

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Djilali Bounaama Khemis Miliana



Faculté des Sciences et de la Technologie Département de Technologie

Mémoire du Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme de

Master

En

« Télécommunications »

Option :

« Systèmes de Télécommunications »

Titre :

**Techniques d'émission et de réception dans les systèmes
MIMO-OFDM**

Réalisé par :

Abdelkader Kheddaoui Mounir

Bekki Aissa

Encadré par :

Mr. Naar Djilali

Année Universitaire: 2019/2020

Remerciements

Nous remercions tout d'abord le grand Dieu pour l'achèvement de ce mémoire.

Nous exprimons nos gratitude à Monsieur le président de jury d'avoir accepté examiné ce mémoire.

Nous remercions Messieurs les membres de jury, d'avoir accepté de prendre part à ce jury ainsi que pour l'intérêt qu'ils l'ont portés à ce travail.

Nous remercions Monsieur Naar Djilali, notre encadreur, pour ses conseils et suggestions avisés qui nous aidés à mener à bien ce travail, et d'avoir rapporté à ce mémoire ces remarques et conseils.

Résumé

Les systèmes multi-antennes MIMO (Multiple Input Multiple Output) sont de plus en plus étudiés du fait de leur bonne efficacité spectrale sur les canaux riches en diffuseurs, tels que ceux des réseaux locaux sans fil ou des communications mobiles urbaines sans fil. Une autre technique pour augmenter l'efficacité spectrale des communications sans fil, La technique OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) qui utilise un ensemble de sous porteuses orthogonales pour transmettre l'information (multiplexage fréquentiel) dans les canaux sélectifs en fréquence.

Pour les différentes configurations de systèmes multi-antennes SISO, SIMO, MISO, MIMO liés au codage OFDM et STBC, une étude comparative a été réalisée.

Cette étude montre que la combinaison MIMO-OFDM-STBC peut améliorer considérablement les performances par rapport aux autres systèmes.

L'association du MIMO à l'OFDM permet d'exploiter à la fois le multiplexage spatial apporté par le système MIMO et le multiplexage fréquentiel apporté par l'OFDM afin d'assurer la robustesse de liaison.

Mots clés : MIMO, OFDM, STBC,

Abstract

Multiple Input Multiple Output (MIMO) multi-antenna systems are increasingly being studied because of their good spectral efficiency on broadcast-rich channels, such as local wireless networks or urban wireless mobile communications. Another technique to increase the spectral efficiency of wireless communications, the OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) technique, which uses a set of orthogonal subcarriers to transmit information (frequency multiplexing) in selective channels in frequency.

For the different configurations of SISO, SIMO, MISO, MIMO multi-antenna systems related to OFDM and STBC coding, a comparative study was carried out.

This study shows that the combination of MIMO-OFDM-STBC can significantly improve performance compared to other study cases.

The association of the MIMO with the OFDM makes it possible to exploit both the spatial multiplexing provided by the MIMO system and the frequency multiplexing provided by the OFDM to ensure the robustness of the link.

Keywords: MIMO, OFDM, STBC.

Table de Matière

Remerciements.....	i
Résumé.....	ii
Abstract.....	iii
Table de Matière.....	iv
Liste des figures.....	vii
Liste des tableaux.....	ix
Liste des abréviations.....	x
Introduction générale.....	1

Chapitre 1

Généralités sur l'OFDM

1.1 Introduction.....	3
1.2 Historique d'OFDM.....	3
1.3 Fonctionnement de l'OFDM.....	6
1.4 Modulation et Démodulation d'OFDM.....	6
1.4.1 Modulations multi porteuses.....	6
1.4.2 Principe des modulations multi porteuses.....	7
1.4.3 Types de Modulation.....	7
1.4.3.1 Modulation de phase (BPSK).....	7
1.4.3.2 Modulation QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying).....	8
1.4.3.3 Modulation QAM (Quadrature Amplitude Modulation).....	8
1.4.4 Principe de modulation.....	9
1.4.5 Principe de la démodulation.....	10
1.4.6 Implantation numérique.....	11
1.4.6.1 Implantation numérique du modulateur.....	11
1.4.6.2 Implantation numérique du démodulateur.....	12
1.4.7 Orthogonalité.....	13
1.4.8 Intervalle de garde.....	13
1.4.9 Schéma final d'OFDM.....	14
1.5 Avantages et Inconvénients d'OFDM.....	14
1.5.1 Avantages d'OFDM.....	14
1.5.2 Inconvénients d'OFDM.....	15

1.6 Conclusion	15
----------------------	----

Chapitre 2

Les systèmes multi-antennes MIMO

2.1 Introduction	16
2.2 Introduction des systèmes multi-antennes MIMO	16
2.3 Principe de la technique MIMO :	17
2.3.1 Diversité spatiale MIMO :	18
2.3.2 Multiplexage spatial MIMO	18
2.3.3 MIMO - Beamforming (formation de faisceau)	18
2.4 Modélisation des différents canaux du système MIMO	19
2.4.1 Système SISO	19
2.4.2 Système SIMO	19
2.4.3 Système MISO	20
2.4.4 Système MIMO	21
2.5 Capacité d'un canal MIMO	22
2.5.1 Gain de multiplexage spatial	24
2.5.2 Gain de diversité spatiale	24
2.6 Techniques d'émission MIMO sans codage de canal	24
2.6.1 Codage espace-temps	24
2.6.1.1 Codes espace-temps en treillis STTC	25
2.6.1.2 Codes espace-temps en blocs STBC	26
2.6.1.2.1 Le code d'Alamouti	26
2.6.1.2.1.1 Cas d'une antenne de réception ;	27
2.6.1.2.1.2 Cas de deux antennes à la réception	28
2.6.2 Codage St en couches	29
2.6.2.1 H-BLAST	29
2.6.2.2 D-BLAST	30
2.6.2.3 V-BLAST	30
2.7 Techniques d'émission MIMO avec codage de canal	31
2.7.1 Système d'émission ST-BICM	31
2.7.1.1 HE-LST (Horizontal Encoding - Layered Space Time)	31
2.7.1.2 DE-LST (Diagonal Encoding - Layered Space Time)	31
2.7.1.3 VE-LST (Vertical Encoding - Layered Space Time)	32

2.8 Techniques de réception	32
2.8.1 Forçage à Zéro (ZF)	33
2.8.2 Minimisation de l'erreur quadratique moyenne (MMSE).....	33
2.8.3 Maximum de vraisemblance (ML)	33
2.8.4 Récepteur V-BLAST	34
2.8.5 Récepteur BICM-MIMO	35
2.9 Association MIMO-OFDM	36
2.10 Conclusion	37

Chapitre 3

Tests et résultats de simulation

3.1 Introduction	37
3.2 Système SISO-OFDM	37
3.2.1 Simulation et interprétation	38
3.2.2 Performances du système SISO-OFDM.....	44
3.3 Système MIMO-OFDM.....	45
3.3.1 Influence du canal	45
3.3.2 Influence de la taille de FFT (NFFT)	46
3.3.3 Influence de la valeur du cyclique préfixe	47
3.3.4 Influence des différents types de modulation	49
3.3.5 Influence du Type de mapping	50
3.4 Comparaison entre les schémas d' Alamouti (2x1; 2x2) et MRC (1x2)	52
3.5 Conclusion	53
Conclusion générale	55
Bibliographie	57
Annexe	62

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1. 1: Principe de L'OFDM [1]	6
Figure 1. 2: Modulation BPSK [2]	8
Figure 1. 3: Modulation QPSK	8
Figure 1. 4: Constellation de la modulation QAM-16.....	9
Figure 1. 5: Schéma de principe d'un modulateur	10
Figure 1. 6: Schéma de principe du démodulateur OFDM.....	11
Figure 1. 7: Modulateur OFDM numérique	12
Figure.1. 8: Démodulateur OFDM numérique	12
Figure 1. 9: Spectre du signal OFDM pour 8 porteuses	13
Figure 1. 10: Schéma bloc d'un système OFDM.....	14

Chapitre 2

Figure 2. 1: Schéma d'un système de transmission sans fil MIMO.....	17
Figure 2. 2: Système SISO.....	19
Figure 2. 3: Système SIMO	20
Figure 2. 4: Système SIMO	20
Figure 2. 5: Système MIMO	21
Figure 2. 6: Capacité des systèmes SISO, MIMO [21]	23
Figure 2. 7: Schéma du codage spatio-temporel [1].....	25
Figure 2. 8: Types de codes espace-temps.....	25
Figure 2. 9: Schéma de la méthode d'Alamouti d'un système MISO 2x1 [29]	27
Figure 2. 10: Schéma de la méthode d'Alamouti d'un système MIMO 2x2 [29]	28
Figure 2. 11: Structure H-BLAST [19]	29
Figure 2. 12: Structure D-BLAST [19]	30
Figure 2. 13: Structure V-BLAST [19]	30
Figure 2. 14: Structure de la technique HE-LST [21].....	31
Figure 2. 15: Structure de la technique DE-LST [21].....	32
Figure 2. 16: Structure de la technique ST-BICM [21].....	32
Figure 2. 17: Performances des cinq principaux récepteurs MIMO	35
Figure 2. 18: Schéma du récepteur BICM-MIMO non itératif.....	35
Figure 2. 19: Schéma simplifié d'un système MIMO-OFDM avec un codage ST [45]	36

Chapitre 3

Figure 3. 1: Schéma d'un système SISO-OFDM.....	37
Figure 3. 2: Symboles complexes de la modulation Q-PSK en B	38
Figure 3. 3: Réponse temporelle du signal OFDM en (C).....	39
Figure 3. 4: Réponse temporelle du signal en (D)	40
Figure 3. 5: Réponse temporelle du signal en (E).....	40

Figure 3. 6: Signal OFDM transmis après l'ajout de bruit en (F)	41
Figure 3. 7: Signal OFDM après élimination du bruit par un filtre passe bas de Butterworth en (G)	42
Figure 3. 8: Signal OFDM reçu à temps discret en (H).....	43
Figure 3. 9: Constellation des symboles reçus et symboles de la Q-PSK en (I).....	43
Figure 3. 10: Performances du système SISO-OFDM en fonction de BER.....	44
Figure 3. 11: Performances du système MIMO-OFDM sur les canaux AWGN et Rayleigh.....	45
Figure 3. 12: Performances du système MIMO-OFDM pour différents taille de FFT	47
Figure 3. 13: Performances du système MIMO-OFDM pour différents valeur du cyclique préfixe	48
Figure 3. 14: Performances du système MIMO-OFDM pour différents états de modulation	50
Figure 3. 15: Performances du système MIMO-OFDM pour différents type de mapping	51
Figure 3. 16: Comparaison des performances entre la technique MRC et Alamouti .	52

Liste des tableaux

Chapitre 2

Tableau 2. 1: Notations des signaux émis d'un système MIMO avec codage d'Alamouti.....	26
--	----

Chapitre 3

Tableau 3. 1: Paramètres du système SISO-OFDM.....	44
Tableau 3. 2: Paramètres du système MIMO-OFDM pour différents NFFT	46
Tableau 3. 3: Paramètres du système MIMO-OFDM pour différentes taille de CP...	48
Tableau 3. 4: Paramètres du système MIMO-OFDM pour différents états de modulation	49
Tableau 3. 5: Paramètres du système MIMO-OFDM pour différents type de mapping	51
Tableau 3. 6: Paramètres utilisés pour différents schémas	52

Liste des abréviations

3G : 3ème Génération

3GPP : 3rd Generation Partnership Project

4G : 4ème Génération

ADSL : Asymmetric Digital Subscriber Line

AM : Modulation d'amplitude

AWGN : Additive White Gaussian Noise

BER : Bit Error Rate

BLAST : Bell Laboratories Layered Space-Time

CCETT : Centre Commun d'Etudes de Télécommunications et Télédiffusion

COFDM : Coded Orthogonal Frequency-Division Multiplexing

CSI : Channel State Information

DAB : Digital Audio Broadcasting

D-BLAST : Diagonal- Bell Laboratories Layered Space-Time

DE-LST : Diagonal Encoding - Layered Space Time

DVB : Video Broadcasting-Terrestrial

EBU : European Broadcasting Union

ETSI : European Telecommunications Standards Institute

FFT : Fast Fourier Transform

FM : Modulation de Fréquence

H-BLAST : Horizontal- Bell Laboratories Layered Space-Time

HE-LST : Horizontal Encoding - Layered Space Time

HF: Haute Fréquence

HiperLAN : Hiper Local Area Network

HSPA+ : Evolved High-Speed Packet Access

IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineers

IFFT : Inverse Fast Fourier Transform

ISI : Inter-Symbol Interference

LTE : Long Term Evolution

MIMO : Multiple Input Multiple Output

MISO : Multiple Input Single Output

ML : Maximum likelihood

MMSE : Minimum Mean Squared Error

MTC : Multi Tone Channel

NOSTBC : Non Orthogonal Space-Time Block Codes

OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OSTBC : Orthogonal Space-Time Block Codes

PM : Modulation De Phase

QSTBC : Quasi-orthogonal Space-Time Block Codes

SIMO : Single Input Multiple Output

SISO : Single Input Single Output

SNR : Signal to Noise Ratio

ST : Space Time

STBC : Space-Time Block Codes

ST-BICM : Space time-Bit Interleaved Coded Modulation

STTC : Space-Time Trellis Codes

UMTS : Universal Mobile Telecommunication System

V-BLAST : Vertical- Bell Laboratories Layered Space-Time

VE-LST : Vertical Encoding - Layered Space Time

Wi-Fi : Wireless Fidelity

WiMax : Worldwide Interoperability for Microwave Access

ZF : Zéro Forcing

OSIC: Ordered Successive Interference Cancellation

Introduction générale

Introduction générale

Ces dernières années, afin de répondre aux besoins du marché des télécommunications, le nombre de systèmes de communication sans fil a fortement augmenté, de sorte que les services fournis aux utilisateurs continuent de croître et de s'adapter aux besoins des utilisateurs. Face à la croissance d'un certain nombre d'utilisateurs, des services de plus en plus rapides sont nécessaires et en même temps une certaine qualité de service doit être garantie. Par conséquent, il est nécessaire d'envisager de nouvelles technologies à très haute efficacité spectrale, capable de fournir des débits de données élevés et une capacité d'utilisation élevée. En plus de haut débit, nous proposons la technique MIMO-OFDM.

En 1996, des chercheurs ont mis au point une nouvelle technique permettant d'augmenter la vitesse de transmission en utilisant des réseaux d'antennes pour la transmission et la réception. Cette technique est basée sur MIMO (Multiple Input Multiple Output). En 1998, grâce aux travaux sur les codes espace-temps orthogonaux, l'utilisation de cette technique a été considérablement améliorée.

La technique OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) est devenue indispensable dans les systèmes de transmission sans fil, l'OFDM a été adopté dans plusieurs normes sans fil telles que les systèmes (Digital Audio Broadcasting (DAB)), (Digital Video Broadcasting-Terrestrial (DVB-T)), la norme IEEE 802.11a/g / Wi-Fi et le réseau local (Local Area Network (LAN)) de norme IEEE 802.16a/WiMax. Il est également utilisé dans les systèmes mobiles sans fil 3G et 4G. La technique OFDM est particulièrement appréciée car elle résiste bien à l'effet de trajets multiples provoqué par le canal.

La combinaison du MIMO et de l'OFDM permet d'exploiter les avantages des deux méthodes : la robustesse de la liaison sur des canaux sélectifs en fréquence pour l'OFDM et la robustesse sur des canaux non corrélés en espace pour les MIMO avec codage espace-temps.

L'objectif de ce mémoire est l'étude des systèmes MIMO-OFDM et l'évaluation de leurs performances en utilisant le logiciel MATLAB.

Le mémoire élaboré est constitué de trois chapitres:

Le premier chapitre introduit l'OFDM, son principe, son historique et les types de modulations numériques, ainsi que son implantation avec ses avantages et ses inconvénients.

Dans le second chapitre, nous introduisons l'architecture des systèmes MIMO, la capacité du canal, ainsi les différents types de codage, multiplexage et les techniques de réception employées pour traiter les signaux reçus, avec l'association MIMO-OFDM.

Dans le troisième chapitre, nous essayerons de valider les notions théoriques par des simulations réalisées via le logiciel Matlab, traiterons le signal en bande de base de l'émission à la réception en utilisant la modulation OFDM, et effectuerons des simulations basées sur plusieurs paramètres, comparé plusieurs systèmes SISO / SIMO / MISO / MIMO liés à l'OFDM.

Enfin, nous finalisons notre mémoire avec une conclusion générale et perspective.

Chapitre 1

Généralités sur l'OFDM

1.1 Introduction

Plusieurs technologies sont connues depuis longtemps pour la communication sans fil. La technologie qui permet d'influencer la révolution dans ce domaine est la technologie dite multi-porteuse. Ces techniques comprennent la transmission de données numériques en modulant simultanément les données numériques sur un grand nombre de porteuses. La première idée pour appliquer la technologie de multiplexage est l'OFDM. Le regain d'intérêt actuel réside dans l'amélioration de l'efficacité spectrale en orthogonalisant les porteuses, ce qui permet d'obtenir un meilleur recouvrement spectral, c'est-à-dire une modulation OFDM. La réalisation de la modulation et de la démodulation se fait à l'aide de circuits puissants basés sur la Transformée de Fourier Rapide (FFT) et son inverse (IFFT).

Dans ce chapitre on va essayer de créer une idée générale sur le principe et le fonctionnement de l'OFDM.

1.2 Historique d'OFDM

À la fin des années sécantes du siècle dernier en Etats Unis elle parle à la première fois sur la modulation multi-porteuse. Dans cette période l'idée de transmettre un grand débit sur plusieurs porteuses modulées à des débits moindres est apparue pour des applications du type HF [1], un premier modem HF utilisant des modulations 2-FSK sur 20 ou 40 voies en parallèle fut proposé en 1957. L'idée consiste à émettre simultanément sur des fréquences porteuses différentes des modulations à bas débits. Chaque porteuse était, donc, moins sensible aux effets du canal tandis que l'émission de plusieurs porteuses en même temps permet d'obtenir un débit binaire de 3 Kbit/sec dans la bande de 0 à 3 KHz. D'autres études permises d'apporter des améliorations à cette première version de modem multi-porteuse et de réaliser un modem nommé « KINEPLEX », le principe est de garanti un bon débit sans effets négative sur BER, mais le problème sur le nombre des voit envoyé en parallèle qui augmente l'encombrement spectral du signal émis [2].

En 1966 des conditions d'orthogonalité furent mises en évidence. Cela aurait permis aux spectres des respectives sous-porteuses de se chevaucher, en optimisant ainsi la bande occupée par le signal émis. Dans ce même article, ils eurent démontré plusieurs lemmes et théorèmes concernant les paramètres de la modulation (forme d'onde, espace entre les sous- porteuses, etc.) pour assurer l'orthogonalité. Dès lors, on commença à parler de « Orthogonal Frequency Division Multiplexing » (OFDM) comme un type de modulations multi-porteuses avec des propriétés bien précises (l'orthogonalité) [1].

En 1968, des chercheurs américains ont fabriqué un modem OFDM. Le débit binaire total est de 4800 bits / s et la bande passante est de 3 kHz. Le débit binaire est réparti sur 34 porteuses séparées de 82 Hz. Après avoir implémenté ces modems et étudié les performances du système OFDM, nous nous sommes rendu compte que la synchronisation (temps et fréquence) est le principal enjeu de ces modulations, car l'orthogonalité entre sous-porteuses dépend largement de la synchronisation. Malgré cette difficulté, les gens ont toujours une grande confiance en l'OFDM. Un système OFDM pour canal HF, ses performances sont nettement meilleures que la modulation à porteuse unique. En 1970, le premier brevet de modem OFDM a finalement été déposé aux États-Unis. Après des années un nombre des modems qui supporte le système OFDM a été proposé. Parmi ces modems un modem utiliser la modulation 16-QAM a été proposé. Il montre aussi que l'OFDM vérifie le critère de Nyquist, et qu'il n'est donc pas nécessaire d'utiliser un filtrage de Nyquist.

En 1979, on voyait apparaître un modem pour la bande HF comportant 48 sous-porteuses espacées de 45 Hz, utilisant une modulation 32-QAM et atteignant un débit de 9.6 Kbit/sec.

Pendant les années quatre vingt le projet de radiodiffusion numérique (DAB) a été lancé, les scientifiques ne s'intéressèrent pas aux systèmes OFDM. Mais après quelques années le CCETT (Centre Commun d'Etudes de Télécommunications et Télédiffusion) est créé à Rennes et propose un système de transmission de type OFDM dans lequel une technique de multiplexage à division de fréquences orthogonales était associée à un codage combinant un codage convolutif et un entrelacement [2].

Ainsi, les informations erronées véhiculées par les porteuses subissant des atténuations (dues aux échos destructifs du canal de transmission) seront corrigées grâce à celles transmises par les porteuses affectées par des échos constructifs. De ce

fait, le système fut appelé COFDM le "C" faisant référence au codage utilisé. Cette technique novatrice a été validée pour la radiodiffusion numérique DAB. Elle permet la diffusion d'un débit de 1.5 Mbits/s dans une largeur de bande de 1.5 MHz vers des terminaux fixes ou mobiles.

En 1991, l'ETSI a utilisé l'OFDM comme modulation standard du DAB, tandis que d'autres recherches ont également été menées sur la télévision numérique DVB. La norme exige également une modulation OFDM et, en 1997, EBU a retenu l'OFDM comme modulation du système DVB dans un rapport préliminaire. La technologie OFDM est à nouveau proposée dans la technologie de quille DS1, qui permet de transmettre à haut débit (de 1,5 à 8 Mbps) sur des paires de cuivre à paires torsadées, et l'application principale de l'ADSL est l'Internet haut débit, utilisant une modulation complexe. La technologie (telle que l'OFDM) est particulièrement intéressante car elle a une bonne efficacité spectrale et permet d'obtenir une transmission à grande vitesse dans une bande de fréquences donnée [1].

En 1996 la société TELLA proposait l'OFDM pour le système communication mobile UMTS. Ils proposèrent une interface radio basée OFDM pour le standard UMTS. Cette proposition ouvrait des perspectives ambitieuses dans le domaine du MC-CDMA.

Entre 1999 et 2001, l'apparition des standards pour les WLAN's, comme IEEE 802.11a/g nommé Wi-Fi et ETSI Hiper LAN II, qui adoptaient la modulation multi porteuse OFDM comme spécification principale de leur couche physique. En 2005 une amélioration de la technologie Wi-Fi se présente d'abord sur le marché des États Unis et ensuite en Europe. Le standard, appartenant toujours à la famille du Wi-Fi est le IEEE 802.16 est plus connu sous le nom du Wi-Max. Ce système garantit un débit théorique jusqu'à 80 Mbps et une portée maximale de 50 km. Un an plus tard, un autre standard se présente sur la scène du Wi-Fi : le 802.11n. Il permet à la technologie Wi-Fi d'atteindre des débits théoriques entre 100 et 540 Mbps, en ajoutant l'utilisation de la technique « MIMO », et d'améliorer aussi la portée des réseaux sans fil [1].

Début 2006, le procédé de modulation OFDM a été adopté par l'alliance WiMedia pour les communications à très haut débit (480 Mbps) et à courte portée (10 m), basées sur la technologie «Ultra Wide Band». Ces améliorations du système Wi-Fi représentent donc les nouvelles applications des réseaux « WLAN » pour tout ce qui est accès à Internet sans fil [2].

1.3 Fonctionnement de l'OFDM

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) est une modulation qui permet de diviser plusieurs bandes de fréquences sur plusieurs canaux orthogonaux et uniformes. C'est-à-dire qu'il distribue les symboles sur un grand nombre de porteuses à faible débit binaire.

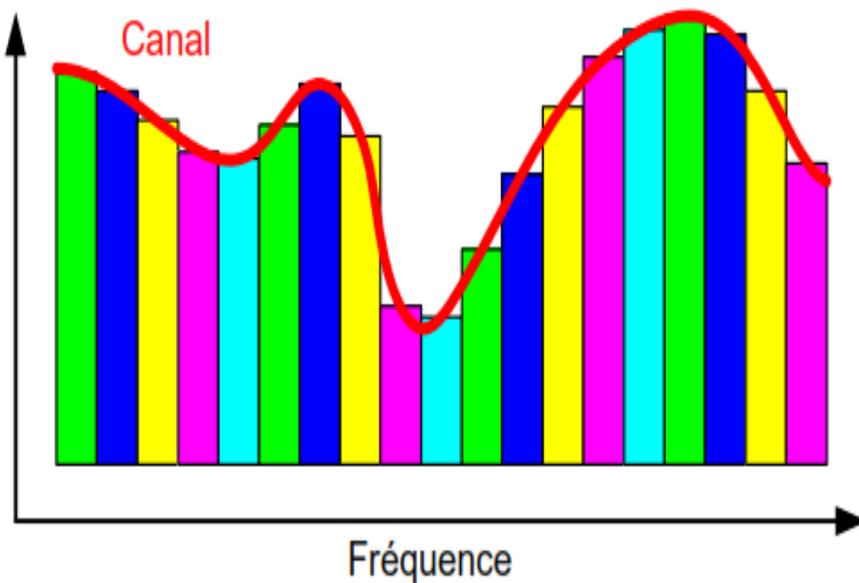


Figure 1. 1: Principe d'OFDM [1]

Pour émettre un signal, l'OFDM divise une plage de fréquence en plusieurs sous-canaux espacés par des zones libres de tailles fixes. Comme si l'on combinait le signal à transmettre sur un grand nombre de systèmes de transmission (des émetteurs, par exemple) indépendants et à des fréquences différentes.

1.4 Modulation et démodulation d'OFDM

Tout d'abord, afin de comprendre le principe de la modulation et la démodulation OFDM, nous devons discuter d'une technique importante appelée modulation multi-porteuse.

1.4.1 Modulations multi porteuses

Les techniques qu'on appelle multi-porteuses consistent à transmettre des données numériques en les modulant sur un grand nombre de porteuses en même temps. Ce sont des techniques de multiplexage en fréquence qui existent depuis longtemps. Le regain d'intérêt actuel réside dans l'amélioration apportée pour augmenter l'efficacité

spectrale en orthogonalisant les porteuses ce qui permet d'implémenter la modulation et la démodulation à l'aide de circuits performants de transformée de Fourier rapide. Le multiplexage en fréquence est bénéfique pour les transmissions dans des canaux sélectifs en fréquence qui comportent des trajets multiples. C'est pourquoi nous trouve cette technique dans les normes de diffusion du son numérique dans des mobiles DAB(Digital Audio Broadcasting), de télévision numérique terrestre (DVB-T Digital Video Broadcasting terrestrial), de communications numériques hauts débits (ADSL Asynchronous Digital Subscriber Line) sur la boucle locale téléphonique, ainsi que dans l'étude des normes de communications pour réseaux locaux à l'intérieur des bâtiments (Hiperlan 2 BRAN).Suivant les applications, cette technique se nomme OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) ou MTC(Multi-Tone Channel).

1.4.2 Principe des modulations multi porteuses

Le principe est de transmettre des données numériques en modulation parallèle sur un grand nombre de porteuses à bas débit. Dans les systèmes traditionnels de transmission de données en série, les symboles sont transmis en séquence : le spectre de chaque élément de données est autorisé à occuper toute la bande passante disponible [3].

1.4.3 Types de modulation

La modulation numérique est généralement basée sur trois types de Modulation; modulation de fréquence (FM), modulation d'amplitude (AM) et la modulation de phase (PM). Dans nos recherches nous baserons sur AM et PM.

Les principales modulations:

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

1.4.3.1 Modulation de phase (BPSK)

Modulation à changement de phase PSK est une modulation numérique, qui a pour principe de transmettre des informations binaires via la phase d'un signal de référence. Les formes qui permettent ces modulations sont BPSK et QPSK. BPSK est basé sur la modification de la phase de la porteuse et dépend du signal à transmettre [4]. Pour la

transmission numérique, 0 et 1 provoquent un changement de 180° de la phase de la porteuse. Lors de la réception, le détecteur de phase peut trouver le signal numérique transmis sur la fréquence de modulation [2].

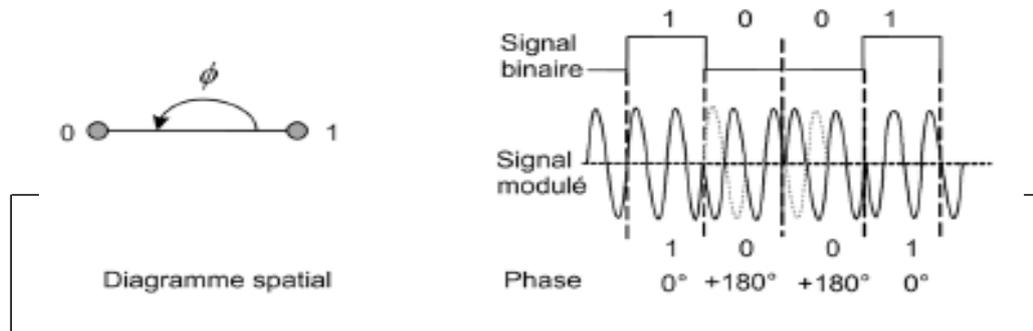


Figure 1. 2: Modulation BPSK [2]

1.4.3.2 Modulation QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying)

Cette modulation produit deux signaux transportant l'information, l'un est sinusoïdal (Q) et l'autre cosinusoïdal (I). Le codage est réalisé en fonction de la phase de ces signaux. Il y a deux phases possibles (séparées de 180°) pour chacun des deux signaux (I et Q), ce qui permet de réaliser 4 symboles différents (ligne Signal / Data ci- dessous).

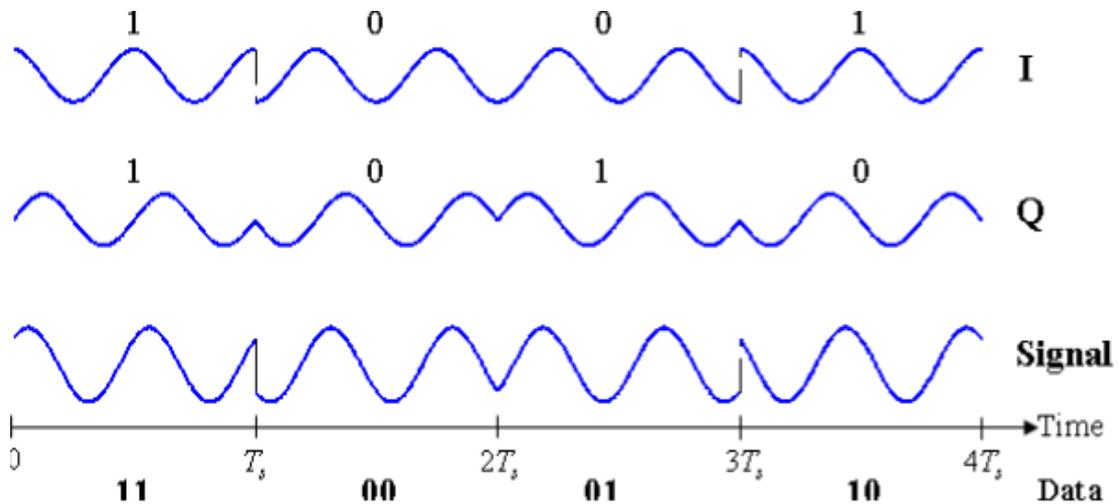


Figure 1. 3: Modulation QPSK

1.4.3.3 Modulation QAM (Quadrature Amplitude Modulation)

La modulation d'amplitude en quadrature est une forme de modulation d'une porteuse par modification de l'amplitude de la porteuse elle-même et d'une onde en quadrature (une onde déphasée de 90° avec la porteuse) selon l'information transportée par deux signaux d'entrée [4].

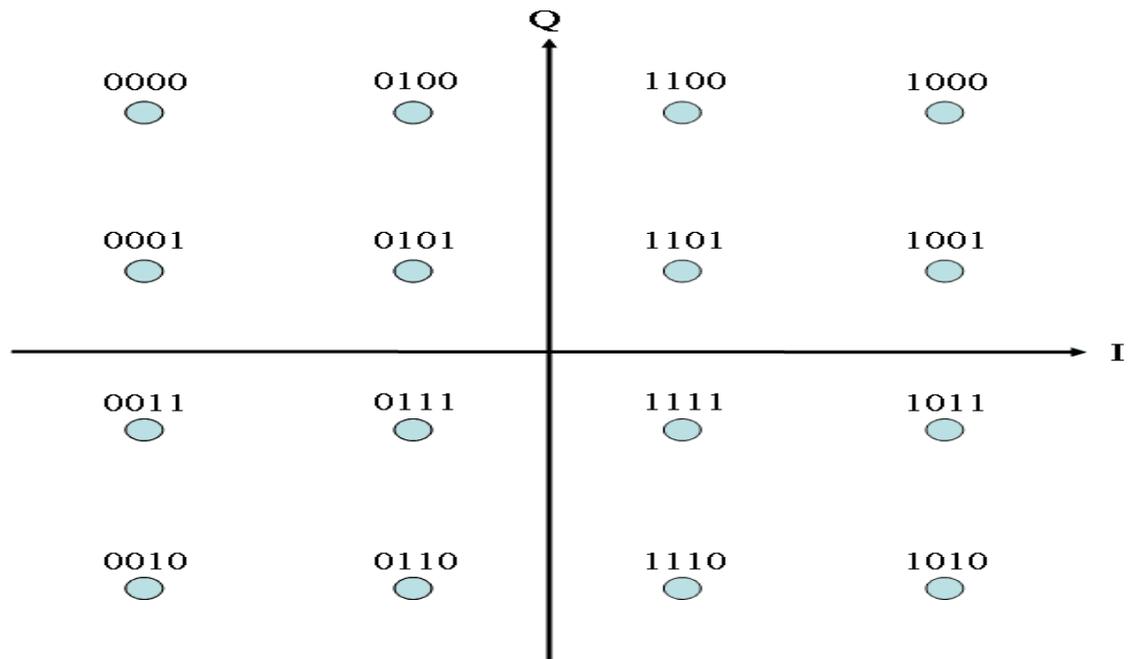


Figure 1. 4: Constellation de la modulation QAM-16

1.4.4 Principe de modulation

Le principe du multiplexage de fréquence est de regrouper les données numériques en N paquets de données, où N paquets de données commencent par des éléments binaires, généralement en utilisant des constellations modulées QAM et PSK [3].

T_s est le temps qui sépareit deux paquets de N et nommée par la durée des symboles.

Chacun C_k module un signal à la fréquence f_k .

Le signale modulé s'écire par la forme complexe :

$$C_k e^{j2\pi f_k} \quad (\text{Eq.1.1})$$

Le signal $s(t)$ total correspondant à toutes les données d'un symbole OFDM est la somme des signaux individuels :

$$\mathbf{s}(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{j2\pi f_k} \quad (\text{Eq.1.2})$$

Le schéma de la modulation est comme suit :

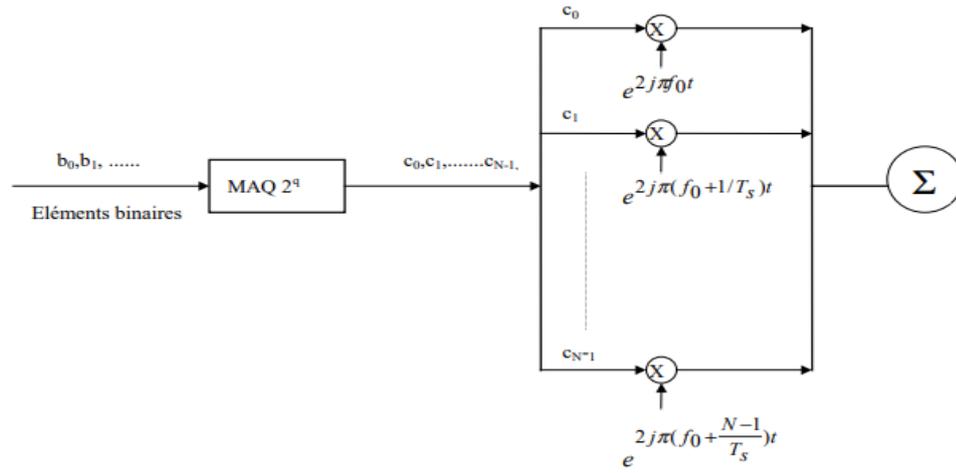


Figure 1. 5: Schéma de principe d'un modulateur

Plus précisément, la donnée numérique C_k est un nombre complexe, qui est défini par un élément binaire à travers un diagramme de constellation à modulation d'amplitude à plusieurs états (4, 16, 64, généralement état $2q$) en QAM orthogonal. Ces données sont des symboles q -aires formés en regroupant q bits. Ils sont appelés symboles numériques. Ne les confondez pas avec les symboles OFDM, qui sont des groupes de N symboles numériques sur N porteuse [5].

On dit que le multiplexage est orthogonal si l'espace entre les fréquences est $1/T_s$

Donc $f_k = f_0 + \frac{k}{T_s}$

Alors
$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{j2\pi[f_0 + \frac{k}{T_s}]t} \tag{Eq.1.3}$$

1.4.5 Principe de la démodulation

L'équation on niveau de démodulateur donnée par la relation suivante :

$$y(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k H_k(t) e^{2j\pi(f_0 + \frac{k}{T_s})t} \tag{Eq.1.4}$$

$H_k(t)$ est la fonction de transfert du canal autour de la fréquence f_k et à l'instant t . Cette fonction varie lentement et on peut la supposer constante sur la période T_s ($T_s \ll 1/Bd$). La démodulation classique consisterait à démoduler le signal suivant les N sous-porteuses suivant le schéma classique [3].

Le schéma de la démodulation est comme suit :

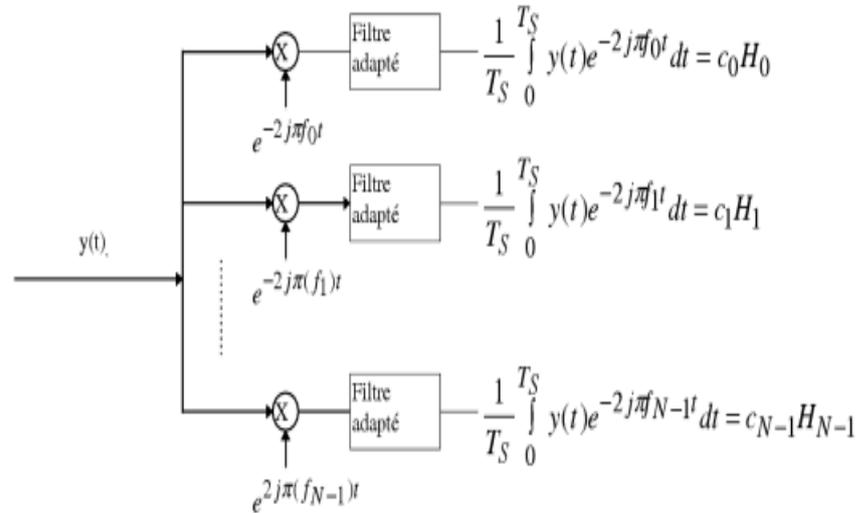


Figure 1. 6: Schéma de principe du démodulateur OFDM

1.4.6 Implantation numérique

Dans les communications à haut débit, les débits sont limités par des contraintes physiques : le bruit dû aux imperfections des systèmes et la nature physique des composants affectent la transmission du signal émis. On réduit dans ce cas les erreurs de transmission en numérisant les informations. De plus l'implantation numérique offre aussi l'opportunité d'ajouter des codes correcteurs d'erreurs afin de protéger notre signal des perturbations engendrées par le canal de transmission [6].

1.4.6.1 Implantation numérique du modulateur

L'équation de signal de sortie $s(t)$ est sous la forme :

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{j2\pi [f_0 + \frac{k}{T_S} t]} \quad (\text{Eq.1.5})$$

En discrétisant ce signal et en le ramenant en bande de base pour l'étude numérique on obtient une sortie $s(n)$ sous la forme :

$$S_n = \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{j2\pi \frac{K_n}{N} n} \quad (\text{Eq.1.6})$$

Par conséquent, $S(n)$ est obtenu par la transformée de Fourier discrète inverse de $C(k)$. En sélectionnant le nombre de porteuses N tel que $N = 2^n$, le calcul de la transformée

de Fourier inverse peut être simplifié, et le calcul peut être effectué par simple IFFT [6]. Le schéma de modulateur est comme suit :

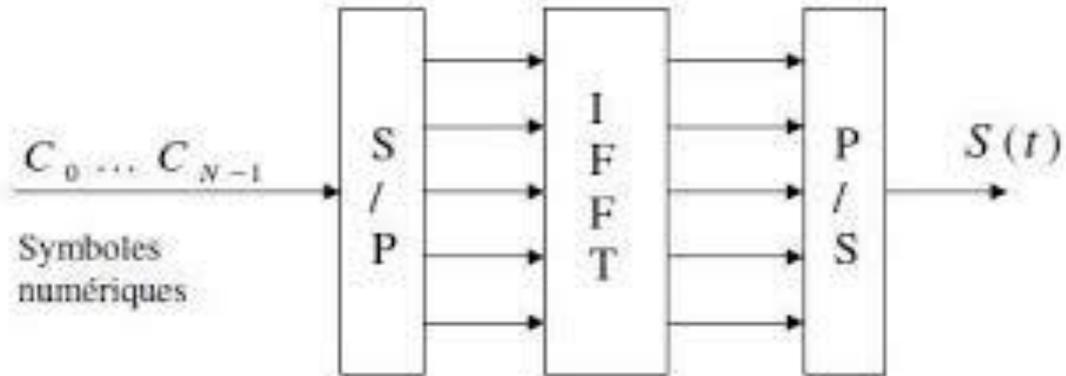


Figure 1. 7: Modulateur OFDM numérique

1.4.6.2 Implantation numérique du démodulateur

L'analyse théorique définit le signal échantillonné reçu au niveau du démodulateur sous la forme :

$$y(t_n) = y\left(\frac{nt_s}{N}\right) = y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k H_k e^{2j\pi\left(f_0 + \frac{k}{T_s}\right)t_n} \quad (\text{Eq.1.7})$$

$y(n)$ est la transformée de Fourier discrète inverse de $C_k H_k$, donc la démodulation comprend l'exécution d'une transformée de Fourier directe discrète. Le nombre de porteuses est choisi tel que $N = 2n$, et FFT peut être utilisée pour ce calcul [6].

Nous obtenons alors le schéma de principe suivant :

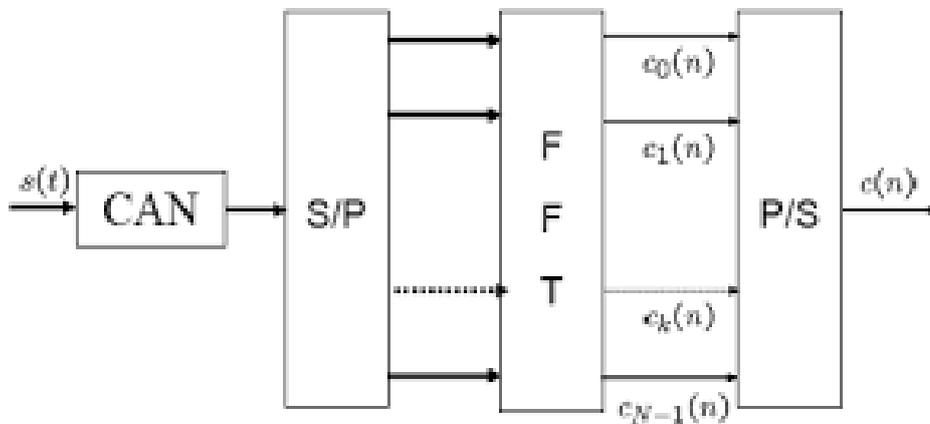


Figure.1. 8: Démodulateur OFDM numérique

1.4.7 Orthogonalité

Définition : la relation mathématique de l'orthogonalité il dit c'est on à deux fonctions $f(t)$ et $g(t)$ dans l'intervalle $[a-b]$ il faut que leur intégrale égale a zéro.

$$\int_a^b f(t) \cdot g(t) = 0 \quad (\text{Eq.1.8})$$

Avec un autre coté on obtient ce signal suivant :

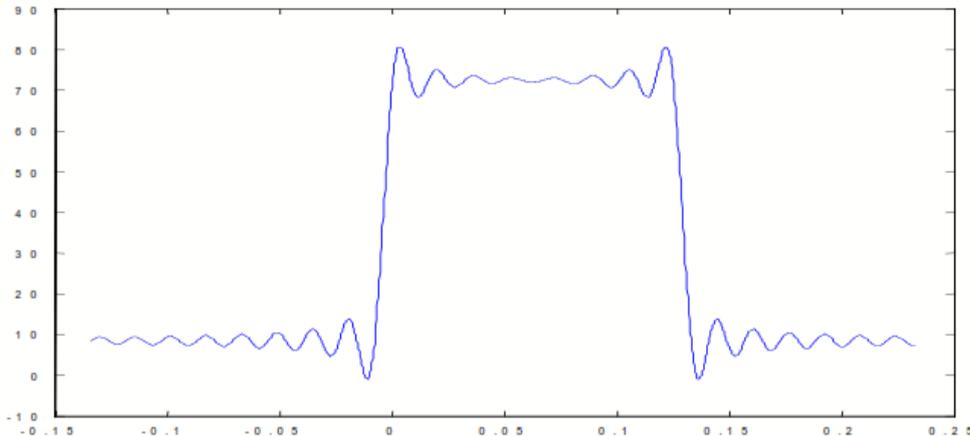


Figure 1. 9: Spectre du signal OFDM pour 8 porteuses

La figure ci-dessus montre le spectre d'un signal OFDM à 8 porteuses. Nous avons remarqué qu'une sous-porteuse est plus grande qu'une autre sous-porteuse, et l'orthogonalité signifie que lorsque le spectre d'une sous-porteuse est le plus grand, les images fantômes de toutes les autres sous-porteuses peuvent être éliminées. L'orthogonalité est une propriété de base qui permet d'envoyer et de détecter plusieurs signaux d'information dans un seul canal sans interférence.

1.4.8 Intervalle de garde

La durée T_u des informations transmises est différente de la période de symbole T_s car il faut considérer un «temps de garde» Δ entre deux périodes utiles. Ce temps a pour but d'éliminer le fait que pour que l'intervalle de garde soit effectif, sa durée doit au moins être égale à l'écho non négligeable le plus long (l'écho avec le plus grand retard) [7].

$$T_s = T_u + \Delta \quad (\text{Eq.1.9})$$

1.4.9 Schéma final d'OFDM

Le schéma bloc en bas représente l'émission et la réception du système OFDM

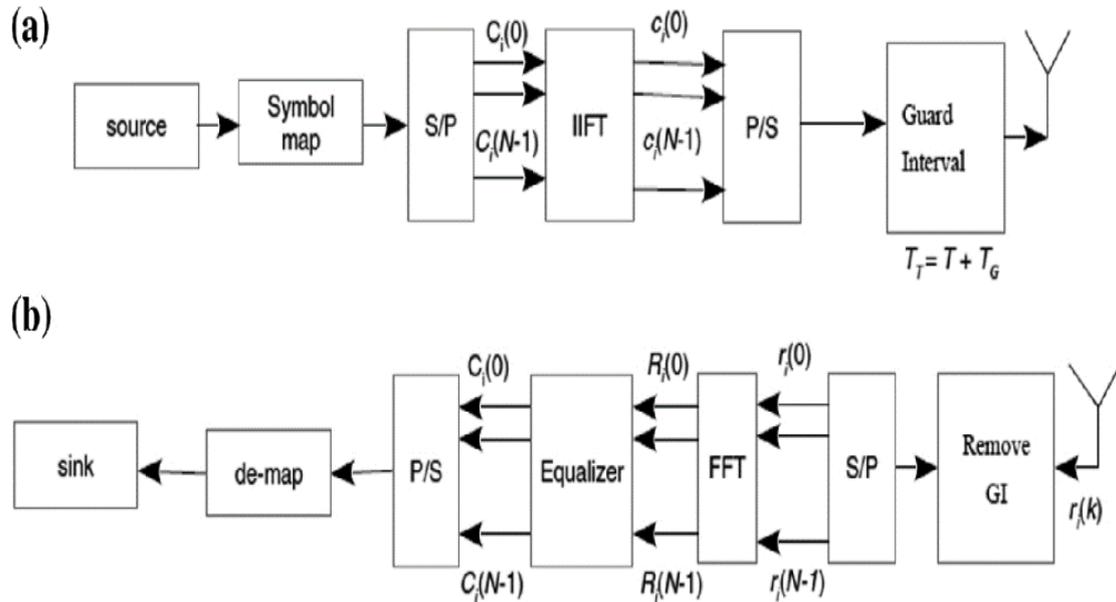


Figure 1.10: Schéma bloc d'un système OFDM

La partie (a) représente la transmission, la partie (b) représente la réception. Nous avons la source de données à transmettre, puis il y a un convertisseur S / P qui divise les données à son entrée en flux de données parallèles à un débit réduit. Nous avons également des blocs de modulation numérique (symboles mappés), des blocs d'insertion et d'omission de temps de garde, des blocs FFT et IFFT pour la modulation et la démodulation de sous-porteuses [7].

1.5 Avantages et Inconvénients d'OFDM

Comme tout dans nos vies, il y aura toujours un côté positif et un côté négatif. Dans cette partie, nous tenterons de souligner certains des avantages et inconvénients de l'OFDM.

1.5.1 Avantages d'OFDM

- Anti-interférence: les interférences qui se produisent sur le canal peuvent être limitées à la bande passante où toutes les données sont perdues
- Convenable pour les transmissions à haut débit.

- Efficacité spectrale: avec OFDM, tant que l'orthogonalité entre les sous-porteuses est préservées, le nombre de sous-porteuses peut être augmenté sans augmenter la bande de fréquences utilisée.
- Implémentation simple : l'implémentation de l'OFDM nécessite une simple IFFT-FFT.
- La technologie OFDM offre une grande flexibilité dans l'allocation du débit dans un contexte multi utilisateurs.

1.5.2 Inconvénients d'OFDM

- Par rapport aux systèmes à porteuse unique, le rapport de puissance de signal crête / moyenne est très élevé: cela nécessite que l'amplificateur ait une plage linéaire très large.
- Il est plus sensible au décalage de fréquence et au bruit de phase.

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la recherche théorique sur l'OFDM. La recherche implique ou est basée sur le principe de modulation et de démodulation de la technologie président. À la fin de l'étude, il a été conclu que l'OFDM divise les informations en un petit ensemble de données. Chaque donnée attribuée à une porteuse orthogonale grâce à cette technique, même s'il y a plusieurs résonances, nous pouvons récupérer les informations transmises. La vitesse de transmission de l'OFDM est également très élevée.

Chapitre 2

Les systèmes multi-antennes MIMO

2.1 Introduction

Les techniques sans fil sont en constante évolution afin de répondre aux besoins croissants de la population, c'est pourquoi la majorité des travaux de recherche focalise sur le développement de nouvelles technologies permettant de répondre aux besoins des utilisateurs. La conception de la nouvelle génération de réseaux sans fil est toujours prise en charge par le problème de limitation de capacité d'une bande passante très étroite et d'une puissance de transmission généralement limitée, afin de surmonter ces handicaps, des nouvelles techniques appelés en général les systèmes MIMO (Multiple Input Multiple Output). Ces systèmes sont essentiellement utilisés pour augmenter la capacité des liens de communications sans fil ainsi le débit de transmission par rapport aux systèmes composés d'une seule antenne à l'émission et à la réception SISO (Single Input Single Output) sans avoir à augmenter la puissance du signal émis ou la largeur de la bande passante.

Dans ce chapitre, nous décrirons la technique MIMO et son développement, puis présenterons les catégories du système, ainsi les techniques d'émission et réception les plus couramment utilisée par les canaux MIMO.

2.2 Introduction des systèmes multi-antennes MIMO

Les systèmes multi-antennes considèrent comme l'une de technologie plus utilisé dans la communication sans fil, le premier système multi-antenne (MISO) a été réalisé par Marconi en 1901 afin d'accroître le gain de transmission pour une communication trans-atlantique. Les systèmes multi-antennes ont évolué au cours du siècle dernier dans les laboratoires du Bell grâce à deux membres Telatar [8] et Foschini & al [9], ces deux derniers ont démontré que la capacité du canal MIMO augmente linéairement avec le nombre d'antennes, dépassant la limite théorique de Shannon. Ces systèmes ont un avantage supplémentaire, car ils résistent aux évanouissements et les interférences.

Les systèmes MIMO sont l'un des principaux domaines de développement pour améliorer la qualité de service par réduisant la probabilité d'erreur (gain en diversité),

et pour augmenter les débits des communications sans fil (gain de multiplexage). Ainsi l'efficacité spectrale avec la même bande passante utilisée par les systèmes mono-antennes (c'est-à-dire à moindre coût). Ces systèmes MIMO ont été proposés dans plusieurs normes de communication sans fil modernes telles que IEEE 802.11n (Wi-Fi), la 4G, le LTE, la 3GPP (3rd Generation Partnership Project), WiMax et HSPA+ (evolved High-Speed Packet Access).

L'idée de base des systèmes MIMO est relativement simple : dans une bande de fréquence donnée, l'information est envoyée en utilisant simultanément plusieurs antennes pour l'émission et la réception. En première approximation, le débit transmis dans cette bande de fréquence se trouve multiplié par le nombre d'antennes d'émission. En revanche, la mise en œuvre concrète soulève par contre des problèmes complexes, en effet, tous les signaux émis sont mélangés entre eux, et il est nécessaire de pouvoir séparer les éléments mixtes, on doit alors faire appel, du côté du récepteur, à des méthodes sophistiquées de traitement du signal. Par conséquent, l'utilisation de réseaux d'antennes dans les émetteurs et les récepteurs peut améliorer l'efficacité spectrale et / ou la fiabilité de la transmission numérique dans un environnement riche de diffuseurs [10].

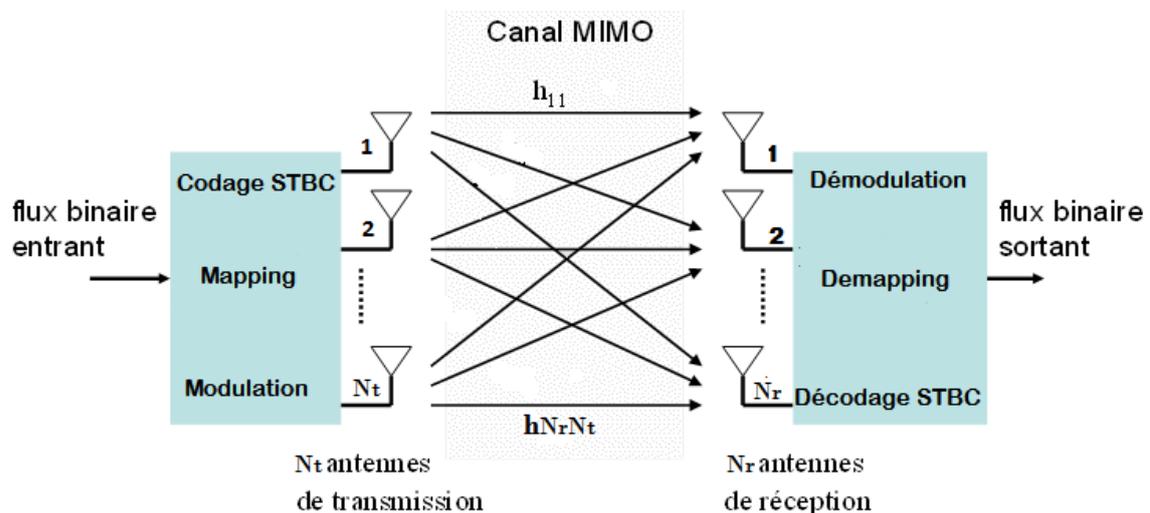


Figure 2. 1: Schéma d'un système de transmission sans fil MIMO

2.3 Principe de la technique MIMO :

Une des meilleures fonctionnalités de l'utilisation des systèmes MIMO est la possibilité de réaliser des sous-canaux orthogonaux entre les émetteurs et les récepteurs à travers un environnement de diffusion [11], selon le niveau de corrélation

entre les coefficients de la matrice du canal MIMO plusieurs techniques peuvent utiliser, ces techniques fonctionnent bien dans le canal de trajets multiples, mais ceux-ci peuvent également provoquer des problèmes d'interférence entre symboles transmis (ISI) [12]. On peut considérer trois catégories de MIMO.

2.3.1 Diversité spatiale MIMO :

Consiste à envoyer simultanément un même message sur différentes antennes à l'émission, les signaux reçus sur chacune des antennes de réception sont ensuite remis en phase et combinés de façon cohérente, cela permet d'augmenter le ratio SNR (grâce au gain de diversité) de la transmission, pour que cette technique soit efficace, il faut que les sous-canaux MIMO soient dé-corrélés les uns des autres [10]. De plus, lorsque le nombre d'antennes à l'émission augmente, la puissance du signal reçu à un moment donné augmente, améliorant ainsi la détection du signal [12].

2.3.2 Multiplexage spatial MIMO

Est une technique utilisée pour maximiser le débit de transmission de données pour une même largeur de bande que le système original sans augmenter la puissance totale d'émission, et améliorer la capacité du canal avec le nombre d'antennes en émission et en réception, chaque message est réparti en sous-messages, on transmet simultanément les sous-messages différents sur chacune des antennes d'émission, les signaux reçus sur les antennes de réception sont réassemblés pour reformer le message entier d'origine, comme pour la diversité MIMO, les sous-canaux de propagation doivent être dé-corrélés, le multiplexage spatial ne fonctionne pas bien dans un environnement à faible SNR car le récepteur a des difficultés à identifier les signaux non corrélés [13], [14], les techniques de diversité et de multiplexage MIMO peuvent être conjointement appliquées dans un système MIMO [10], [15].

2.3.3 MIMO - Beamforming (formation de faisceau)

Considérer comme un filtre spatial dans chaque direction d'intérêt, ce filtre permettra de restaurer ou transmettre des signaux dans une direction spécifique avec un gain maximum, c'est-à-dire de favoriser le gain pour la direction d'intérêt et d'atténuer les signaux émis dans les directions inutiles, il consiste à augmenter le SNR en regroupant l'énergie dans des directions privilégiées, et utilisé pour orienter et

contrôler le faisceau d'onde radio (amplitude et phase du faisceau), on peut ainsi créer des lobes constructifs / destructifs et optimiser une transmission entre l'émetteur et la cible, les techniques de Beamforming permettent à la fois d'étendre une couverture radio (d'une station de base ou d'un point d'accès par exemple) et de limiter les interférences entre utilisateurs et la pollution électromagnétique environnante (en ciblant le récepteur visé) [10], [16].

2.4 Modélisation des différents canaux du système MIMO

2.4.1 Système SISO

Système SISO est un système avec une seule antenne en émission et en réception, qui est le système le plus simple comme le montre la Figure 2. 2.

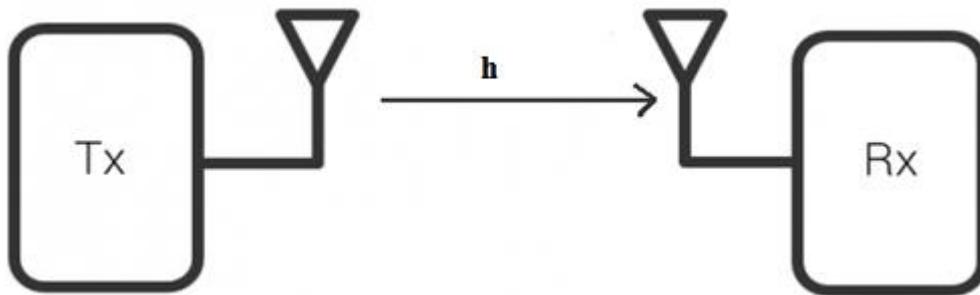


Figure 2. 3: Système SISO

Le signal reçu est exprimé par :

$$y = h s + b \quad (\text{Eq.2.1})$$

Où h représente l'atténuation de Rayleigh et b est le bruit additif gaussien

2.4.2 Système SIMO

Une antenne émet le signal et plusieurs antennes en réception l'interceptent comme apparu dans la Figure 2. 4.

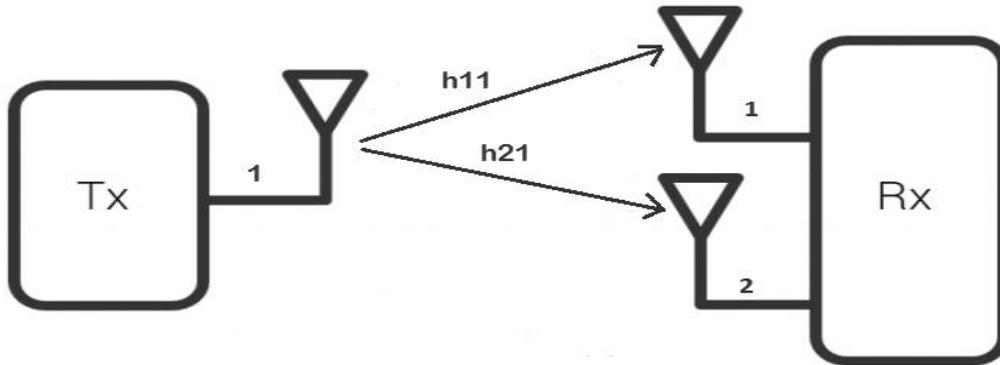


Figure 2. 5: Système SIMO

Un système SIMO peut être modélisé par un nombre d'équations équivalent au nombre d'antennes en réception :

$$y_1 = h_{11} s + b_1 \tag{Eq.2.2}$$

$$y_2 = h_{21} s + b_2 \tag{Eq.2.3}$$

Alors le symbole peut être estimé par la combinaison linéaire suivante :

$$y = w_1 y_1 + w_2 y_2 = (w_1 h_{11} + w_2 h_{21}) s + w_1 b_1 + w_2 b_2 \tag{Eq.2.4}$$

Où w_1 et w_2 sont des gains complexes en réception.

2.4.3 Système MISO

C'est une technique de diversité spatiale en émission, le signal transmis par plusieurs antennes sera intercepté par une seule antenne lors de la réception Figure 2. 6.

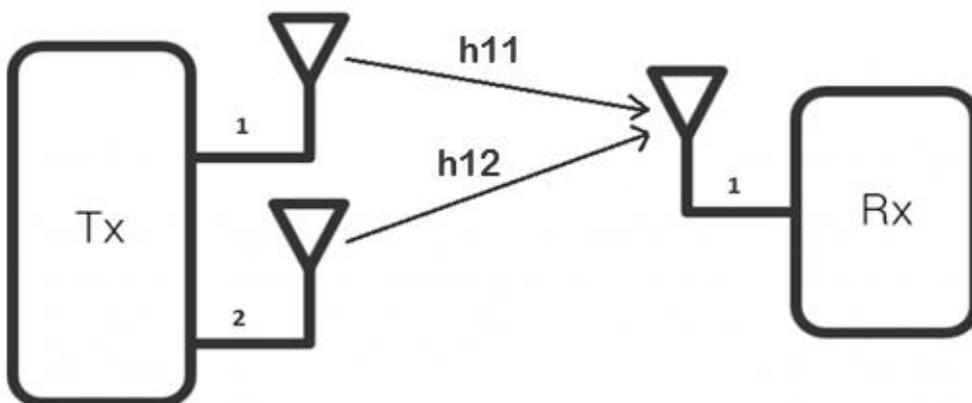


Figure 2. 7: Système MISO

Le cas inverse au cas SIMO est le cas MISO, une seule équation suffit à modéliser ce système :

$$y = h_{11} w_1 s + h_{12} w_2 s + b \tag{Eq.2.5}$$

Où y est le signal reçu.

Les coefficients w_1 et w_2 peuvent être choisis pour compenser l'atténuation du canal, pour cela l'émetteur effectue une pré-égalisation grâce à la connaissance du canal à l'aide d'un retour d'informations du récepteur vers l'émetteur [17].

2.4.4 Système MIMO

La Figure 2. 8, représente le système MIMO qui possède plusieurs antennes en émission et en réception.

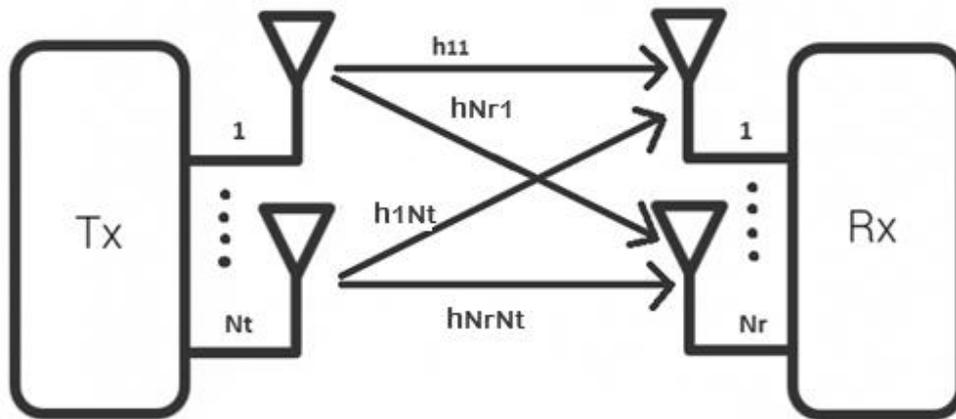


Figure 2. 9: Système MIMO

Un système MIMO comprend N_t antennes d'émission et N_r antennes de réception, nous supposons que la bande de fréquences utilisée pour la transmission soit suffisamment étroite pour que le canal soit non sélectif en fréquence, à la réception, chaque antenne reçoit la somme des symboles s_i transmis simultanément par chacune des antennes émettrices, le signal y_j reçu par les antennes réceptrices peut s'écrire de manière discrète:

$$y_j = \sum_{i=1}^{N_t} h_{ji} s_i + b_j \quad (\text{Eq.2.6})$$

Où h_{ji} est le gain (coefficient d'évanouissement) du canal non sélectif en fréquence entre l'antenne d'émission i et l'antenne de réception j , et b_j est un bruit blanc additif gaussien de moyenne nulle.

L'équation (2.6) peut s'écrire sous une forme matricielle comme suit :

$$y = Hs + b \quad (\text{Eq.2.7})$$

H est la matrice du canal de dimension $N_r \times N_t$.

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1N_t} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2N_t} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_r1} & h_{N_r2} & \dots & h_{N_rN_t} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq.2.8})$$

Tel que :

$$\begin{aligned} \mathbf{s} &= [s_1, s_2, \dots, s_{N_t}]^T \\ \mathbf{b} &= [b_1, b_2, \dots, b_{N_r}]^T \\ \mathbf{y} &= [y_1, y_2, \dots, y_{N_r}]^T \end{aligned}$$

Où \mathbf{s} et \mathbf{y} sont respectivement les vecteurs des symboles transmis et reçus, \mathbf{b} est le vecteur de bruit gaussien.

2.5 Capacité d'un canal MIMO

Le concept de capacité de canal est lié au vaste domaine de la théorie de l'information, commencé après la publication de Shannon [18]. Elle consiste à exprimer le taux maximal de bit possible à transmettre à travers un canal, mesuré en bits par seconde par Hertz (bits/s/Hz). Les études de Telatar [8] et Foschini [9] dans les années 90 ont aperçus que la capacité des systèmes MIMO augmente linéairement avec le nombre des antennes.

Nous considérons un canal MIMO non sélectif en fréquence et sans CSI à l'émission, avant de définir la capacité de ce canal MIMO, nous rappelons que la capacité instantanée d'un canal SISO non sélectif en fréquence s'écrit [19]:

$$C = \log_2 (1 + \rho |h|^2) \text{ bits/s/Hz} \quad (\text{Eq.2.9})$$

Où ρ est le SNR en réception, h est l'évanouissement complexe de canal.

L'expression de la capacité généralisée pour un système MIMO est suivant [20]:

$$C = \log_2 \left[\det \left(I_{N_r} + \frac{\rho}{N_t} H H^H \right) \right] \text{ bits/s/Hz} \quad (\text{Eq.2.10})$$

Où :

\det : est le déterminant

N_t et N_r : antennes d'émission et de réception

I_{N_r} : Matrice d'identité $N_t \times N_r$

H : La matrice du canal MIMO $N_t \times N_r$

$(.)^H$: L'opération de transposé conjugué

ρ : Le rapport signal-à-bruit sur une antenne de réception. $\rho = \frac{P}{N_0}$

P : la puissance de signal transmis

N_0 : la densité spectrale de puissance du bruit blanc (AWGN)

La figure ci-dessus montre l'évaluation de la capacité en fonction du SNR pour les systèmes SISO, MIMO (N_t, N_r)

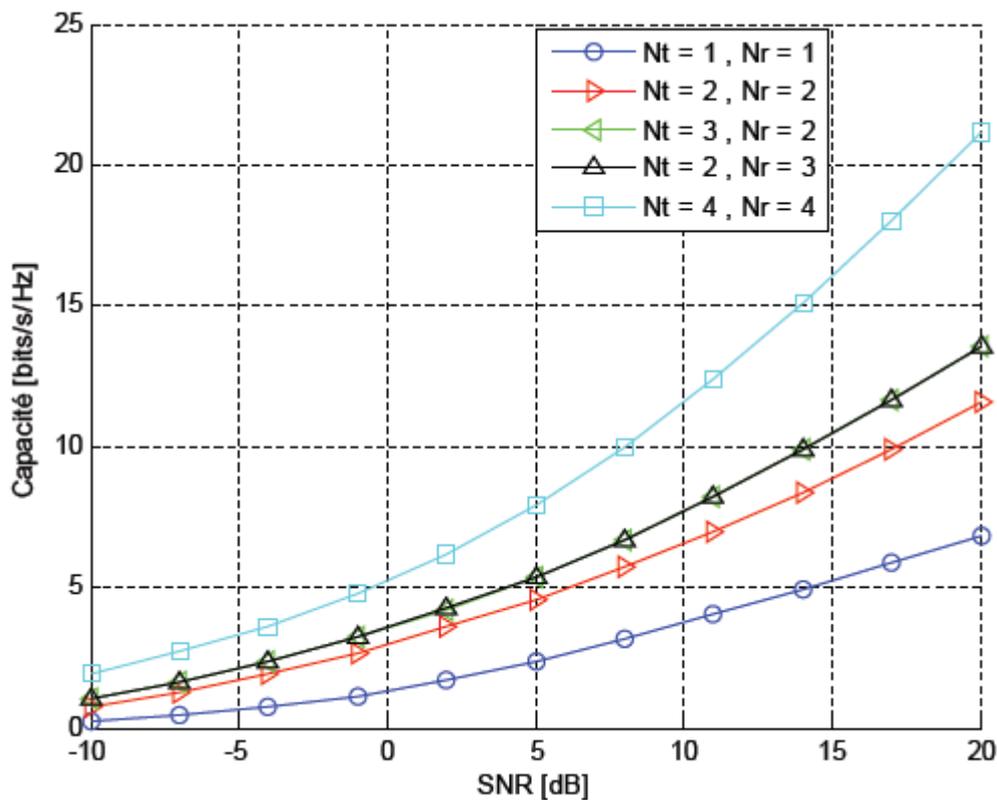


Figure 2. 10: Capacité des systèmes SISO, MIMO [21]

D'après la Figure 2.6, on constate qu'à chaque fois qu'on augmente le nombre d'antennes à l'émission et celui à la réception la capacité est aussi augmentée linéairement en fonction du SNR et le bon résultat à celle du système MIMO ($N_t= 4$ et $N_r = 4$)

Le système MIMO permet d'exploiter la dimension spatiale, comparé à d'autres systèmes (SISO, SIMO et MISO), il présente de nombreux avantages parmi lesquels on retrouve le gain de diversité spatiale et le gain de multiplexage spatial et ce dernier est également possible dans le système MIMO.

2.5.1 Gain de multiplexage spatial

Le multiplexage spatial a pour but d'augmenter le débit de transmission par rapport le SNR en utilisant plusieurs antennes à l'émission et à la réception sans augmenter la puissance de transmission, le gain de multiplexage spatial est interprété comme le nombre de symboles d'informations indépendantes qui coexistent en réception. Il se traduit aussi par l'augmentation de la capacité grâce aux canaux spatiaux parallèles parce que le canal MIMO peut être considéré comme un ensemble de canaux SISO en parallèle [22], [23].

2.5.2 Gain de diversité spatiale

Le gain de diversité est déterminé par le nombre d'antennes d'émission et de réception, ce gain peut être utilisé pour combattre les évanouissements. Ainsi, de fournir au récepteur plusieurs répliques d'une même information, cette information émise par plusieurs antennes a subi des atténuations indépendantes, le gain de diversité indique comment la pente de la probabilité d'erreur en fonction du SNR varie avec la diversité. D'après [24] on sait que plus l'ordre de diversité augmente, plus la probabilité d'erreur moyenne décroît exponentiellement en fonction du SNR [22], [25].

Plusieurs techniques MIMO en émission et en réception sont utilisés pour mettre en pratique les notions de diversité et de multiplexage, dans le cadre de notre travail nous sommes particulièrement intéressés par le codage espace-temps et dans le cas où le canal serait connu parfaitement par le récepteur.

2.6 Techniques d'émission MIMO sans codage de canal

2.6.1 Codage espace-temps

Le codage ST est un système puissant qui combine le codage avec la diversité de transmission pour améliorer la capacité du réseau, la couverture et la qualité en réduisant les interférences des canaux sans fil [26]. Pour créer de la redondance ou de la corrélation entre les signaux émis sur les dimensions spatiale et temporelle, afin qu'à la réception le signal reçu soit bien décodé.

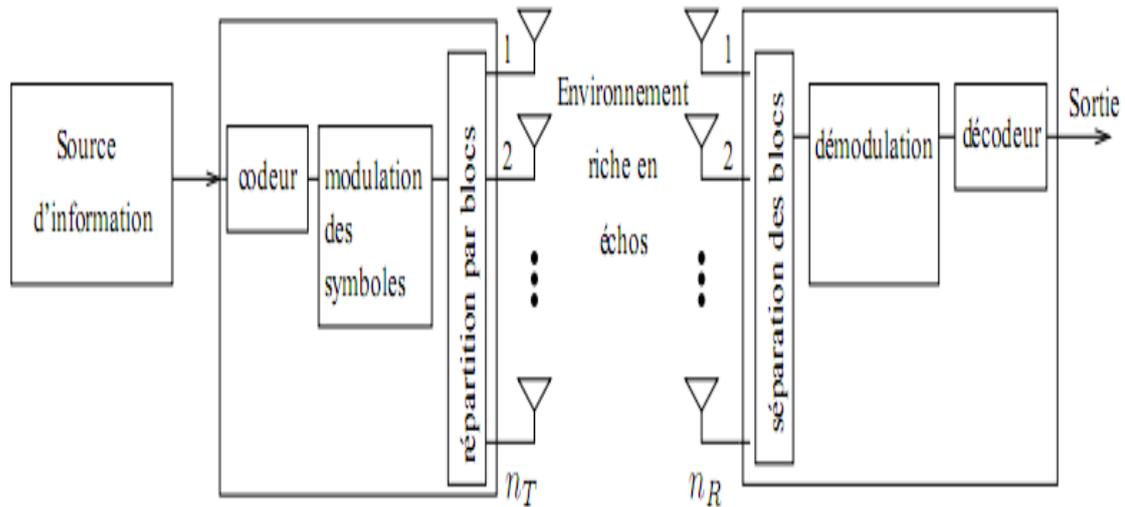


Figure 2. 11: Schéma du codage espace-temps [1]

Les codes espace-temps peuvent être classés en deux catégories : codes espace-temps en blocs STBC et codes espace-temps en treillis STTC, les premiers sont simples à mettre en œuvre tandis que les seconds offrent d'excellentes performances [23], dans ce travail nous focalisons sur les codes STBC, car moins complexes.

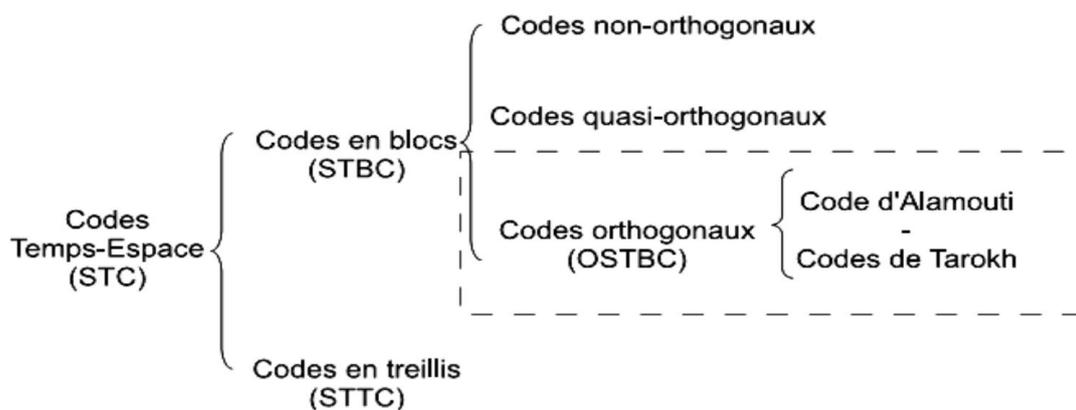


Figure 2. 12: Types de codes espace-temps

2.6.1.1 Codes espace-temps en treillis STTC

Proposés originellement par Tarokh, Jafarkhani et Calderbank dans [27], [28]. Ces codes sont une généralisation des modulations codées en treillis aux canaux MIMO [23], ce codage utilise la représentation en treillis pour coder les signaux à transmettre sur les différentes antennes, la complexité du décodage est exponentielle avec le rendement. En effet, le décodage d'un code en treillis est basé sur l'utilisation de l'algorithme de Viterbi, cet algorithme consiste à minimiser la métrique additive sur tous les chemins du treillis, cela rend l'utilisation de ce codage moins utilisée.

2.6.1.2 Codes espace-temps en blocs STBC

Espérons réduire la complexité des codes CSTT, Alamouti [29] a construit un code espace-temps orthogonal qui atteint la diversité maximale pour un système MIMO 2x1 avec un rendement égal à 1. Dans [27], Tarokh a généralisé le code d'Alamouti à des dimensions plus élevées. L'avantage des codes orthogonaux est leur décodage linéaire [19]. Ce codage est divisé en trois approches [27] principales que sont : les codes temps-espace en blocs orthogonaux OSTBC, les codes temps-espace en blocs non-orthogonaux NOSTBC et les codes temps-espace en blocs quasi-orthogonaux QSTBC, les signaux qui sont codés avec l'OSTBC sont orthogonaux les uns aux autres, cette orthogonalité réduit dès lors l'interférence entre les différents signaux transmis et améliore la performance du récepteur qui distingue les différents signaux reçus, les codes OSTBC offrent par ailleurs une faible complexité de décodage [12], la plus connu et plus utilisé est le codage d'Alamouti.

2.6.1.2.1 Le code d'Alamouti

Le premier code OSTBC et le seul code orthogonal complexe permettant d'atteindre la diversité maximale avec un rendement égal à $R = 1$ [29], le code d'Alamouti utilisé sur de nombreux systèmes radio-mobiles comme l'UMTS, WiMax IEEE 802.16 Wifi IEEE 802.11n.

	Antenne 1	Antenne 2
instant t	s_1	s_2
instant t+T	$-s_2^*$	s_1^*

Tableau 2. 1: Notations des signaux émis d'un système MIMO avec codage d'Alamouti

$T=2$ durées symboles.

A l'instant 1, les symboles s_1 et s_2 sont transmis respectivement sur les antennes 1 et 2 puis à l'instant 2, les symboles $-s_2^*$ et s_1^* sont transmis sur les antennes 1 et 2, (*) l'opérateur complexe conjugué, s'écrit sous forme matricielle comme suit [30] :

$$S = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2^* \\ s_2 & s_1^* \end{bmatrix} \quad (\text{Eq.2.11})$$

Alamouti a proposé deux systèmes de transmission: deux antennes d'émission et une antenne de réception, et la seconde contient deux antennes d'émission et de réception.

2.6.1.2.1.1 Cas d'une antenne de réception ;

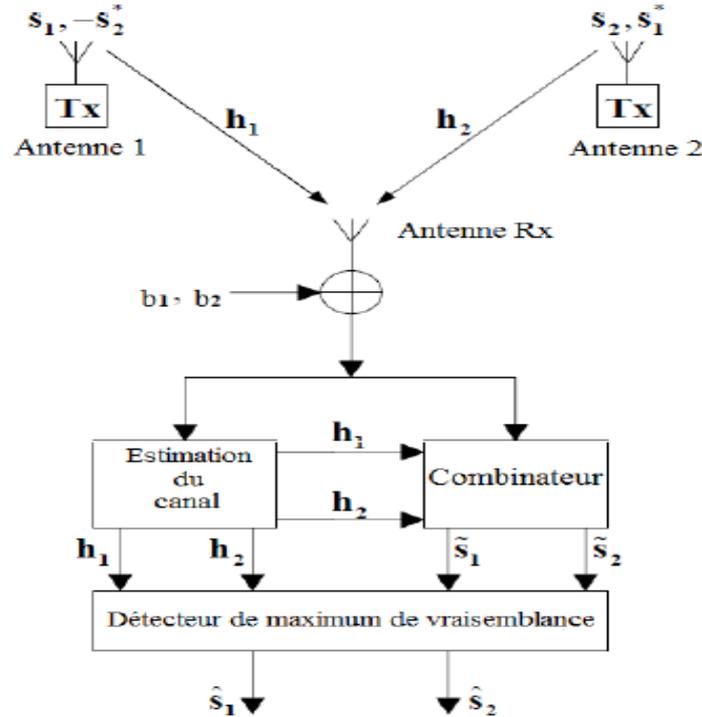


Figure 2. 13: Schéma de la méthode d'Alamouti d'un système MISO 2x1 [29]

Soient y_1 et y_2 les signaux reçus pendant deux périodes symboles successives :

$$y_1 = h_1 s_1 + h_2 s_2 + b_1 \quad (\text{Eq.2.12})$$

$$y_2 = -h_1 s_2^* + h_2 s_1^* + b_2 \quad (\text{Eq.2.13})$$

Tel que les b_1 et b_2 représentent le bruit blanc gaussien complexe dans la réception.

Le combinateur reçoit les signaux y_1 et y_2 avec l'estimation des canaux par combinant l'équation (2.12) avec le complexe conjugué de l'équation (2.13) on peut définir l'équation sous forme de matrice vectorielle de la forme suivant :

$$\begin{bmatrix} \tilde{s}_1 \\ \tilde{s}_2^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ h_2^* & -h_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2^* \end{bmatrix} \quad (\text{Eq.2.14})$$

Nous posons:

$$\tilde{\mathbf{s}} = \bar{\mathbf{H}} \bar{\mathbf{s}} + \bar{\mathbf{b}} \quad (\text{Eq.2.15})$$

Avec $\tilde{\mathbf{s}} = [\tilde{s}_1 \ \tilde{s}_2^*]^T$ le vecteur du signal combiné, $\bar{\mathbf{b}} = [b_1 \ b_2^*]^T$ et $\bar{\mathbf{s}} = [s_1 \ s_2]^T$ est le vecteur du signal transmis, où $\bar{\mathbf{H}}$ est la matrice du canal.

Pour estimer les symboles transmis, les signaux combinés seront, ensuite, envoyés au détecteur de maximum de vraisemblance en multipliant le vecteur combiné par l'Hermitien de la matrice orthogonale \bar{H} , \bar{H}^H [31]:

$$\hat{s} = \begin{bmatrix} \hat{s}_1 \\ \hat{s}_2 \end{bmatrix} = \bar{s} \bar{H}^H = \bar{H}^H \bar{H} \bar{s} + \bar{H}^H \bar{b} \quad (\text{Eq.2.16})$$

$$\hat{s} = \begin{bmatrix} h_1^* & h_2 \\ h_2^* & -h_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ h_2^* & -h_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_1^* & h_2 \\ h_2^* & -h_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq.2.17})$$

$$\hat{s} = \begin{bmatrix} |h_1|^2 + |h_2|^2 & 0 \\ 0 & |h_1|^2 + |h_2|^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_1^* & h_2 \\ h_2^* & -h_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq.2.18})$$

$$\hat{s} = (|h_1|^2 + |h_2|^2)\bar{s} + \bar{b} \quad (\text{Eq.2.19})$$

La transmission étant cohérente, h_1 et h_2 sont connus du récepteur et puisque le vecteur de bruit $\bar{b} = \bar{H}^H \bar{b}$ est encore gaussien en peut alors décoder facilement les deux signaux séparément [23].

2.6.1.2.1.2 Cas de deux antennes à la réception

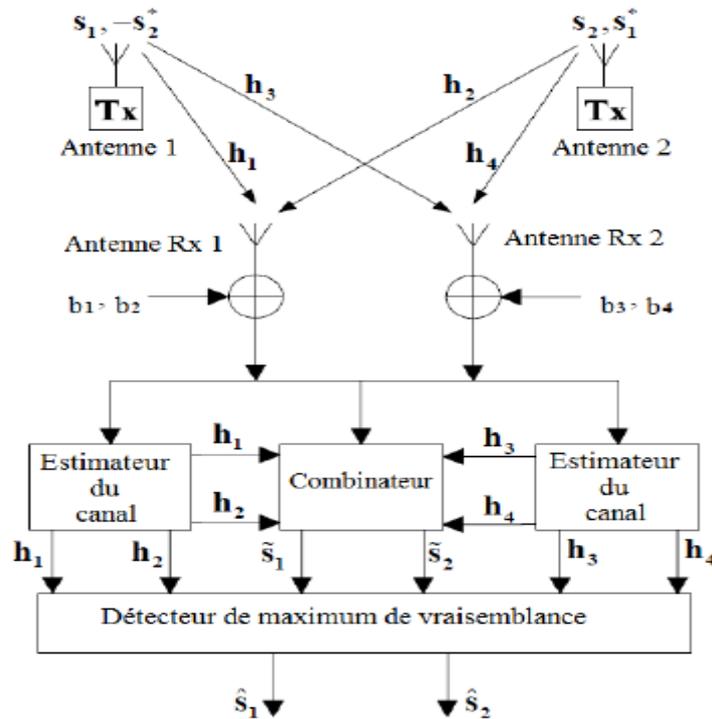


Figure 2. 14: Schéma de la méthode d'Alamouti d'un système MIMO 2x2 [29]

La même démarche comme le système 2x1, en considérant h_1, h_2, h_3 et h_4 comme étant les coefficients de canal [21], les signaux reçus sont exprimés par :

$$y_1 = h_1 s_1 + h_2 s_2 + b_1$$

$$y_2 = -h_1 s_2^* + h_2 s_1^* + b_2$$

$$\begin{aligned} y_3 &= h_3 s_1 + h_4 s_2 + b_3 \\ y_4 &= -h_3 s_2^* + h_4 s_1^* + b_4 \end{aligned} \quad (\text{Eq.2.20})$$

b_1, b_2, b_3, b_4 représentent les bruits additifs gaussiens

Ces équations peuvent être réécrites sous forme matricielle comme suit:

$$\begin{bmatrix} y_1 & y_2 \\ y_3 & y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ h_3 & h_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 & -s_2^* \\ s_2 & s_1^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 & b_2 \\ b_3 & b_4 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq.2.21})$$

En opérant de la même manière que ci-dessus, nous obtenons:

$$\begin{aligned} \hat{s}_1 &= (|h_1|^2 + |h_2|^2 + |h_3|^2 + |h_4|^2)s_1 + h_1^* b_1 + h_2 b_2^* + h_3^* b_3 + h_4 b_4^* \\ \hat{s}_2 &= (|h_1|^2 + |h_2|^2 + |h_3|^2 + |h_4|^2)s_2 - h_1 b_2^* + h_2^* b_1 - h_3 b_4^* + h_4^* b_3 \end{aligned} \quad (\text{Eq.2.22})$$

2.6.2 Codage St en couches

Le rendement limité des codes espace-temps a motivé de la création des codes ST en couches avec un haut rendement, la capacité des systèmes ST en couches augmente linéairement avec le nombre d'antennes d'émission, tandis que le BER diminue de façon exponentielle si l'on utilise un détecteur (ML) [32]. Foschini [20] a proposé un premier architecture du codage ST en couches BLAST, est appelé D-BLAST, par la suite Foschini, Wolniansky et Golden proposent deux architectures [33], [34], V-BLAST, H-BLAST, l'idée de base est de diviser la trame binaire à transmettre en sous-trames, les sous-trames (couches) sont ensuite transmises sur les différentes antennes.

2.6.2.1 H-BLAST

Cette architecture découpe la trame d'information en sous-trame puis codée indépendamment et transmise par les antennes émettrices. Ce type de codage permet d'exploiter seulement la diversité temporelle à l'émission lorsque les sous-trames sont indépendantes [19].

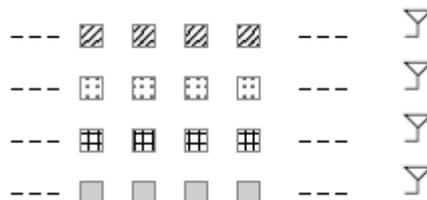


Figure 2. 15: Structure H-BLAST [19]

2.6.2.2 D-BLAST

Cette architecture possède une structure plus complexe par rapport les autres, chaque sous-trame d'information est répartie sur un diagonal espace-temps grâce à un entrelaceur espace-temps (Figure 2.12), les sous-trame est transmis successivement par chacune des antennes émettrices. Ainsi, chaque sous-trame subit tous les évanouissements du canal MIMO. L'avantage de ce système est qu'il exploite à la fois la diversité spatiale et temporelle [19].

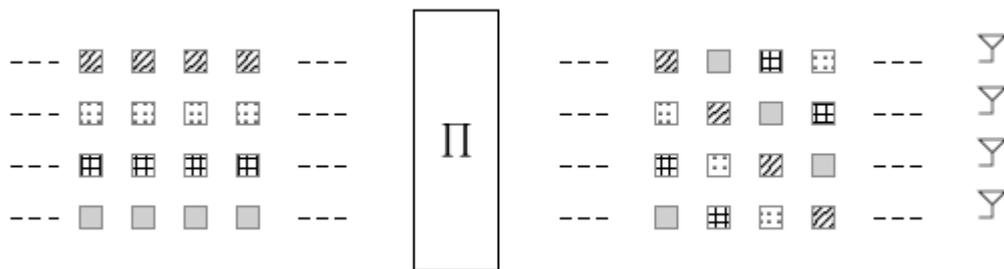


Figure 2. 16: Structure D-BLAST [19]

2.6.2.3 V-BLAST

L'architecture V-BLAST est la plus simple, qui ne fait appel à aucune technique de codage, chaque symbole de la trame est transmis par une des antennes émettrices (Figure 2.13). Ainsi, ce schéma comme le schéma D-BLAST permet d'exploiter la diversité spatiale et/ou temporelle à l'émission, mais il est de complexité plus faible [19].

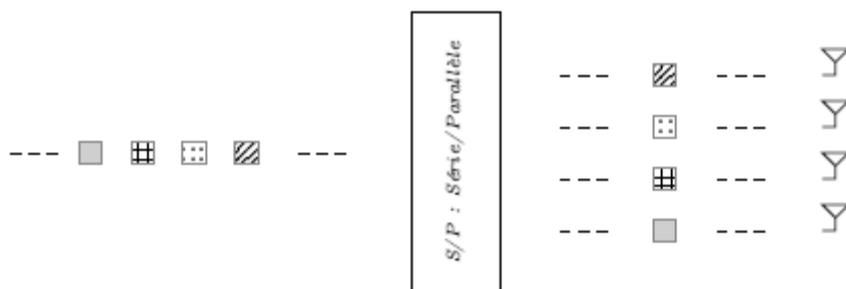


Figure 2. 17: Structure V-BLAST [19]

2.7 Techniques d'émission MIMO avec codage de canal

2.7.1 Système d'émission ST-BICM

La structure BICM (modulation de code avec entrelacement de bits) se compose d'encodeur de canal, d'un entrelaceur binaire, et d'un convertisseur bits vers symboles appartenant à une constellation de modulation particulière. Cette technique permettant d'exploiter la diversité spatio-temporelle. Il existe plusieurs manières d'emplacement du codeur BICM dans la chaîne d'émission comme montre.

2.7.1.1 HE-LST (Horizontal Encoding - Layered Space Time)

Chaque sous-trame d'information est codée, entrelacée, modulée indépendamment et transmise par une antenne émettrice (Figure 2.14). L'avantage de ce système est qu'il est flexible et facile à mettre en œuvre, mais en revanche, il ne profite pas de la diversité spatiale du système de diffusion [19].

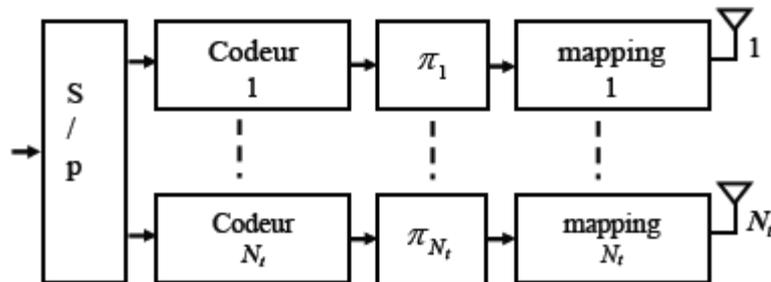


Figure 2. 18: Structure de la technique HE-LST [21]

2.7.1.2 DE-LST (Diagonal Encoding - Layered Space Time)

Chaque sous-trame d'information est indépendamment codée, entrelacée et modulée (Figure 2.15), puis les symboles modulés de chaque sous-trame sont transmis successivement par chaque antenne émettrice à l'aide d'un entrelaceur espace-temps de type diagonal. Par conséquent, chaque sous-trame est transmise par toutes les antennes. L'avantage de ce système est qu'il utilise la diversité de la transmission, mais sa réalisation reste difficile à réaliser [19].

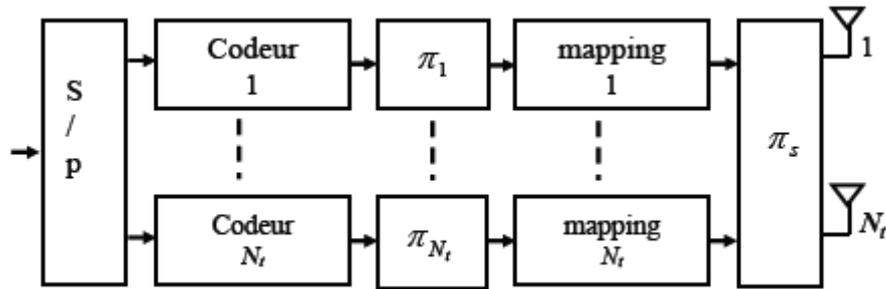


Figure 2. 19: Structure de la technique DE-LST [21]

2.7.1.3 VE-LST (Vertical Encoding - Layered Space Time)

La trame d'information est codée, entrelacée et modulée en une seule. Ensuite, chaque symbole de modulation de la trame codée est transmis à travers l'une des antennes d'émission. Il s'agit de modulations codées à bits entrelacés (dites également BICM : Bit Interleaved Coded Modulation) associées au codage espace temps. Dans [35], ce schéma prend l'abréviation ST-BICM, nous nous intéressons plus particulièrement à la technique ST-BICM (space time-Bit Interleaved Coded Modulation) car elle permet d'obtenir à la fois un gain de diversité et de multiplexage [19].

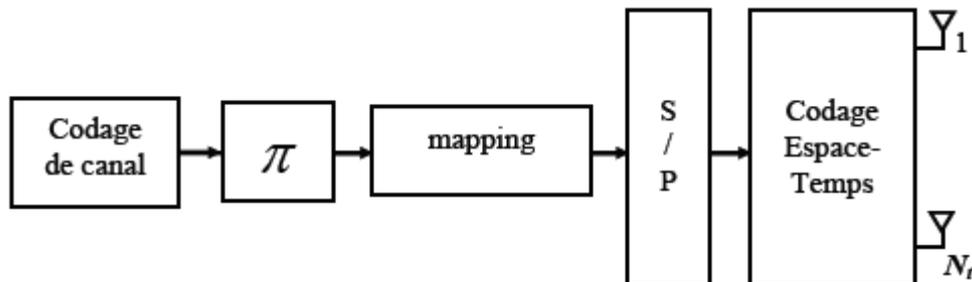


Figure 2. 20: Structure de la technique ST-BICM [21]

2.8 Techniques de réception

La réception consiste à estimer les bits transmis, certains de ces récepteurs requièrent la connaissance du canal de propagation en réception d'autre non [16]. Il existe de nombreux algorithmes de réception, le choix d'un algorithme dépend à des performances excellentes en termes de taux d'erreur binaire BER et de la mise en œuvre doit être moins compliqué.

2.8.1 Forçage à Zéro (ZF)

Le récepteur linéaire le plus simple qui est basée sur l'inversion ou pseudo inversion de la matrice de canal H , le vecteur de symboles estimés de taille $N_t \times 1$ est alors donné par la relation :

$$\hat{s} = \begin{cases} H^{-1} \cdot y & \text{si } H \text{ est carré} \\ (H^H H)^{-1} \cdot H^H \cdot y & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{Eq.2.23})$$

Où y : le vecteur reçu

L'inconvénient de cette technique est l'augmentation du niveau de bruit ce qui dégradé les performances.

2.8.2 Minimisation de l'erreur quadratique moyenne (MMSE)

La détection MMSE est basée sur la minimisation d'erreur quadratique moyenne entre le vecteur des symboles transmis et celui des symboles estimés, en présence de bruit et les interférences entre symboles transmis, donné par :

$$\hat{s} = (H^H H + \frac{\sigma_b^2}{\sigma_s^2} I)^{-1} \cdot H^H \cdot y \quad (\text{Eq.2.24})$$

Où σ_b^2 la puissance du bruit par antenne de réception, et σ_s^2 la puissance des symboles transmis, ce récepteur résiste mieux au bruit que le récepteur ZF. À haut SNR, le récepteur MMSE tend vers le récepteur ZF car $\sigma_b^2 \approx 0$.

2.8.3 Maximum de vraisemblance (ML)

Ce type de détection offre les meilleures performances en Taux d'Erreur Binaire (BER), le récepteur MV donne les symboles estimés grâce à la formule :

$$\hat{s} = \arg \min_s \|y - Hs\|^2 \quad (\text{Eq.2.25})$$

Où la recherche de la distance minimale s'effectue sur tous les symboles possibles. Ce récepteur présente également la plus grande complexité et augmente de façon exponentielle avec le nombre d'antennes d'émission et linéairement avec le nombre d'antennes en réception. Il y a des algorithmes plus simples ayant des performances proches, comme l'algorithme Branch & Bound [36] et le décodage par sphères [37].

2.8.4 Récepteur V-BLAST

Le principe de l'algorithme du récepteur V-BLAST a été présenté dans [9], [38]. Il s'agit d'un égaliseur à retour de décision, adapté à la structure des systèmes MIMO, l'égaliseur peut utiliser soit le critère du forçage à zéro, soit le critère du MMSE, son principe est le suivant : démoduler d'abord les symboles de l'émetteur le plus favorisé (avec le meilleur BER suivant le critère considéré). Ensuite, sa contribution au vecteur reçu y est ensuite annulée, ce qui augmente le SNR sur les autres émetteurs (à chaque bonne décision), cette étape est répétée jusqu'au dernier émetteur, le moins favorisé qui est émis par la dernière antenne d'émission. Son principal inconvénient est la propagation des erreurs. En effet, une fois qu'une mauvaise décision a été prise sur la valeur d'un symbole, une mauvaise contribution est retirée au vecteur y , ce qui entraîne que les symboles suivants seront mal estimés. Ce récepteur est aussi classifié dans la littérature OSIC (Ordered Successive Interference Cancellation). [39]

La Figure 2.17 [40] montre les performances pour les cinq récepteurs que nous venons de présenter.

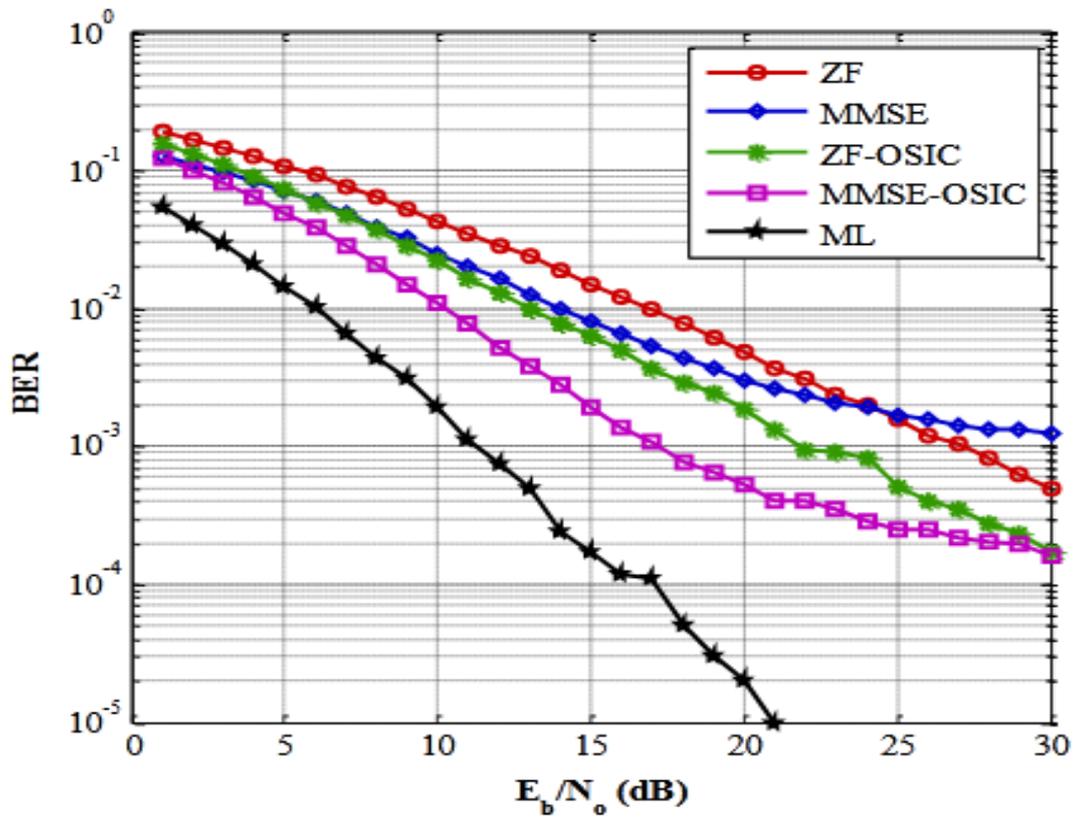


Figure 2. 21: Performances des cinq principaux récepteurs MIMO

Evidemment, les performances d'un récepteur numérique augmentent avec sa complexité, mais le (ML) donne les meilleures performances.

2.8.5 Récepteur BICM-MIMO

Le système ST-BICM dispose de deux modes de réception: récepteur non itératif et récepteur itératif. Dans nos recherches, nous nous intéressons à type récepteurs non itératifs car facile à mettre en œuvre [41].

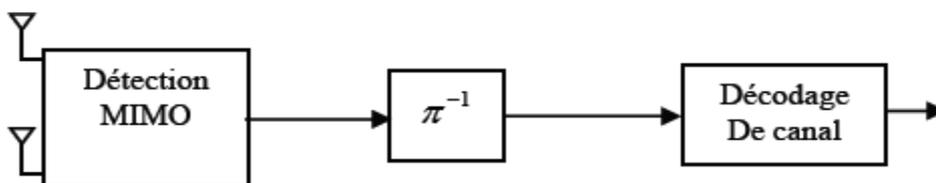


Figure 2. 22: Schéma du récepteur BICM-MIMO non itératif

Les symboles reçus sont convertis en bits binaires selon la constellation d'une modulation spécifique, puis désentrelacés les bits produits par cette conversion en utiliser un entrelaceur de type généralement aléatoire et effectuer enfin le décodage

des canaux ceci est basé sur l'algorithme de Viterbi. La complexité du récepteur nombre d'antennes et ordre de modulation.

2.9 Association MIMO-OFDM

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 [42]. 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 [43], [44]. 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 [12].

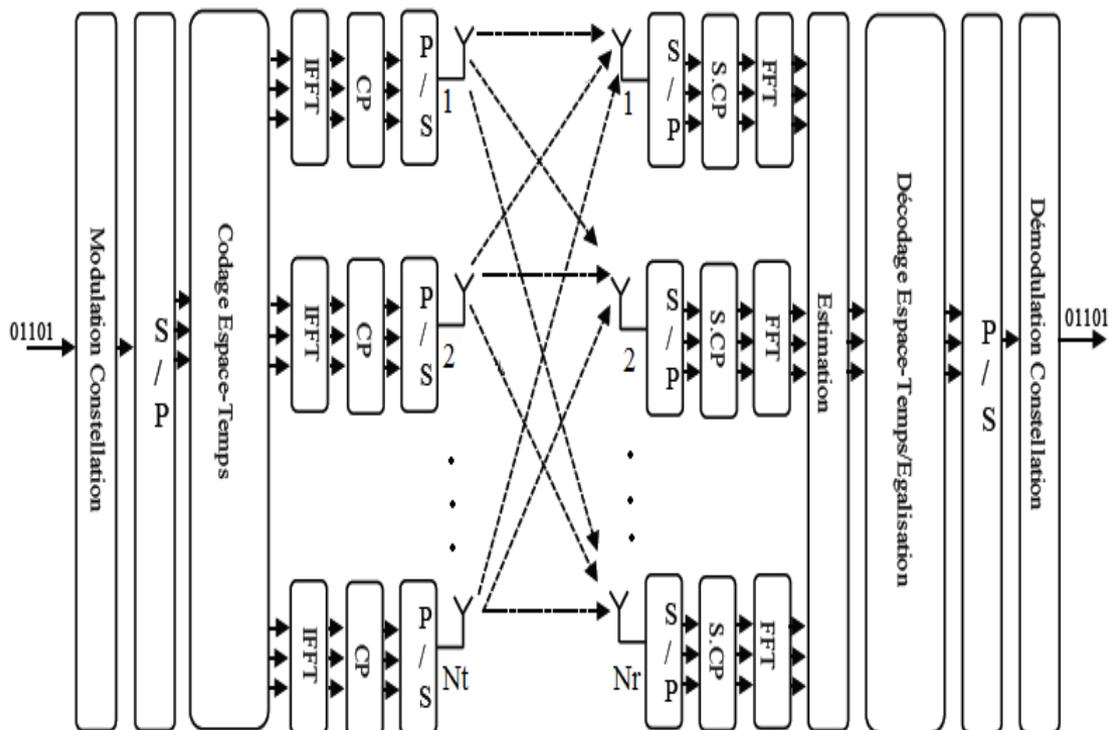


Figure 2. 23: Schéma simplifié d'un système MIMO-OFDM avec un codage ST [45]

2.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons discuté des principes et des fonctions des systèmes MIMO utilisés dans les systèmes de communication sans fil, l'hypothèse de connaissances de canal en réception est la plus réaliste. Ensuite, nous avons présenté les différentes familles de codes espace-temps, nous nous sommes intéressés plus particulièrement au codage espace-temps en bloc orthogonaux qui est capable d'offrir un gain de diversité. Ainsi les algorithmes de décodage associés qui jouent un rôle clé dans les performances du système MIMO. L'association MIMO-OFDM est aujourd'hui, reconnue comme une solution à fort potentiel pour les futurs systèmes de radiocommunication.

Chapitre 3

Tests et résultats de simulation

3.1 Introduction

Après avoir finalisé la partie théorique, qui contient les bases théoriques du système OFDM et du système MIMO, nous passons dans ce chapitre à l'implémentation de notre application. Il convient de noter que tous les programmes sont écrits sous MATLAB, qui est un logiciel de calcul de programmation qui peut aider à résoudre des problèmes et améliorer le processus d'apprentissage. Dans ce chapitre, nous comparons les performances de différentes configurations en fonction de BER (Taux d'erreur binaire).

Nous avons divisé ce chapitre en trois parties :

- ✓ Description et simulation d'une chaîne de transmission SISO-OFDM en bande de base.
- ✓ Comparaison des performances du système MIMO-OFDM (2x2 Alamouti) en fonctions de plusieurs paramètres (canal, type de modulation, etc.).
- ✓ Comparaison des performances entre les différents systèmes MIMO-OFDM, MISO-OFDM, SIMO-OFDM et SISO-OFDM

3.2 Système SISO-OFDM

La figure ci-dessous représente le schéma block d'un système SISO-OFDM

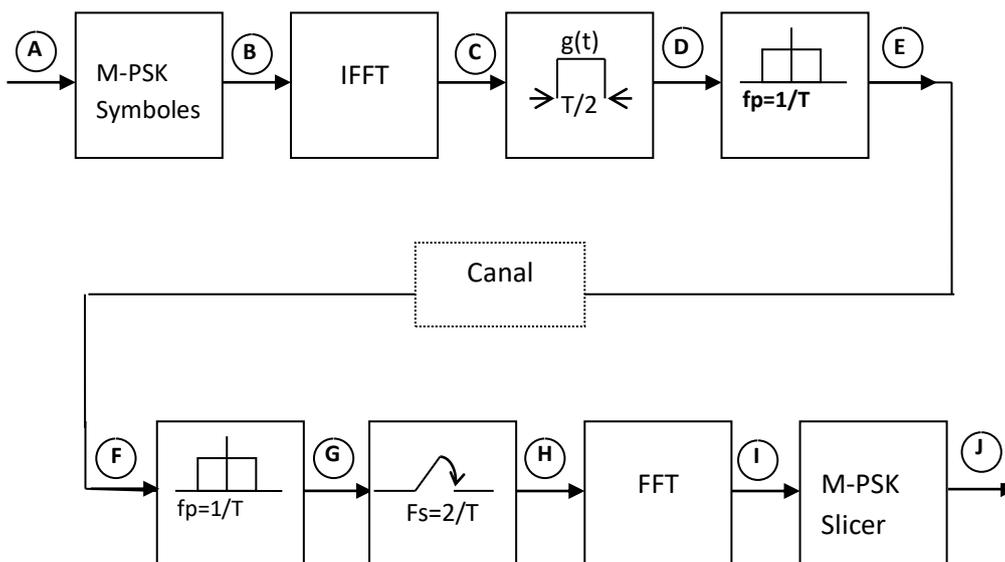


Figure 3. 1: Schéma d'un système SISO-OFDM

3.2.1 Simulation et interprétation

Dans cette partie on va essayer de faire une explication sur le schéma passé avec l'utilisation d'un code MATLAB, ce code représente les états de signal entre chaque bloque qui nommée par de lettres (A, B, C,.....).

Lors de la transmission, les bits de la source binaire sont modulés et génèrent des symboles complexes prenant leurs valeurs dans un alphabet fini correspondant à une modulation numérique, comme la modulation d'amplitude en quadrature (M-QAM) ou la modulation par décalage de phase (M-PSK), dans cette chaîne, nous utilisons la modulation Q-PSK, après la conversion du binaire au Gray, ces symboles ont la même amplitude et sont répartis en ($N = 128$) sous-porteuses (série / parallèle), l'espacement des sous-porteuses dans le domaine fréquentiel $\Delta f = 1 / T_s$ (T_s est la durée du symbole).

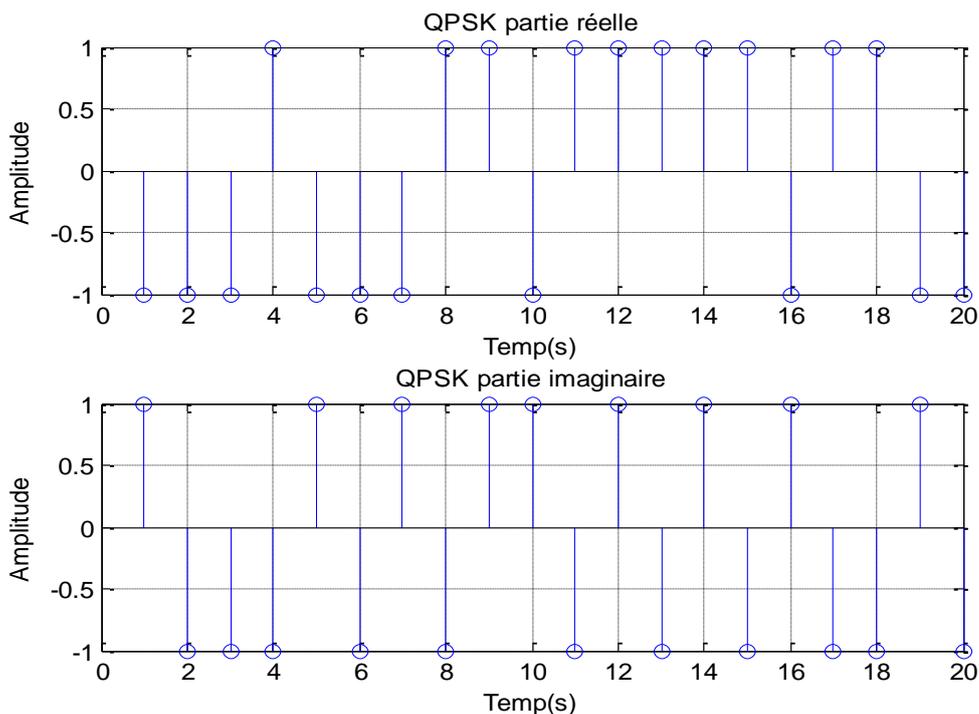


Figure 3. 2: Symboles complexes de la modulation Q-PSK en B

L'état (C) représente le signal de la transformée de Fourier discrète inverse (Inverse Fast Fourier Transform IFFT) permet de générer le signal dans le domaine temporel constitué de N échantillons, en général, toutes les N sous-porteuses sont modulées en utilisant les symboles de données, les symboles pilotes peuvent être répartis sur plusieurs symboles OFDM consécutifs, ainsi le préfixe cyclique (CP) de longueur T_g

est ajouté pour éliminer l'interférence entre symboles tout en gardant l'orthogonalité entre les sous-porteuses, après la fonction IFFT, la fonction d'addition a été réalisée par un convertisseur P / S qui génère le signal OFDM à temps discret donné par la figure suivant :

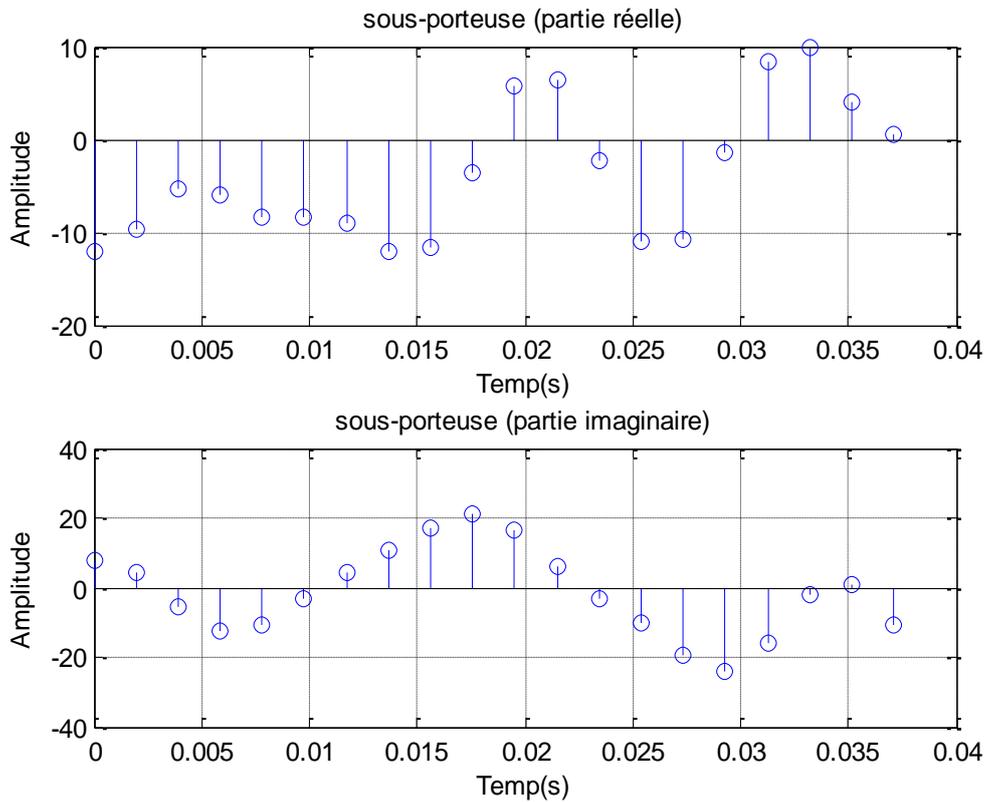


Figure 3. 3: Réponse temporel du signal OFDM en (C)

Le signal OFDM en temps discret ne peut pas transmettre par le milieu sans fil en raison de l'exigence de bande passante infinie, donc, il faut passer à l'étage de la conversion numérique/ analogique par l'utilisation de la fenêtre de pondération $g(t)$, son rôle est convertir les signaux discrets de la sortie de IFFT en signal continu, l'idée est de répété l'échantillon de l'IFFT plusieurs fois dans un intervalle entre deux échantillons par escaliers ou par des pas différents comme apparu en bas :

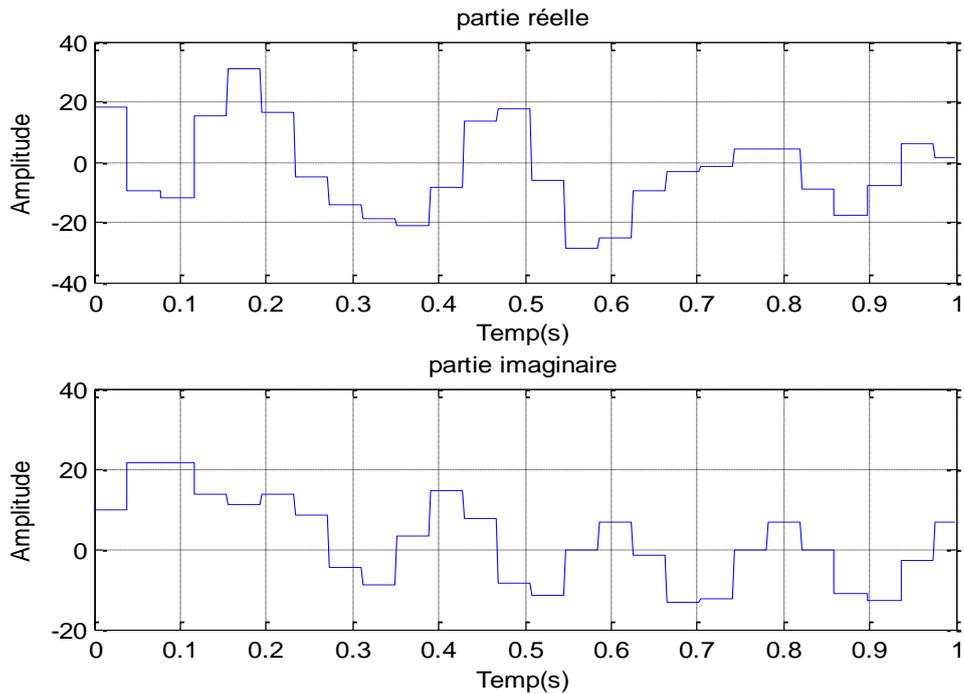


Figure 3. 4: Réponse temporelle du signal en (D)

L'étage suivant est le filtrage (E), on utilise un filtre passe bas de type de Butterworth, est utilisé pour construire un signal analogique lisse à partir d'une entrée numérique, la sortie du filtre donne un signal en bande de base comme apparu dans Figure 3.5.

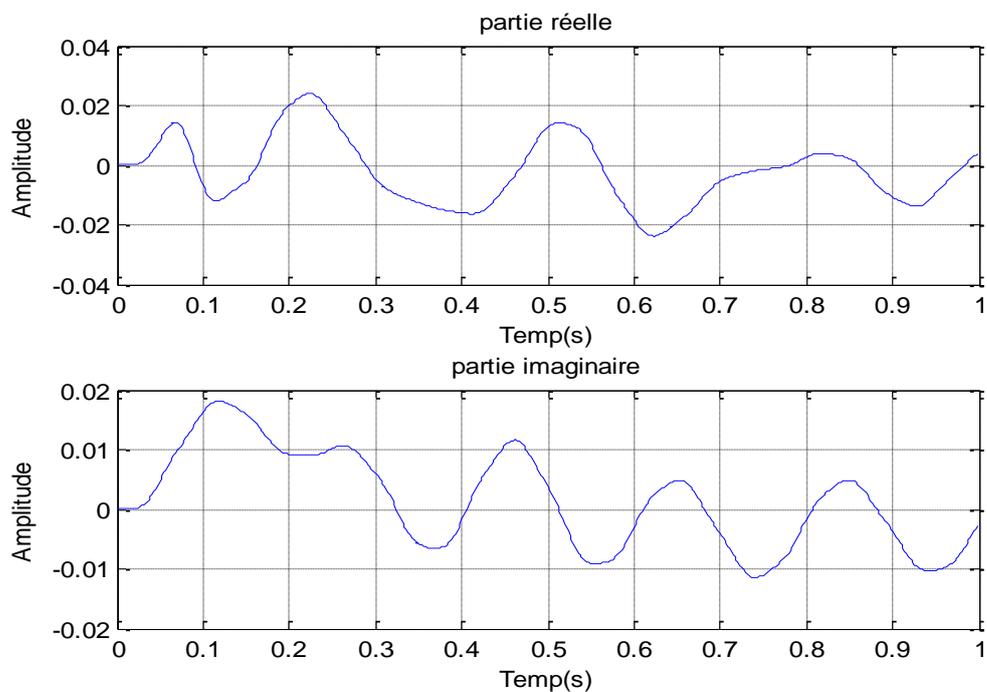


Figure 3. 5: Réponse temporelle du signal en (E)

Enfin ce signal transmis via le canal qui ajout un bruit blanc gaussien(BBAG) au signal dans l'état (F) comme figuré en bas.

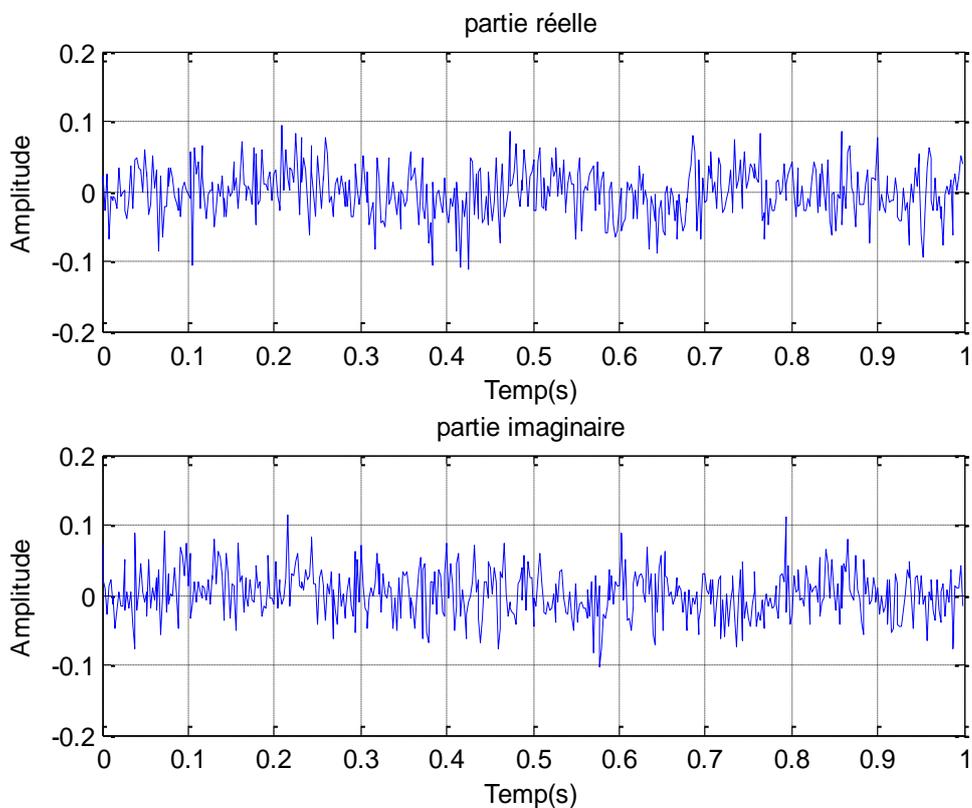


Figure 3. 6: Signal OFDM transmis après l'ajout de bruit en (F)

En réception, les opérations inverses sont effectuées, l'état (G) représente la suppression du bruit(BBAG) par un filtre passe bas (Butterworth) est donné par la figure 3.7.

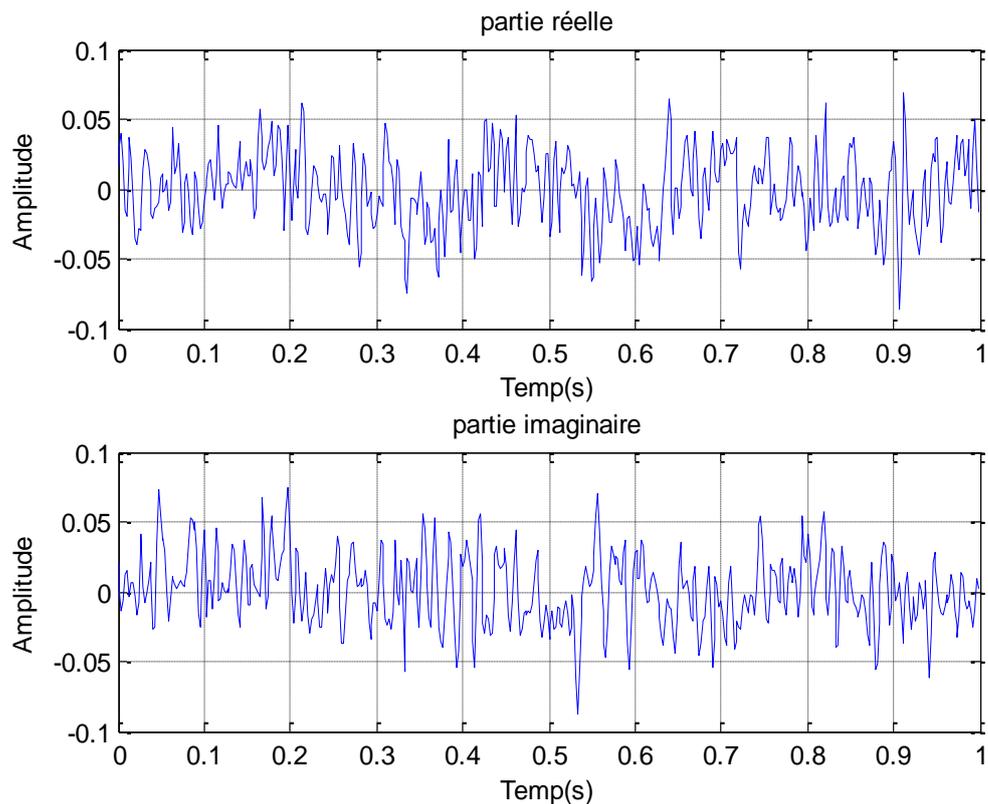


Figure 3. 7: Signal OFDM après élimination du bruit par un filtre passe bas de Butterworth en (G)

Puis à l'état (H) la conversion analogique/numérique avec la suppression de la cyclique préfixe dans la figure 3.8, conversion (série/parallèle) avant l'opération de la(FFT) dans (I) qui transpose les symboles du domaine temporel au domaine fréquentiel, conversion (parallèle/série), démodulation numérique (Q-PSK) dans figure 3.9 qui donne les bits reçus, il suffit de détecter le quadrant dans lequel se trouve le symbole transmis pour retrouver la valeur de la partie réelle et imaginaire (I-Q) en (J).

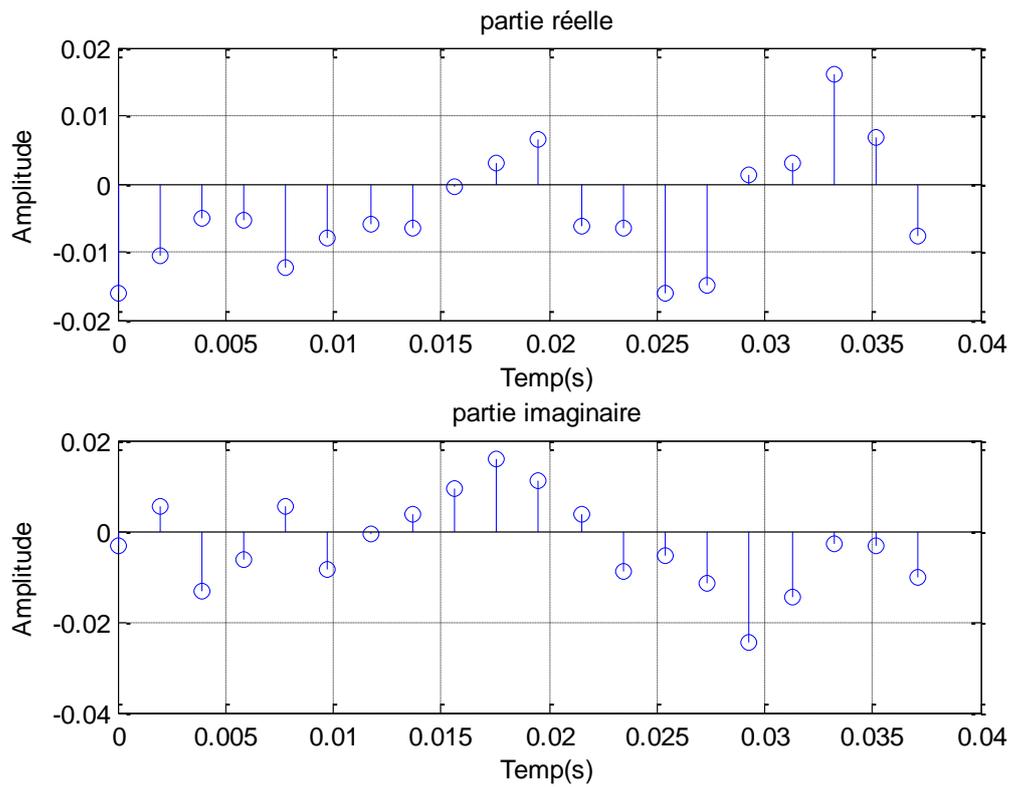


Figure 3. 8: Signal OFDM reçu à temps discret en (H)

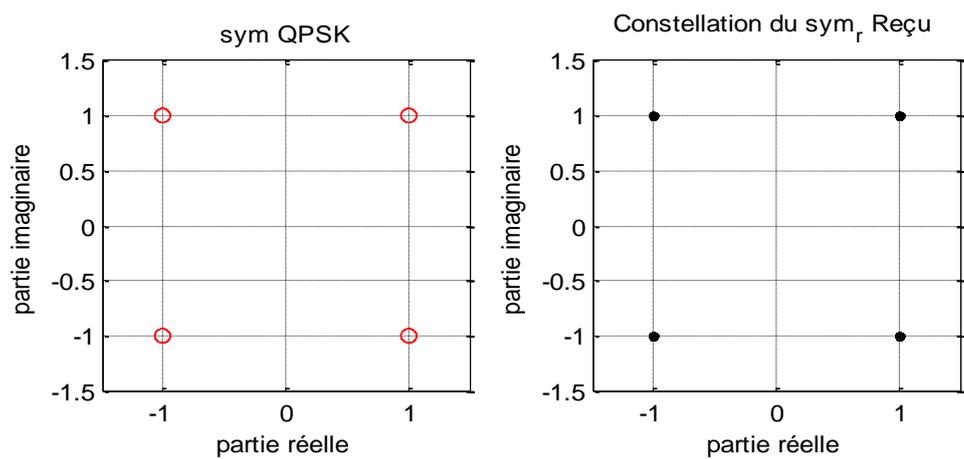


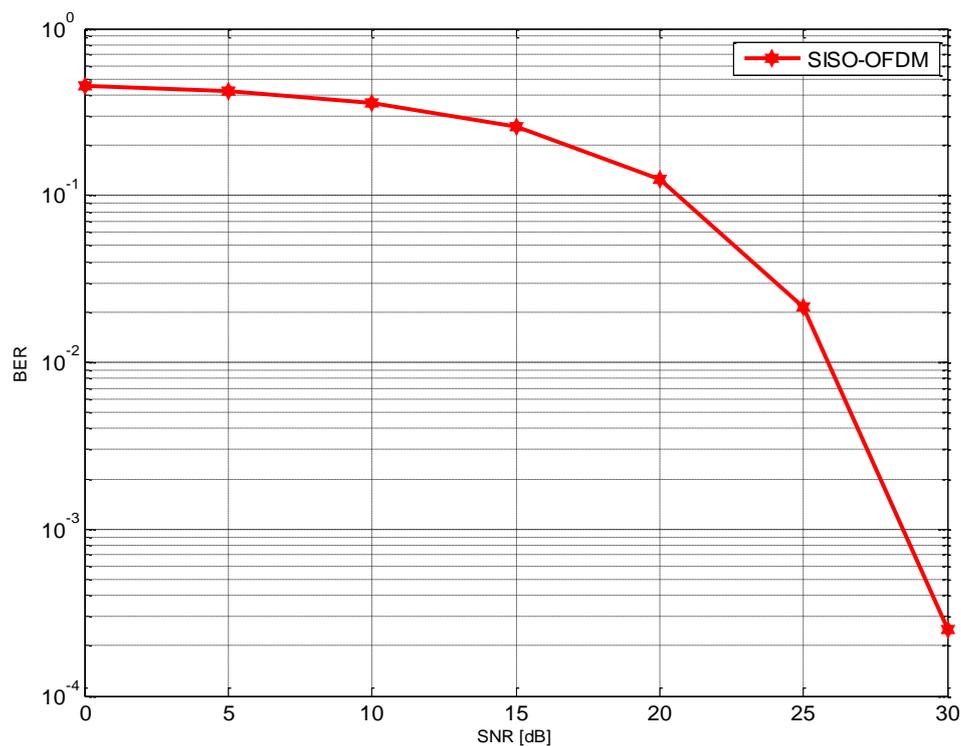
Figure 3. 9: Constellation des symboles reçus et symboles de la Q-PSK en (I)

3.2.2 Performances du système SISO-OFDM

paramètres	valeurs
La taille de la FFT(NFFT)	128
modulation	QPSK
canal	AWGN
Taille du CP	NFFT/4
Type de mapping	Gray

Tableau 3. 1: Paramètres du système SISO-OFDM

Les résultats de simulation sont donnés dans Figure 3.10

**Figure 3. 10:** Performances du système SISO-OFDM en fonction de BER

Nous présentons ici la performance BER de la modulation numérique QPSK avec un système SISO-OFDM sur le canal AWGN. La Figure 3.10 montre la courbe BER Vs

SNR pour le système SISO-OFDM, il ressort de la figure que lorsque le rapport énergie/bruit augmente dans le système, le taux d'erreur binaire diminue.

3.3 Système MIMO-OFDM

Dans cette simulation, nous proposons un système avec deux antennes d'émission et deux antennes de réception (schéma d'Alamouti) non codé, en bande de base, le canal est supposé parfaitement connu par le récepteur. Nous vous recommandons de comparer les performances de différentes configurations, par exemple:

- Canal
- Taille du FFT
- Taille du cyclique préfixe
- Type de modulation
- Mapping

3.3.1 Influence du canal

Comparaison entre les performances du système MIMO-OFDM utilisant la modulation BPSK, CP=16, taille FFT/IFFT=64 sur un canal AWGN et Rayleigh.

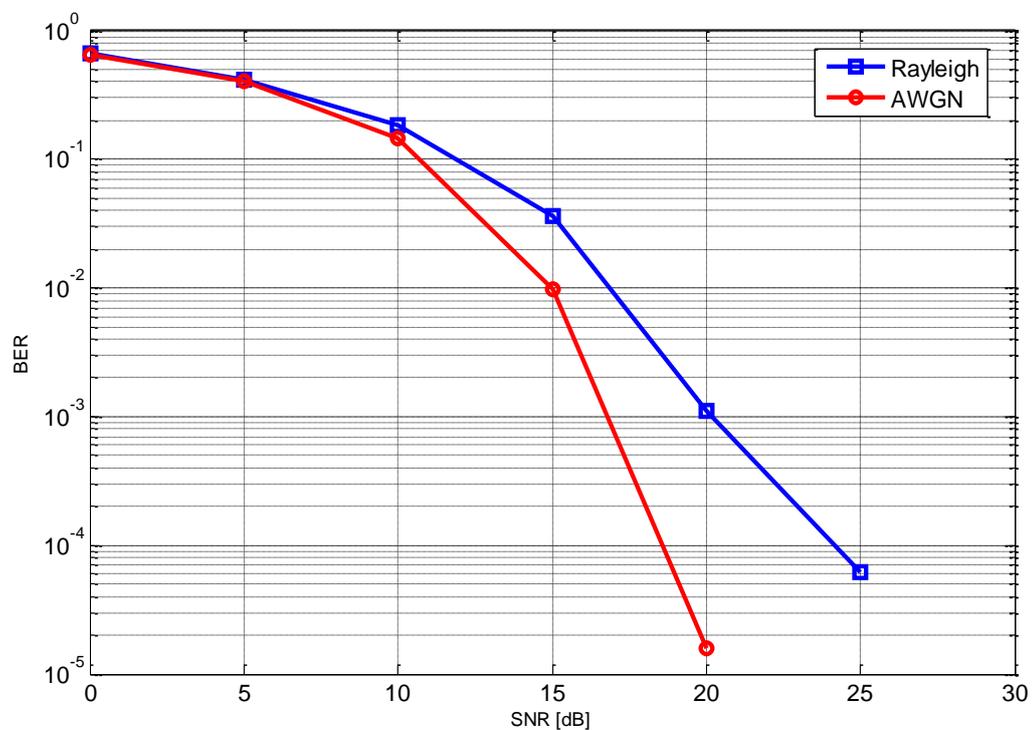


Figure 3. 11: Performances du système MIMO-OFDM sur les canaux AWGN et Rayleigh

La figure montre les performances du système MIMO-OFDM sur les canaux AWGN et Rayleigh. On peut voir sur la Figure 3.11 que par rapport au canal Rayleigh, le canal AWGN subit moins d'erreurs. Par conséquent, il est évident que le canal gaussien offre de meilleures performances comme montre dans la figure. La raison de cette différence de performances est que le canal AWGN ajoute un bruit gaussien blanc complexe au signal à densité spectrale constante. Par contre, pour le canal de Rayleigh, on suppose que l'amplitude du signal lors du passage dans le canal varie aléatoirement et s'évanouit en suivant la distribution de Rayleigh.

3.3.2 Influence de la taille de FFT (NFFT)

Les paramètres du système MIMO-OFDM utilisés dans la simulation sont :

paramètres	valeurs
La taille de la FFT(NFFT)	64, 128, 512,1024
modulation	BPSK
canal	Rayleigh
Taille du CP	NFFT /4
Type de mapping	Gray

Tableau 3. 2: Paramètres du système MIMO-OFDM pour différents NFFT

Les résultats de simulation sont donnés dans Figure 3.12

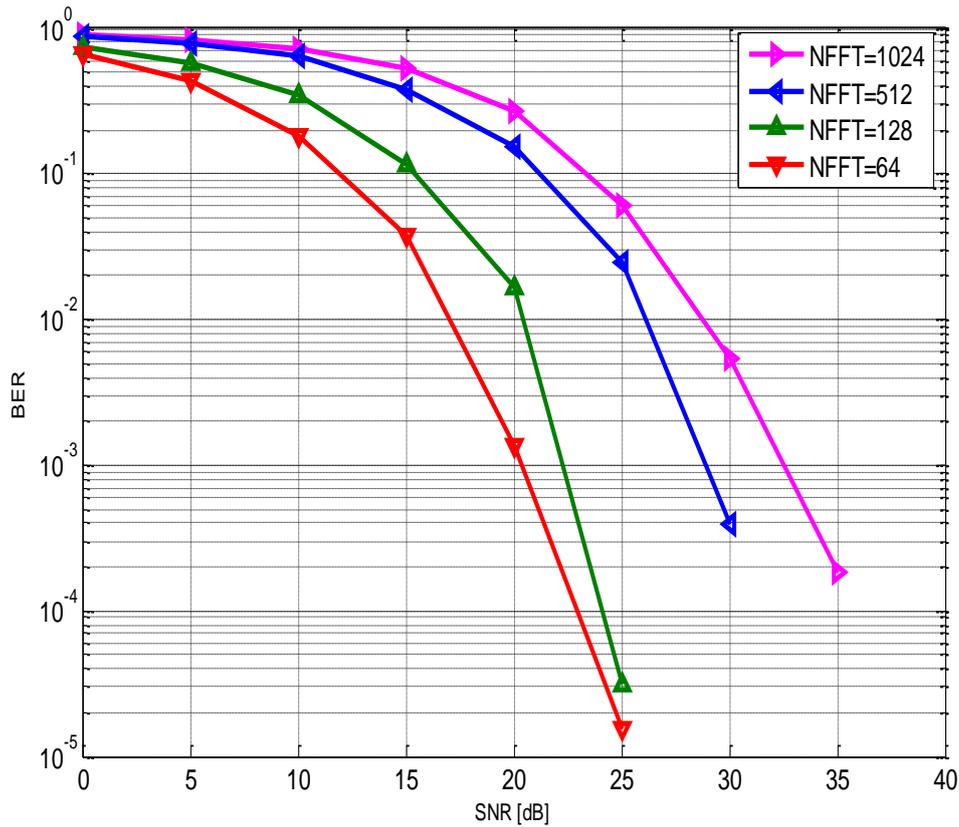


Figure 3. 12: Performances du système MIMO-OFDM pour différents taille de FFT

Cette figure montre l'effet du nombre de sous-porteuses sur les performances du système MIMO-OFDM. D'après les valeurs du BER, nous avons remarqué que par rapport à $NFFT = 128, 512, 1024$, les meilleures performances sont obtenus avec $NFFT= 64$. Quand le nombre de sous-porteuses augmente le débit binaire augmente et la qualité de transmission diminue.

L'augmentation du nombre de sous-porteuses provoquera des interférences inter-porteuses et perturbe la détection du signal original.

3.3.3 Influence de la valeur du cyclique préfixe

Nous nous intéressons à la détermination de la longueur d'intervalle de garde, nécessaire pour éliminer les interférences inter-symboles.

Les paramètres du système MIMO-OFDM utilisés dans la simulation sont :

paramètres	valeurs
La taille de la FFT(NFFT)	64
modulation	BPSK
canal	Rayleigh
Taille du CP	NFFT /4, NFFT /16, NFFT /32
Type de mapping	Gray

Tableau 3. 3: Paramètres du système MIMO-OFDM pour différentes taille de CP

Les résultats de simulation sont donnés dans Figure 3.13

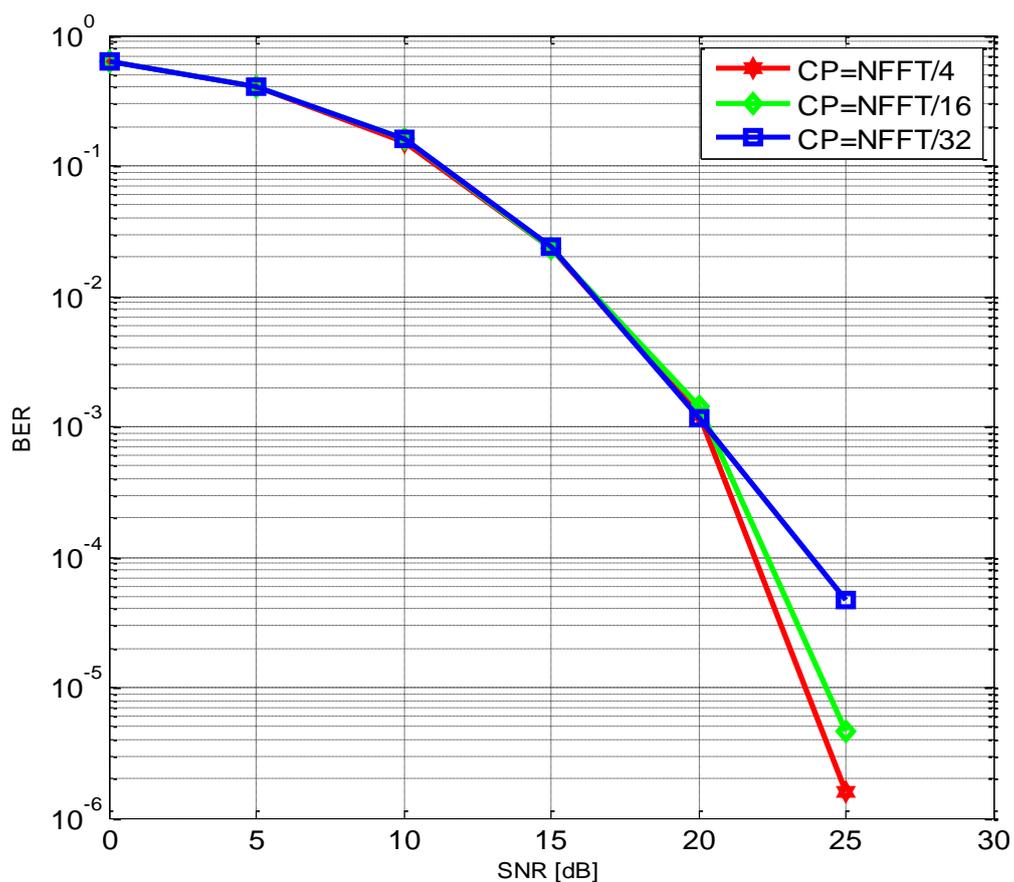


Figure 3. 13: Performances du système MIMO-OFDM pour différents valeur du cyclique préfixe

On peut voir sur cette figure que l'augmentation de la taille de l'intervalle de garde de $N_{FFT} / 32$ à $N_{FFT} / 4$ augmentera la robustesse du système. En effet, en théorie, l'intervalle de garde peut être utilisé pour résister aux effets de dispersion causé par le canal radio. Élimine ainsi les interférences entre symboles (ISI)

3.3.4 Influence des différents types de modulation

Les paramètres du système MIMO-OFDM utilisés dans la simulation sont :

paramètres	valeurs
La taille de la FFT(NFFT)	64
modulation	BPSK, QPSK, 8PSK
canal	Rayleigh
Taille du CP	$N_{FFT} / 4$
Type de mapping	Gray

Tableau 3. 4: Paramètres du système MIMO-OFDM pour différents états de modulation

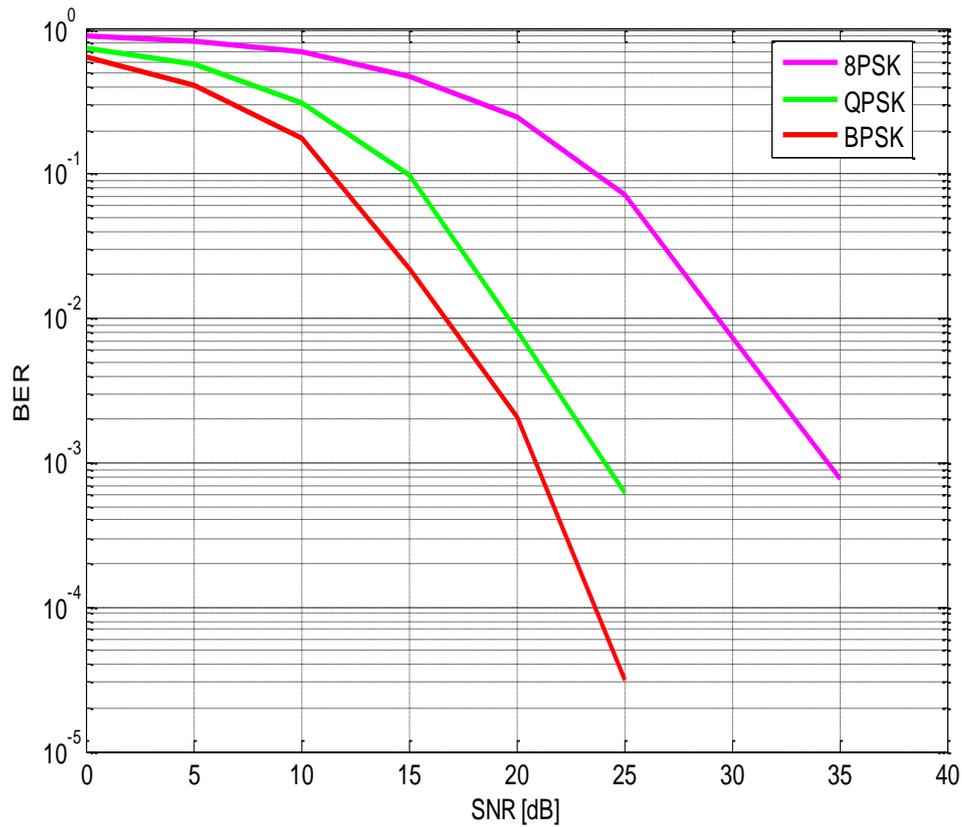


Figure 3. 14: Performances du système MIMO-OFDM pour différents états de modulation

Selon la Figure 3. 14, la meilleure performance est obtenue par la modulation BPSK.

Lorsque l'ordre de modulation augmente, le système devient moins fiable, ce qui est lié au type de modulation (M-PSK), car plus le numéro de constellation est important, plus le démodulateur aura du mal à distinguer entre les différents états. Mais lorsqu'on réduit l'ordre de modulation, le nombre de bits par symbole est également réduit, ce qui est désavantageux pour les applications nécessitant des débits binaires très élevés.

3.3.5 Influence du Type de mapping

Les paramètres du système MIMO-OFDM utilisés dans la simulation sont :

paramètres	valeurs
La taille de la FFT(NFFT)	64
modulation	BPSK
canal	Rayleigh
Taille du CP	NFFT /4
Type de mapping	Gray, BN(Binaire Naturelle)

Tableau 3. 5 Paramètres du système MIMO-OFDM pour différents type de mapping

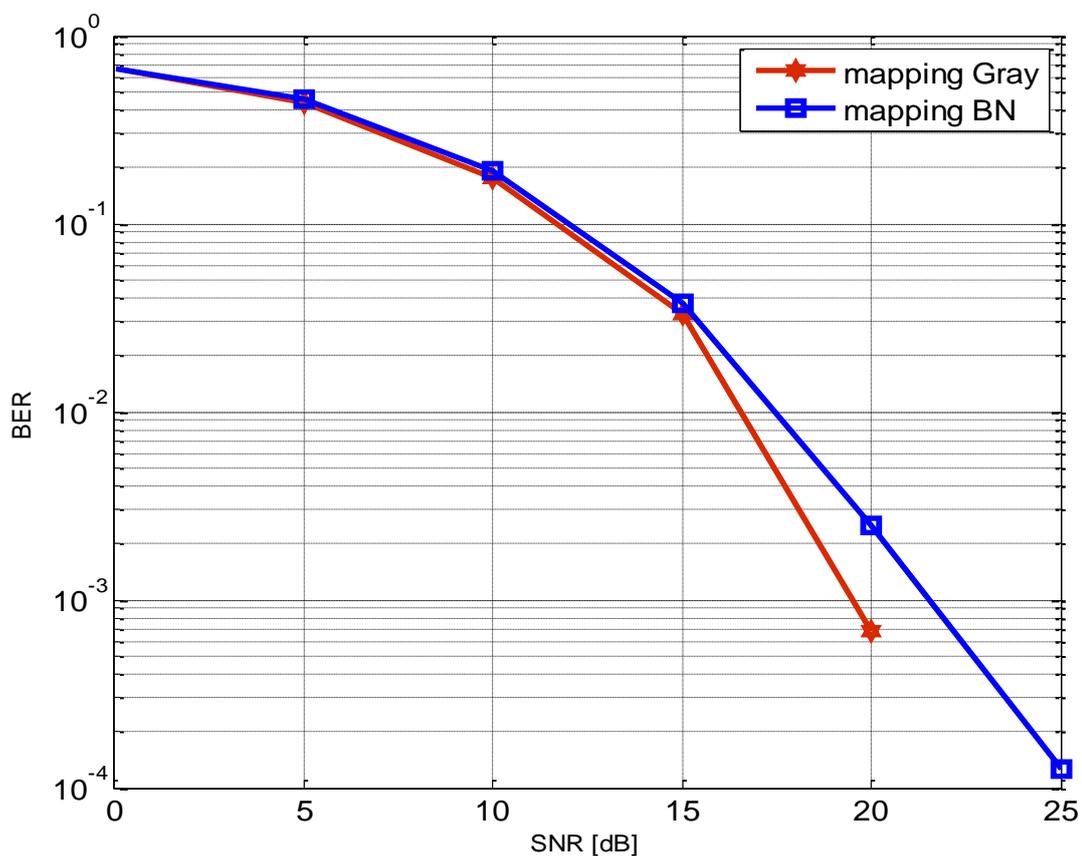


Figure 3. 15: Performances du système MIMO-OFDM pour différents type de mapping

La Figure 3.15 montre l'importance de choisir le type de mappage, Évidemment, le mapping Gray peut apporter de bonnes performances par rapport à le mapping BN (Binaire Naturelle)

3.4 Comparaison entre les schémas d'Alamouti (2x1; 2x2) et MRC (1x2)

paramètres	valeurs
La taille de la FFT(NFFT)	64
modulation	BPSK
canal	Rayleigh
Taille du CP	NFFT /4
Type de mapping	Gray

Tableau 3. 6: Paramètres utilisés pour différents schémas

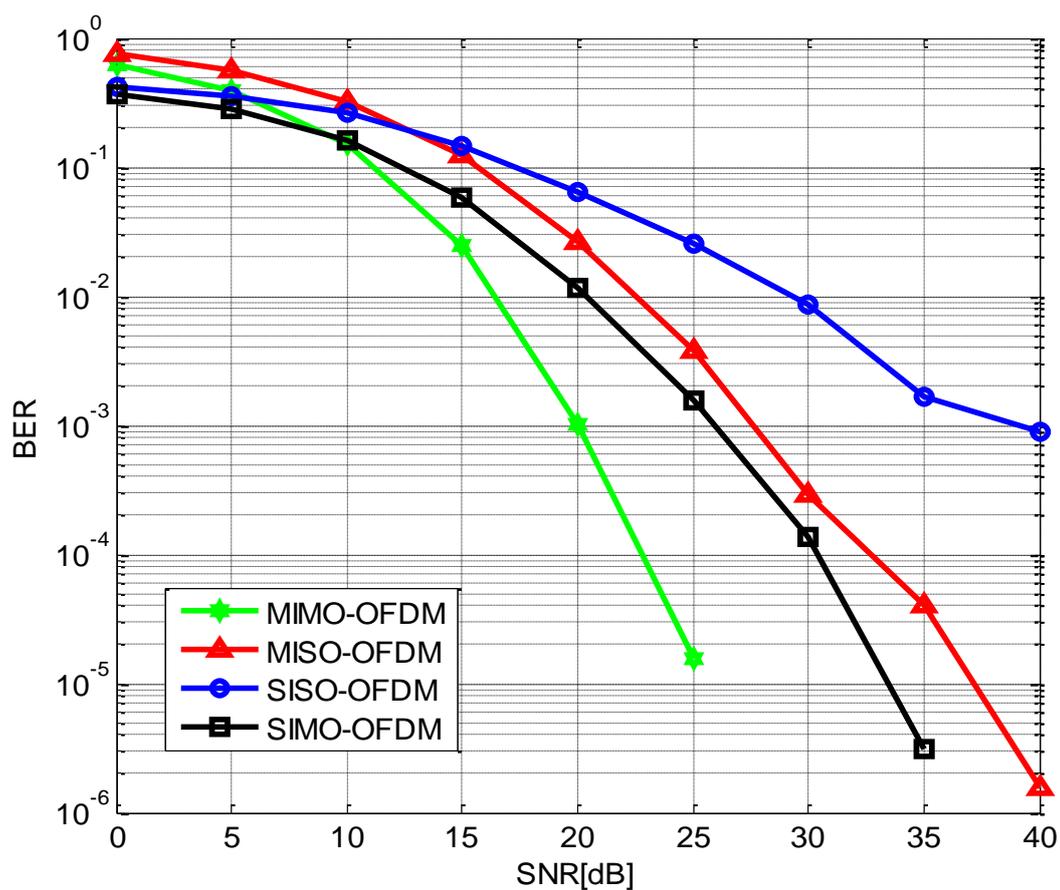


Figure 3. 16: Comparaison des performances entre la technique MRC et Alamouti

La figure 3. montre la performance de SISO-OFDM (1x1), SIMO-OFDM (1x2 MRC), MISO-OFDM (2x1 Alamouti) et MIMO-OFDM (2x2 Alamouti) en fonction de BER sur un canal de Rayleigh,

Les résultats obtenus illustrés sur la figure 3 montrent que l'utilisation de la technique de codage d'Alamouti et MRC donne une meilleure estimation du BER par rapport au système SISO. D'après la même figure, il nous semble que le résultat obtenu par la technique MRC 1x2 est meilleur que d'Alamouti 2x1 parce que la puissance d'émission du système MISO est la moitié de celle du système SIMO.

Le système MIMO-OFDM a des performances supérieures par rapport les autres systèmes

3.5 Conclusion

Au chapitre 3, nous nous sommes concentrés sur les deux parties théoriques vues dans les deux premiers chapitres. Nous avons utilisé le programme MATLAB pour simuler la combinaison des systèmes SISO, MIMO, MISO et SIMO avec OFDM pour trouver le système le plus performant.

Ce travail est divisé en trois parties. Au départ, nous avons présenté la simulation d'une chaîne de communication numérique complète allant d'une modulation OFDM sur un canal SISO en bande de base.

La deuxième partie se concentre sur l'impact de plusieurs paramètres sur les performances du système MIMO-OFDM (2x2 Alamouti) non codé, à savoir : le canal, type de modulation, le mapping, taille de FFT,

La dernière partie est consacrée à l'étude comparative entre les systèmes étudiés, sur un canal à évanouissement de Rayleigh. En outre, les résultats de simulation ont montré que la technique MIMO-OFDM (2x2 Alamouti) présente meilleures performances en termes de taux d'erreur binaire comparativement aux SISO-OFDM, MISO-OFDM et SIMO-OFDM.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans un contexte de forte mobilité, le domaine de la communication numérique sans fil à très haut débit reste un domaine de recherche très actif, visant à développer des solutions de connectivité sans coupure et offrant une très bonne qualité de service pour les utilisateurs. Ce travail se focalise sur l'étude de la technique MIMO avec l'association de la modulation OFDM afin d'évaluer les performances de ces systèmes. Ces deux techniques sont actuellement mises en œuvre dans plusieurs standards.

L'OFDM est devenu une technique de transmission sans fil populaire. Son principe est de convertir les données en un ensemble de sous-canaux parallèles. Les sous porteuses sont séparés par une fréquence minimale requise pour maintenir l'orthogonalité dans les domaines temporel et fréquentiel.

La technique MIMO est utilisé pour augmenter et améliorer la performance du système de transmission en utilisant les codes de blocs d'espace-temps (STBC).

Le travail que nous avons effectué dans ce mémoire se compose de trois chapitres. Le premier chapitre concerne l'historique de l'OFDM, la modulation multi-porteuse ainsi que la description générale de l'OFDM avec ses avantages et ses inconvénients

Dans le deuxième chapitre, nous allons voir l'architecture des systèmes MIMO, en étudiant la capacité du canal, ainsi les différents types de codage, multiplexage et les techniques de réception employées pour traiter les signaux reçus, ainsi que l'association MIMO-OFDM afin de résoudre les problèmes de débit et d'interférences des signaux.

Le troisième chapitre présent la simulation de la chaîne de transmission SISO-OFDM de l'émission vers la réception, ensuite, l'étude de l'influence de plusieurs paramètres

(canal, le mapping, la modulation, etc.) sur les performances du système MIMO-OFDM (2x2 Alamouti). En fin une comparaison entre les différents canaux SISO OFDM, SIMO-OFDM, MISO-OFDM et MIMO-OFDM.

Nous avons obtenu quelques résultats satisfaisants de ces simulations, à savoir:

- La technique OFDM réduit considérablement le phénomène d'ISI. Le bon choix de la longueur du cyclique préfixe est primordial pour éliminer complètement ce phénomène,
- Par rapport aux systèmes MISO-OFDM, SIMO-OFDM et SISO-OFDM, les systèmes MIMO-OFDM (cadage d'Alamouti) ont de meilleures performances
- L'association MIMO-OFDM permet d'obtenir une meilleure qualité du signal lors de la réception en éliminant la sélectivité des canaux et en réduisant les interférences entre les symboles et donc plus l'ordre de diversité augmente plus le taux d'erreur diminue et plus le signal à la réception est optimal

Perspectives

- La technique MIMO continue à être au centre des recherches et de standardisation de la future génération de la téléphonie mobile (5G) en cours notamment en ce qu'on est convenu d'appeler le (MASSIVE MIMO).
- Les performances de la chaîne MIMO-OFDM peuvent être améliorées en utilisant d'autres codes et modulations.

Bibliographie

- [1] S. Ferouani, "Etude et Implémentation d'un Système MIMO dans un Contexte OFDM", Mémoire, Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen 2010.
- [2] D.DAACHI, "Etude des systèmes MIMO-OFDM communication sans fil", Mémoire, UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA DE BEJAIA, 2012.
- [3] A. Le Glaunec, "MODULATIONS MULTIPORTEUSES"-par Version à approfondir.
- [4] https://fr.wikipedia.org/wiki/Phase-shift_keying.
- [5] S. Helaimia N. Farhi, "Etude et Simulation d'une Transmission de Type OFDM Pour Les Communications Sans Fil", Mémoire, UNIVERSITE LARBI TEBESSI – TEBESSA, MEMOIRE, 2016.
- [6] S.PAILLARD P.GRUYER, "Modélisation d'un modulateur et démodulateur OFDM", 12 décembre 2005.
- [7] C.OUAGHLANI B. Kileni, "La technique de transmission OFDM", 2019.
- [8] E. Telatar, "Capacity of multiple antenna Gaussian channels", AT&T Bell Laboratories, Technical Report 1995.
- [9] M.J. Gans. G. J. Foschini, "On the limits of wireless communications in fading environment when using multiple antennas", *Wireless Personal Communications*, 6, 311–335, 1998.
- [10] F.T.BENDIMERAD, "MIMO et Accès Multiples Avancés pour Réseaux Sans Fil", Rapport général du projet PNR 2013.
- [11] C. C. Chiau, "Study of the diversity antenna array for the MIMO wireless communication systems", Department of Electronic Engineering Queen Mary, University of London United Kingdom, 2006.

- [12] A. Rachini, "Etude de la synchronisation temporelle dans les systèmes MIMO-OFDM appliqués aux réseaux mobiles", Thèse de doctorat, INSA de Rennes, 2014.
- [13] A. F. Molisch, "MIMO systems with antenna selection" - an overview, in Radio and Wireless Conference, 2003. RAWCON '03. Proceedings, p. 167-170,2003.
- [14] G. C. Raleigh et J. M. Cioffi, "Spatio-temporal coding for wireless communication", IEEE Transactions on Communications, vol. 46, no. 3, p. 357-366, 1998.
- [15] I. Dioum, "Conception de systèmes multi-antennaires pour techniques de diversité et MIMO : application aux petits Objets nomades communicants", Thèse de doctorat, Université Nice Sophia Antipolis, 2013.
- [16] K. Mabrouk, "Conception et réalisation d'un système de Télécommunications MIMO avec Formation Numérique de Faisceaux en réception ; Calibrage aveugle du Démodulateur triphasé Zéro-IF et comparaison au démodulateur classique à 2 voies I et Q", Thèse de doctorat, Télécom Paris Tech,2008.
- [17] M. Mehassouel, "Application de la technologie MIMO a la 4G du mobile", mémoire, Université Ferhat Abbas –setif1-2014.
- [18] C. E. Shannon, "A mathematical theory of communication", Technical journal, AT & T Bell Labs,October 1948.
- [19] D. Karakolah, "Conception et prototypage d'un récepteur itératif pour des systèmes de transmission MIMO avec précodage linéaire", Thèse de doctorat, Dissertation, TELECOM Bretagne, 03 Nov 2009.
- [20] G. J. Foschini, "Layered space-time architecture for wireless communication in fading environments when using multi-element antennas", Bell Labs Technical Journal, pp.41–59, 1996.
- [21] Dj.Naar, "Codage espace-temps dans les systèmes MIMO en utilisant les

polynômes d'Hermite", Thèse de doctorat, UNIVERSITE DJILLALI LIABES
03 Novembre 2016.

- [22] N. Prayongpun, "Modélisation et étude de la capacité du canal pour un système multi-antennes avancé exploitant la diversité de polarisation", Thèse de doctorat, Université Joseph-Fourier-Grenoble I, 2009.
- [23] D. Le Ruyet et B. Özbek, "Systèmes MIMO et codage spatio-temporel", Article, CNAM, 292 rue Saint Martin, 75141 Paris Cedex 3, France.
- [24] L. Zheng, "Diversity and Multiplexing: A Fundamental Tradeoff in Multiple-Antenna Channels", Article, IEEE TRANSACTIONS ON INFORMATION THEORY, VOL. 49, NO. 5, MAY 2003.
- [25] P. Djiknavorian, "MIMO pour les nuls", Laboratoire de Radio télécommunications et de Traitement du Signal université Laval. Janvier 2006.
- [26] A.J. Paulraj, "Space-time processing for wireless communication", Information systems lab, Stanford University CA 94305-4055 USA 1997.
- [27] H. Jafarkhani and A. R. Calderbank V. Tarokh, "Space-time block codes from orthogonal designs", IEEE Transactions on Information Theory, pages 1456-1467, July 1999.
- [28] N. Seshadri, and A.R. Calderbank, V. Tarokh, "Space-time codes for high data rate wireless communication : performance criterion and code construction", Information Theory, IEEE Transactions on, vol. 44, no. 2, pp. 744–765, 1998.
- [29] S. M. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 16, no. 8, pp. 1451–1458, October 1998.
- [30] W. Zhang X.G Xia K.B Letaief, "Space-Time/Frequency coding for MIMO OFDM in next generation broadband wireless systems", IEEE Wireless Communications, June 2007.

- [31] J. Martin P. Djiknavorian, "L'application de processus stochastiques dans la méthodologie d'Alamouti. Une technique simple de diversité pour les communications sans-fil", GEL-60364, 16 décembre 2005.
- [32] O. BERDER, "Optimisation et stratégies d'allocation de puissance des systèmes de transmission multi-antennes", Thèse de doctorat, Laboratoire d'accueil : LEST -UMR CNRS 6165, Université de Bretagne Occidentale, 2002.
- [33] G. J. Foschini, P. W. Wolnianski, and R. A. Valenzuela G. D. Golden, "V-BLAST: A high capacity space-time architecture for the rich-scattering wireless channel", In Proceedings of the International Symposium on Advanced Radio Technologies, Boulder (CO), USA, September 10 1998.
- [34] G. J. Foschini, G. D. Golden, and R. A. Valenzuela P. W. Wolniansky, "V-BLAST: An architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel", In Proceedings of the URSI International Symposium on Signal, Systems and Electronics (ISSSE), pages 295-300, Pisa, Italy, September 29-October 2, 1998.
- [35] A. M. Tonello, "Space-time bit-interleaved coded modulation with an iterative decoding Strategy", In Proceedings of VTC '00, (Boston, USA), pages 473-478, sept 2000.
- [36] K. Pattipati and L. Brunel P. Willett J. Luo, "Branch-and-bound-based fast optimal algorithm for multiuser detection in synchronous cdma", in, vol. 5:3336-3340, May 2003.
- [37] K. ABED-MERAIM, and J. C. BELFIORE M. O. DAMEN, "A Generalized Sphere Decoder for Asymmetrical Space-Time Communication Architecture", In IEE Electronic Letters, volume 36, January 2000.
- [38] B. M. Hochwald B. Hassibi, "High-Rate Codes That Are Linear in Space and Time", IEEE TRANSACTIONS ON INFORMATION THEORY, VOL. 48, NO. 7, JULY 2002.

- [39] P. Leray, J. Palicot H. Wang, "Architecture reconfigurable pour les systems MIMO à base d'opérateurs CORDIC", 2006.
- [40] I.CHIALI, "Détection multi-utilisateurs MUD dans un système multi-antennes et à modulation multi-porteuses MIMO-OFDM par des approches méta-heuristiques", Thèse de Doctorat, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –,2017.
- [41] G. Matz, F. Hlawatsch D. Seethaler, "Low-Complexity Soft Demodulation of MIMO-BICM Using the Line-Search Detector", in Proc. IEEE ICC-2005, Seoul (Korea), May 2005, vol. 4, pp. 2447–2451 Copyright IEEE 2005.
- [42] H.A. TALEB, "MIMO-OFDM POUR LES COMMUNICATIONS SANS-FIL DANS LES MINES SOUTERRAINES", MEMOIRE, aout 2017.
- [43] D. R. Company, "Using mimo-ofdm technology to boost wireless lan performance today", White Paper, Jun 2005.
- [44] J. H. Winters , N. R. Sollenberger Y.G.Li, "MIMO-OFDM for Wireless Communications:Signal Detection With Enhanced Channel Estimation", IEEE Transactions On Communications, VOL. 50, NO. 9, SEPTEMBER 2002.
- [45] M. BESSEGHIER, "Estimation du CFO et des canaux pour les systèmes à porteuses multiples", Thèse de doctorat, Université Djilali Liabes, 2017.
- [46] H. AOUDIA M.BOUTAGHANE, "Étude de modèles de canaux MIMO stochastiques", Mémoire, Université Abderrahmane Mira de Béjaia,2014.

Annexe

La technique MRC [46]

Les systèmes à diversité de réception nécessitant des techniques de recombinaison des signaux afin d'obtenir un signal sans évanouissement qui sont dû aux multi-trajets. Plusieurs techniques de recombinaisons sont développées dans ce domaine, nous avons choisi de détailler la technique de combinaison par rapport maximal (MRC) car elle est la plus adaptée pour les systèmes de diversité. Cette technique permet de récupérer tous les signaux indépendants arrivant aux récepteurs pour les combiner. Pour empêcher certains phénomènes observés sur quelques branches qui sont liées aux déphasages et la diminution de la puissance des signaux, chaque signal doit être multiplié par un co-phaseur pour que les signaux ne soient plus déphasés, et un coefficient de pondération w_i est appliqué sur chaque branche avant que tous les signaux ne soient combinés (figure 1), le combineur choisit des signaux qui ont un coefficient de pondération élevé, ou un SNR élevé afin de maximiser le signal à la sortie.

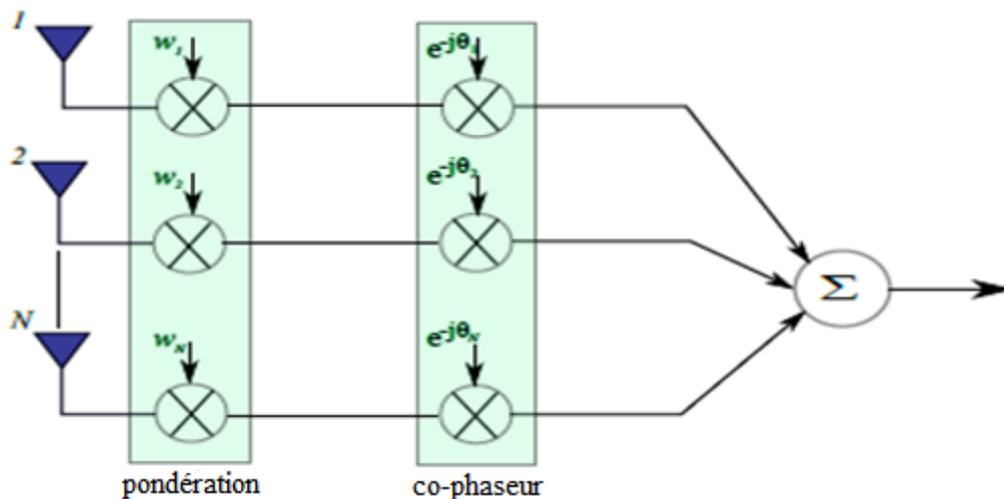


Figure 1 : Schémas du combineur par rapport maximal (MRC)

Le SNR estimé par la technique de la combinaison par rapport maximal (MRC) est donné par :

$$\gamma = E[|s(t)|^2] \sum_{n=1}^N \frac{|V_n|^2}{\sigma_{b,n}^2} = \sum_{n=0}^N \gamma_n$$

Avec :

$$\gamma_n = E[|s(t)|^2] \frac{V_n V_n^*}{\sigma_{b,n}^2}$$

γ : est le SNR.

$S(t)$: le signal transmis.

V_n : La réponse du canal.

$\sigma_{b,n}$: Le bruit gaussien de la nième antenne réceptrice.

N : nombre d'antenne utilisé à la réception.

γ_n : est le SNR de chaque branche avant la combinaison.