas la même distance et ne sont pas réfléchies sur les mêmes surfaces, de sorte que le même signal atteint le récepteur plusieurs fois et avec différents niveaux d'énergie. La relation entre le signal émis et reçu s'écrit :

$$r(t) = \sum_{i=1}^n c_i s(t - \tau_i) + n(t) \quad (3.2)$$

$s(t)$: Le signal émis.

$n(t)$: Un bruit additif.

$r(t)$: Le signal reçu.

c_i : Le gain complexe du trajet i .

τ_i : Le retard du trajet i .

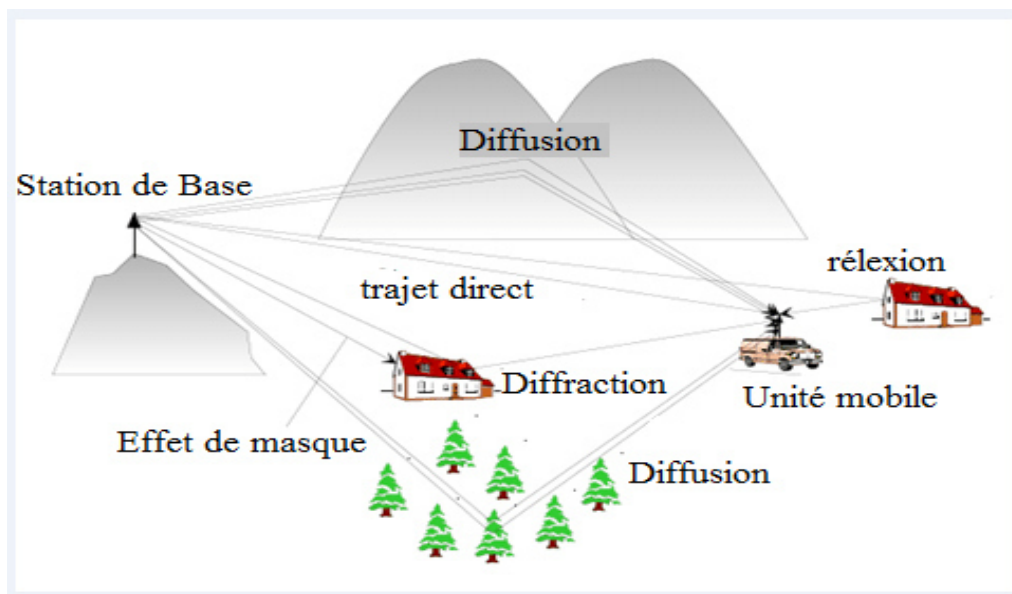


Figure 3.8. La propagation de l'onde avec le phénomène de trajets multiples [14].

Il existe un beaucoup de types de canaux multi trajet. Dans le cadre de notre travail nous nous intéressons aux types de canaux suivants :

3.3.1. Canal gaussien

Le canal gaussien (en anglais : Additive White Gaussian Noise (AWGN)) est le canal statistique le plus simple pour les communications sans fil, mais pas forcément le plus réaliste. Il modélise uniquement le bruit thermique du récepteur comme une variable aléatoire gaussienne de densité de probabilité $P_X(x)$ et s'ajoute au signal utile. Cette variable aléatoire est nommée le bruit blanc additif gaussien (BBAG). Le bruit est dit blanc car il perturbe de façon identique tout le spectre avec une densité spectrale de puissance mono-latérale constante N_0 (W/Hz). Le bruit est alors défini carrément

statistiquement par sa moyenne μ_b nulle et sa variance σ_b^2 (la puissance moyenne des composantes réfléchies) [15].

$$P_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_b^2}} e^{-\left[\frac{x-\mu_b^2}{2\sigma_b^2}\right]} \quad (3.3)$$

Ce canal est décrit par l'équation suivante :

$$r(t) = s(t) + n(t) \quad (3.4)$$

$r(t)$: Le signal reçu

$s(t)$: le signal émis.

$n(t)$: un bruit blanc additif gaussien [16].

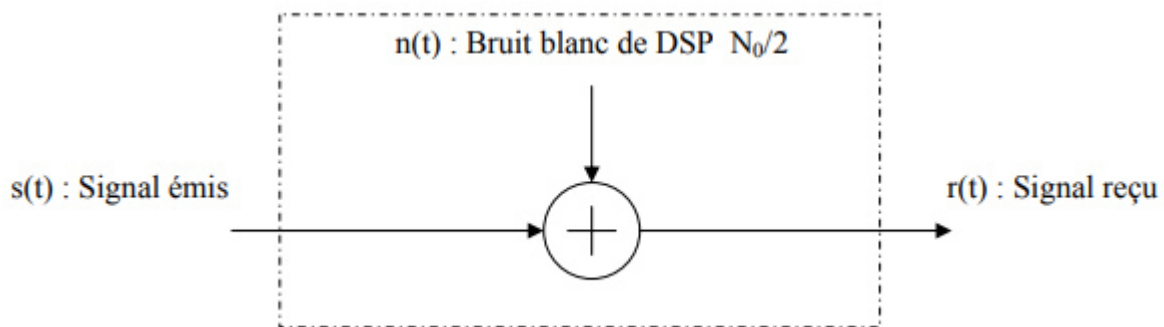


Figure 3.9. Modèle du canal AWGN.

3.3.2. Le canal de Rice [17]

Le canal de Rice se produit quand un trajet puissant existe en plus des trajets dispersés de puissance plus faible. Elle est défini à partir de deux paramètres, le premier paramètre est l'amplitude ou l'enveloppe, de la composante principale nommé écart-type σ . Celle-ci est décrite par la fonction de densité de probabilité $P(r)$ suivante :

$$P(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} \cdot e^{-\left[\frac{r^2+\alpha^2}{2\sigma^2}\right]} \cdot I_0 \frac{r \cdot \alpha}{\sigma^2} & r \geq 0 \\ 0 & r < 0 \end{cases} \quad (3.5)$$

σ^2 : est la puissance moyenne des composantes réfléchies

α^2 : La puissance moyenne de la composante directe

I_0 : représente la fonction de Bessel modifié de première espèce et d'ordre zéro.

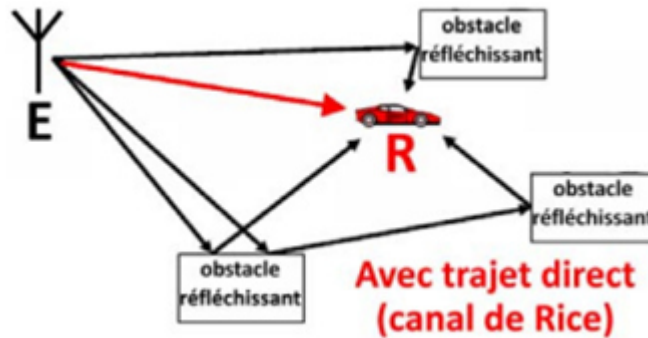


Figure 3.10. Canal Rice [18].

3.3.3. Canal de Rayleigh [19]

Le canal de Rayleigh est un cas particulier du canal de Rice par le fait qu'il ne comporte pas de composante directe. Ainsi, l'enveloppe du signal résultant comporte seulement des composantes réfléchies. Ce canal caractérise essentiellement les milieux urbains, tel le centre-ville de Montréal, où le signal reçu est composé des réflexions du signal émis sur les édifices et les gratte-ciels. De ce fait, en partant de la formule (3.5) et en éliminant la composante directe a , on obtient la loi de Rayleigh. L'enveloppe du signal résultant est obtenue par la fonction de densité de probabilité suivante:

$$P(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} & r \geq 0 \\ 0 & r < 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

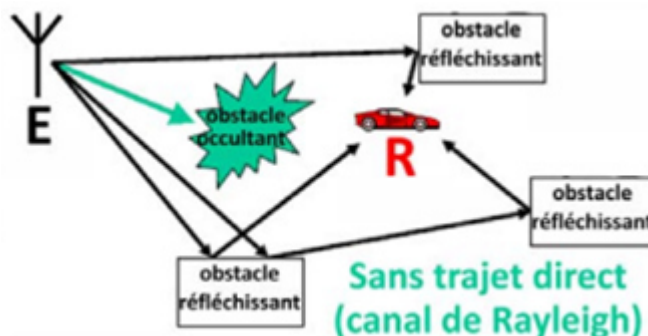


Figure 3.11. Modèle du canal Rayleigh [18].

3.4. Association MIMO-OFDM

Il est à présent reconnu que les systèmes MIMO (multiple input multiple output), Permettent une amélioration de la fiabilité et des débits dans la communication sans fil, et dans autre partie la modulation OFDM permet une approche efficace pour traiter les canaux sélectifs en fréquence. L'association système MIMO et la technique OFDM permet d'exploiter les avantages des deux méthodes : la robustesse de la liaison sur des canaux sélectifs en fréquence pour l'OFDM et la robustesse sur les canaux non corrélés en espace pour les MIMO avec codage [20].

La combinaison MIMO-OFDM peut réduire la complexité du récepteur et fournir une communication à ultra-haut débit et peut atténuer les effets des évanouissements sélectifs en fréquences. Le principe du MIMO-OFDM consiste à appliquer une modulation IFFT et d'une démodulation FFT à chaque antenne d'émission n_t et à chaque antenne de réception n_r , respectivement, la technologie MIMO peut être combinée avec n'importe quel type de modulation, mais des recherches récentes montrent que la combinaison entre un système MIMO et un système OFDM est la plus efficace. La technique MIMO-OFDM utilisée dans la norme IEEE 802.11n, HiperLAN/2 et les systèmes de téléphonie mobile tels que le Wi-Max, 3G et la 4G afin d'augmenter le débit de transmission et améliorer la qualité de transmission [21].

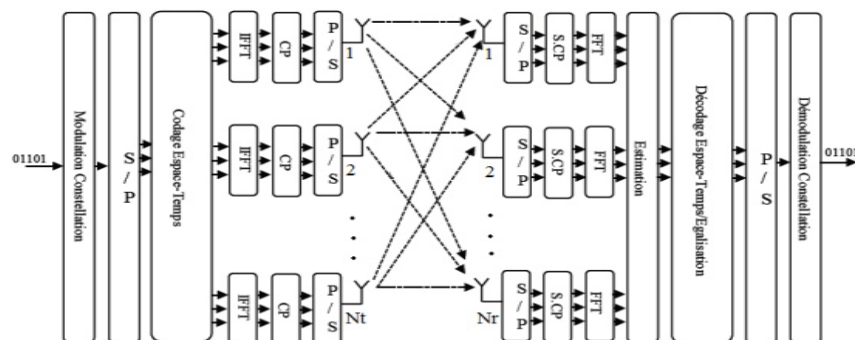


Figure 3.12. Schéma simplifié d'un système MIMO-OFDM avec un codage ST [21].

Les schémas de signalisation utilisés dans les systèmes MIMO basés sur OFDM peuvent être subdivisés en deux catégories principales, le multiplexage spatial et le codage spatiotemporel.

3.4.1. Dans le multiplexage spatial de MIMO-OFDM

Plusieurs flux de données sont transmis simultanément à partir de différentes antennes d'émission dans chaque sous-porteuse de fréquence. Étant donné que tous les signaux porteurs sont orthogonaux les uns aux autres et qu'un (CP) est inséré entre des blocs (OFDM), les signaux de multiplexage spatial n'ont pas de (ISI) dans les domaines temporel et fréquentiel. Ainsi, si ces signaux arrivent au réseau d'antennes du récepteur avec des signatures spatiales suffisamment différentes et que le récepteur dispose d'un (CSI) précis, il peut séparer ces flux en canaux parallèles et décoder le signal émis. Ce schéma augmente le débit du système puisque différentes informations peuvent être transmises simultanément sur plusieurs antennes.

3.4.2. Un code espace-temps (STC)

Le code espace-temps est une méthode utilisée pour améliorer la fiabilité de la transmission de données en utilisant la redondance dans l'espace et dans le temps. Les (STCs) reposent sur la transmission de plusieurs copies redondantes d'un flux de données sur un certain nombre d'antennes dans le but qu'au moins certaines d'entre elles survivent au chemin physique du canal entre l'émission et la réception dans un état suffisamment bon pour permettre un décodage fiable.

Dans MIMO-OFDM, les (STCs) peuvent consister en un codage sur les antennes et les intervalles de temps (OFDM), et il peut également y avoir un codage sur les antennes et les sous-porteuses de fréquence (OFDM) afin d'obtenir un gain de diversité spatiale [22].

3.5. Capacité du système MIMO-OFDM [23]

Il est montré qu'un système MIMO-OFDM en bande de base et avec K sous-porteuses peut être vu comme un système à K branches parallèles et indépendantes d'un système MIMO mono-porteuse.

Pour un système MIMO-OFDM, les données à émettre sont d'abord démultiplexées en n_t voies indépendantes, pour être modulé par un modulateur OFDM sur chaque antenne émettrice, avant d'être émises. Au niveau du récepteur, le signal de chaque sous porteuses est séparé antenne par antenne, à l'aide de n_r démodulateurs OFDM. La capacité du système MIMO-OFDM devient alors :

$$C_{MIMO-OFDM} = \frac{1}{k} \sum_{k=1}^k \xi \log_2(\det[I_{n_r} + \rho_k H_k H_k^*]) \quad (3.7)$$

$C_{MIMO-OFDM}$: La capacité de système MIMO – OFDM .

I_{n_r} : La matrice identité de dimension n_r .

$\xi = T_u/(T_u + \Delta)$: Le tient compte de la perte d'efficacité spectrale dans l'intervalle de garde.

ρ_k : Le SNR (rapport signal/bruit) de la sous-porteuse k.

H_k : La matrice du canal de la sous-porteuse k.

3.6. Les performances MIMO_OFDM

Les performances sont calculées en termes de Taux d'erreur binaire (TEB) ; Le Taux d'erreur binaire (en Anglais: Bit Error Rate (BER)) est un paramètre très important dans les systèmes télécommunications qui mesure le nombre d'erreurs par des données numériques reçues, il fournit une mesure de la qualité du système (indiquant le niveau d'atténuation et/ou de perturbation de la puissance du signal) [20].

$$BER = \frac{\text{nombre des erreurs}}{\text{nombre total de bits envoyés}} \quad (3.8)$$

Ce mécanisme est étroitement lié au rapport signal sur bruit (SNR), et le type de relation entre eux est une relation inverse, car plus la force du BER est élevée, plus le SNR diminue, et vice versa. La formule de BER est exprimée comme :

$$BER = \frac{1}{2} \text{erfc}(\sqrt{SNR}) \quad (3.9)$$

Le rapport signal bruit (en anglais : Signal to Noise Ration (SNR)) est le rapport de la puissance du signal reçu sur la puissance de bruit dans la gamme de fréquence du processus. Un BER élevé entraîne une augmentation de la perte de paquets, augmenter le délai et diminuer le débit. Le SNR est un L'indicateur mesure généralement la clarté du signal dans un circuit ou un canal de transmission filaire/sans fil et mesure en décibel (dB). Le SNR est le rapport entre le signal utile et le bruit de fond indésirable.

$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{noise}} \quad (3.10)$$

SNR : Le rapport signal bruit.

P_{signal} : La puissance du signal reçu.

P_{noise} : La puissance de bruit [24].

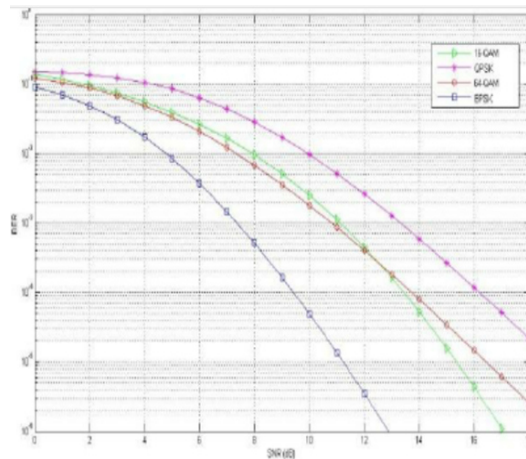


Figure 3.13. BER pour MIMO_OFDM utilisant l'égaliseur ZF pour le canal AWGN [25].

3.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons traité les concepts les plus importants de l'OFDM, de son principe de base, de son principe de fonctionnement et de son implémentation, puis nous avons également défini les canaux multi-trajets utilisés dans la transmission MIMO, et les types les plus importants qui y sont utilisés, qui sont le canal Gaussien et le canal Rice et Rayleigh.

Nous avons également parlé sur La combinaison MIMO-OFDM, et nous avons abordé le but de cette union, sa capacité, et une étude Sa performance est relative aux bits d'erreur binaire (BER)

Enfin, nous disons qu'en raison des avantages et de l'efficacité du système MIMO-OFDM, il ne fait aucun doute qu'il est à la pointe dans le monde des communications sans fil.

3.8. Références bibliographie

- [1] Roguiai Soufiane, Boudjelkha Ala Eddine Et Mokeddem Bahia, 'Analyse des performances de F-OFDM', Mémoire de MASTER de l'université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, Spécialité: Systèmes de télécommunication, 2018-2019.
- [2] <https://igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2010/LTE/ofdm.html>
- [3] ALLAOU safia, 'Simulation et performances d'algorithmes pour l'accès aux ressources à base de F-OFDM', Mémoire de Master de l'université A.MIRA-BEJAIA, Spécialité : Télécommunication, 2019/2020.
- [4] SAMI AGREBI, 'IMPLÉMENTATION FPGA D'UNE FFT À BASE D'ARITHMÉTIQUE LOGARITHMIQUE POUR LES SYSTÈMES OFDM', mémoire de l'université du Québec à Trois_Rivières, 2012.
- [5] https://www.memoireonline.com/10/12/6350/m_Memoire-de-fin-de-cycle-portant-sur-letude-du-WiMAX-comme-technologie-dacces-haut-debit-17.html
- [6] MECHRI Nawal, 'L'effet du turbo codage sur une transmission MIMO-OFDM', Mémoire de master de l'université SAAD DAHLAB de BLIDA, 2012-2013.
- [7] PATRICE GEORGES MANGA, 'ÉTUDE DE PERFORMANCE D'UNE LIAISON SANS FIL OFDM DANS UN CANAL COMPLEXE', Mémoire de l'université du QUÉBEC en ABITIBI-TEMISCAMINGUE, 2012.
- [8] DAHOUMANE Tahar, 'Applications de l'OFDM', Mémoire de mastère de l'Ecole Nationale Polytechnique, 2011-2012.
- [9] BOUKHEDIMI Ikram et HAKIMI Chems-Eddine, 'Implémentation de la technique OFDM sous Matlab© pour les standards Wi-Fi et DVB-T', Mémoire de fin d'études En vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electronique de l' l'Ecole Nationale Polytechnique, 2013.
- [10] BENGHENIA, Abd El Kader et BAKIRE ALI, 'Etude de la capacité du canal de communication et le taux d'erreur binaire (BER) pour un système MIMO-OFDM avec deux types de codage Alamouti et STBC', artical de Conference: CITIMAt de l'Université Abou Bekr Belkaïd. Tlemcen BP 230. 13000 Algérie, 2020.
- [11] GUISSI Yasmine, 'Etude de la technique de gestion d'un réseau sans fil basé sur le standard 802.16', Mémoire de master de l'université A. MIRA BEJAIA, 2012/2013.

- [12] <http://www.conniq.com/WiMAX/fdm-ofdm-ofdma-sofdma-03.htm>
- [13] BOUTAGHANE Massine et AOUDIA Hakim, 'ÉTUDE DE MODÈLES DE CANAUX MIMO STOCHASTIQUES', Mémoire de master de l'université Abderrahmane Mira de Béjaia , 2014.
- [14] https://www.researchgate.net/figure/Les-mecanismes-de-propagations-132-Le-canal-de-propagation-radio-Un-systeme-de_fig1_278644377
- [15] SLIMOUNE Ismail , 'Étude des transmissions MIMO – CDMA', Mémoire de Master de l'UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENAHA JIJEL, 2020 .
- [16] BOUTAGHANE Massine et AOUDIA Hakim, 'ÉTUDE DE MODÈLES DE CANAUX MIMO STOCHASTIQUES', Mémoire de Master l'université Abderrahmane Mira de Béjaia, 2014.
- [17] Hathat Mohamed Elfateh et Aougabi Meriem, 'Performance d'un système de communication sans fils à base de la technique UFMC candidat pour 5G', Mémoire de Master de l'université Kasdi Merbah Ouargla, 2018 .
- [18] https://blog.f6krk.org/wp-content/uploads/2019/02/Trans_num7.pdf
- [19] GIRARD FRANÇOIS, ' PERFORMANCES D'UN LIEN RADIO AÉRIEN', Mémoire de Master de l'université du QUÉBEC , 2001
- [20] DJEFFAL Aziza et ZINAI Nadia, 'Etude et Realisation d'un simulateur de transmission MIMO-OFDM', Mémoire de master de l'université de l'ARBI BEN M'HIDI d'OUM EL BOUAGHI.
- [21] Abdelkader Kheddaoui Mounir et Bekki Aissa, 'Techniques d'émission et de réception dans les systèmes MIMO-OFDM', Mémoire de Master de l'université Djilali Bounaama Khemis Miliana, 2019/2020.
- [22] Boudouaya maria et Ben Salem Nour Elhouda et Bennaceur Besma et Trad Hadjer, 'Etude et simulation des systèmes de MIMO (Application aux systèmes de Cinquième génération)', Mémoire de Master de l'université Echahid Hamma Lakhdar El-Oued, 2022.
- [23] SOFI Naima, 'Etude et optimisation d'un système de communications sans fil MIMO-OFDM pour des applications WIFI et WIMAX', Thèse Présentée de Doctorat 3^{ème} Cycle de l'Université Aboubakr Belkaïd Tlemcen, Spécialité : Télécommunications, 2019.
- [24] Nisha Achra, Mathur Garima et R.P. Yadav, 'Performance Analysis of MIMO OFDM System for Different Modulation Schemes under Various Fading Channels', International

Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering Vol. 2,
Issue 5, May 2013

[25] https://www.researchgate.net/figure/BER-for-MIMO-OFDM-using-ZF-Equalizer-for-AWGN-channel_fig3_273321085

CHAPITRE 04

‘Simulations et discussions’

4.1. Introduction

Après l'étude théorique que nous avons exposée dans les chapitres précédents de ce mémoire, nous avons considéré la technologie OFDM, ses bases et ses avantages, ainsi que le système MIMO et le but de son utilisation, qui est similaire à d'autres systèmes multi-antennes. Le concept d'incorporer ces deux systèmes en un seul système appelé système MIMO-OFDM a révolutionné le monde des communications sans fil, et cette fusion est considérée comme un modèle précieux qui ne doit pas être négligé.

Ce chapitre commencera par comparer les systèmes multi-antennes en termes de capacité. Nous examinerons comment l'augmentation du nombre d'antennes affecte la capacité du canal. Ensuite, nous examinerons et comparerons les performances des systèmes SISO-OFDM et MIMO-OFDM.

Nous utilisons MATLAB pour mettre en œuvre les systèmes considérés et obtenir les résultats nécessaires pour expliquer le principe de notre travail et le but de le faire.

4.2. Comparaison des capacités de canal des systèmes SISO, SIMO, MISO et MIMO

Le tableau 4.1 indique le nombre d'antennes dans l'émetteur et le récepteur ainsi que l'expression de la capacité de canal pour chaque système afin de faire la distinction entre les capacités des systèmes SISO, SIMO, MISO et MIMO :

Tableau 4.1 le nombre des antennes dans l'émission et réception des systèmes multi antenne.

Les types des systèmes multi antenne	Le nombre des antennes dans l'émetteur	Le nombre des antennes dans le récepteur	L'expression du la capacité (bit/s/Hz)
SISO	1	1	$C_{SISO} = \log_2(1 + \rho \cdot h_{11} ^2)$
SIMO	1	2	$C_{SIMO} = \log_2(1 + \rho \cdot n_r)$
MISO	2	1	$C_{MISO} = \log_2(1 + \rho)$
MIMO	2	2	$C_{MIMO} = \log_2(\det [I_{n_r} + (\rho / n_t) HH^*])$

Les résultats de simulations sont montrés dans la figure 4.1.

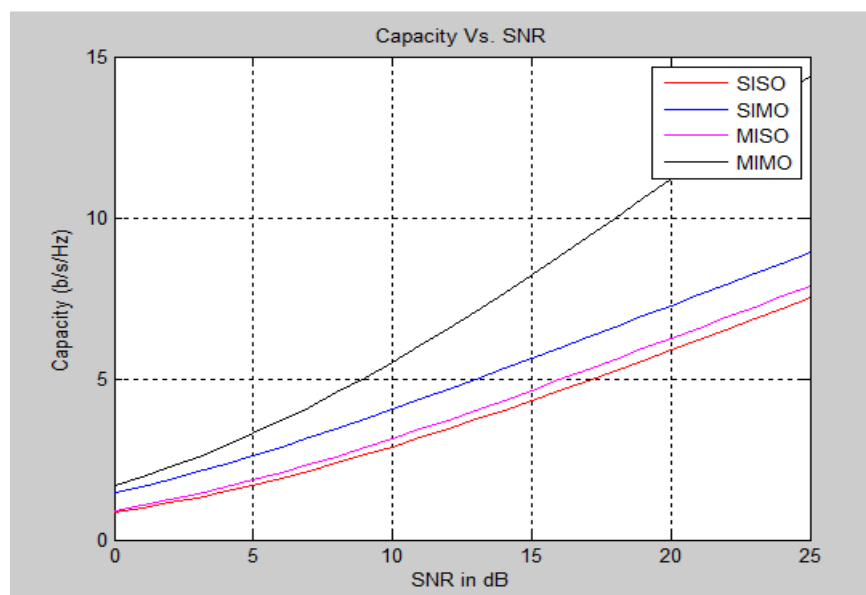


Figure 4.1. La comparaison entre la capacité SISO, SIMO, MISO, MIMO.

4.3.1. Discussion

La figure 4.1. Présente la variation de la capacité de canal de chaque système SISO, SIMO, MISO et MIMO en fonction du rapport signal sur bruit (SNR) qui prend des valeurs dans l'intervalle [0, 25] (dB). Il est clair d'après cette figure que la capacité du canal pour les 04 systèmes augmentation avec l'augmentation du SNR.

Le tableau 4.2 présente les valeurs des capacités, correspondantes aux différents systèmes, en fonction des différentes valeurs du SNR.

Tableau 4.2 le changement des capacités de canal SISO, SIMO, MISO, MIMO en fonctionné par le SNR.

SNR (dB)	Capacité de SISO (bit/s/Hz)	Capacité de SIMO (bit/s/Hz)	Capacité de MISO (bit/s/Hz)	Capacité de MIMO (bit/s/Hz)
0	0.85	1.43	0.93	1.7
5	1.5	2.5	1.75	3
10	2.7	4	3	5.4
15	4.1	5.5	4.5	8
20	6	7.3	6.1	11.25
25	7.5	8.9	7.95	14.5

D'après ce tableau, nous remarquons que

- $C_{MIMO} > C_{SIMO} > C_{MISO} > C_{SISO}$

À une valeur de 5dB, les capacités des différents systèmes prennent les valeurs $C_{SISO} = 1.5$ (bit/s/Hz) , $C_{SIMO} = 2.5$ (bit/s/Hz), $C_{MISO} = 1.75$ (bit/s/Hz), $C_{MIMO} = 3$ (bit/s/Hz)

Pour un SNR =25dB, $C_{SISO} = 7.5$ (bit/s/Hz) , $C_{SIMO} = 8.9$ (bit/s/Hz), $C_{MISO} = 7.95$ (bit/s/Hz), $C_{MIMO} = 14.5$ (bit/s/Hz) .

Les valeurs des capacités des systèmes SISO et MISO sont très proches les unes des autres, et la différence entre elles sont négligeable. La différence entre les valeurs des capacités des systèmes MIMO et SIMO n'est pas très significative. Par

conséquence, nous pouvons considérer que les systèmes SISO et MISO sont de performances similaires, et même chose pour les systèmes MIMO et SIMO. Le système MIMO est le meilleur parmi tous les autres systèmes en terme de capacité de canal.

Dans ce qui suit nous présentons les résultats des simulations, permettant d'étudier l'effet de l'augmentation du nombre d'antenne, que ce soit dans l'émetteur que dans le récepteur, dans un système MIMO sur la capacité de ce dernier. Les résultats des simulations sont présentés dans la figure 4.2.

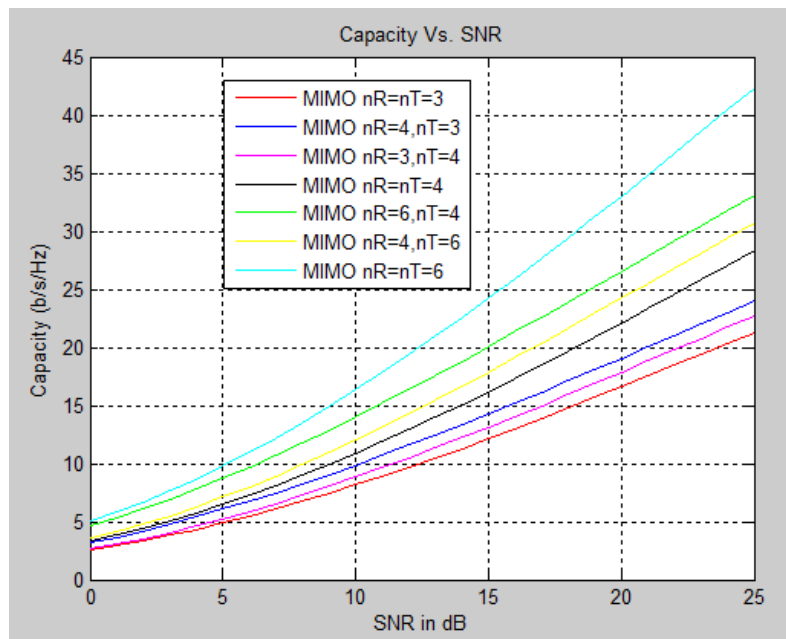


Figure 4.2 les capacités du canal MIMO pour différents nombre d'antenne.

La figure (4.2) présente les capacités du canal MIMO pour différents nombre d'antenne et en fonctionnée du SNR.

Il est clair d'après cette figure que les valeurs prises par les capacités obtenues pour les différents nombre d'antennes, augmente proportionnellement avec les valeurs du SNR. Plus le nombre d'antennes utilisées n'augmente, plus la capacité du système MIMO augmente dans l'intervalle [0, 25] (dB).

Tableau 4.3 la capacité de canal MIMO en fonction du nombre d'antennes.

La capacité (Bit/s/Hz) SNR (dB)	$C_{n_r=n_t=3}$	$C_{n_r=4,n_t=3}$	$C_{n_r=3,n_t=4}$	$C_{n_r=n_t=4}$	$C_{n_r=6,n_t=4}$	$C_{n_r=4,n_t=6}$	$C_{n_r=n_t=6}$
0	2.51	3.17	2.64	3.37	4.62	3.56	5.02
10	8.25	10	9	11	14	12	16.5
25	21.5	23.94	22.76	28.5	33	30.75	42.26

D'après le tableau 4.3, il est clair que :

$$C_{n_r=n_t=6} > C_{n_r=6,n_t=4} > C_{n_r=4,n_t=6} > C_{n_r=n_t=4} > C_{n_r=4,n_t=3} > C_{n_r=3,n_t=4} > C_{n_r=n_t=3}$$

D'après les figures. 4.1et 4.2, nous pouvons conclure que plus le nombre d'antennes dans l'émetteur et le récepteur est élevé, plus la capacité du canal est élevée, surtout lorsque le nombre d'antennes des deux côtés est le même. Il est préférable que le nombre d'antennes du récepteur soit supérieur au nombre d'antennes de l'émetteur pour garantir une meilleure capacité de canal, ce qui confirme la validité de l'expression du deuxième chapitre (2.29).

4.3. Implémentation de Système MIMO-OFDM

L'implémentation du système SISO-OFDM est la méthode la plus facile et la plus simple d'implémentation pour MIMO-OFDM, comme illustré ci-dessous.

4.3.1. Simulation d'un système SISO basé sur l'OFDM

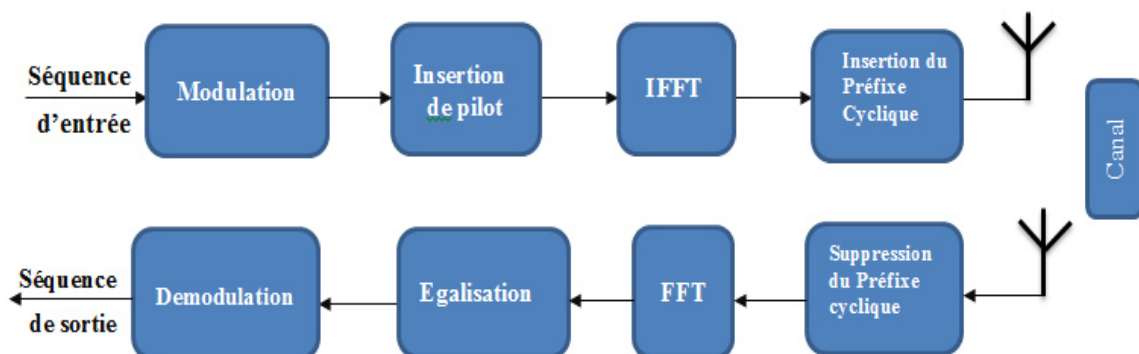


Figure 4.3 le schéma bloc de système SISO_OFDM.

4.3.1.1. Description du système SISO_OFDM

a. Séquence D'entrée

La séquence d'entrée est formée de symboles appartenant à un ensemble fini définie par l'ordre de la modulation utilisée. Pour le cas la BPSK l'ordre de la modulation $M = 2$, et par conséquent la séquence d'entrée est binaire $\{0, 1\}$. Pour le cas de la QPSK $M = 4$, et par conséquent la séquence d'entrée $\{0,1,2,3\}$. D'une façon générale, la séquence de l'entrée correspondante à une modulation d'ordre M est $\{0, \dots, M - 1\}$.

b. Modulation

Les types de modulation utilisée sont les modulations PSK et QAM notamment, le BPSK, QPSK, 16QAM et 64QAM.

$$x_{BPSK} = [1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0]$$

$$X_{BPSK} = [-1.0000 + 0.0000i \ 1.0000 + 0.0000i \ -1.0000 + 0.0000i \ 1.0000 + 0.0000i \ -1.0000 + 0.0000i \ 1.0000 + 0.0000i \ -1.0000 + 0.0000i \ 1.0000 + 0.0000i \ -1.0000 + 0.0000i \ -1.0000 + 0.0000i \ -1.0000 + 0.0000i \ 1.0000 + 0.0000i \ 1.0000 + 0.0000i \ 1.0000 + 0.0000i \ -1.0000 + 0.0000i]$$

$$x_{QPSK} = [3 \ 0 \ 2 \ 1 \ 3 \ 3 \ 1 \ 0 \ 3 \ 1 \ 2 \ 3 \ 3 \ 2 \ 0 \ 1]$$

$$X_{QPSK} = [-0.0000 - 1.0000i \ 1.0000 + 0.0000i \ -1.0000 + 0.0000i \ 0.0000 + 1.0000i \ -0.0000 - 1.0000i \ -0.0000 - 1.0000i \ 0.0000 + 1.0000i \ 1.0000 + 0.0000i \ -0.0000 - 1.0000i \ 0.0000 + 1.0000i \ -1.0000 + 0.0000i \ -0.0000 - 1.0000i \ -0.0000 - 1.0000i \ -1.0000 + 0.0000i \ 1.0000 + 0.0000i \ 0.0000 + 1.0000i]$$

$$x_{16QAM} = [15 \ 3 \ 9 \ 7 \ 14 \ 12 \ 7 \ 0 \ 13 \ 7 \ 9 \ 12 \ 14 \ 11 \ 2 \ 6]$$

$$\begin{aligned}
 X_{16QAM} = & [0.9239 - 0.3827i \quad 0.3827 + 0.9239i \quad -0.9239 - 0.3827i \\
 & - 0.9239 + 0.3827i \quad 0.7071 - 0.7071i \quad -0.0000 - 1.0000i \\
 & - 0.9239 + 0.3827i \quad 1.0000 + 0.0000i \quad 0.3827 - 0.9239i \\
 & - 0.9239 + 0.3827i \quad -0.9239 - 0.3827i \quad -0.0000 \\
 & - 1.0000i \quad 0.7071 - 0.7071i \quad -0.3827 - 0.9239i \quad 0.7071 \\
 & + 0.7071i \quad -0.7071 + 0.7071i]
 \end{aligned}$$

x_{64QAM}

$$= [60 \quad 14 \quad 38 \quad 31 \quad 57 \quad 48 \quad 29 \quad 1 \quad 52 \quad 28 \quad 39 \quad 50 \quad 58 \quad 47 \quad 11 \quad 25]$$

$$\begin{aligned}
 X_{64QAM} = & [0.9239 - 0.3827i \quad 0.1951 + 0.9808i \quad -0.8315 - 0.5556i \quad - \\
 & 0.9952 + 0.0980i \quad 0.7730 - 0.6344i \quad -0.0000 - 1.0000i \quad -0.9569 + \\
 & 0.2903i \quad 0.9952 + 0.0980i \quad 0.3827 - 0.9239i \quad -0.9239 + 0.3827i \quad - \\
 & 0.7730 - 0.6344i \quad 0.1951 - 0.9808i \quad 0.8315 - 0.5556i \quad -0.0980 - \\
 & 0.9952i \quad 0.4714 + 0.8819i \quad -0.7730 + 0.6344i]
 \end{aligned}$$

c. Insertion de pilot

Les pilotes sont utilisés pour estimer le canal pour ensuite, appliquer l'IFFT sur les sous-porteuses informatives.

d. IFFT

La Transformée de Fourier rapide inverse est un processus dans lequel toutes les sous-porteuses sont converties du domaine fréquentiel au domaine temporel, généralement $N_{FFT} = 64$ porteuse.

e. Insertion du Préfixe cyclique

On sait aussi que les sous-porteuses sont fréquemment exposées à des interférences, notamment des interférences entre symboles (ISI), et pour les protéger, on introduit le préfixe cyclique (CP) au début d chaque symbole, car ce dernier permet de combattre les interférences (ISI), ou plutôt à les éliminer.

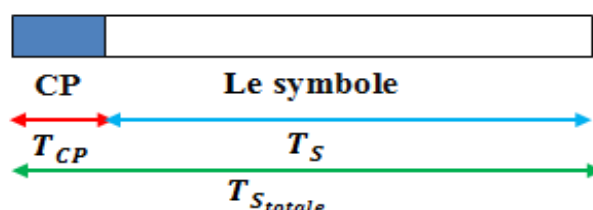


Figure 4.4 Insertion du préfix cyclique.

Donc la durée totale du symbole est :

$$T_{S_{totale}} = T_S + T_{CP} \quad (4.1)$$

f. Antenne d'entrée

Antenne d'entrée est un transformateur qui convertit le courant électrique en ondes électromagnétiques.

g. Le canal

C'est un passage où un support, dans lequel une quantité d'informations est transférée en fonction de sa bande passante de l'émetteur au récepteur. Nous avons choisi le type de canal de type ; Rayleigh.

h. Antenne de sortie

C'est un appareil qui capte le signal émis par l'émetteur et convertit également les ondes électromagnétiques reçues en courant électrique.

i. Suppression du Préfixe cyclique

Dans ce bloc, le préfixe cyclique de chaque symbole est supprimé.

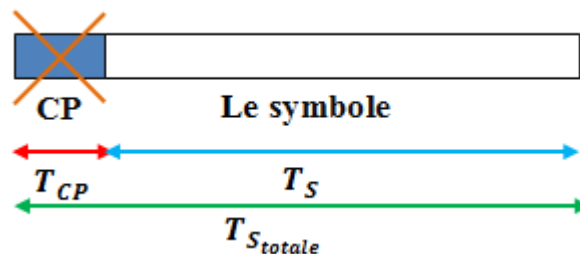


Figure 4.5. Suppression du préfix cyclique.

Donc la durée du symbole égal :

$$T_S = T_{S_{totale}} - T_{CP} \quad (4.2)$$

j. FFT

La Transformée de Fourier rapide est un mécanisme dans lequel toutes les sous-porteuses sont converties du domaine temporel au domaine fréquentiel.

k. Egalisation

C'est une étape très importante, car il s'agit de Corriger les changements et éliminer toutes les influences qui ont affecté les informations lors de leur transmission

dans le canal. D'une autre manière, l'égalisation est un processus d'élimination et de réduction sélective de fréquence.

1. La démodulation

Les types de modulation utilisée sont les modulations PSK et QAM notamment, le BPSK, QPSK, 16QAM et 64QAM.

$$Y_{BPSK} = [-1.0000 + 0.0000i \quad 1.0000 + 0.0000i \quad -1.0000 + 0.0000i \quad 1.0000 + 0.0000i \quad -1.0000 + 0.0000i \quad 1.0000 + 0.0000i \quad -1.0000 + 0.0000i \quad 1.0000 + 0.0000i \quad -1.0000 + 0.0000i \quad 1.0000 + 0.0000i \quad -1.0000 + 0.0000i \quad 1.0000 + 0.0000i \quad -1.0000 + 0.0000i \quad 1.0000 + 0.0000i \quad -1.0000 + 0.0000i \quad 1.0000 + 0.0000i]$$

$$y_{BPSK} = [1 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0]$$

$$Y_{QPSK} = [-0.0000 - 1.0000i \quad 1.0000 + 0.0000i \quad -1.0000 + 0.0000i \quad 0.0000 + 1.0000i \quad -0.0000 - 1.0000i \quad -0.0000 - 1.0000i \quad 0.0000 + 1.0000i \quad 1.0000 + 0.0000i \quad -0.0000 - 1.0000i \quad 0.0000 + 1.0000i \quad -1.0000 + 0.0000i \quad -0.0000 - 1.0000i \quad -0.0000 - 1.0000i \quad -1.0000 + 0.0000i \quad 1.0000 + 0.0000i \quad 0.0000 + 1.0000i]$$

$$y_{QPSK} = [3 \quad 0 \quad 2 \quad 1 \quad 3 \quad 3 \quad 1 \quad 0 \quad 3 \quad 1 \quad 2 \quad 3 \quad 3 \quad 2 \quad 0 \quad 1]$$

$$Y_{16QAM} = [0.9239 - 0.3827i \quad 0.3827 + 0.9239i \quad -0.9239 - 0.3827i \quad -0.9239 + 0.3827i \quad 0.7071 - 0.7071i \quad -0.0000 - 1.0000i \quad -0.9239 + 0.3827i \quad 1.0000 + 0.0000i \quad 0.3827 - 0.9239i \quad -0.9239 + 0.3827i \quad -0.9239 - 0.3827i \quad -0.0000 - 1.0000i \quad 0.7071 - 0.7071i \quad -0.3827 - 0.9239i \quad 0.7071 + 0.7071i \quad -0.7071 + 0.7071i]$$

$$y_{16QAM} = [15 \quad 3 \quad 9 \quad 7 \quad 14 \quad 12 \quad 7 \quad 0 \quad 13 \quad 7 \quad 9 \quad 12 \quad 14 \quad 11 \quad 2 \quad 6]$$

$$Y_{64QAM} = [0.9239 - 0.3827i \quad 0.1951 + 0.9808i \quad -0.8315 - 0.5556i \quad -0.9952 + 0.0980i \quad 0.7730 - 0.6344i \quad -0.0000 - 1.0000i \quad -0.9569 +$$

$$\begin{aligned}
 &0.2903i \ 0.9952 + 0.0980i \ 0.3827 - 0.9239i \ -0.9239 + 0.3827i \ - \\
 &0.7730 - 0.6344i \ 0.1951 - 0.9808i \ 0.8315 - 0.5556i \ - 0.0980 - \\
 &0.9952i \ 0.4714 + 0.8819i \ - 0.7730 + 0.6344i]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &y_{64QAM} = \\
 &[60 \ 14 \ 38 \ 31 \ 57 \ 48 \ 29 \ 1 \ 52 \ 28 \ 39 \ 50 \ 58 \ 47 \ 11 \ 25]
 \end{aligned}$$

m. Séquence de sortie

La séquence de sortie est formée de symboles appartenant à un ensemble fini selon le types de modulation utilisé, et nous le mentionnerons ci-dessus et ses séquences de sortie.

Pour le cas la BPSK : La séquence de sortie est binaire $\{0, 1\}$.

Pour le cas de la QPSK : la séquence de sortie $\{0,1,2,3\}$.

Pour le cas de la 16QAM : La séquence de sortie

$$\{0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15\}$$

Pour le cas de la 64QAM : La séquence de sortie

$$\{0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15, \dots, 59,60,61,62,63\}$$

Tableau 4.4. Les paramètres de système SISO-OFDM.	
Les Paramètre du système	Les Caractéristiques
La technique de modulation	OFDM
Le type de Modulation	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM
Le nombre de symboles OFDM	1
Le nombre de sous porteuses OFDM	64
La taille de FFT/IFFT	64

La durée du préfixe cyclique(CP)	8
le type de système multi_antenne	SISO
Le nombre d'antenne à l'émission	1
Le nombre d'antenne à la réception	1
Le type de canal	Rayleigh

4.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons utilisé MATLAB pour mener une étude comparative des systèmes SISO-OFDM, SIMO-OFDM, MISO-OFDM et MIMO-OFDM. Nous avons évalué leurs performances en termes de capacité pour diverses antennes et différents niveaux de rapport signal sur bruit (SNR). Nos résultats ont montré que les systèmes MIMO-OFDM sont nettement plus puissants que les autres configurations. Cela est dû au fait que le MIMO-OFDM peut tirer parti de la diversité spatiale offerte par les antennes multiples, ce qui permet une meilleure utilisation du spectre et une amélioration significative des performances en général. De plus, nous avons constaté que la capacité des systèmes SIMO-OFDM, MISO-OFDM et MIMO-OFDM a augmenté en raison de l'augmentation du nombre d'antennes. En ce qui concerne le SNR, nous avons découvert que tous les systèmes avaient des performances meilleures à mesure que le SNR augmentait. Cependant, par rapport aux autres configurations, le MIMO-OFDM a démontré une résilience supérieure aux effets de bruit.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Dans ce mémoire, nous avons présenté l'idée de combiner l'OFDM avec un système MIMO pour améliorer ses performances, et ce mélange est devenu une source de force dans les systèmes de communication sans fil qui ne peuvent pas être abandonnés. Nous avons présenté quatre chapitres, chaque chapitre traitant d'un sujet spécifique.

Le premier chapitre traite de la notion de multiplexage et de ses variétés. Nous avons discuté des principes fondamentaux de la technologie OFDM, de son fonctionnement et de la façon de calculer ses performances, ainsi que de ses avantages et de ses inconvénients.

Le deuxième chapitre traite une étude du système MIMO, où nous avons commencé par rappeler la définition des antennes, leurs types et leurs caractéristiques les plus importantes. Nous avons abordé la partie principale qui est le système MIMO. Nous avons expliqué son principe fondamental, ses types, ses avantages et les méthodes pour calculer sa capacité.

Le troisième chapitre a donné une brève introduction à la technologie OFDM. Ensuite, nous avons discuté du concept de multi-trajet et des types de transmission utilisés dans les systèmes MIMO. Enfin, nous avons présenté la combinaison MIMO-OFDM, qui combine les avantages des deux technologies mentionnées dans les chapitres précédents. De plus, nous avons noté sa capacité et la façon dont on peut calculer ses performances notamment le calcul du BER.

Dans le quatrième chapitre, nous avons simulé et extrait les résultats en utilisant MATLAB, puis nous les avons interprétés en comparant les capacités des systèmes MIMO et SISO, etc. Une comparaison des performances MIMO-OFDM et SISO-OFDM a été faite en utilisant pour chaque système divers types de modulation tels que BPSK, QPSK, QAM-16 et QAM-64.

Depuis sa création et jusqu'à nos jours, le système MIMO-OFDM a été la base de tous les réseaux sans fil, et il le restera inévitablement à l'avenir en raison de ses nombreux avantages.