

République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université de Saida Dr Moulay Tahar
Faculté de technologie
Domaine : science et technologie
Département d'électronique
Filière : Electronique. Instrumentation



Projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de master instrumentation

Intitulé

Analyse d'un système radio mobile dans un environnement multi trajets

Présenter Par :

***KADI ILHEM**

***HAMDAD RANIA**

Encadré par :

Dr ABOURA LAMIA

Le jury :

M. BOUCHENAK SOFIA

Président

M. TAMI ABDELKADER

Examineur

2022/2023

Les remerciements :

Au terme de ce mémoire, nous tenons à remercier tout naturellement en premier lieu Dieu le tout puissant qui m'a donné la force, le courage et la patience de bien mener ce travail.

Nous remercions notre encadrant madame Aboura.Lamia pour son

Aide, ses conseils et ses remarques pertinentes.

Mes remerciements s'adressent également à monsieur le président de jury et les membres de jury d'avoir accepté d'assister à ma soutenance Et de juger ce modeste travail.

Nous tenons à remercier, également notre collègue madame Slímani.Feta

Mes sentiments vont également à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Les Dédicaces :

*Je dédie ce projet de fin d'études, aux personnes
qui me sont les plus chères :*

*A mes parents qui m'ont énormément soutenu
Dans les moments les plus difficiles, partagé mes
joies et mes peines, qui se sont toujours sacrifiés
pour moi.*

*A mes frères et ma sœur pour ses
encouragements.*

A mes amis et collègues.

KADI ILHEM

A ma très chère mère,

Je tiens c'est avec grand plaisir que je dédie ce modeste travail à l'être le plus cher de ma vie, ma mère aucun dédicace ne saura exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bon être.

Cher à ma grand-mère,

Cher à mes frères et ma famille,

*Aucun mot ne décrit mes sentiments en ce moment, je tiens à remercier chacun de vous pour son aide et sa
Énergie positive et à mes amis and mes collègues.*

HAMDAD RANIA

1. Table des matières

Liste des abréviations :	I
Liste des Figures :	III
Résumé:	V
Introduction générale :	1
Chapitre 01 : Généralités sur les transmissions sans fil	3
1.1. Définition sur les différents types des générations et les canaux de transmission :	4
1.1.1. Première génération (1G) :	4
1.1.2. Deuxième génération (2G) :	4
1.1.3. Troisième génération (3G) :	5
1.1.4. Evolution vers la quatrième génération (4G) :	5
1.1.5. Tableau de détail des générations de réseau mobile :	6
1.2. Canal :	6
1.2.1. Canal de propagation radio mobile :	6
1.2.2. Propagation par trajets multiples :	7
1.3. Les perturbations de propagation :	8
1.4. Types et modèles de canaux :	9
1.4.1. Canal avec bruit blanc gaussien aditif :	9
1.4.2. Canal à évanouissements :	10
1.4.3. Le modèle du canal de Rayleigh :	11
1.5. Principes de la modulation :	12
1.5.1. La modulation de phase (BPSK ou BinaryPhase Shift Keying) :	12
1.5.2. QPSK: Quadrature Phase-Shift Keying :	13
1.5.3. QAM : Quadrature Amplitude Modulation :	14
1.6. Réseau sans fil :	14
1.6.1. Définition :	14
1.6.2. Câble électrique :	15
1.6.3. Fibre optique:	15
1.6.4. Canal électromagnétique :	16
Chapitre 02:Etude du système MIMO-OFDM	17

.2	Introduction :	18
2.1.	Technique MIMO :	18
2.2.	Principe de MIMO:	19
2.3.	Le principe de la technologie MIMO :	21
2.4.	Domaines d'utilisation de la technologie MIMO :	22
2.5.	Concept et capacité des canaux MIMO :	22
2.5.1.	Système SISO :	23
2.5.2.	Système MISO :	23
2.5.3.	Système SIMO :	24
2.6.	Avantages de la technologie MIMO :	24
2.7.	La technologie OFDM :	25
2.7.1.	Principe :	25
2.7.2.	Description mathématique :	25
2.7.3.	Principe de la modulation OFDM :	27
2.8.	Notion D'ORTHOGONALITÉ:	31
2.9.	Schéma général d'un système de communication sans fil basé sur la modulation OFDM :	31
2.10.	Les Avantages et inconvénients de l'OFDM :	32
2.11.	L'utilisation de l'OFDM :	33
2.12.	Présentation détaillée du system MIMO-OFDM :	34
2.12.1.	Emetteur MIMO-OFDM :	34
2.12.2.	Récepteur MIMO-OFDM :	35
2.13.	Conclusion :	35
	Chapitre 03 : Simulations et Résultats	36
3.	Introduction :	37
3.1.	Présentation de Matlab:	37
3.2.	Simulation et performance d'un Système MIMO-OFDM :	38
3.3.	Description des différents blocs en émission :	38
3.4.	Description des différents blocs en réception :	43
3.5.	Paramètres de simulation MIMO-OFDM :	47
3.6.	Les performances du système MIMO-OFDM :	48
3.7.	Modulation :	50

3.8.	La simulation de MIMO :.....	53
3.9.	La simulation de l'OFDM :.....	54
3.9.1.	Les données originales:	55
3.9.2.	Modulation Psk:	55
3.9.3.	Sous-porteuses 1 à 4 :.....	56
3.9.4.	IFFT sur toutes les sous-porteuses:	57
3.9.5.	Préfixe cyclique ajouté à toutes les sous-porteuses :.....	57
3.9.6.	Orthogonalité :	58
3.9.7.	Signal OFDM :.....	58
3.10.	Conclusion :.....	59
	Conclusion générale :	61
	L'annexe 1:	62
	L'annexe 2:	65
4.	Bibliographie.....	70

Liste des abréviations :

AWGN: Additive White Gaussian Noise.

BBGA : Bruit Blanc Gaussien Additif

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

BPSK : Binary Phase Shift Keying

CP: Cyclic Préfix

CAN : Convertisseur Analogique Numérique

CDMA: Code Division Multiple Access.

FDMA: Frequency Division Multiple Access.

FFT: Fast Fourier Transform.

HiperLan: High Performance LAN.

GPRS: General Packet Radio Service.

GSM: Global System for Mobile communications.

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineer.

IFFT: Inverse Fast Fourier Transform

LOS: Line of Sight.

MIMO: Multiple Input Multiple Output

MISO: Multiple Input Single Output

NLOS: None Line of Sight.

OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing

PSK: Phase Shift Keying.

QAM: quadrature amplitude modulation

QPSK: quadrature Phase Shift Keying.

SISO: Single Input Single Output

SNR: Signal to Noise Ratio.

STBC: **Space**-Time Block Code.

SIMO: Single Input Multiple Output

UMTS: Universal Mobile Telecommunications System.

Wi-MAX: Worldwide Interoperability for Microwave Access.

WIFI: Wireless Fidelity.

WIMAX: Worldwide Interoperability for Microwave Access.

WLAN: Wireless Local Area Network.

WMAN: Wireless Metropolitan Area Network.

WPAN: Wireless Personal Area Network.

WWAN: Wireless Wide Area Network.

Liste des Figures :

- Figure 1.1 : Schéma synoptique d'une chaîne de communication
- Figure 1.2 : Propagation par multi-trajets dans un environnement « Outdoor »
- Figure 1.3 : Propagation multi-trajets NLOS
- Figure 1.4 : Propagation multi-trajets LOS
- Figure 1.5: Modèle du canal BBAG
- Figure 1.6: Milieu de transmission avec deux obstacles
- Figure 1.7: Modèle d'un canal avec évanouissement
- Figure 1.8: Le modèle du canal de Rayleigh
- Figure 1.9: le schéma de la modulation BPSK
- Figure 1.10: le schéma de la modulation QPSK
- Figure 1.11 : Schéma de constellation de la modulation QAM-16.
- Figure 1.12 : Paires torsadées.
- Figure 1.13 : Câble coaxial.
- Figure 1.14 : Illustration d'un câble contenant plusieurs fibres optiques.
- Figure 2.1: Schémas représentatifs du SISO, MISO, SIMO et MIMO
- Figure 2.2 : Schémas représentatifs du SISO, MISO, SIMO et MIMO.
- Figure 2.3: Modèle de canal MIMO
- Figure 2.4: Principe de système MIMO
- Figure 2.5 : Comparaison des systèmes multi-porteuse et mono porteuse
- Figure 2.6 : Symboles OFDM
- Figure 2.7 : schéma de principe d'un modulateur OFDM
- Figure 2.8 : Signal temporel à la sortie du modulateur
- Figure 2.9: Spectre idéal en sortie du modulateur OFDM
- Figure 2.10: spectre réel en sortie du modulateur OFDM.
- Figure 2.11 : Schéma block d'un système OFDM
- Figure 3.1 : Chaîne de transmission MIMO-OFDM en Simulink
- Figure 3.2 : Emetteur OFDM
- Figure 3.3 : Insertion des sous-porteuses pilotes et de la sous porteuse nulle centrale (DC).

Figure 3.4 : Codeur spatio-temporel

Figure 3.5 : Récepteur OFDM

Figure 3.6 : Combinateur Spatio-temporel

Figure 3.7 : Courbe de taux d'erreur binaire (BER) system MIMO-OFDM

Figure 3.8 : Modulation 16 QAM

Figure 3.9: Modulation 64 QAM Channel MIMO

Figure 3.10: Modulation 64 QAM Channel AWGN

Figure 3.11 : Modulation BPSK

Figure 3.12 : Simulation de MIMO, SIMO, et SISO Systèmes

Figure 3.13 : Les données originales

Figure 3.14: Modulation Psk

Figure 3.15: Sous-porteuses 1 à 4

Figure 3.16: IFFT sur toutes les sous-porteuses

Figure 3.17: Préfixe cyclique ajouté à toutes les sous-porteuses

Figure 3.18: Orthogonalité

Figure 3.19: Signal OFDM

Résumé :

On observe de nos jours un intérêt considérable pour de nouvelles technologies sans fil capables de réaliser des hauts débits, comme l'OFDM qui offre une forte protection pour les canaux à trajets multiples. Les perturbations qui interviennent sur ce type de canaux induisent des erreurs de transmission pour assurer un taux d'erreur minimal. Dans ce travail, Nous combinons la technologie MIMO et celle de l'OFDM capable d'offrir une protection améliorée aux trajets multiples, et une robustesse développée grâce à l'entrelacement temporel des données transmis et un codage de correction d'erreurs.

Les résultats obtenus montrent que le MIMO-OFDM avec codage convolutif est performant et juste, et on a obtenu le signal BER qui confirme notre simulation est juste et bon.

Introduction générale

Introduction générale :

Le monde de la communication a fait des avancées qualitatives dans les communications sans fil, où les services aux utilisateurs sont devenus plus nombreux, nécessitant le transfert de la voix, des données ou du contenu multimédia (images, vidéo, ...). Ce développement s'est accompagné d'une augmentation significative du nombre d'utilisateurs et de leurs exigences en termes de productivité, alors que l'utilisateur n'est pas convaincu de parler uniquement avec son interlocuteur au téléphone, mais nécessite d'autres services tels que l'Internet mobile ou les appels vidéo, et avec une bonne qualité de service.

Cependant, l'augmentation des besoins de production est entravée par la disponibilité des ressources spectrales pour le rayonnement électromagnétique, et aussi par la nature des canaux eux-mêmes. En effet, les communications sont faites sur de plus en plus de bandes de fréquences limitées par le grand nombre de normes. De plus, la communication sans fil est réalisée par la propagation d'une onde électromagnétique dans l'espace, mais le canal est généralement de type multi-trajets, en raison de plusieurs obstacles (bâtiments, arbres, voitures, etc.). A la réception, le signal reçu d'un ensemble de signaux est constitué de directions différentes qui rendent le canal sélectif en fréquence et augmentent son effet avec le débit de transmission.

Pour résoudre ces problèmes, plusieurs technologies ont été adoptées : les systèmes multi-antennes MIMO (Multi-Input et Multiple Output), ont vu le jour, ce qui a permis de gagner en diversité spatiale et d'améliorer la capacité du système. Ainsi que des techniques de modulations multi-porteuses OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), qui permettent d'accéder à une bonne efficacité spectrale avec une bonne robustesse de la transmission. Des débits historiques ont été atteints avec l'apparition de la combinaison des deux technologies précédentes pour donner un nouveau système, qu'on appelle MIMO-OFDM, qui est la base principale du système de communication de la quatrième génération, il permet une meilleure exploitation de la diversité spatiale et de la diversité fréquentielle prévue par cette technique de modulation.

Dans ce contexte, on a fait l'étude des systèmes MIMO-OFDM et l'évaluation de leurs performances dans un environnement multi-trajets. Les deux techniques à savoir l'OFDM et MIMO-OFDM seront implémentées à l'aide de l'outil de simulation SIMULINK de MATLAB. Leurs performances respectives seront mises en valeurs à travers des simulations extensives, pour mettre en valeur l'intérêt et l'apport de l'une relativement à l'autre.

Introduction générale :

Pour cela on a organisé notre manuscrit comme suit :

- Le premier chapitre présente les généralités sur les transmission sans fil .
- Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des systèmes MIMO, OFDM et leur combinaison.
- Le troisième chapitre présente les résultats et les simulations des différents systèmes : MIMO, OFDM et MIMO-OFDM
- Conclusion générale.

Chapitre 01 : Généralités sur les transmissions sans fil

1.1.Définition sur les différents types des générations et les canaux de transmission :

1.1.1. Première génération (1G) :

La première génération [1] de systèmes cellulaires 1G est la technologie de téléphonie mobile de première génération. Les téléphones portables étaient des téléphones analogiques et étaient introduits en 1980. En 1979, le premier système cellulaire dans le monde est devenu opérationnel par «Nippon Telephone and Telegraph (NTT) » à Tokyo, Japon. En Europe, les deux systèmes analogiques les plus populaires étaient « Nordic MobileTelephone (NMT) » et « TACS », d'autres systèmes analogiques ont également été introduits dans les années 1980 à travers l'Europe.

Tous les systèmes offraient la fonctionnalité de han Dover et d'itinérance, mais les réseaux cellulaires n'étaient pas en mesure d'interagir entre les pays. C'était le principal inconvénient de la téléphonie mobile de première génération.

1.1.2. Deuxième génération (2G) :

La 2G est la seconde génération pour la téléphonie mobile, elle est aussi connue sous le nom de GSM. Les premiers réseaux cellulaires de deuxième génération ont été commercialisés sous la norme GSM en Finlande par « Radiolinja » en 1991.

Les trois avantages principaux des réseaux 2G par rapport à leurs prédécesseurs étaient que les conversations téléphoniques étaient cryptées numériquement. Les réseaux 2G étaient nettement plus efficaces sur le spectre, permettant des taux de pénétration bien plus importants, mais aussi ils ont introduit les services de données mobiles en commençant par le GPRS (2.5G) avec un débit théorique de 171.2 Kbit/s, puis le EDGE (2.75G) avec un débit allant jusqu'à 384 kbit/s qui a été déployé sur les réseaux GSM à partir de 2003, initialement par AT&T aux États-Unis.

Néanmoins, plusieurs opérateurs ont annoncé que la technologie 2G sera désactivée sur leurs réseaux afin qu'ils puissent récupérer ces bandes radio et les réutiliser pour de nouvelles technologies, mais en Algérie, cette étape risquera de prendre beaucoup de temps car sur les 45,846 millions abonnés actifs, 14,385 millions sont des abonnés au réseau GSM soit 31,38% d'abonnés [3], et cela s'explique majoritairement par l'utilisation de terminaux mobiles qui ne supportent pas les nouvelles technologies et qui doivent être changés.

1.1.3. Troisième génération (3G) :

La troisième génération [1] de réseaux mobiles (3G) regroupe deux familles de technologies ayant connu un succès commercial : l'UMTS (Universel Mobile Télécommunications System), issu du GSM et largement déployé autour du globe, et le CDMA2000, issu de l'IS-95 et déployé principalement en Asie et en Amérique du Nord. Les interfaces radio de ces deux familles reposent sur des caractéristiques techniques proches, notamment un schéma d'accès multiples à répartition par les codes (CDMA).

La 3G est caractérisée par la volonté des industriels de télécommunications de définir une norme au niveau mondial. Les enjeux étaient d'offrir une itinérance globale aux utilisateurs, mais Tableau 0-1 également de réduire les coûts unitaires des terminaux mobiles et des équipements de réseau grâce aux économies d'échelle.

Dans cette perspective, ces entreprises, en particulier celles issues du monde GSM, se sont regroupées au sein du consortium 3GPP. Cette démarche aboutit à l'élaboration de la norme UMTS à la fin des années 1990. Cette première version de la norme est appelée Release 99. Les innovations associées au système UMTS ont principalement trait au réseau d'accès, celui-ci s'interfaçant avec le réseau cœur GPRS. Les objectifs de l'UMTS étaient d'accroître la capacité du système pour le service voix mais surtout d'améliorer le support des services de données.

La différence majeure avec le GSM vient de l'interface radio. Celle-ci repose sur l'étalement de spectre à séquence directe.

L'étalement de spectre consiste à transmettre une information sur un signal occupant un spectre nettement plus grand que le minimum nécessaire. Cette technique a été d'abord utilisée dans les systèmes militaires à des fins de discrétion et parce qu'elle offre une bonne résistance aux brouillages hostiles. Depuis le milieu des années 90, elle est utilisée dans certains systèmes radio mobiles cellulaires.

En Algérie, au 31 décembre 2017, le parc d'abonnés 3G a atteint 21,592 millions avec un taux de pénétration au service téléphonique de troisième génération de 51,17%.

1.1.4. Evolution vers la quatrième génération (4G) :

Il s'agit d'une nouvelle technologie qui a premièrement été commercialisée utilisant la norme LTE (Long Term Evolution) fin 2009 par l'opérateur téléphonique suédois et finlandais « Telia »,

c'est une évolution des réseaux GSM/UMTS qui spécifie la prochaine génération du système d'accès mobile à large bande. Les intérêts majeurs qu'a apportée la 4G par rapport à son antécédent 3G réside dans, l'augmentation considérable du débit qui peut atteindre 100 Mbits/s en liaison descendante et 50 Mbits/s en liaison montante, diminution de latence, et permet d'offrir plus de capacité et une mobilité qui peut aller jusqu'à 350 km/h, et même 500 km/h en fonction de la bande de fréquences. De ce fait, cette technologie a aussi été adoptée en Algérie à partir de l'année 2016 et comptait 9,868 millions d'abonnés à la fin 2017, tous opérateurs inclus [1].

1.1.5. Tableau de détail des générations de réseau mobile :

<i>Détail des générations de réseau mobile</i>			
<i>Réseau</i>	<i>Acronyme</i>	<i>Débit</i>	<i>Fréquences</i>
1G	<i>RC2000 et NMT</i>	<i>2.4kbit/s</i>	
2G	<i>GSM</i>	<i>9,6Kbit/s</i>	<i>900 et 1800 MHz</i>
3G	<i>UMTS</i>	<i>1,9Mbit/s</i>	<i>1900 et 2100 MHz</i>
4G	<i>LTE</i>	<i>150Mbit/s</i>	<i>800,1800 et 2600 MHz</i>

Tableau 1.1 : Détail des générations de réseau mobile

1.2.Canal :

1.2.1. Canal de propagation radio mobile :

Un système de transmission radioélectrique permet de transformer un signal électrique émis $e(t)$ en signal électrique reçus $s(t)$ par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques. Le canal de propagation est l'endroit qui transforme les ondes électromagnétiques lors de leur propagation. A ce stade, il est important de différencier le canal de propagation, qui ne tient en compte que des interactions du signal émis avec l'environnement traversé et le canal de transmission, qui inclut en plus les effets induits par les antennes émettrice et réceptrice comme le montre la Figure 1.1.

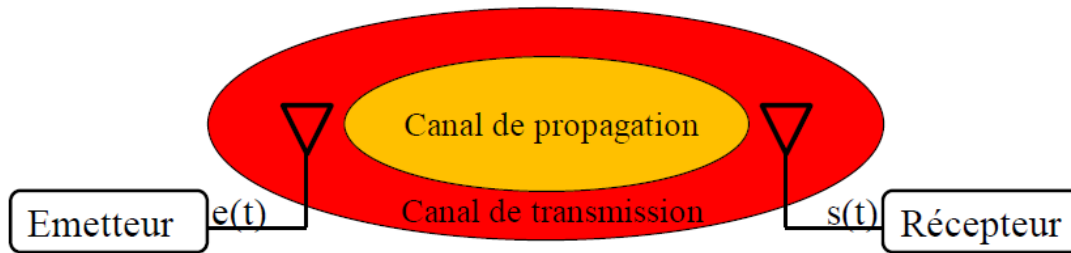


Figure 1.1 : Schéma synoptique d'une chaîne de communication

1.2.2. Propagation par trajets multiples :

La propagation en espace libre représente un cas idéal. Mais en réalité, le canal de propagation est l'endroit de multi trajets à cause des obstacles qui entourent l'émetteur et le récepteur (Figure 1.2). Dans ce cas, plusieurs répliques du signal émis arrivent au récepteur à travers plusieurs trajets qui possèdent différents états d'atténuation, de déphasage et des retards (dus à la longueur du trajet).

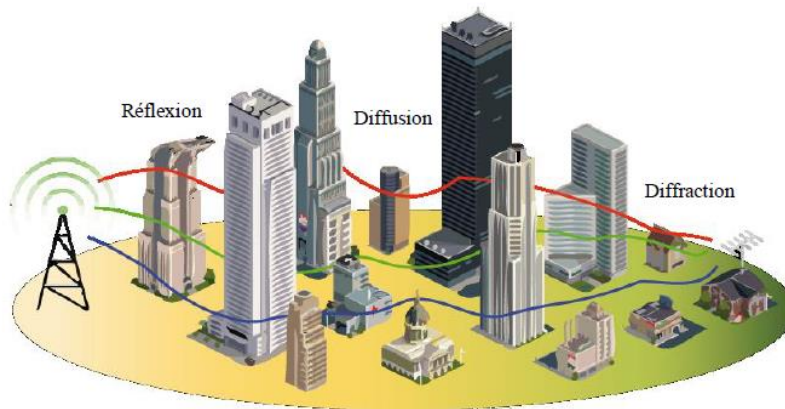


Figure 1.2 : Propagation par multi-trajets dans un environnement « Outdoor »

Lors de la propagation multi-trajets, deux situations de propagation sont généralement distinguées. La première est désignée par le terme NLOS (None Line Of Sight) où il n'y a pas de visibilité directe entre l'émetteur et le récepteur. Dans ce cas, la densité de probabilité de l'amplitude d'évanouissement du signal total reçu la suit la loi de Rayleigh (Figure I.3). Alors

que, la deuxième situation aura lieu lorsqu'il existe un trajet direct prépondérant (Line Of Sight, LOS) (Figure I.4) et par conséquent l'amplitude d'évanouissement est caractérisée par la distribution de Rice.

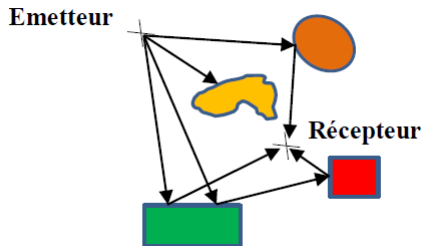


Figure 1.3 : Propagation multi-trajets NLOS

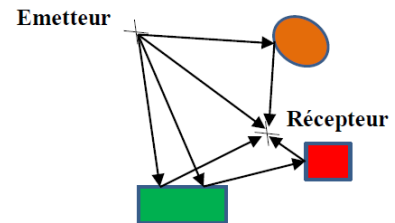


Figure 1.4 : Propagation multi-trajets LOS

Selon la nature des objets rencontrés durant le parcours des trajets multiples, divers phénomènes électromagnétiques sont dégagés tels que : la réflexion, la diffraction et la diffusion sur des obstacles [2].

1.3. Les perturbations de propagation :

Lors d'une communication radio mobile, le signal émis est porté par une onde électromagnétique qui se propage dans l'air, cette propagation est loin d'être en espace libre. Les obstacles de différentes formes géométriques et de diverses caractéristiques perturbent la propagation, ces perturbations se traduisent par des fluctuations de la puissance du signal reçu en fonction de la distance. On distingue deux types de fluctuations de l'enveloppe du signal reçu : les évanouissements sévères, qui sont causés par l'addition des différents trajets provenant des diffuseurs à proximité du récepteur, et les évanouissements lents, qui sont causées par les variations à grande échelle du milieu de propagation. Les mécanismes de propagation qui se produisent, en communication mobile, sont : [2]

- **la réflexion** : elle se produit lorsqu'une onde électromagnétique rencontre des surfaces lisses de très grandes dimensions par rapport à sa longueur d'onde (λ), comme par exemple la surface de la terre, les bâtiments et les murs.

- **la diffraction** : elle se produit lorsqu'un obstacle épais et de grande dimension par rapport à sa longueur d'onde obstrue l'onde électromagnétique entre l'émetteur et le récepteur. Dans ce cas, des ondes secondaires sont générées et se propagent derrière l'obstacle ("shadowing").
- **la diffusion "Scattering"** : elle se produit lorsque l'onde rencontre un obstacle dont l'épaisseur est de l'ordre de sa longueur d'onde, comme par exemple les lampadaires et les feux de circulation. Dans ce cas, l'énergie est dispersée dans toutes les directions

1.4.Types et modèles de canaux :

Il existe une multitude de modèles des canaux de propagations. Dans cette étude nous nous intéressons aux types de canaux suivants : [3]

1.4.1. Canal avec bruit blanc gaussien aditif :

Le modèle de canal le plus couramment utilisé pour la transmission numérique analogique est également le canal de bruit blanc additif gaussien, qui est également l'un des modèles les plus faciles à générer et à analyser. (BBAG). Ce bruit modélise le bruit interne (bruit thermique dû à des défauts de l'appareil) et le bruit externe (bruit d'antenne). Cependant, ce modèle est plus lié à la transmission filaire car il représente une transmission presque parfaite de l'émetteur au récepteur. Supposons qu'on a envoyé le signal $x(t)$, le signal reçu s'écrit alors :

$$Y(t) = a x(t) + n(t) \quad (1.1)$$

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

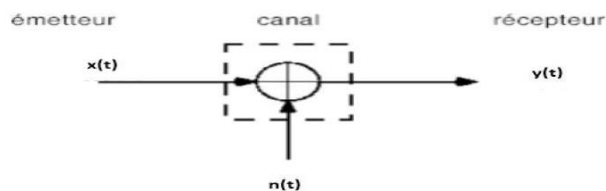


Figure 1.5: Modèle du canal BBAG

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

$$\frac{S}{B} = \log_2(M) \frac{E_b}{N_0} \quad (1.2)$$

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

M représente les états possibles que peut prendre un symbole.

1.4.2. Canal à évanouissements :

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

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

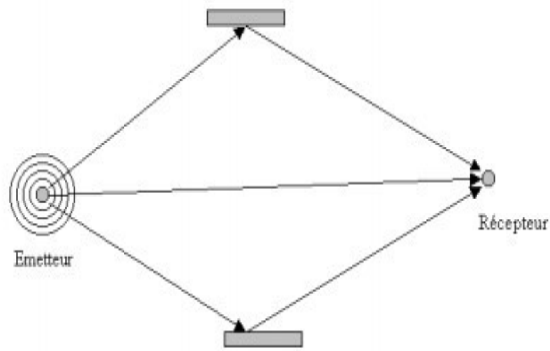


Figure 1.6: Milieu de transmission avec deux obstacles

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

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

Il est décrit par l'équation :

$$R(t) = h(t; t_d) * S(t) \quad (1.3)$$

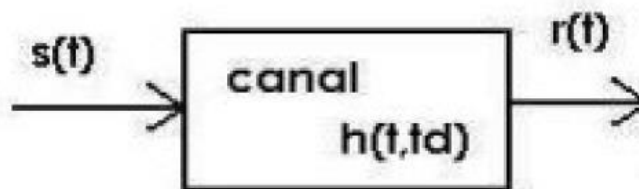


Figure 1.7: Modèle d'un canal avec évanouissement

1.4.3. Le modèle du canal de Rayleigh :

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

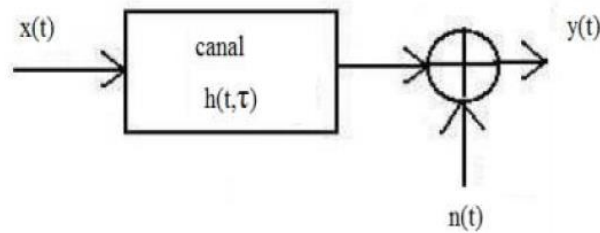


Figure 1.8: Le modèle du canal de Rayleigh

Conséquent, à la sortie du canal, on a :

$$Y(t) = x(t) * h(t, \tau) + n(t) \quad (1.4)$$

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

1.5.Principes de la modulation :

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

Les principales modulations utilisées par IEEE 802.11 sont les suivantes :[4]

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

1.5.1. La modulation de phase (BPSK ou BinaryPhase Shift Keying) :

La phase de la porteuse transmission numérique, les 0 et les 1 provoquent une variation de 180° de la phase de la porteuse. En réception, un détecteur de phase permet de retrouver sur la fréquence modulée le signal numérique émis

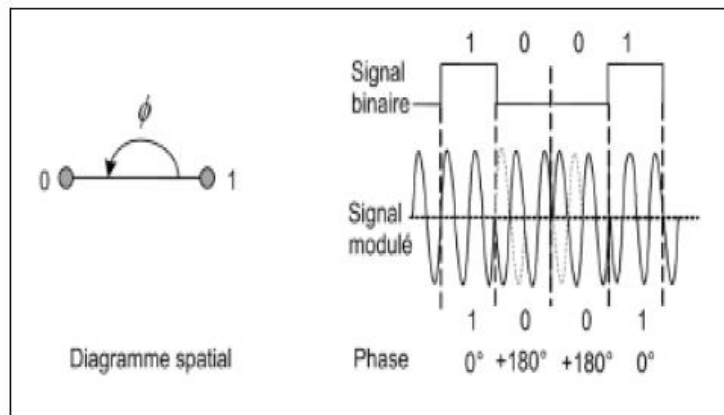


Figure 1.9 : le schéma de la modulation BPSK

1.5.2. QPSK: Quadrature Phase-Shift Keying :

Cette modulation produit deux signaux transportant l'information, l'un est sinusoïdal (Q) et l'autre Co sinusoïdal (I). Le codage est réalisé en fonction de la 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).

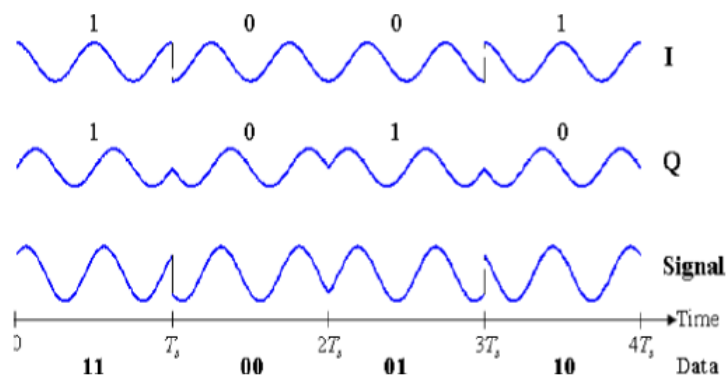


Figure 1.10 : le schéma de la modulation QPSK

La modulation QPSK est très utilisée dans les transmissions satellites car elle permet d'obtenir un signal peu sensible aux interférences tout en conservant un débit acceptable. Ces caractéristiques sont importantes.

1.5.3. QAM : Quadrature Amplitude Modulation :

Cette modulation complète la modulation QPSK. En effet, elle utilise le même système de modulation de phase mais elle ajoute, en plus, une modulation d'amplitude.

Les signaux I et Q peuvent prendre différentes valeurs d'amplitude et ainsi augmenter le nombre de symboles transmissibles.

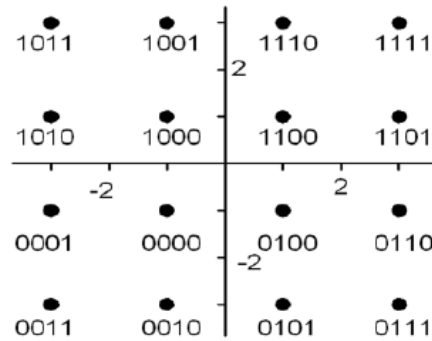


Figure 1.11 : Schéma de constellation de la modulation QAM-16.

La transmission de ces symboles sur la bande peut-être altérée par d'autres signaux d'interférences; afin d'améliorer la résistance, IEEE802.11 utilise deux techniques : l'élargissement de spectre, et l'OFDM. Nous dans ce mémoire on s'intéresse à l'OFDM.

1.6. Réseau sans fil :

1.6.1. Définition :

Un réseau sans fil est un réseau informatique ou numérisé qui connecte différents postes ou systèmes entre eux par ondes radios.

Le réseau sans fil peut associer à un réseau de télécommunication pour réaliser des interconnexions entre nœuds. La norme la plus utilisée actuellement pour les réseaux sans fil est la norme IEEE802.11.

Le rayonnement géographique des ondes est relativement limité étant donné la faible puissance d'émission des solutions matérielles actuelles. Pour cette raison, les réseaux sans fil se sont avant tout développés comme réseaux internes, propres à un bâtiment, soit comme réseau d'entreprise, soit comme réseau domestique [5].

Il existe plusieurs familles de canaux, avec leurs caractéristiques propres, qui sont listés ci-dessous :

1.6.2. Câble électrique :

Un câble électrique simple est constitué de deux fils conducteurs d'électricité. On distingue notamment :

- le câble simple où les deux fils sont côte à côte ;
- la paire torsadée où les deux fils sont enroulés l'un sur l'autre : on limite ainsi les interférences et la diaphonie, et on utilise ce type de canal pour des communications sur de courtes distances ;

Le câble coaxial où l'un des deux fils est en fait un treillis qui entoure l'autre fil. Ainsi, les interférences avec d'autres dispositifs sont extrêmement réduites. Le câble coaxial est utilisé dans certains réseaux Ethernet ou pour transmettre un signal vidéo sur quelques dizaines de mètres. Les premiers câbles sous-marins étaient coaxiaux, mais ils sont maintenant largement dépassés par les câbles à fibre optique. [22]

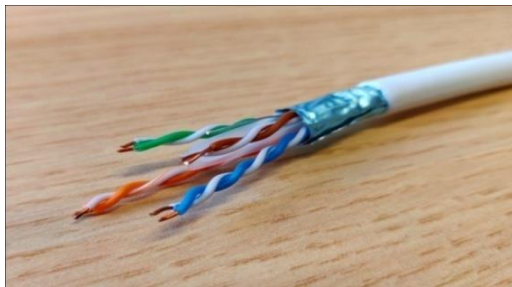


Figure 1.12 : Paires torsadées.

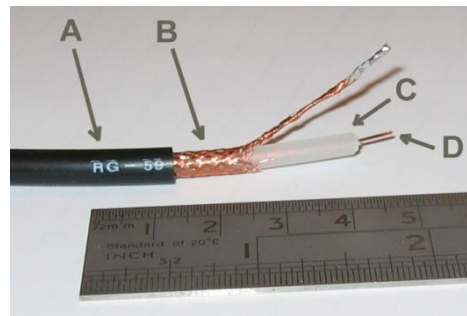


Figure 1.13 : Câble coaxial.

1.6.3. Fibre optique:

Une fibre optique est un fil en verre ou en plastique qui conduit la lumière entre ses deux extrémités avec très peu de pertes. De ce fait, elle présente très peu de distorsion et n'introduit quasiment pas de bruit. La fibre optique est utilisée à tous les niveaux de l'architecture de communication : des câbles sous-marins aux logements.

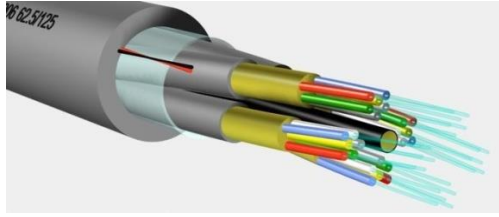


Figure 1.14 : Illustration d'un câble contenant plusieurs fibres optiques.

1.6.4. Canal électromagnétique :

Le canal électromagnétique regroupe tous les milieux où les ondes électromagnétiques (comme les ondes radio ou la lumière) peuvent se déplacer. Typiquement, il s'agit de l'air libre. On distingue trois types de propagation :

- la propagation en ligne de mire qui permet des communications très haute fréquence ; elle est utilisée en téléphonie mobile ou pour la communication par laser entre bâtiments ;
- la propagation par onde de sol : l'atmosphère joue le rôle d'un guide d'onde ; elle permet des communications à très basses fréquence et autorise la diffusion du message dans le monde entier (par exemple en navigation) ;
- la propagation ionosphérique où les ondes rebondissent sur l'ionosphère et la surface de la Terre [22].

Chapitre 02 :

Etude du système MIMO-OFDM

2. Introduction :

Dans ce chapitre, nous explorons en détail les systèmes MIMO, OFDM et la combinaison MIMO-OFDM. Nous commencerons par une présentation approfondie de chacune de ces technologies, en expliquant leurs principes de base, leurs avantages et leurs limites.

2.1. Technique MIMO :

MIMO est une technologie sans fil qui utilise plusieurs émetteurs et récepteurs pour transmettre plus de données en même temps. La technologie MIMO tire parti d'un phénomène d'ondes radio appelé trajets multiples où les informations transmises rebondissent sur les murs, les plafonds et d'autres objets, frappant l'antenne de réception plusieurs fois sous différents angles et à des moments légèrement différents.

Les systèmes MIMO sont l'un des principaux axes de développement pour augmenter les débits des communications sans fil. Leur particularité réside dans l'utilisation simultanée de plusieurs antennes, émettrices et réceptrices. D'autant plus, ces systèmes permettent d'améliorer les performances des appareils et permettent d'atteindre à la fois de très hautes efficacités spectrales et de lutter efficacement contre les évanouissements du signal. L'idée est de tirer profit de la dimension spatiale du canal et d'exploiter les trajets multiples plutôt que de les supprimer. [06]

Les systèmes MIMO sont devenus l'un des sujets les plus étudiés car ils sont capables d'augmenter l'efficacité spectrale (amplitude) sur une bande de fréquence limitée. L'utilisation de plusieurs antennes entraîne une dimension supplémentaire dans le degré d'accès multiple au réseau par rapport au cas d'une seule antenne (Space Division Multiple Access : SDMA). [07]

La technologie MIMO tire parti du comportement multi-trajets en utilisant plusieurs émetteurs-récepteurs « intelligents » avec une dimension « spatiale » supplémentaire pour augmenter significativement les performances et l'autonomie. MIMO permet à plusieurs antennes de transmettre et de recevoir plusieurs flux spatiaux en même temps. La technologie MIMO rend les antennes plus intelligentes en leur permettant de combiner des flux de données provenant de différents chemins à différents moments pour augmenter efficacement la puissance de réception du signal. Les antennes intelligentes utilisent la technologie de diversité spatiale, qui fait bon usage des antennes redondantes. Si le nombre d'antennes est supérieur aux flux spatiaux, des

antennes supplémentaires peuvent ajouter de la diversité dans le récepteur et augmenter la portée. Il a différents types de transmission MIMO, MISO, SIMO et SISO (Figure 2.1). [08]

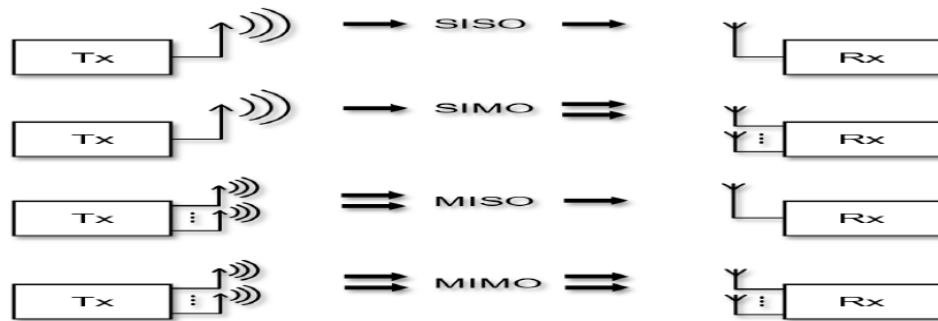


Figure 2.1: Schémas représentatifs du SISO, MISO, SIMO et MIMO

2.2.Principe de MIMO:

Un system MIMO se caractérise par l'utilisation de plusieurs antennes à l'émission ainsi qu'à la réception. Lorsqu'un tel système comprend seulement une seule antenne à l'émission et plusieurs antennes à la réception, il est nommé SIMO (Single Input Multiple Output). De même, lorsqu'il comprend plusieurs antennes à la réception et une seule antenne à l'émission, il est nommé MISO (Multiple Input Single Output).

Finalement, si les deux côtés comptent une antenne chacun, le système est dit SISO (Single Input Single Output). Comme la montré la figure 2.2.

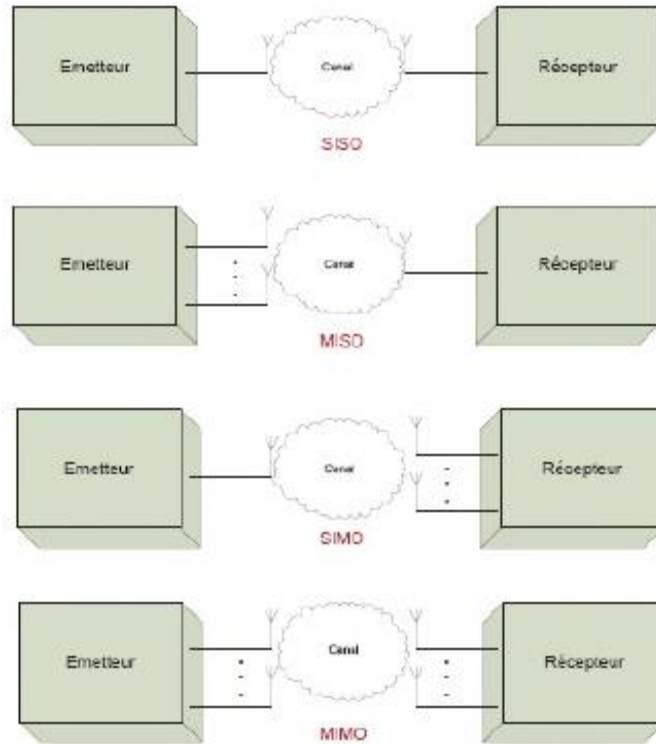


Figure2.2 : Schémas représentatifs du SISO, MISO, SIMO et MIMO.

La (figure 2.3) montre le modèle de canal MIMO, qui a été construit avec plusieurs antennes en émission et en réception. Ce canal est constitué de N_t antennes d'émission et de N_r antennes de réception. Ce modèle est également constitué d'une matrice H , où chaque paramètre complexe h_{ij} représente la fonction de transfert entre l'antenne de réception j et l'antenne d'émission i . Le vecteur reçu y peut s'écrire : [9]

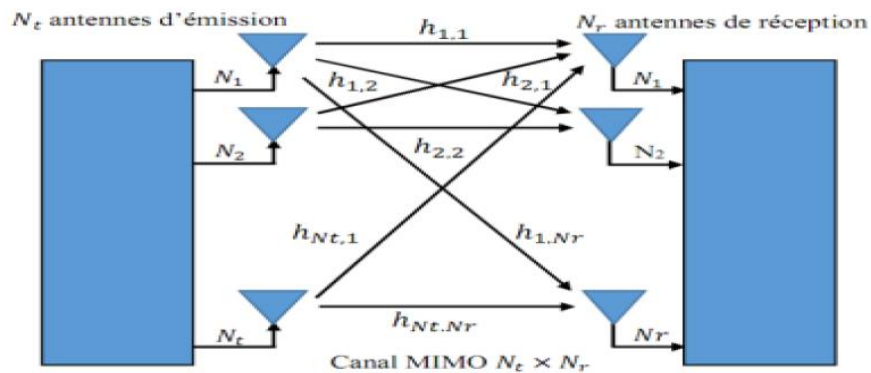


Figure2.3: Modèle de canal MIMO

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (2.1)$$

$\mathbf{Y}$: représente les symboles reçus

$\mathbf{H}$: matrice de canal

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & \dots & h_{1Nr} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & \dots & h_{2Nr} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & \dots & h_{3Nr} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ h_{Nt1} & h_{Nt2} & h_{Nt3} & \dots & h_{NtNr} \end{bmatrix}$$

$\mathbf{x}$: le vecteur de symboles émis

$$\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$$

$\mathbf{n}$: bruit

$$\mathbf{n} = \{n_1, n_2, \dots, n_N\}$$

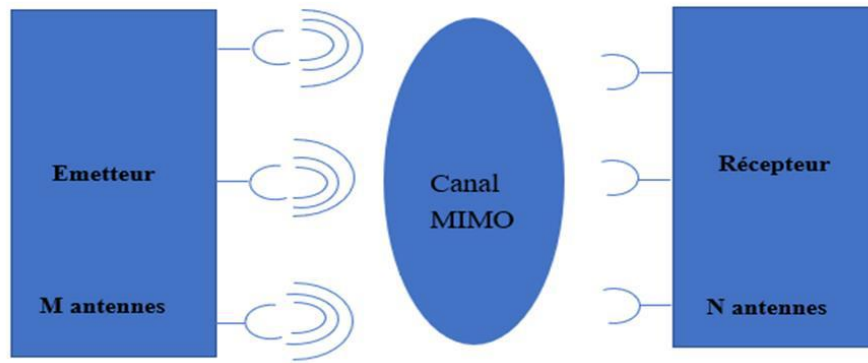
Avec h_{ij} les coefficients du canal : $i \in \{1, \dots, N_t\}$, $j \in \{1, \dots, N_r\}$.

2.3.Principe de la technologie MIMO :

Le MIMO permet d'envoyer plusieurs signaux différents sur des antennes différentes à des fréquences proches pour augmenter le débit ou la portée du réseau.

Sa particularité passe donc par l'utilisation simultanée de plusieurs antennes, émettrices et réceptrices. Ainsi il permet d'améliorer les performances des appareils, qui aujourd'hui connaissent des problèmes liés à la nature des ondes et à leur comportement suivant l'environnement, ce qui diminue la qualité de transmission et donc le débit ainsi que la portée.

La figure 2.4 montre : Principe de système MIMO

**Figure2.4:** Principe de système MIMO

Le principe du MIMO est simple : il consiste à multiplier les signaux pour transmettre une même information. Peu importe que les ondes radio se dégradent avec la distance ou à cause des obstacles les paquets de données qu'elles véhiculent sont réorganisés à l'arrivée pour reconstituer l'information d'origine.

2.4. Domaines d'utilisation de la technologie MIMO :

Les systèmes MIMO sont l'un des principaux axes de développement pour augmenter les débits des communications sans fil.

MIMO est également prévu pour être utilisé dans de radiotéléphonie mobile des normes telles que récente 3GPP et 3GPP2. En 3GPP, l'accès haute vitesse par paquets plus (HSPA +) et Long Term Evolution (LTE) normes prennent en compte MIMO. Par ailleurs, à soutenir pleinement les environnements cellulaires, y compris les consortiums de recherche MIMO IST-MASCOT proposons de développer des techniques avancées MIMO, par exemple, MIMO multi-utilisateurs (MU-MIMO) [10]. Les systèmes : HiperLAN/2, Wifi et les systèmes de la 4ème génération tels LTE et WiMax utilisent la technologie MIMO-OFDM afin d'augmenter le débit de transmission et améliorer la qualité de transmission.

2.5. Concept et capacité des canaux MIMO :

La capacité des systèmes MIMO est un sujet d'actualité dans la littérature, que nous allons présenter ici pour montrer l'intérêt des transmissions MIMO.

Afin de pouvoir comparer les différentes capacités que nous allons voir, la puissance totale moyenne émise pT reste constante. Lorsque le nombre d'antennes varie à l'émetteur, alors la puissance est répartie entre les M antennes de façon à ce que leur somme reste égale à p .

Si aucune connaissance du canal n'est disponible à l'émetteur, la répartition de puissance uniforme est optimale en termes de capacité (chaque antenne émet une puissance pT/M).

2.5.1. Système SISO :

C'est un système mono-antenne étant perturbé par un bruit blanc additif gaussien est donnée par :

$$C_{\text{SISO}} = (1 + \rho \cdot |h|^2) \text{ bits/s/Hz} \quad (2.2)$$

Avec ρ est le rapport signal sur bruit SRB :

$$\rho = \frac{S}{B} = \frac{P_T \cdot E(|h|^2)}{\sigma^2} \quad \text{si } E(|h|^2) = 1 \rightarrow \rho = \frac{P_T}{\sigma^2} \quad (2.3)$$

2.5.2. Système MISO :

C'est une technique de diversité spatiale en émission. C'est-à-dire plusieurs antennes émettent des signaux qui sont interceptés par une seule antenne en réception. Dans ce mode de transmission, une superposition du signal transmis simultanément par les N_t antennes émettrices est reçue.

C'est-à-dire que la puissance émise est divisée sur le nombre d'antenne: $(\frac{P_T}{M})$

Le rapport signal à bruit moyen à la réception est donné par :

$$\rho = \frac{\frac{P_T}{M} \sum_i^M E(|h_i|^2)}{\sigma^2} \quad (2.4)$$

$$C = \log_2 \frac{\frac{P_T}{M} \sum_i^M E(|h_i|^2)}{\sigma^2} \quad (\text{bits/s/Hz}) \quad (2.5)$$

L'avantage de la technique MISO par rapport à la technique SISO est dans le fait que dans les multi trajets la probabilité d'évanouissement dans N_t antennes est inférieure à la probabilité d'évanouissement sur une seule antenne.

2.5.3. Système SIMO :

C'est une technique qui utilise plusieurs antennes en réception pour lutter contre l'évanouissement dû au canal. Le signal reçu est additionné et le rapport signal sur bruit total est la somme des rapports signaux sur bruits de chacun des antennes de la réception.

h_i est le gain complexe du canal entre l'antenne émettrice et la i -ème antenne réceptrice.

$$\rho_i = \frac{P_T E(h_i)^2}{\sigma_1^2} \quad (2.6)$$

Capacité d'un système SIMO :

$$C = (1 + \rho \sum_{i=1}^N |h_i|^2) \quad (2.7)$$

Cette capacité [11] croît de façon logarithmique avec le nombre d'antennes à la réception.

2.6. Avantages de la technologie MIMO :

La technique MIMO présente multiples avantages, nous citons :

- Exploiter les trajets multiples en bénéficiant des avantages de décoloration aléatoire, tel qu'il est connu que la déficience principale à la performance d'un système de communication sans fil s'estompe en raison de trajets multiples et des interférences.
2. Augmenter le débit de données du système pour la même puissance rayonnée totale et la même largeur de bande de canal.
 3. Parvenir à très haute efficacité spectrale et c'est une solution parfaite pour la disponibilité de la bande passante limitée.
 4. Sauver la consommation électrique du système, car elle augmente la capacité du système et de fiabilité sans consommer un pouvoir excessif

5. Accroître la capacité du système, donc il peut prendre en charge un nombre beaucoup d'utilisateurs.

2.7. La technologie OFDM :

2.7.1. Principe :

Le principe de l'OFDM consiste à diviser sur un grand nombre de porteuses le signal numérique que l'on veut transmettre. Comme si l'on combinait le signal à transmettre sur un grand nombre de systèmes de transmission (exemple: des émetteurs) indépendants et à des fréquences différentes. Pour que les fréquences des porteuses soient les plus proches possibles et ainsi transmettre le maximum d'information sur une portion de fréquences donnée, l'OFDM utilise des porteuses orthogonales entre elles. Les signaux des différentes porteuses se chevauchent mais grâce à l'orthogonalité n'interfèrent pas entre elles. Le signal à transmettre est généralement répété sur différentes fréquences porteuses. Ainsi dans un canal de transmission avec des chemins multiples où certaines fréquences seront détruites à cause de la combinaison destructive de chemins, le système sera tout de même capable de récupérer l'information perdue sur d'autres fréquences porteuses qui n'auront pas été détruites. Chaque porteuse est modulée indépendamment en utilisant des modulations numériques: QPSK, QAM-16, QAM-64,...

- Ce principe permet de limiter l'interférence entre symboles. Pour l'éliminer, on peut ajouter un intervalle de garde (c'est-à-dire une période pendant laquelle il n'y a aucune transmission) après chaque symbole émis très grand devant le délai de transmission (la vitesse de la lumière multipliée par la distance séparant l'émetteur et le récepteur).

2.7.2. Description mathématique :

L'équivalent passe-bas d'un signal OFDM est exprimé ainsi

$$V(t) = \sum_{K=0}^{N-1} I_K e^{i2\pi kt/T}, 0 \leq t \leq T \quad (2.8)$$

où $\{I_k\}$ sont les symboles de donnée, N est le nombre de sous-porteuses et T la durée du bloc OFDM. L'espacement entre porteuses de $1/T$ (Hz) rend les sous-porteuses orthogonales entre elles; cette propriété est exprimée ainsi:

$$\frac{1}{T} \int_0^T (e^{\frac{i2\pi K_1 t}{T}}) * (e^{\frac{i2\pi K_2 t}{T}}) dt = \frac{1}{T} \int_0^T e^{\frac{i2\pi (K_2 - K_1) t}{T}} dt = \begin{cases} 1, & K_1 = K_2 \\ 0, & K_1 \neq K_2 \end{cases} \quad (2.9)$$

Où $(.)^*$ correspond à l'opérateur conjugué complexe.

Pour éviter l'interférence inter-symboles dans un environnement de propagation multi chemins, un intervalle de garde, où T_g est la période de garde, est inséré avant le bloc OFDM. Pendant cet intervalle, un *préfixe cyclique* est transmis. Ce préfixe cyclique est égal au dernier T_g du bloc OFDM. Le signal OFDM avec le cyclique préfixe est donc:

$$V(t) = \sum_{K=0}^{N-1} I_K e^{i2\pi K t / T}, \quad -T_g \leq t \leq T \quad (2.10)$$

Le signal passe-bas ci-dessus peut soit être constitué de valeur réelles ou complexes. Pour le signal à valeurs réelle celui-ci est généralement transmis en bande de base et exprimé ainsi:

$$S(t) = \Re\{v(t)e^{i2\pi f_c t}\} \quad (2.11)$$

Le signal en bande de base à valeurs complexes est par contre modulé à une fréquence supérieure f_c . En général le signal est représenté ainsi:

$$S(t) = \sum_{k=0}^{N-1} |I_k| \cos \left(2\pi \left[f_c + \frac{K}{T} \right] t + \arg[I_K] \right) \quad [12]. \quad (2.12)$$

2.7.3. Principe de la modulation OFDM :

L'OFDM consiste à diviser un flux de symboles à la cadence $\frac{1}{T}$ en N flux de symboles à la cadence $\frac{1}{N_c T}$. N_c symboles sont ainsi transmis en parallèle sur une durée $N_c T$. La bande passante est donc divisée en N_c sous bande dont la transmittance est presque constante, ce qui explique la robustesse de cette modulation en présence de canaux sélectifs en fréquence. [13]

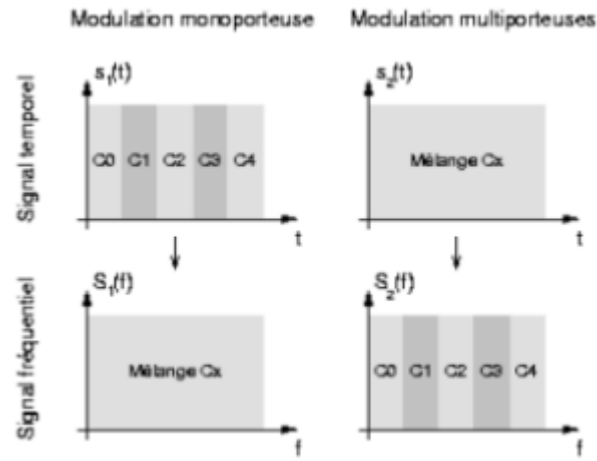


Figure 2.5 : Comparaison des systèmes multi-porteuse et mono porteuse

On considère la voie descendante d'un système de communication sans fil basé sur la transmission OFDM avec une station de base et des terminaux mobiles. Le système comporte:

- N_u usagers, soit R_j , $j=1, \dots, N_u$, le débit du $j^{\text{ème}}$ utilisateur exprimé en Bits/seconde.
- N_{cu} sous porteuses sur lesquelles les données sont modulées. Un utilisateur peut allouer un ensemble de ces sous-porteuses.
- Le principe de la modulation OFDM consiste à répartir aléatoirement des symboles de durée T_u (temps symbole utile) sur différentes porteuses modulées en QPSK ou QAM (selon le compromis robustesse / débit).

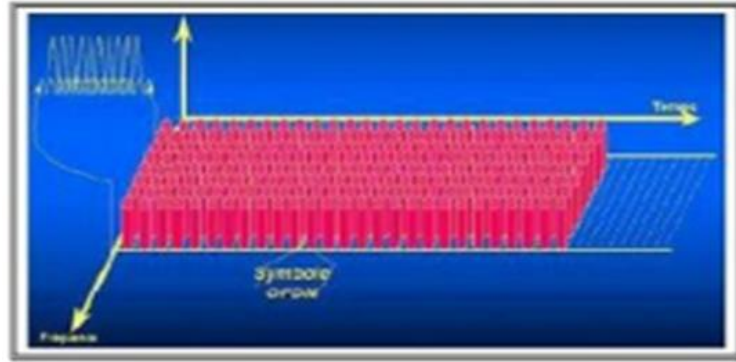


Figure 2.6 : Symboles OFDM

L'OFDM découpe le canal en cellule selon les axes du temps et de fréquence (Figure 2. 6). Le canal est alors constitué d'une suite de sous bandes de fréquence et d'une suite de segments temporels. A chaque cellule fréquence/temps est attribuée une porteuse dédiée. On va donc répartir l'information à transporter sur l'ensemble de ces porteuses, voir figure 2.7, modulée chacune à faible débit par une modulation du type BPSK, QPSK ou QAM. Un symbole OFDM comprend l'ensemble des informations contenues dans l'ensemble des porteuses à un instant t . Chacune des porteuses est orthogonale à la précédente.

La séquence de N symboles de $C_0, \dots, C_N$, constitue un symbole OFDM, le $K^{ième}$ train de symboles parmi les N trains module un signal de fréquence f_K , le signal modulé du train K s'écrit sous forme complexe :

$$S(t) = \sum_{K=0}^{N-1} C_K e^{j2\pi f_K t} \quad (2.13)$$

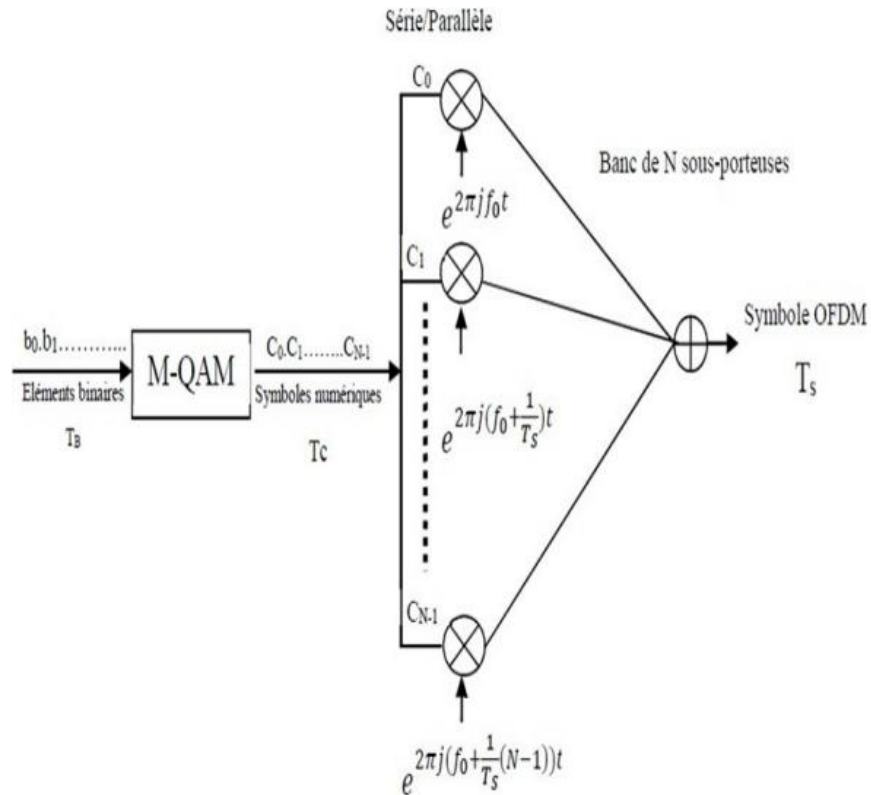


Figure2.7 : Schéma de principe d'un modulateur OFDM

Le signal total $s(t)$ correspond à l'ensemble des symboles réassemblés en un symbole OFDM, il est représenté par la figure 2.8.

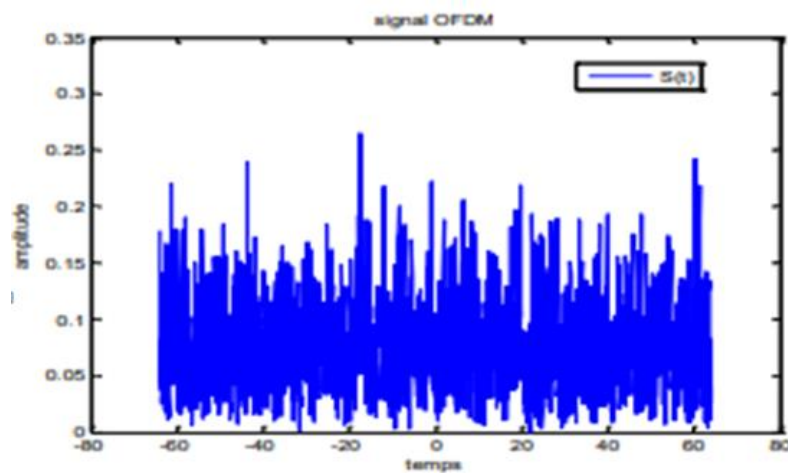


Figure2.8 : Signal temporel à la sortie du modulateur

Les fréquences sont orthogonales si l'espace entre deux fréquences adjacentes f_k et f_{k+1} est $\frac{1}{T_s}$, en effet chaque porteuse modulant un symbole pendant une fenêtre rectangulaire temporelle de durée T_s , son spectre en fréquence est un sinus cardinal, fonction qui s'annule tous les multiples de $\frac{1}{T_s}$.

$$f_k = f_0 + \frac{k}{T_s} \quad (2.14)$$

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

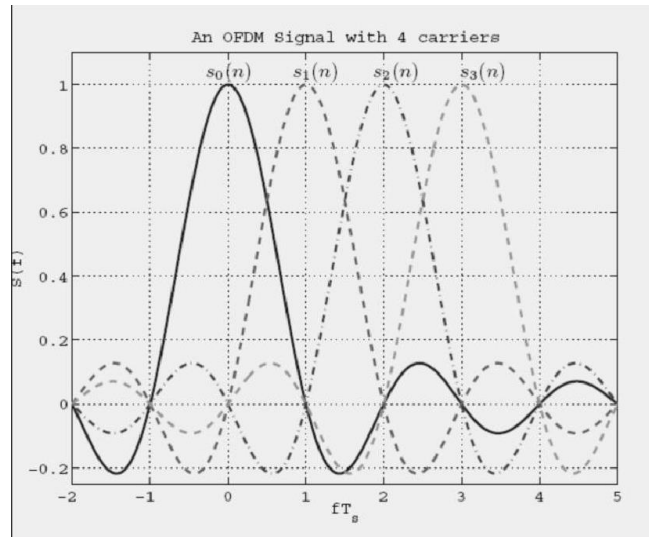


Figure 2.9: Spectre idéal en sortie du modulateur OFDM

Ainsi la somme des spectres des sous-porteuses donne le spectre réel [13].

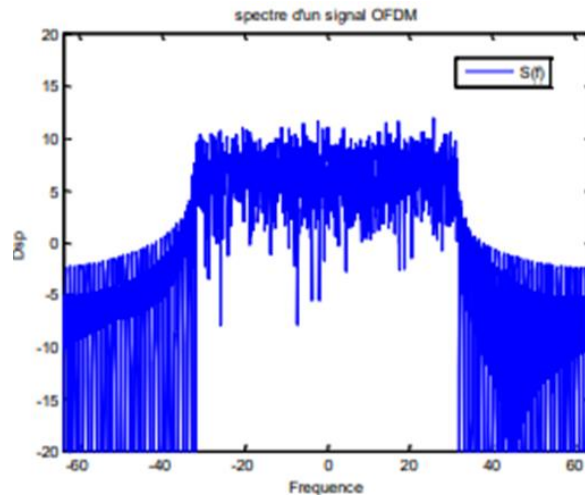


Figure 2.10: spectre réel en sortie du modulateur OFDM.

2.8. Notion D'ORTHOGONALITÉ:

La différence fondamentale entre les différentes techniques classiques de modulation multi-porteuses et l'OFDM est que cette dernière autorise un fort recouvrement spectral entre les sous porteuses, spectral. Cependant, pour que ce recouvrement ne soit pas néfaste, les porteuses doivent respecter une contrainte d'orthogonalité, à la fois dans les domaines temporel et fréquentiel. Toute fois l'utilisation d'un très grand nombre de porteuses est une perspective ce qui permet d'augmenter sensiblement le nombre d'utilisateur ou d'amoindrir l'encombrement.

- Il faut beaucoup de modulateurs, de démodulateurs et de filtres.
- Il faut davantage de largeur de bande.

Pour résoudre ces deux problèmes on spécifie un espacement régulier de $f_{\mu} = \frac{1}{T_{\mu}}$ entre les sous porteuses. En effet, chaque porteuse modulant un symbole pendant une fenêtre rectangulaire temporelle de durée T_s , possède un spectre de fréquence en « sinus cardinal » qui s'annule tous les multiples $\frac{1}{T_s}$. Les porteuses forment alors un ensemble orthogonal.

2.9. Schéma général d'un système de communication sans fil basé sur la modulation OFDM :

La Figure (2.11) représente un système OFDM complet. Il comporte un émetteur, un récepteur et un canal radio à travers lequel se fait la transmission. On a d'abord le générateur des données qui vont être transmises, ensuite on a un convertisseur série parallèle qui divise les données à son entrée en des flux de données parallèles de débits réduits [13].

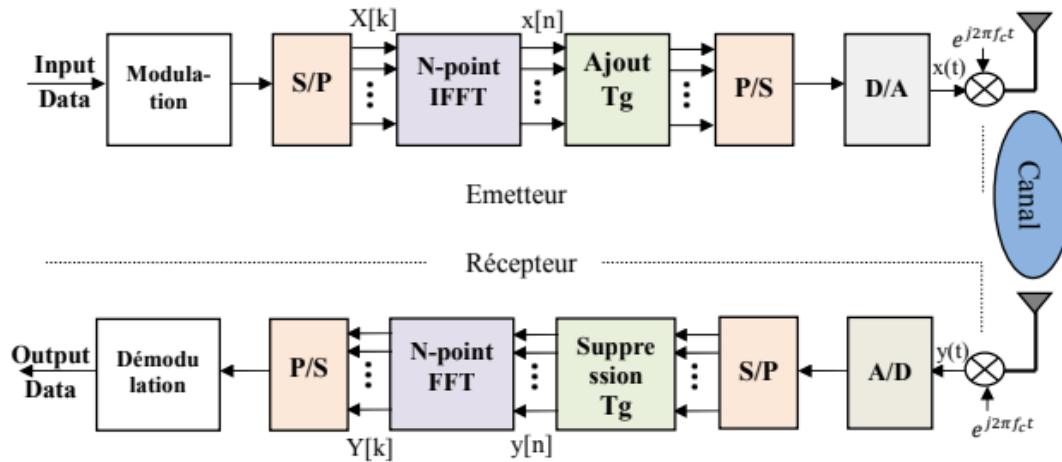


Figure 2.11 : Schéma block d'un système OFDM [14]

On a encore le bloc de modulation numérique (QAM, 16-QAM ...), le bloc d'insertion et d'émission de temps de garde, les blocs FFT et IFFT pour la modulation et démodulation des sous-porteuses et enfin les blocs caractérisant le canal de transmission. A la sortie, on rejoint les flux de données parallèles pour reconstituer les données initiales [13].

2.10. Les Avantages et inconvénients de l'OFDM :

Contrairement aux transmissions mono porteuses, un des grands avantages de la modulation OFDM consiste en la simplicité de l'égalisation des distorsions. Ceci permet d'avoir des récepteurs simples et peu coûteux.

Les principaux avantages et inconvénients de la modulation l'OFDM sont nombreux, on peut en citer:

Une utilisation efficace des ressources fréquentielles en comparaison avec les solutions classiques de multiplexage fréquentiel. Ceci est principalement dû au fait que dans l'OFDM, les canaux se chevauchent tout en gardant une orthogonalité parfaite.

Les techniques multi porteuses sont robustes au bruit impulsif puisque chaque sous Porteuse est affectée d'un bruit indépendant des autres porteuses. Contrairement aux Modulations mono porteuses, où le bruit peut affecter un certain nombre de symboles Transmis, la perte d'un symbole dû à un bruit important n'affecte pas les autres Symboles.

Les techniques OFDM ont une très grande flexibilité dans l'allocation du débit dans un contexte multi utilisateurs. En effet, en fonction de la valeur du gain instantané du canal, chaque sous porteuse peut être codée indépendamment des autres porteuses.

Plus les perturbations s'amplifient, plus la technologie perd de son intérêt car il faut alors mettre en place des méthodes de filtrages ou de codages qui réduisent Grandement les débits.

L'OFDM est également très vulnérable aux problèmes de décalage en fréquence (Frequency offset) et de synchronisation [15]. En effet, la fréquence offset engendre Des interférences ICI qui peuvent détruire l'orthogonalité entre sous porteuses.

2.11. L'utilisation de l'OFDM :

L'OFDM est un schéma largement utilisé dans les normes de télécommunications. Il offre notamment les avantages suivants :

- Il résout l'évanouissement sélectif en fréquence et les distorsions multi-trajets dans les canaux large bande
- Il permet de réaliser l'estimation et l'égalisation du canal de façon indépendante sur chaque sous-porteuse
- Il facilite le partage simplifié des ressources entre plusieurs flux de données
- Il s'adapte parfaitement aux systèmes MIMO et Massive MIMO puisque chaque sous-porteuse présente un évanouissement plat, l'égalisation inclut donc un calcul simple par sous-porteuse
- Il présente une grande efficacité spectrale globale. [17]

2.12. Présentation détaillée du system MIMO-OFDM :

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

2.12.1. Emetteur MIMO-OFDM :

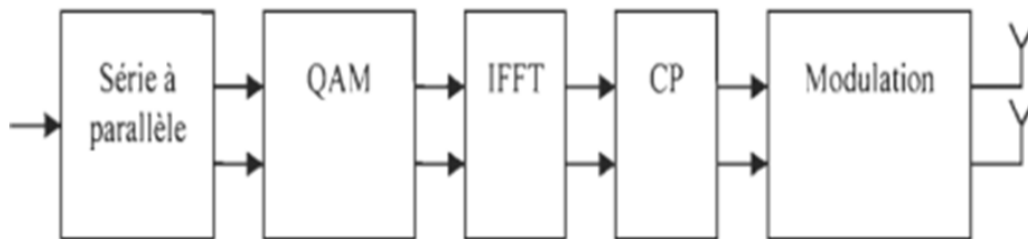
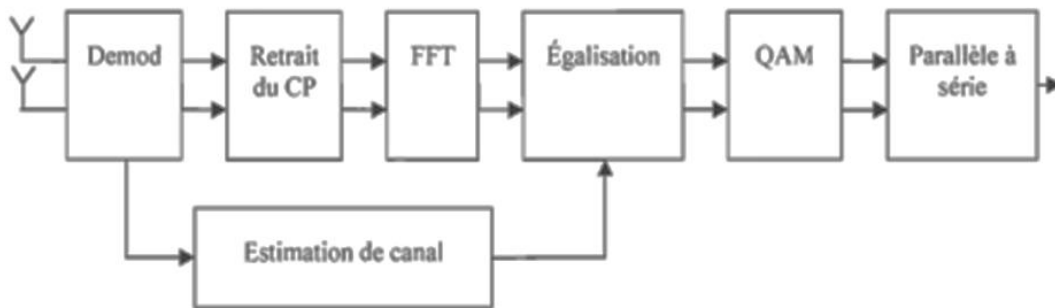


Figure 2.12 : Emetteur MIMO_OFDM

Dans cet émetteur MIMO-OFDM, la première étape c'est de faire passer la chaîne de données d'entrée, qui est à l'origine en série, en parallèle, afin de les répartir sur autant de séries qu'il y aura d'antennes de transmission. Les données ainsi mises en parallèle seront ensuite encodées selon une constellation QAM.

Nous appliquons ensuite l'IFFT sur ces valeurs, donnant pour sortie des valeurs complexes. Un préfixe cyclique (cyclic préfix ; CP) est apposé au début de chaque groupe de données OFDM, contenant une copie des dernières données. C'est à ce point que le signal est réparti sur les antennes de transmission et pour être envoyé [18].

2.12.2. Récepteur MIMO-OFDM :**Figure 2.13 :** Récepteur MIMO_OFDM

D'abord, pour retrouver les données numériques, le signal reçu est démodulé, ensuite, après avoir retiré le préfixe cyclique, la FFT est appliquée pour retourner dans le domaine fréquentiel. C'est ensuite que l'égalisation a lieu. Par contre, pour la plupart des techniques, il est nécessaire de connaître le canal pour pouvoir procéder à la détection. [19]

2.13. Conclusion :

Ce chapitre vise à fournir une compréhension approfondie du MIMO-OFDM en tant que technique de transmission avancée pour les systèmes de communication sans fil dans des environnements multi-trajets.

Chapitre 3 :

Simulations et Résultats

3. Introduction :

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

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à la simulation de systèmes MIMO, OFDM et leur combinaison MIMO-OFDM. Pour atteindre cet objectif, nous utilisons le logiciel MATLAB® R2022a.

Pour bien comprendre le fonctionnement du système MIMO-OFDM et confirmer ce qu'on a vu dans la théorie, nous avons réalisé un programme sous MATLAB® qui calcule le taux de bits erronés (BER) en fonction du rapport entre l'énergie des bits transmis et l'énergie du bruit (E_b/N_0) en changeant quelques paramètres essentiels savoir la taille de l'intervalle de garde et la taille de la constellation. Nous avons considéré deux types de canaux de communication à savoir, un canal AWGN et un canal de Rayleigh.

Nous commencerons par présenter brièvement les principes de base du MIMO et de l'OFDM, en expliquant comment ils fonctionnent individuellement et comment ils peuvent être combinés. Ensuite, nous discuterons des différentes techniques de simulation disponibles pour modéliser les canaux MIMO-OFDM.

Enfin, nous explorerons les méthodes d'évaluation des performances des systèmes MIMO-OFDM, en analysant des métriques clés telles que le taux d'erreur binaire (BER) en utilisant le model Simulink de MATLAB® R2022a.

3.1.Présentation de Matlab:

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

l'analyse du système. Il comprend une riche bibliothèque de blocs prédéfinis pour les opérations permettant de réaliser le modèle graphique du système.

3.2. Simulation et performance d'un Système MIMO-OFDM :

Nous avons implémenté le système de transmission MIMO-OFDM sous Simulink [21]. Le système se compose de deux parties de base, à savoir la partie émission (modulation MIMO-OFDM) et la partie réception (démodulation MIMO-OFDM), comme c'est illustré à la Figure (3.1).

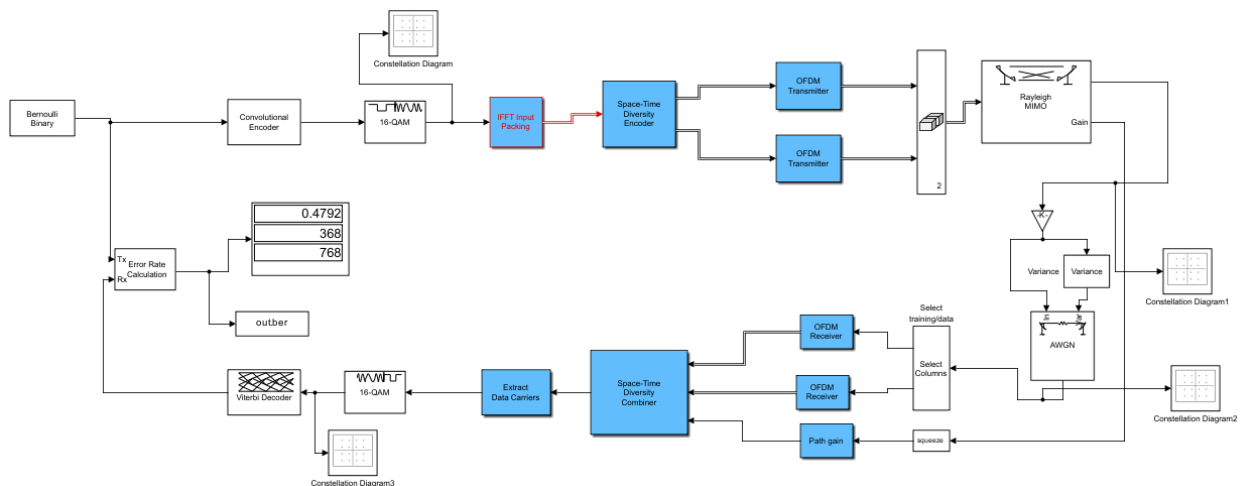


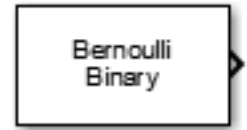
Figure 3.1 : Chaîne de transmission MIMO-OFDM en Simulink

3.3. Description des différents blocs en émission :

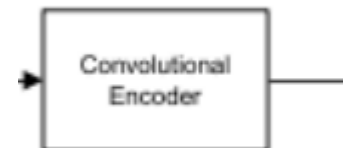
Dans la partie transmission, nous générons des éléments binaires aléatoires, puis les distribuons sur différentes sous-porteuses, puis utilisons des modulateurs pour la modulation, donc l'information a une constellation très spécifique. A chaque entrée, une transformée de Fourier rapide inverse (IFFT) est appliquée pour moduler la sous-porteuse, puis une conversion parallèle/série est effectuée. Ensuite, nous ajoutons l'intervalle de garde en tant que préfixe cyclique, et l'assemblage sera prêt pour la transmission. La mise en œuvre de l'émetteur OFDM dans SIMULINK comprend les blocs suivants que nous allons décrire.

✓ Bernoulli Binary:

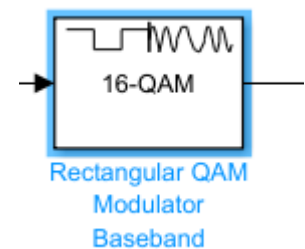
Le bloc Bernoulli Binary Generator génère des nombres binaires aléatoires à l'aide d'une distribution de Bernoulli. Ce bloc est utilisé pour générer des bits de données aléatoires afin de simuler des systèmes de communication numériques et d'obtenir des métriques de performances telles que le taux d'erreur sur les bits.

**✓ Convolutional Encoder:**

Le bloc Convolutional Encoder code le message binaire d'entrée en utilisant le schéma de codage convolutif spécifié par une structure en treillis. Ce bloc peut accepter des entrées dont la longueur varie pendant la simulation.

**✓ Modulation QAM-16:**

Le bloc de bande de base du modulateur QAM général module à l'aide d'une modulation d'amplitude en quadrature. La sortie est une représentation en bande de base du signal modulé.



✓ **Emetteur OFDM :**

L'opération fondamentale de ce bloc est l'IFFT qui assure la modulation des données que porte un symbole OFDM en les transformant du domaine fréquentiel au domaine temporel, puis, la puissance du signal est normalisée par sa multiplication par un gain de compensation 'K'.

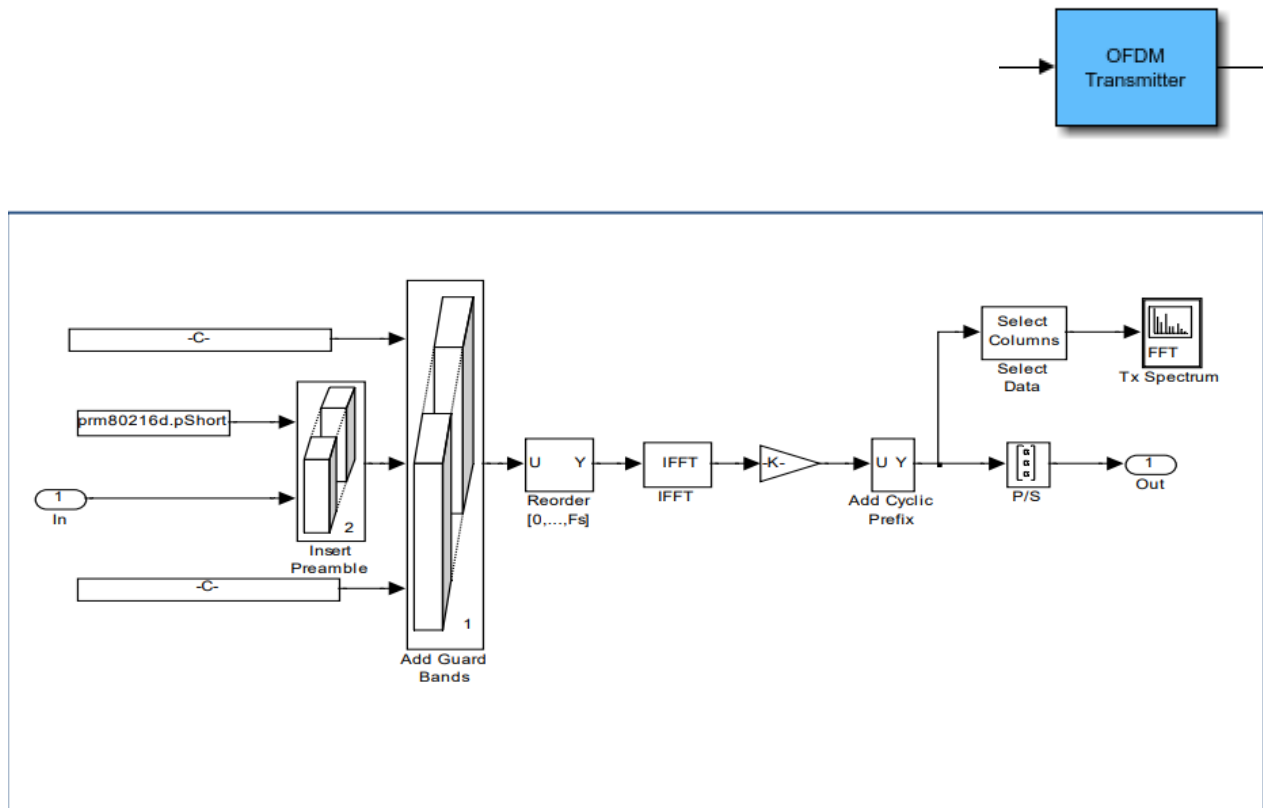
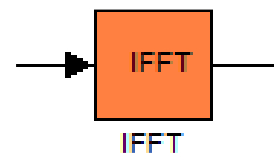


Figure3.2: Emetteur OFDM

✓ **IFFT:**

Le bloc IFFT calcule la transformée de Fourier rapide inverse (IFFT) sur la première dimension d'un tableau d'entrée N-D. Le bloc utilise l'une des deux implémentations FFT possibles. La taille de l'IFFT sélectionnée est de 256.



✓ IFFT input packing :

Ce bloc a comme fonction de convertir les données que porte un symbole OFDM de série en parallèle, puis de l'arranger par insertion des 8 sous-porteuses pilotes, qui permettent d'obtenir des informations sur le canal et la synchronisation à la réception et l'insertion aussi de la sous-porteuse nulle centrale (DC). La figure 3.3 illustre la manière dont les sous-porteuses sont insérées.

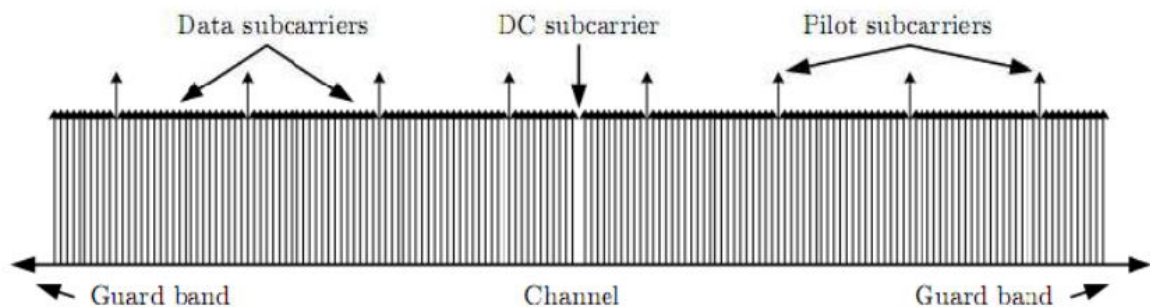
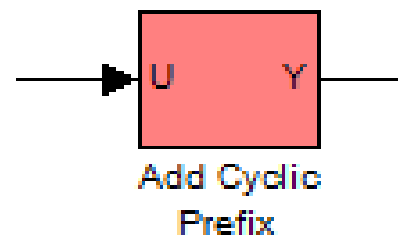


Figure 3.3 : Insertion des sous-porteuses pilotes et de la sous porteuse nulle centrale (DC).

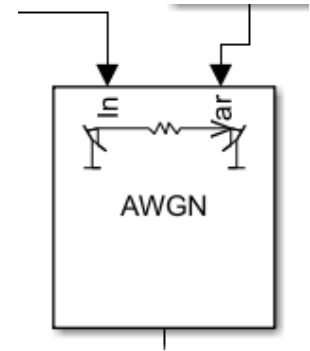
✓ Add Cyclic Prefix:

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



✓ Canal AWGN:

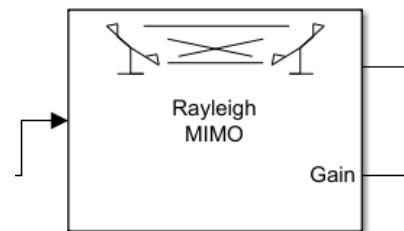
Le bloc AWGN Channel modélise le bruit blanc gaussien. Ce bloc nous permet de choisir le paramètre rapport signal sur bruit (SNR) et la puissance du signal d'entrée. La valeur du SNR peut être modifiée pour déterminer la limite pour laquelle on commence à avoir un taux d'erreur élevé.



Channel AWGN

✓ Channel MIMO fading :

Le bloc MIMO Fading Channel filtre un signal d'entrée à l'aide d'un canal d'évanouissement multi-entrées/multi-sorties (MIMO). Ce bloc modélise à la fois l'évanouissement de Rayleigh et de Rician et utilise le modèle de Kronecker pour modéliser la corrélation spatiale entre les liens.



✓ Codeur spatio-temporel :

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

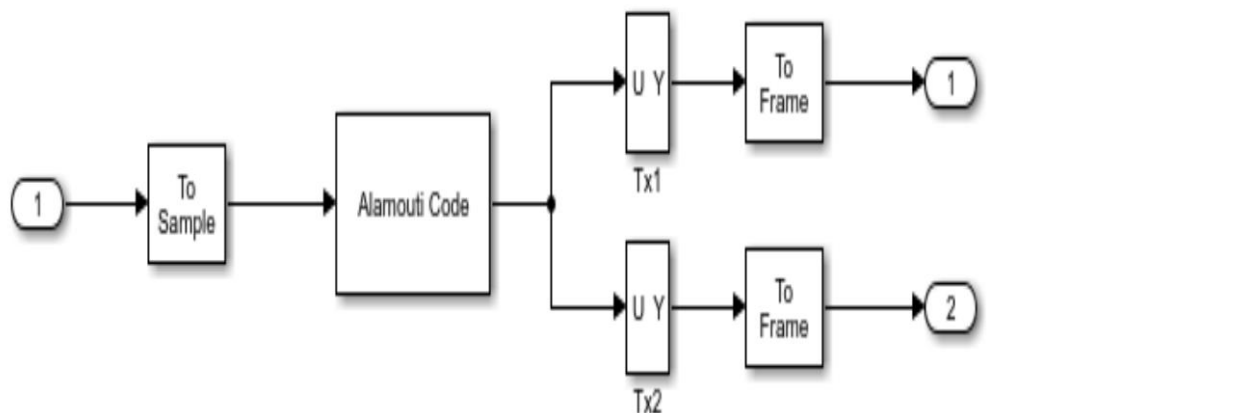
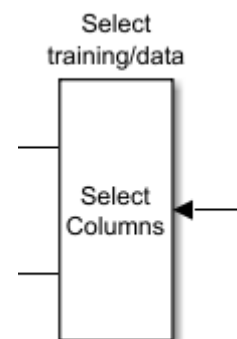


Figure 3.4 : Codeur spatio-temporel

3.4.Description des différents blocs en réception :

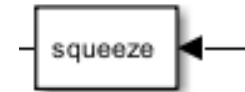
✓ Sélecteur des colonnes:

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



✓ **Squeeze:**

Supprimer les dimensions singleton du signal d'entrée multidimensionnel. Une dimension singleton est une dimension dont la taille est 1. Par exemple, un signal 2x1x3 devient un signal 2x3. Les signaux 1-D et 2-D passent sans changement.

✓ **Récepteur OFDM :**

Le symbole OFDM reçu, subit une conversion série-parallèle puis l'extraction du préfixe cyclique. Il passe ensuite par le sous-bloc FFT, qui lui permet de passer du domaine temporel au domaine fréquentiel, puis, la puissance de signal est normalisée par sa multiplication par un gain de compensation 'K'. Finalement, la bande de garde est enlevée et les symboles sont réordonnés.

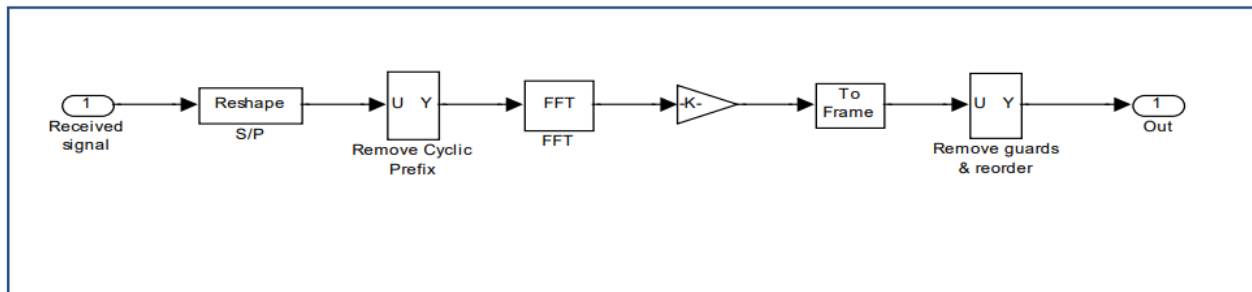
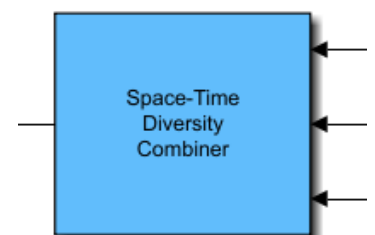


Figure3.5: Récepteur OFDM

✓ **Combiner spatio-temporel :**

Le bloc OSTBC Combiner combine le signal d'entrée (de toutes les antennes de réception) et le signal d'estimation de canal pour extraire les informations des symboles qui sont codés à l'aide d'un OSTBC. L'estimation du canal d'entrée peut ne pas être constante au cours de chaque transmission de bloc de mots codés et le signal de combinaison n'indique que l'estimation de la première période de symbole par bloc de mots codés.



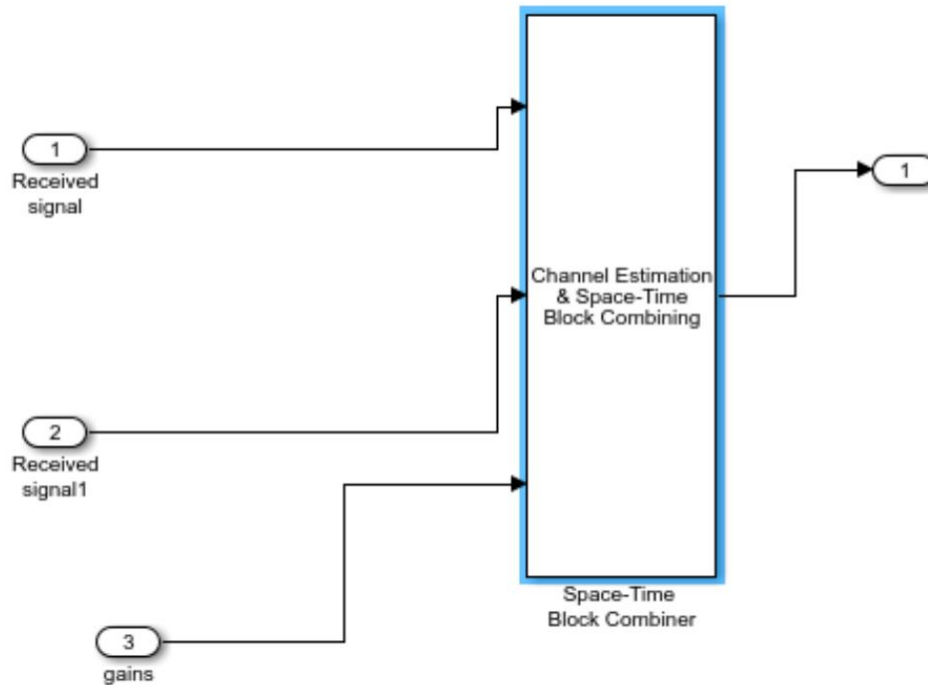
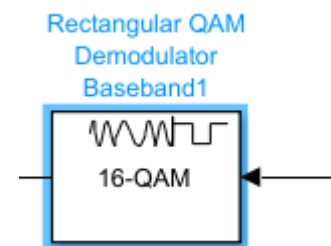


Figure 3.6 : Combinateur Spatio-temporel

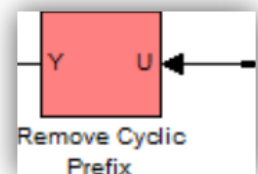
✓ QAM démodulateur :

Le bloc de bande de base du démodulateur QAM rectangulaire démodule un signal qui a été modulé à l'aide d'une modulation d'amplitude en quadrature avec une constellation sur un réseau rectangulaire.



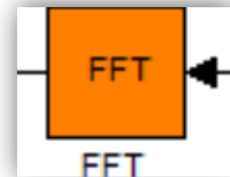
✓ Remove Cyclic Prefix:

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

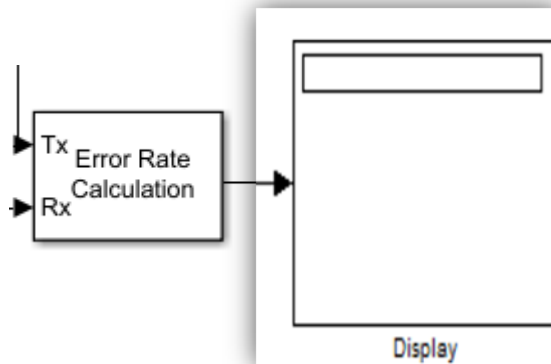


✓ **FFT :**

Au niveau du récepteur, un bloc FFT est utilisé pour traiter le signal reçu et l'amener dans le domaine fréquentiel. Idéalement, la sortie de la FFT sera symboles d'origine qui ont été envoyés à l'IFFT à l'émetteur. A la sortie du préfixe cyclique la taille du vecteur est 256, qui sera directement traité par le bloc FFT.

✓ **Blocs de constellation et taux d'erreur :**

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



Calcul du taux d'erreur

Le bloc (constellation diagram) permet de tracer les constellations des symboles en émission et en réception.

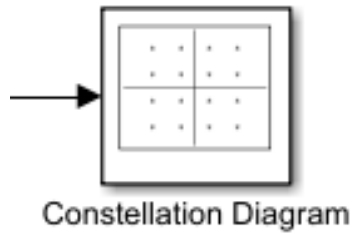


Diagramme de constellation

3.5. Paramètres de simulation MIMO-OFDM :

Dans ce tableau on présente les paramètres utilisés lors de notre simulation.

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

Tableau 3.1 : Paramètres du système MIMO-OFDM

3.6. Les performances du système MIMO-OFDM :

Le taux d'erreur par bit (BER) pour le système MIMO-OFDM est calculé pour une variété de valeurs du rapport SNR pour les modulations 16 QAM.

E_b/N_0 (dB)	BER
0	0.4800
2	0.3600
4	0.2000
6	0.1000
8	0.0500
10	0.0100
12	10^{-8}

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

La figure 3.7 présente les résultats obtenus.

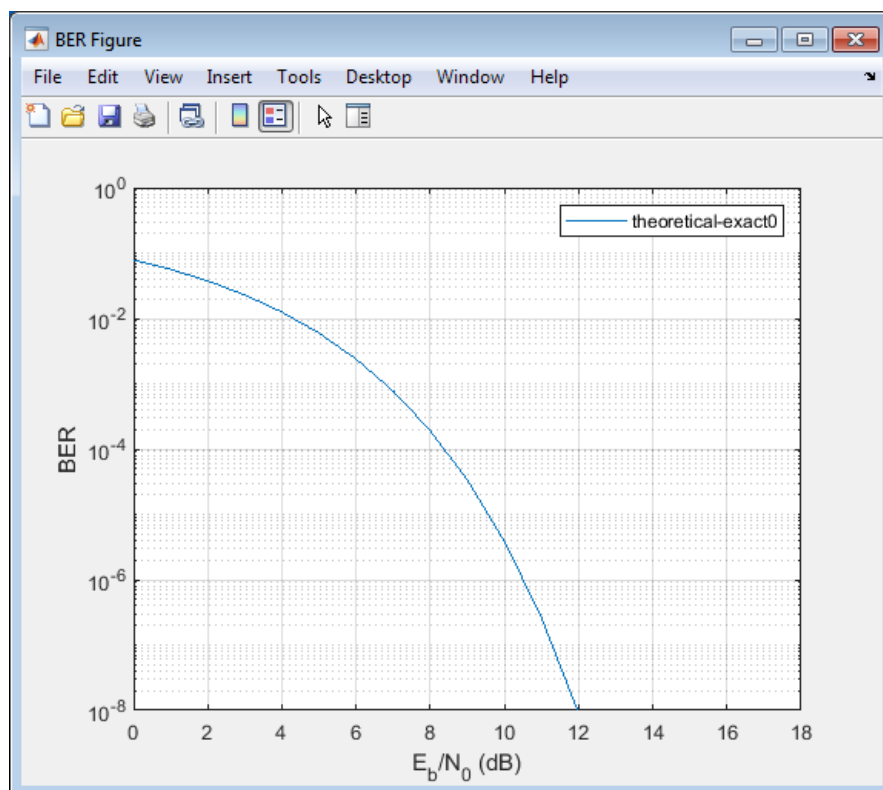


Figure 3.7 : Courbe de taux d'erreur binaire (BER) system MIMO-OFDM

- On remarque que les valeurs du taux d'erreurs binaires BER décroissent en fonction du SNR. Donc il n'y a pas beaucoup d'erreurs, et le système est bon et juste.

3.7. Modulation :

Après l'entrelacement des données binaires, les données rentrent en série au bloc de modulation ou elles seront ordonnées sous forme de constellations selon le type de modulation choisi (QPSK, 16QAM, 64QAM). Les diagrammes de constellations de ces modulations sont décrits sur la figure suivante :

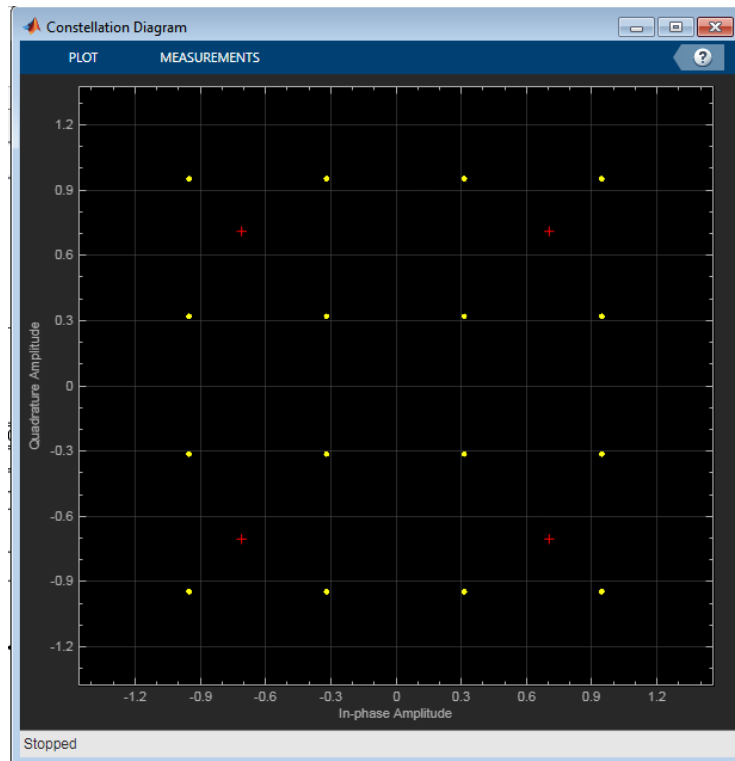


Figure 3.8 : Modulation 16 QAM

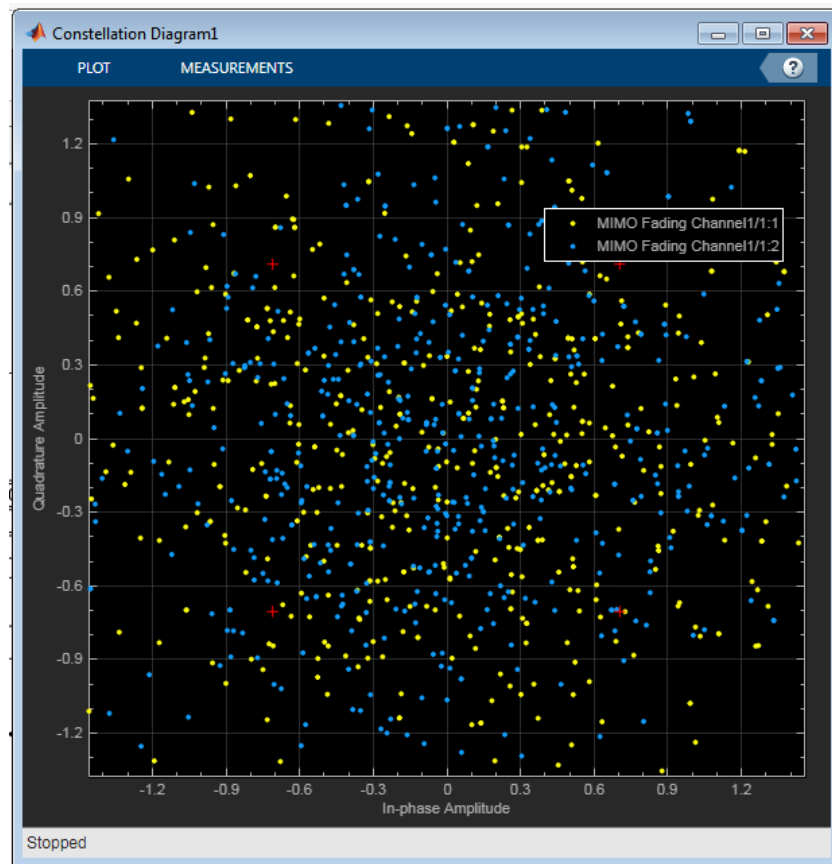


Figure 3.9 : Modulation 64 QAM Channel MIMO

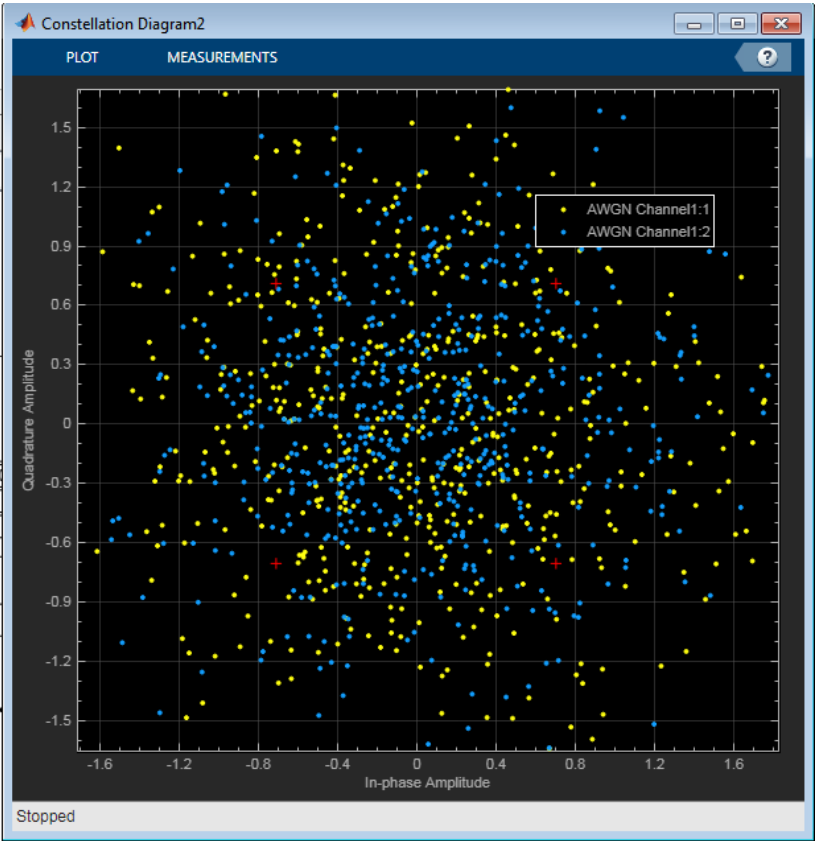


Figure 3.10 : Modulation 64 QAM Channel AWGN

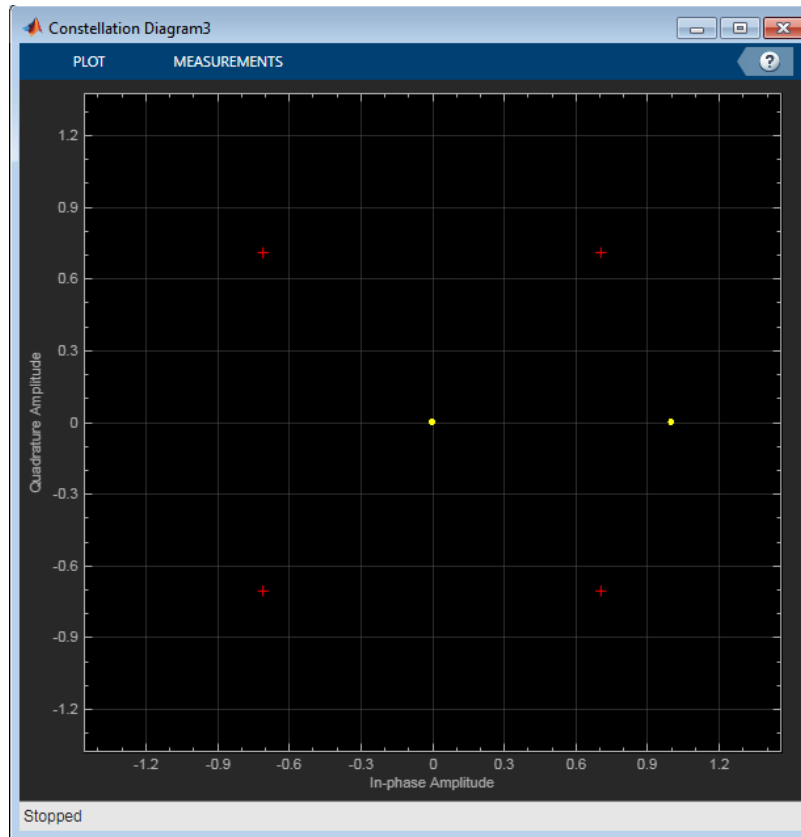


Figure 3.11 : Modulation BPSK

- Ces constellations présentent le nombre de bits pouvant être transmis en une fois, elles peuvent être augmentées pour un meilleur débit binaire, ou diminuées pour améliorer la fiabilité de la transmission en générant moins d'erreurs binaires.
- Après la modulation chaque symbole OFDM se compose de 192 sous-porteuses qui sont réservées pour le transport des données utiles.

3.8. La simulation de MIMO :

Dans cette partie on a simulé le système MIMO avec 2 antennes à l'émission et 2 antennes à la réception, le système SIMO ou diversité de réception avec 1 antenne à l'émission et 2 antennes à la réception ainsi que le système SISO avec 1 antenne à l'émission et 1 antenne à la réception.

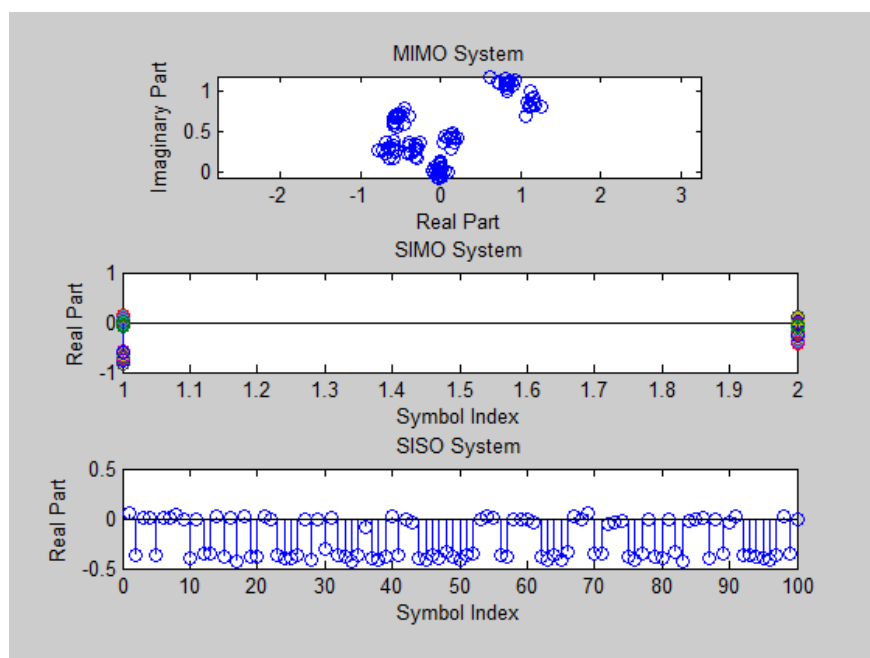


Figure 3.12 : Simulation de MIMO, SIMO, et SISO Systèmes

3.9. La simulation de l'OFDM :

Dans cette partie on a simulé le système OFDM. On a obtenu les résultats suivants :

3.9.1. Les données originales:

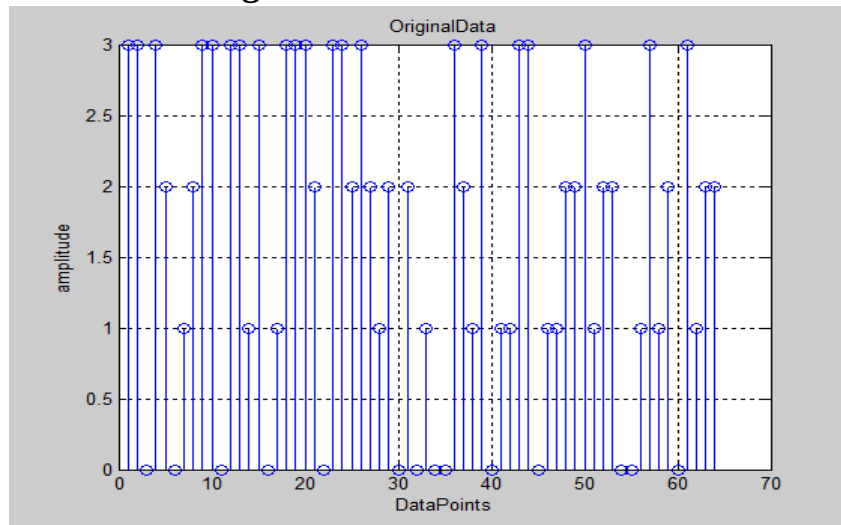


Figure 3.13 : Les données originales

- Cette figure représente les données à l'entrée du modulateur OFDM.

3.9.2. Modulation Psk:

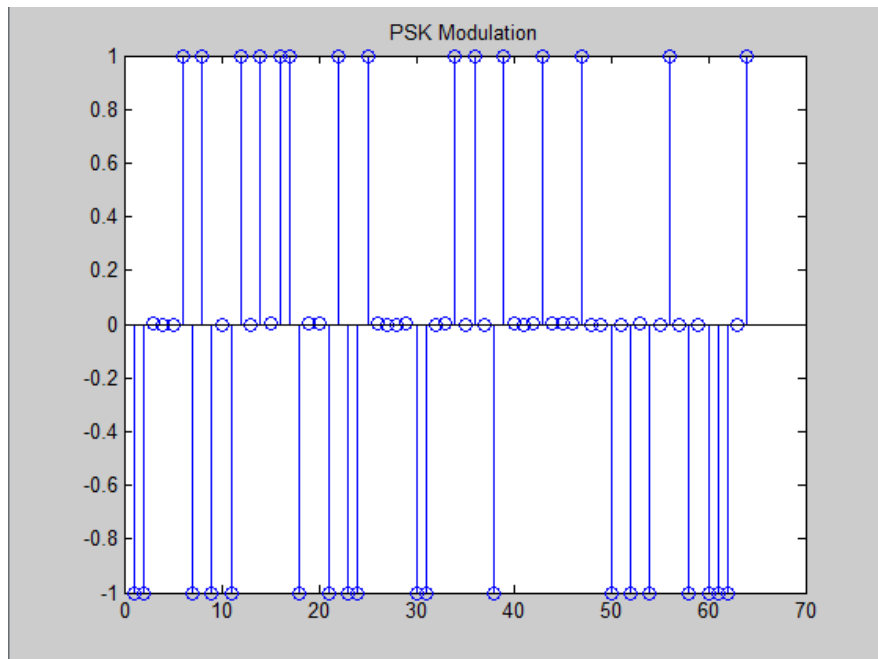


Figure 3.14: Modulation Psk

- Cette figure représente les données après mapping PSK.

3.9.3. Sous-porteuses 1 à 4 :

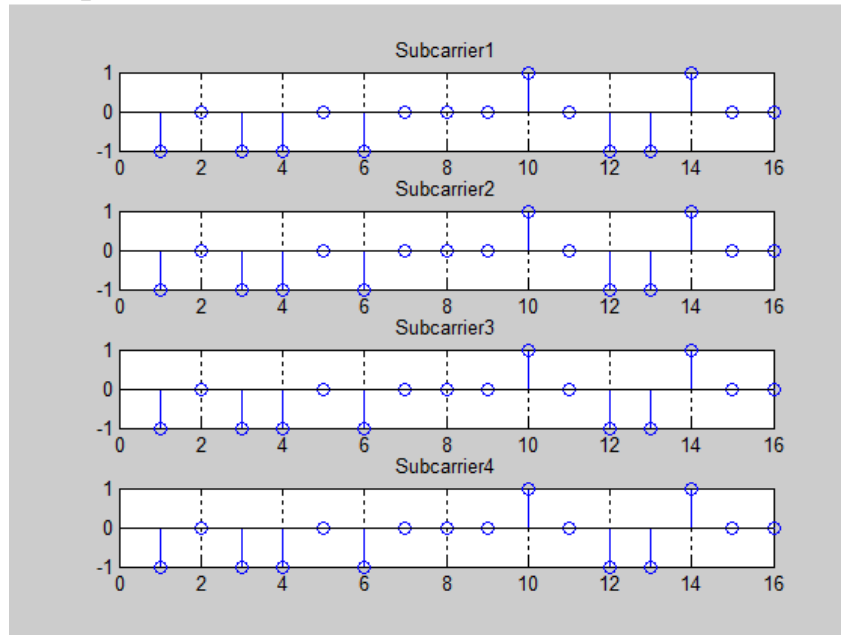


Figure 3.15: Sous-porteuses 1 à 4

- Cette figure représente les données dans chaque sous porteuse.

3.9.4. IFFT sur toutes les sous-porteuses:

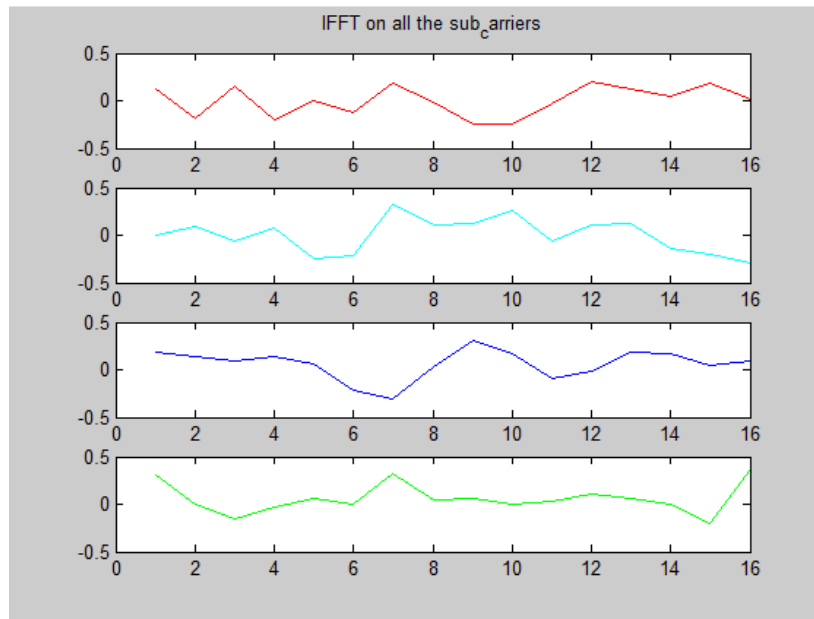


Figure 3.16 : IFFT sur toutes les sous-porteuses

- Cette figure représente les données après modulation (IFFT) pour chaque sous porteuse.

3.9.5. Préfixe cyclique ajouté à toutes les sous-porteuses :

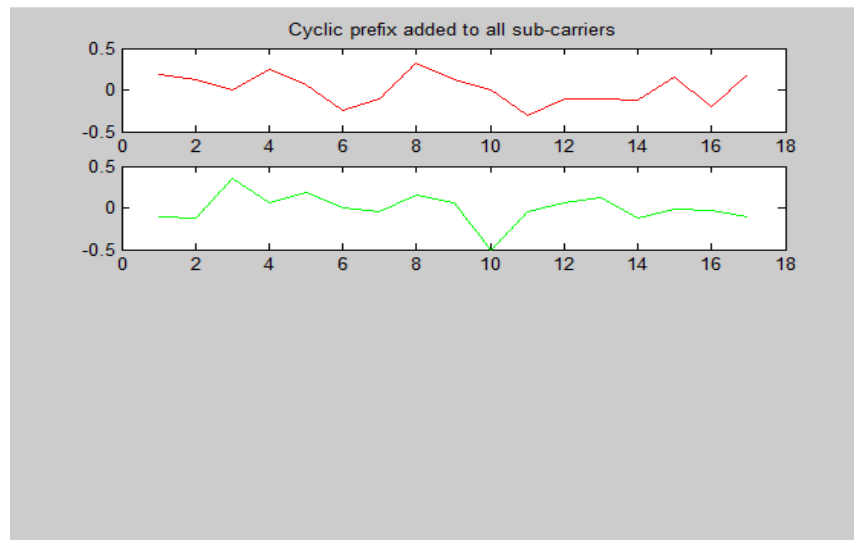


Figure 3.17 : Préfixe cyclique ajouté à toutes les sous-porteuses

- Cette figure représente les données après l'ajout du cyclique préfixe à toute les sous porteuse.

3.9.6. Orthogonalité :

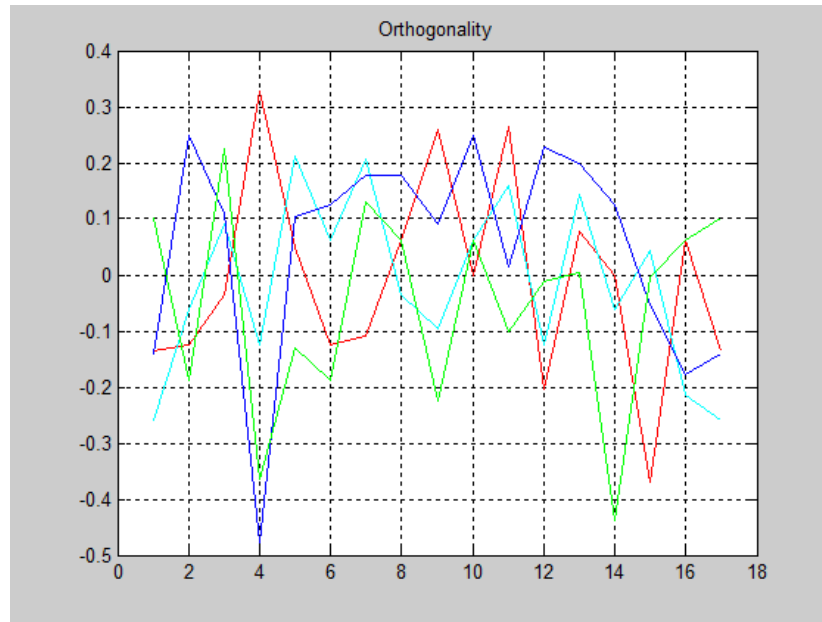


Figure 3.18 : Orthogonalité

La figure 3.18 représente les données qu'on va transmettre, elles sont orthogonales on va les additionner pour obtenir un symbole OFDM.

3.9.7. Signal OFDM :

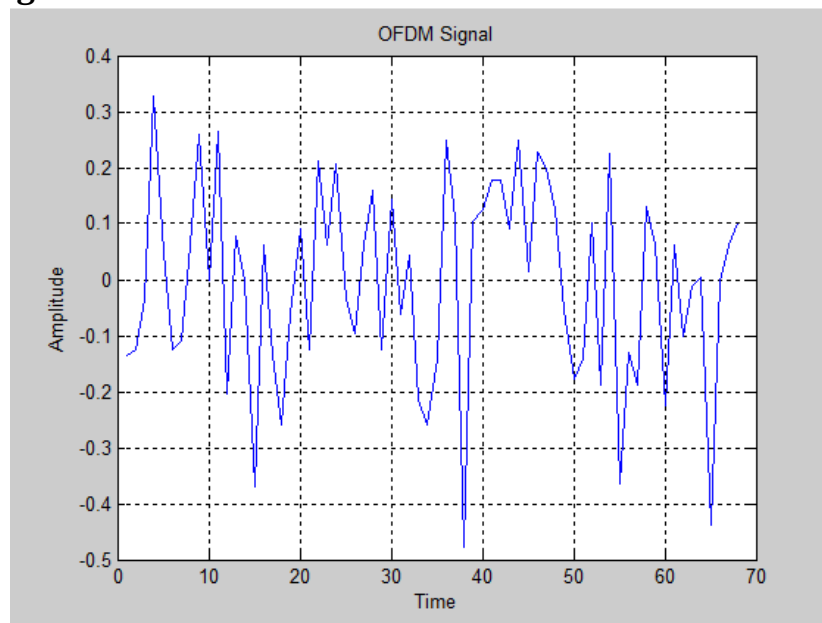


Figure 3.19: Signal OFDM

La figure 3.19 représente la donnée OFDM après sommation des données orthogonales précédentes.

3.10. Conclusion :

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

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

Conclusion générale

Conclusion générale :

Ce travail a été initié dans le contexte, portant sur l'étude des technologies de transmission utilisant des réseaux d'antennes pour l'émission et la réception (MIMO) et associées à la modulation OFDM. Nous avons discuté des concepts OFDM et MIMO séparément afin d'introduire le système MIMO-OFDM, et nous avons décrit les principaux éléments constituant les deux systèmes. Ensuite, nous avons approfondi chacune des technologies et étudié les performances d'un système MIMO utilisant la modulation OFDM. Dans un premier temps, nous avons présenté des généralités sur les systèmes de télécommunications sans fil et exposé les catégories des réseaux sans fils ainsi que leurs avantages et inconvénients.

Dans un deuxième temps nous avons exposé l'étude de la technique OFDM et les principes de son utilisation et son implémentation. Nous avons également présenté la technique MIMO et exposé l'association MIMO-OFDM en combinant les deux systèmes afin d'exploiter leurs avantages. Nous avons implémenté les systèmes de transmissions à base de l'OFDM et MIMO-OFDM sous SIMULINK la combinaison des deux systèmes permet d'exploiter leurs avantages respectifs. A travers les résultats de simulations, nous avons évalué leurs performances en taux d'erreur minimal (BER).

La technique OFDM diminue considérablement le phénomène des interférences en offrant des courbes de constellations non bruitées et un taux d'erreur acceptable, toutefois la technique MIMO-OFDM offre les meilleurs résultats en termes de constellations reçues et de taux d'erreur achevés.

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

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

L'annexe 1:

Code de matlab MIMO:

```
% Simulation of MIMO, SIMO, and SISO Systems with Graphs

% Parameters
numSymbols = 100;      % Number of symbols
snr = 20;              % Signal-to-Noise Ratio (dB)
numTx = 2;             % Number of transmit antennas
numRx = 2;             % Number of receive antennas

% Generate random data symbols
data = randi([0 1], numSymbols, 1);

% MIMO system
h = (randn(numRx, numTx) + 1i * randn(numRx, numTx)) / sqrt(2); % Channel matrix
receivedMIMO = h * reshape(data, [], numTx).';                  % Received signal
receivedMIMO = awgn(receivedMIMO, snr, 'measured');               % Add AWGN noise

% SIMO system
h_simo = (randn(numRx, 1) + 1i * randn(numRx, 1)) / sqrt(2);   % Channel vector
receivedSIMO = h_simo * data.';                                  % Received signal
receivedSIMO = awgn(receivedSIMO, snr, 'measured');              % Add AWGN noise

% SISO system
h_siso = (randn(1) + 1i * randn(1)) / sqrt(2);                 % Channel coefficient
receivedSISO = h_siso * data.';                                  % Received signal
receivedSISO = awgn(receivedSISO, snr, 'measured');              % Add AWGN noise

% Plotting
figure;

% MIMO system
subplot(3, 1, 1);
plot(real(receivedMIMO), imag(receivedMIMO), 'bo');
title('MIMO System');
xlabel('Real Part');
ylabel('Imaginary Part');
axis equal;

% SIMO system
subplot(3, 1, 2);
stem(real(receivedSIMO));
title('SIMO System');
xlabel('Symbol Index');
ylabel('Real Part');

% SISO system
subplot(3, 1, 3);
stem(real(receivedSISO));
title('SISO System');
xlabel('Symbol Index');
ylabel('Real Part');
```

code de matlab OFDM :

```
clc
clear all;
close all;

%initiation
no_of_data_bits=64%Number of bits per channel extended to 128
M =4 %Number of subcarrier channel
```

```

n=256;%Total number of bits to be transmitted at the transmitter
block_size = 16;%size of each OFDM block to add cyclic prefix
cp_len = floor(0.1*block_size); %Lenght of the cyclic prefix

%Transmitter
%source generation and modulation
%generate random data source to be transmitted of lenght 64

data=randsrc(1,no_of_data_bits,0:M-1);
figure(1),stem(data);grid on;xlabel('DataPoints');ylabel('amplitude')
title('OriginalData')

%perform BPSK modulation on the input source data

psk_modulated_data=pskmod(data,M);
figure(2),stem(psk_modulated_data);title('PSK Modulation')

%converting the series data stream into four parallel data stream to form

%four sub carries
S2P = reshape(psk_modulated_data,no_of_data_bits/M,M)
Sub_carrier1=S2P(:,1)
Sub_carrier2=S2P(:,2)
Sub_carrier3=S2P(:,3)
Sub_carrier4=S2P(:,4)
figure(3),subplot(4,1,1),stem(Sub_carrier1),title('Subcarrier1'),grid on;
subplot(4,1,2),stem(Sub_carrier1),title('Subcarrier2'),grid on;
subplot(4,1,3),stem(Sub_carrier1),title('Subcarrier3'),grid on;
subplot(4,1,4),stem(Sub_carrier1),title('Subcarrier4'),grid on;

%IFFT OF FOUR SUB_CARRIERS

number_of_subcarries=4;
cp_start=block_size-cp_len;
ifft_Subcarrier1= ifft(Sub_carrier1)
ifft_Subcarrier2 = ifft(Sub_carrier2)
ifft_Subcarrier3= ifft(Sub_carrier3)
ifft_Subcarrier4= ifft(Sub_carrier4)
figure(4),subplot(4,1,1),plot(real(ifft_Subcarrier1),'r'),
title('IFFT on all the sub_carriers')
subplot(4,1,2),plot(real(ifft_Subcarrier2),'c')
subplot(4,1,3),plot(real(ifft_Subcarrier3),'b')
subplot(4,1,4),plot(real(ifft_Subcarrier4),'g')

%ADD-CYCLIC PREFIX

for i=1:number_of_subcarries,
ifft_Subcarrier(:,i)=ifft((S2P(:,i)),16)% 16 is the ifft point
for j=1:cp_len,
cyclic_prefix(j,i)=ifft_Subcarrier(j+cp_start,i)
end
Append_prefix(:,i)=vertcat(cyclic_prefix(:,i),ifft_Subcarrier(:,i))

%appends prefix to each subcarriers
end
A1=Append_prefix(:,1);
A2=Append_prefix(:,2);

```

```

A3=Append_prefix(:,3);
A4=Append_prefix(:,4);
figure(5),subplot(4,1,1),plot(real(A1),'r'),title('Cyclic prefix added to all
sub-carriers')
subplot(4,1,2),plot(real(A2),'c')
subplot(4,1,2),plot(real(A2),'b')
subplot(4,1,2),plot(real(A2),'g')
figure(11),plot((real(A1)),'r'),title('Orthogonality'),hold
on,plot((real(A2)),'c'),hold on,
plot((real(A3)),'b'),hold on,plot((real(A4)),'g'),hold on,grid on

%Convert to serial stream for transmission
[rows_Append_prefixcols_Append_prefix]=size(Append_prefix)
len_ofdm_data=rows_Append_prefix*cols_Append_prefix

%OFDM signal to be transmitted

ofdm_signal=reshape(Append_prefix,1,len_ofdm_data);
figure(6),plot(real(ofdm_signal));xlabel('Time');ylabel('Amplitude');
title('OFDM Signal');grid on;

```

L'annexe 2:

Les résultats :

no of data bits =

6

M =4

S2P =

-0.0000 - 1.0000i -0.0000 - 1.0000i 1.0000 + 0.0000i -1.0000 + 0.0000i
-0.0000 - 1.0000i -0.0000 - 1.0000i -1.0000 + 0.0000i -1.0000 + 0.0000i
1.0000 + 0.0000i -1.0000 + 0.0000i 0.0000 + 1.0000i 0.0000 + 1.0000i
-1.0000 + 0.0000i 0.0000 + 1.0000i 1.0000 + 0.0000i 0.0000 + 1.0000i
-1.0000 + 0.0000i -0.0000 - 1.0000i 1.0000 + 0.0000i -1.0000 + 0.0000i
-1.0000 + 0.0000i 0.0000 + 1.0000i 1.0000 + 0.0000i -0.0000 - 1.0000i
-1.0000 + 0.0000i -0.0000 - 1.0000i -0.0000 - 1.0000i -0.0000 - 1.0000i
1.0000 + 0.0000i 1.0000 + 0.0000i -0.0000 - 1.0000i -1.0000 + 0.0000i
-0.0000 - 1.0000i -1.0000 + 0.0000i -0.0000 - 1.0000i -1.0000 + 0.0000i
1.0000 + 0.0000i -1.0000 + 0.0000i -1.0000 + 0.0000i -1.0000 + 0.0000i
0.0000 + 1.0000i 1.0000 + 0.0000i 1.0000 + 0.0000i 1.0000 + 0.0000i
-0.0000 - 1.0000i 0.0000 + 1.0000i 0.0000 + 1.0000i -1.0000 + 0.0000i
-0.0000 - 1.0000i 1.0000 + 0.0000i 1.0000 + 0.0000i 0.0000 + 1.0000i
0.0000 + 1.0000i 0.0000 + 1.0000i 1.0000 + 0.0000i 1.0000 + 0.0000i
0.0000 + 1.0000i 0.0000 + 1.0000i 0.0000 + 1.0000i 1.0000 + 0.0000i
-1.0000 + 0.0000i -1.0000 + 0.0000i -1.0000 + 0.0000i 1.0000 + 0.0000i

Sub_carrier1 =

-0.0000 - 1.0000i -0.0000 - 1.0000i 1.0000 + 0.0000i -1.0000 + 0.0000i -1.0000 + 0.0000i -1.0000 + 0.0000i
-1.0000 + 0.0000i 1.0000 + 0.0000i -0.0000 - 1.0000i 1.0000 + 0.0000i 0.0000 + 1.0000i -0.0000 - 1.0000i -0.0000 - 1.0000i
0.0000 + 1.0000i 0.0000 + 1.0000i -1.0000 + 0.0000i

Sub_carrier2 =

-0.0000 - 1.0000i -0.0000 - 1.0000i -1.0000 + 0.0000i 0.0000 + 1.0000i -0.0000 - 1.0000i 0.0000 + 1.0000i
-0.0000 - 1.0000i 1.0000 + 0.0000 -1.0000 + 0.0000i -1.0000 + 0.0000i 1.0000 + 0.0000i 0.0000 + 1.0000i
1.0000 + 0.0000i 0.0000 + 1.0000i 0.0000 + 1.0000i -1.0000 + 0.0000i

Sub_carrier3 =

1.0000 + 0.0000i -1.0000 + 0.0000i 0.0000 + 1.0000i 1.0000 + 0.0000i 1.0000 + 0.0000i 1.0000 + 0.0000i

-0.0000 - 1.0000i -0.0000 - 1.0000i -0.0000 - 1.0000i -1.0000 + 0.0000i 1.0000 + 0.0000i 0.0000 + 1.0000i
 1.0000 + 0.0000i 1.0000 + 0.0000i 0.0000 + 1.0000i -1.0000 + 0.0000i

Sub_carrier4 =

-1.0000 + 0.0000i -1.0000 + 0.0000i 0.0000 + 1.0000i 0.0000 + 1.0000i -1.0000 + 0.0000i -0.0000 - 1.0000i -0.0000 - 1.0000i
 1.0000 + 0.0000i -1.0000 + 0.0000i -1.0000 + 0.0000i 1.0000 + 0.0000i -1.0000 + 0.0000i 0.0000 + 1.0000i 1.0000 + 0.0000i
 1.0000 + 0.0000 1.0000 + 0.0000i

ifft_Subcarrier1 =

-0.1250 - 0.1250i -0.0350 - 0.1640 0.3277 + 0.0625i 0.0485 + 0.0287i -0.1250 - 0.2500i -0.1098 + 0.1825i 0.0625 - 0.0991i
 0.2596 - 0.0192i 0.0000 - 0.0000 0.2636 + 0.0390i -0.2027 + 0.0625 0.0765 + 0.0963i
 -0.0000 - 0.3750i -0.3688 - 0.3075 0.0625 - 0.2759 -0.1346 + 0.1442i

ifft_Subcarrier2 =

-0.0625 + 0.0625i 0.0912 - 0.1110i -0.1250 - 0.2652 0.2106 - 0.0275i 0.0625 - 0.1875i 0.2067 + 0.0721i
 -0.0366 + 0.1768i -0.0951 + 0.3063i 0.0625 - 0.3125i 0.1588 - 0.1390 -0.1250 + 0.2652i 0.1430 - 0.3261i
 -0.0625 - 0.0625i 0.0433 - 0.3221 -0.2134 - 0.1768i -0.2584 + 0.0473i

ifft_Subcarrier3 =

0.2500 + 0.0000 0.1103 + 0.2664i -0.4786 - 0.1768i 0.1031 + 0.0012i 0.1250 - 0.1250i 0.1780 - 0.0737i
 0.1768 - 0.1250 0.0896 + 0.2871 0.2500 - 0.0000 0.0147 + 0.0354i 0.2286 + 0.1768 0.1987 - 0.2298i
 0.1250 - 0.1250i -0.0530 + 0.0219i -0.1768 - 0.1250 -0.1414 + 0.1914i

ifft_Subcarrier4 =

-0.1875 + 0.0625i 0.2258 - 0.0625 -0.3643 - 0.2393i -0.1301 - 0.3452i -0.1875 + 0.0625i 0.1301 - 0.0625i
 0.0625 - 0.2393i -0.2258 + 0.1436i 0.0625 + 0.0625i -0.1008 - 0.0625i -0.0107 + 0.1143i 0.0051 + 0.1167i
 -0.4375 + 0.0625i -0.0051 - 0.0625i 0.0625 + 0.1143i 0.1008 + 0.3349i

ifft_Subcarrier =

-0.1250 - 0.1250i -0.0350 - 0.1640i 0.3277 + 0.0625i 0.0485 + 0.0287i -0.1250 - 0.2500i -0.1098 + 0.1825i 0.0625 -
 0.0991i 0.2596 - 0.0192 0.0000 - 0.0000i 0.2636 + 0.0390i -0.2027 + 0.0625i 0.0765 + 0.0963i -0.0000 - 0.3750i -0.3688 - 0.3075i
 0.0625 - 0.2759i -0.1346 + 0.1442i

cyclic_prefix =

-0.1346 + 0.1442i

Append_prefix =

-0.1346 + 0.1442i -0.1250 - 0.1250i -0.0350 - 0.1640i 0.3277 + 0.0625i 0.0485 + 0.0287i -0.1250 - 0.2500i -0.1098 + 0.1825i
 0.0625 - 0.0991i 0.2596 - 0.0192i 0.0000 - 0.0000i 0.2636 + 0.0390i -0.2027 + 0.0625i 0.0765 + 0.0963i -0.0000 - 0.3750i
 -0.3688 - 0.3075i 0.0625 - 0.2759i -0.1346 + 0.1442i

ifft_Subcarrier =

-0.1250 - 0.1250i -0.0625 + 0.0625i -0.0350 - 0.1640i 0.0912 - 0.1110 0.3277 + 0.0625i -0.1250 - 0.2652i
0.0485 + 0.0287i 0.2106 - 0.0275i -0.1250 - 0.2500i 0.0625 - 0.1875i -0.1098 + 0.1825i 0.2067 + 0.0721i
0.0625 - 0.0991i -0.0366 + 0.1768i 0.2596 - 0.0192i -0.0951 + 0.3063i 0.0000 - 0.0000i 0.0625 - 0.3125i
0.2636 + 0.0390i 0.1588 - 0.1390i -0.2027 + 0.0625i -0.1250 + 0.2652i 0.0765 + 0.0963i 0.1430 - 0.3261i
-0.0000 - 0.3750i -0.0625 - 0.0625i -0.3688 - 0.3075i 0.0433 - 0.3221i 0.0625 - 0.2759i -0.2134 - 0.1768i
-0.1346 + 0.1442i -0.2584 + 0.0473i

cyclic_prefix =

-0.1346 + 0.1442i -0.2584 + 0.0473i

Append_prefix =

-0.1346 + 0.1442i -0.2584 + 0.0473i -0.1250 - 0.1250i -0.0625 + 0.0625i -0.0350 - 0.1640i 0.0912 - 0.1110i
0.3277 + 0.0625i -0.1250 - 0.2652i 0.0485 + 0.0287i 0.2106 - 0.0275i -0.1250 - 0.2500i 0.0625 - 0.1875i
-0.1098 + 0.1825i 0.2067 + 0.0721i 0.0625 - 0.0991i -0.0366 + 0.1768i 0.2596 - 0.0192i -0.0951 + 0.3063i
0.0000 - 0.0000i 0.0625 - 0.3125i 0.2636 + 0.0390i 0.1588 - 0.1390i
-0.2027 + 0.0625i -0.1250 + 0.2652 0.0765 + 0.0963i 0.1430 - 0.3261i -0.0000 - 0.3750i -0.0625 - 0.0625i
-0.3688 - 0.3075i 0.0433 - 0.3221i 0.0625 - 0.2759i -0.2134 - 0.1768i -0.1346 + 0.1442i -0.2584 + 0.0473i

ifft_Subcarrier =

-0.1250 - 0.1250i -0.0625 + 0.0625i 0.2500 + 0.0000i
-0.0350 - 0.1640i 0.0912 - 0.1110i 0.1103 + 0.2664i
0.3277 + 0.0625i -0.1250 - 0.2652i -0.4786 - 0.1768i
0.0485 + 0.0287i 0.2106 - 0.0275i 0.1031 + 0.0012i
-0.1250 - 0.2500i 0.0625 - 0.1875i 0.1250 - 0.1250i
-0.1098 + 0.1825i 0.2067 + 0.0721i 0.1780 - 0.0737i
0.0625 - 0.0991i -0.0366 + 0.1768i 0.1768 - 0.1250i
0.2596 - 0.0192i -0.0951 + 0.3063i 0.0896 + 0.2871i
0.0000 - 0.0000i 0.0625 - 0.3125i 0.2500 - 0.0000i
0.2636 + 0.0390i 0.1588 - 0.1390i 0.0147 + 0.0354i
-0.2027 + 0.0625i -0.1250 + 0.2652i 0.2286 + 0.1768i
0.0765 + 0.0963i 0.1430 - 0.3261i 0.1987 - 0.2298i
-0.0000 - 0.3750i -0.0625 - 0.0625i 0.1250 - 0.1250i
-0.3688 - 0.3075i 0.0433 - 0.3221i -0.0530 + 0.0219i
0.0625 - 0.2759i -0.2134 - 0.1768i -0.1768 - 0.1250i
-0.1346 + 0.1442i -0.2584 + 0.0473i -0.1414 + 0.1914i

cyclic_prefix =

-0.1346 + 0.1442i -0.2584 + 0.0473i -0.1414 + 0.1914i

Append_prefix =

-0.1346 + 0.1442i -0.2584 + 0.0473i -0.1414 + 0.1914i

-0.1250 - 0.1250i -0.0625 + 0.0625i 0.2500 + 0.0000i

-0.0350 - 0.1640i 0.0912 - 0.1110i 0.1103 + 0.2664i

0.3277 + 0.0625i -0.1250 - 0.2652i -0.4786 - 0.1768i

0.0485 + 0.0287i 0.2106 - 0.0275i 0.1031 + 0.0012i

-0.1250 - 0.2500i 0.0625 - 0.1875i 0.1250 - 0.1250i

-0.1098 + 0.1825i 0.2067 + 0.0721i 0.1780 - 0.0737i

0.0625 - 0.0991i -0.0366 + 0.1768i 0.1768 - 0.1250i

0.2596 - 0.0192i -0.0951 + 0.3063i 0.0896 + 0.2871i

0.0000 - 0.0000i 0.0625 - 0.3125i 0.2500 - 0.0000i

0.2636 + 0.0390i 0.1588 - 0.1390i 0.0147 + 0.0354i

-0.2027 + 0.0625i -0.1250 + 0.2652i 0.2286 + 0.1768i

0.0765 + 0.0963i 0.1430 - 0.3261i 0.1987 - 0.2298i

-0.0000 - 0.3750i -0.0625 - 0.0625i 0.1250 - 0.1250i

-0.3688 - 0.3075i 0.0433 - 0.3221i -0.0530 + 0.0219i

0.0625 - 0.2759i -0.2134 - 0.1768i -0.1768 - 0.1250i

-0.1346 + 0.1442i -0.2584 + 0.0473i -0.1414 + 0.1914i

ifft_Subcarrier =

-0.1250 - 0.1250i -0.0625 + 0.0625i 0.2500 + 0.0000i -0.1875 + 0.0625i

-0.0350 - 0.1640i 0.0912 - 0.1110i 0.1103 + 0.2664i 0.2258 - 0.0625i

0.3277 + 0.0625i -0.1250 - 0.2652i -0.4786 - 0.1768i -0.3643 - 0.2393i

0.0485 + 0.0287i 0.2106 - 0.0275i 0.1031 + 0.0012i -0.1301 - 0.3452i

-0.1250 - 0.2500i 0.0625 - 0.1875i 0.1250 - 0.1250i -0.1875 + 0.0625i

-0.1098 + 0.1825i 0.2067 + 0.0721i 0.1780 - 0.0737i 0.1301 - 0.0625i

0.0625 - 0.0991i -0.0366 + 0.1768i 0.1768 - 0.1250i 0.0625 - 0.2393i

0.2596 - 0.0192i -0.0951 + 0.3063i 0.0896 + 0.2871i -0.2258 + 0.1436i

0.0000 - 0.0000i 0.0625 - 0.3125i 0.2500 - 0.0000i 0.0625 + 0.0625i

0.2636 + 0.0390i 0.1588 - 0.1390i 0.0147 + 0.0354i -0.1008 - 0.0625i

-0.2027 + 0.0625i -0.1250 + 0.2652i 0.2286 + 0.1768i -0.0107 + 0.1143i

0.0765 + 0.0963i 0.1430 - 0.3261i 0.1987 - 0.2298i 0.0051 + 0.1167i

$-0.0000 - 0.3750i$ $-0.0625 - 0.0625i$ $0.1250 - 0.1250i$ $-0.4375 + 0.0625i$
 $-0.3688 - 0.3075i$ $0.0433 - 0.3221i$ $-0.0530 + 0.0219i$ $-0.0051 - 0.0625i$
 $0.0625 - 0.2759i$ $-0.2134 - 0.1768i$ $-0.1768 - 0.1250i$ $0.0625 + 0.1143i$
 $-0.1346 + 0.1442i$ $-0.2584 + 0.0473i$ $-0.1414 + 0.1914i$ $0.1008 + 0.3349i$

cyclic_prefix =

$-0.1346 + 0.1442i$ $-0.2584 + 0.0473i$ $-0.1414 + 0.1914i$ $0.1008 + 0.3349i$

Append_prefix =

$-0.1346 + 0.1442i$ $-0.2584 + 0.0473i$ $-0.1414 + 0.1914i$ $0.1008 + 0.3349i$
 $-0.1250 - 0.1250i$ $-0.0625 + 0.0625i$ $0.2500 + 0.0000i$ $-0.1875 + 0.0625i$
 $-0.0350 - 0.1640i$ $0.0912 - 0.1110i$ $0.1103 + 0.2664i$ $0.2258 - 0.0625i$
 $0.3277 + 0.0625i$ $-0.1250 - 0.2652i$ $-0.4786 - 0.1768i$ $-0.3643 - 0.2393i$
 $0.0485 + 0.0287i$ $0.2106 - 0.0275i$ $0.1031 + 0.0012i$ $-0.1301 - 0.3452i$
 $-0.1250 - 0.2500i$ $0.0625 - 0.1875i$ $0.1250 - 0.1250i$ $-0.1875 + 0.0625i$
 $-0.1098 + 0.1825i$ $0.2067 + 0.0721i$ $0.1780 - 0.0737i$ $0.1301 - 0.0625i$
 $0.0625 - 0.0991i$ $-0.0366 + 0.1768i$ $0.1768 - 0.1250i$ $0.0625 - 0.2393i$
 $0.2596 - 0.0192i$ $-0.0951 + 0.3063i$ $0.0896 + 0.2871i$ $-0.2258 + 0.1436i$
 $0.0000 - 0.0000i$ $0.0625 - 0.3125i$ $0.2500 - 0.0000i$ $0.0625 + 0.0625i$
 $0.2636 + 0.0390i$ $0.1588 - 0.1390i$ $0.0147 + 0.0354i$ $-0.1008 - 0.0625i$
 $-0.2027 + 0.0625i$ $-0.1250 + 0.2652i$ $0.2286 + 0.1768i$ $-0.0107 + 0.1143i$
 $0.0765 + 0.0963i$ $0.1430 - 0.3261i$ $0.1987 - 0.2298i$ $0.0051 + 0.1167i$
 $-0.0000 - 0.3750i$ $-0.0625 - 0.0625i$ $0.1250 - 0.1250i$ $-0.4375 + 0.0625i$
 $-0.3688 - 0.3075i$ $0.0433 - 0.3221i$ $-0.0530 + 0.0219i$ $-0.0051 - 0.0625i$
 $0.0625 - 0.2759i$ $-0.2134 - 0.1768i$ $-0.1768 - 0.1250i$ $0.0625 + 0.1143i$
 $-0.1346 + 0.1442i$ $-0.2584 + 0.0473i$ $-0.1414 + 0.1914i$ $0.1008 + 0.3349i$

rows_Append_prefix = 17

cols_Append_prefix = 4

len_ofdm_data = 68.

4. Bibliographie

- [1] Autorité de Régulation de la poste et des Communications Électroniques. (2017). Observatoire du marché de la téléphonie mobile en Algérie. Alger.
- [2] Sizun, Hervé, and Pierre de Fornel. *Radio wave propagation for telecommunication applications*. Berlin, Germany:: Springer, 2005
- [3] Erik. Dahlman, Stefan. Parkvall and Johan. Sköld, "4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband "Academic Press is an imprint of Elsevier, Oxford, OX5 1GB, UK, 2011
- [4] Yan G.(2008).réseaux sans fils de nouvelle génération : architectes spontanées et optimisation inter-couches. Institut polytechnique de Grenoble.These de doctorat
- [5] pujolle.(2008). Les réseaux. Eyrolles. ISBN : 978-2-212-11757-8.1099p
- [6] D. karakolah. Conception de prototypage d'un récepteur itératif pour les systèmes de transmission MIMO avec pré-codage linéaire. Thèse de doctorat, université Bretagnesud, France, 2009
- [7] THESE DE DOCTORAT Présentée devant L'université Djillali Liabes de SidiBelAbbes Faculté de Génie Electrique. Département d'Electronique : Implantation d'applications Radio Logicielles sur architectures reconfigurables pour les systèmes multiporteuses et multi-antennes Année (2020-2021)
- [8] Staudy Paper on Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) Technologie
- [9] El zein.G. guguen. P 0 (2004). Les technique multi-antennes pour les réseaux sans fil Lavoisier
- [10] ALDHAHERI, A. S. A. CONCEPTION ET SIMULATION D'UNE ANTENNE MIMO Année(2019)

- [11] B. Holter, .On the capacity of the MIMO channel: A tutorial introduction. Trondheim, Norway : in Proceedings of the IEEE Norwegian Symposium on Signal Processing (NSSP), october 18-20 2001, pp. 167.172
- [12] Boutaleb, Amir, Nazim Bouraoui, and Manal Encadreur Messadi. Amélioration des performances des transmissions OFDM par le chaos. Diss. Université de Jijel, 2021
- [13] sylvain tertois réduction des effets des non-linéarités dans une modulation multi porteuse a l'aide de réseaux de neurones thèse de doctorat soutenue le 12 décembre 2003
- [14] Yong Soo Cho, Jaekwon Kim, Won Young Yang, Chung G. Kang, "MIMO-OFDM wireless communications with matlab" John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, 2010
- [15] Pollet T., Moeneclaey M.; Jeanclaude I., Sari H.; « Carrier phase jitter sensitivity for single-carrier and multi-carrier QAM systems »; IEEE Symposium on Communications and Vehicular Technology in the Benelux, pp.174-181, November 1994
- [16] <https://fr.mathworks.com/discovery/ofdm.html>
- [17] V. Tarokh, A. Naguib, N. Seshadri, and A. R. Calderbank, "Space-time codes for high data rate wireless communication: Performance criteria in the presence of channel estimation errors, mobility, and multiple paths," IEEE Trans. Commun, vol. 47, no. 2, pp. 199–207, Feb 1999.
- [18] A. van Zelst, T.C.W. Schenk, «Implementation of a MIMO OFDM based Wireless LAN System», Accepted for publication in IEEE Transactions on SignalProcessing. Netherlands, May 2004.
- [19] H.A Bakir, « Exploitation de l'association des techniques MIMO-OFDM dans les réseaux sans fil », Mémoire de Magister, Université d'Algérie, 2012.
- [20] stuber,G.L;barry,J.R; mcLaughlin,S.W.;Ye Li; Ingram, M.A;pratt,T.G.;"Broadband MIMO-OFDM wireless communications", Proceeding of the IEEE, Volume:92, issue:2,February 2004 pp. 271-294
- [21]bashar(2023). MIMO_OFDM_system_2x2 (https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/66670-mimo_ofdm_system_2x2), MATLAB Central File Exchange. Retrieved June 5, 2023

[22] <https://vincmazet.github.io/comnum/g%C3%A9n%C3%A9ralit%C3%A9s/canal.html>