



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



UNIVERSITE Echahid Hamma Lakhdar El-Oued

Faculté de Technologies

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique

Domaine : Sciences et Technologies

Filière Télécommunication

Spécialité : Systèmes de Télécommunication

Par :

- *Boudouaya maria.*
- *Ben Salem Nour Elhouda.*
- *Bennaceur Besma.*
- *Trad Hadjer.*

Thème

**Etude et simulation des systèmes de MIMO (Application aux
systèmes de Cinquième génération)**

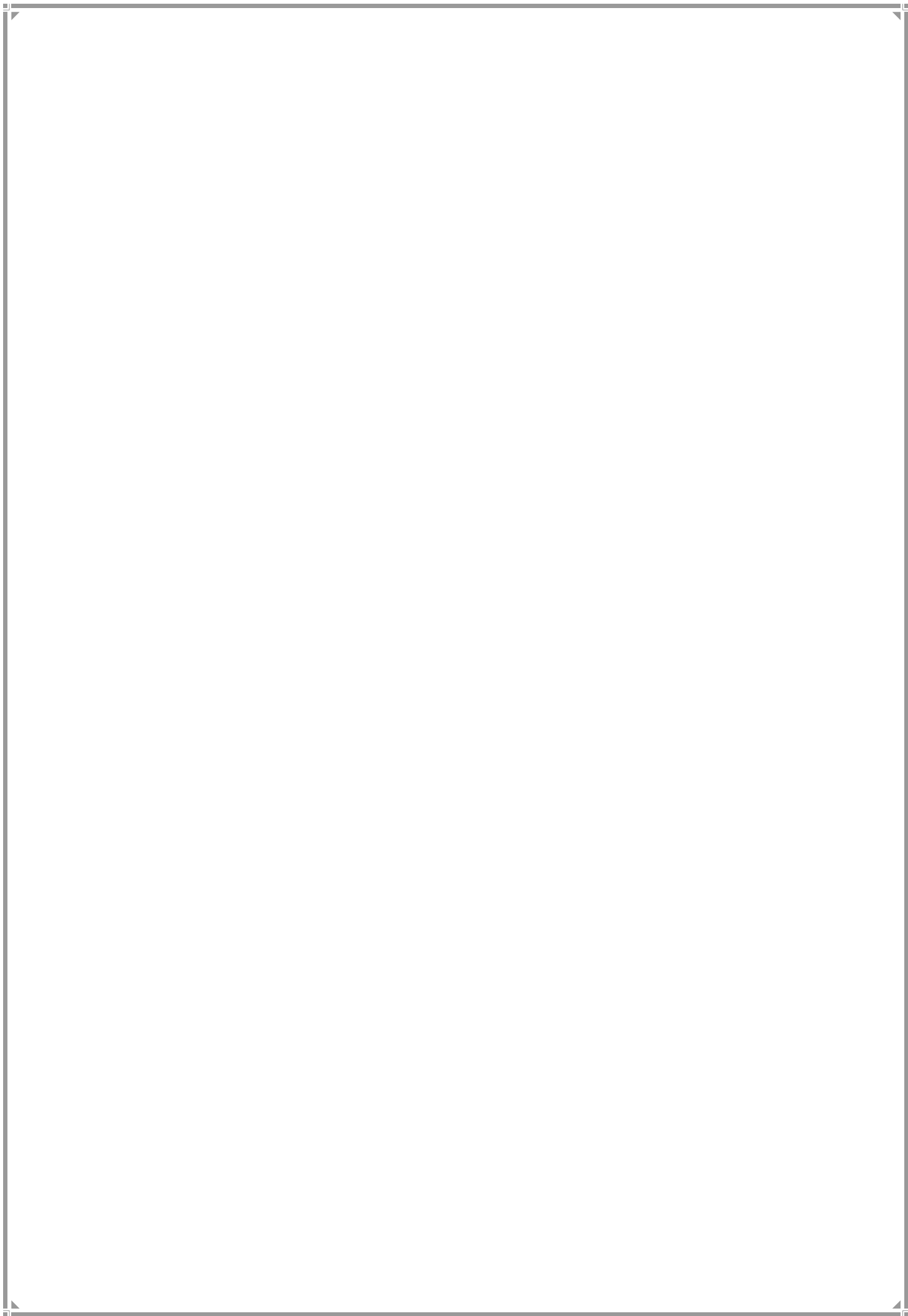
Soutenu publiquement

Le : 14/06/2022

Devant le jury composé de :

Président : Ghendir Said
Examineur : Chemsali
Encadreur : Ajgou Riadh

Année : 2021/2022



Remerciement

*Tout d'abord, louange à dieu Tout-Puissant qui était avec nous dans
Tous nos pas et chemin, nous le remercions pour notre succès.*

*Nous remercions notre encadreur, Mr « Ajgou Riadh », pour
Toute l'aide qu'il nous a apporté, pour ses précieux conseils et pour sa
Confiance en nous.*

*Nos vifs remerciements également aux membres jury pour leur
Intérêt pour nos recherches et pour son acceptation d'examiner notre
Travail.*

*Nos remerciements vont tous les enseignants qui nous ont soutenus
Dans notre carrière universitaire.*

*Merci à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la
concretization de ce ProJet.*

Dédicace

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات الحمد لله ما انتهى درب ولا ختم جهد إلا
بفضله الحمد لله على تمام ما سعيانا لأجله طوال السنين
إلى قوتي وقدوتي وأماني في هذه الدنيا والذي الحبيب صاحب السيرة العطرة والعقل
المستنير

إلى من تعبت من أجلنا وأحسن تربيتنا ورعتنا حتى صرنا كبارا أُمي حبيتي
والدائي حفظهما الله ورعاهما لهما من الفضل ما يبلغ عنان السماء فوجودهما سبب
لاستمرارى ونجاتي في الحياة

إلى أغلى من فقدت إلى روح إخوتي الطاهرة صلاح الدين ومحمد إسلام ومروان
الذين وافتهم المنية منذ عام تغمدهم الله برحمته الواسعة

إلى إخوتي بشائر وغفران شكرا لوجودكم في حياتي إلى أخوي زياد وسمير
وابن أخي أحمد حفظهم الله

إلى صديقاتي التي جمعتني بهم مقاعد الدراسة مريّة سعيدة هدى ورائية
إلى أساتذتي من الابتدائية إلى المتوسطة إلى الثانوية إلى الجامعة الذين تعلمت منهم
الكثير ليس بالعلم فقط بل بالأخلاق والمحبة

إلى كل أولئك الذين وقفوا معي ولو بحرف أو بكلمة أو بموقف أو دعاء صادق

Nour el Houda ben Salem

Dédicace

إلى من أفضلها على نفسي ولم تدخر جهدا في سبيل إسعادي على الدوام أُمي
الحبيبة إلى والدي الحبيب الذي كد من أجلنا إلى أخواتي شهرزاد وفدوة إلى عمي
الحبيب إسماعيل وخالي العزيز محمد عبد الناصر

إلى عائلتي بودواية وعسال وكل من ساعدني في مسيرتي إلى القرية إلهام تومي وكل
أقربائي إلى صديقتي الحبيبات نور الهدى وسميحة وسعيدة ومروة وخولة وتوأمي
صبرين

إلى أساتذتي من الابتدائية الى المتوسطة الى الثانوية الذين تعلمت منهم الكثير ليس
بالعلم فقط بل بالأخلاق

إلى كل أولئك الذين وقفوا معي ولو بحرف أو بكلمة أو بموقف أو دعاء صادق

Maria boudouaya

Dédicace

Je dédie ce mémoire :

Mes très chers parents Mohammed Saïd et ouhiba pour leur soutien
Durant toute ma vie d'étudiant et sans eux je ne serai jamais devenu ce que je
suis.

A mes sœurs Samah, Fatima Zohra.

A mes chers amis, Abir, Fatima Zohra, Aida et marwa. Pour leur soutien
Moral et leur encouragement.

A Mon fiancé Okba

A toute mes familles : Bennaceur & Hammouda

A tous ceux que j'aime, et tous ceux qui m'aiment

Bennaceur Besma

Dédicace

إليك يا أمي يا من علمتني العطاء دون انتظار المقابل يا من زرعتني في قلبي أسمى
معاني الحب والعطاء إلى ذلك الصرح العظيم الذي علمني الخلق الكريم والذي
صاحب الفضل الكبير

إليك أستاذي جميع عبارات الشكر والتقدير يا من بذلت دون انتظار المقابل

إلى زوجي الغالي وإلى صديقتي الغالية مريم

وإلى زميلاتي في هذا العمل وإلى عائلتي الثانية وكل من شجعني في هذه الحياة
وأعطاني دفعة نحو الأمام

Trad Hadjer

Résumé

Les systèmes MIMO ont gagné un grand intérêt et sont devenus populaires. Ils ont été adoptés dans plusieurs standards de communications sans fils. Est une technologie habilitante clé pour les réseaux de nouvelle génération qui rassemble les antennes à la fois au niveau de l'émetteur et du récepteur pour fournir un spectre et une efficacité énergétique élevés à l'aide d'un traitement relativement simple. Tous les avantages qu'apportent les MIMO font d'eux un objet de recherches intenses pour leur intégration dans les systèmes de communication sans fil de la 5G.

L'intégration des MIMO dans les communications minières permet de tourner la propagation à multi-trajets en son avantage. La combinaison de l'OFDM avec les systèmes MIMO permet de réduire la complexité du récepteur et d'offrir des nous avons implémenter chaque bloc de la chaine de transmission sur Matlab, et présenté les résultats de simulation.

Mots-clés : MIMO, OFDM, MIMO-OFDM.

ملخص:

اكتسبت أنظمة MIMO اهتمامًا كبيرًا وأصبحت شائعة. لقد تم اعتمادها في العديد من معايير الاتصالات اللاسلكية. هي تقنية تمكين رئيسية لشبكات الجيل التالي التي تجمع الهوائيات معًا في كل من المرسل والمستقبل لتقديم طيف عالي وكفاءة في الطاقة باستخدام معالجة بسيطة نسبيًا. جميع المزايا التي توفرها MIMO تجعلها موضوع بحث مكثف لدمجها في أنظمة الاتصالات اللاسلكية G.5.

إن دمج تقنية MIMO في اتصالات يجعل من الممكن تحويل الانتشار متعدد المسارات لصالحها. الجمع بين OFDM وأنظمة MIMO يجعل من الممكن تقليل تعقيد المستقبل وتقديم الحلول لقد قمنا بتنفيذ كل كتلة من سلسلة الإرسال على Matlab، وقدمنا نتائج المحاكاة.

Table des matières

Remerciement	I
Dédicace.....	II
Résumé.....	VI
Table des matières.....	VII
Liste des figures.....	X
Liste de tableaux.....	XI
Listes des acronymes et abréviations.....	XII
Symboles.....	XIV

Introduction générale

Chapitre 1: Technologie MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)

1.1 Introduction.....	04
1.2 Développement et l'histoire du MIMO	04
1.3 Notion de diversité.....	05
1.3.1. Diversité temporelle	05
1.3.2. Diversité de fréquence.....	05
1.3.3 Diversité spatiale	05
1.4 Explication générale de la technique MIMO.....	06
1.5 Le principe de la technologie MIMO	08
1.6 Les types des canaux MIMO.....	09
1.6.1- SYSTEME MIMO-SISO (Single Input Single Output).....	09
La capacité de système SISO.....	10
1.6.2-SYSTEME MIMO-SIMO (Single Input Multiple Output).....	10
La capacité de système SIMO.....	10
1.6.3-SYSTEME MIMO-MISO (Multiple Input Single Output).....	11
La capacité de système MISO.....	11
1.6.4 -SYSTEME MIMO (Multiple Inputs and Multiple Outputs).....	11
La capacité d'un système MIMO.....	12
1.7 Algorithmes d'émissions associés aux systèmes MIMO.....	12
1.7.1-Systèmes MIMO à boucle ouverte.....	12
1.7.1.1- Multiplexage spatial.....	13

1.7.1-2- Codage espace-temps (STC)	14
A- Les codes temps-espace en treillis (STTC).....	14
B- Le code temps-espace en blocs (STBC).....	14
1.7.2-Systèmes MIMO à boucle fermé.....	14
1.8 Algorithme de réception associées aux systèmes MIMO.....	15
1.8.1. Technique de forçage à zéro (ZF).....	15
1.8.2. Minimisation de l'erreur quadratique moyenne (EQMM).....	15
1.8.3. Récepteur à Maximum de Vraisemblance (MV).....	16
1.9 Domaines d'utilisation de la technologie MIMO.....	16
1.9.1. La technologie MIMO dans WiMax.....	17
1.9.2 La technologie MIMO dans Wifi.....	17
1.10 Avantages de la technologie MIMO.....	17
1.11 La technologie Massive MIMO.....	18
1.11.1- Beamforming (Formation de faisceau)	18
1.11.2 -Multi-User MIMO (MU-MIMO)	19
1.12 Liaison montante et descendante massive MIMO (Massive MIMO up Link and down Link)	19
1.12.1 Up Link Transmission.....	19
1.12.2 Down Link Transmission.....	20
1.13 L'efficacité spectrale (SE).....	20
1.14 Efficacité énergétique (EE).....	21
1.15 Conclusion.....	24

Chapitre 2 : MIMO-OFDM ET CSI MIMO

2.1 INTRODUCTION	27
2.2 Explication de la système OFDM	27
2.2.1 systèmes OFDM	27
2.2.2 Principe de l'OFDM	28
2.2.3. La chaîne de transmission d'un système OFDM	28
2.2.4. L'expression du signal OFDM	29
2.2.5. Intervalles de garde	29
2.2.5.1 Préfixe cyclique (CP)	29
2.2.5.2. Zéro padding (ZF)	30
2.2.6. Les Avantages et les inconvénients de l'OFDM	31
2.3 MIMO -OFDM	31

2.3.1 La combinaison MIMO-OFDM	31
2.3.1 .1 Dans le multiplexage spatial de MIMO-OFDM	32
2.3.1 .2 Un code espace-temps (STC)	32
2.3.2 le principe d'un système MIMO-OFDM	32
2.4 Taux d'erreur binaire (BER)	35
2.5 Estimation du canal	35
2.5.1 Estimation du canal LS	36
2.5.2 Estimation de canal basée sur DFT	36
2.6 MIMO-OFDM Channel Estimation	37
2.6.1 Égalisation des canaux MIMO	37
2.6.1 .1 Égalisation du forçage zéro (ZF)	37
2.6.1 .2 Égalisation de l'erreur quadratique moyenne minimale (MMSE)	38
2.6.1.3 Égalisation de probabilité maximale	38
2.7 Conclusion	39
Chapitre 3 : Simulation des résultats obtenus	
3.1. Introduction.....	42
3.2. Capacité des systèmes MIMO.....	42
3.2 .1. Etude de performance de la capacité de système MIMO	42
3.2.2. Amplitude de canal MIMO aléatoire par MATLAB	44
3.2.3. Simulations de canaux 4*4 liés spatialement par Matlab	46
3.3. Transmettre la diversité contre recevoir la diversité	47
3.4. Codage de bloc spatio-temporel avec estimation de canal	48
3.5. Conclusion	52
Conclusion Générale	
Références	55

Liste des figures

Chapitre 1 :

Figure 1.1	Schémas représentatifs du SISO, MISO, SIMO et MIMO	07
Figure 1.2	Modèle de canal MIMO	08
Figure 1.3	Principe de système MIMO	09
Figure 1.4	Canal SISO	09
Figure 1.5	Canal SIMO	10
Figure 1.6	Canal MISO	11
Figure 1.7	Canal MIMO	11
Figure 1.8	Principe de multiplexage spatial.	13
Figure 1.9	Transmission en boucle fermée.	15
Figure 1.10	Modèle d'un canal Massive MIMO	18
Figure 1.11	Système Massive MIMO en transmission multi-utilisateurs	19

Chapitre 2 :

Figure 2.1	Chaîne de radiocommunications entre une source (émetteur) et un destinataire (récepteur)	29
Figure 2.2	La protection contre les interférences entre symboles OFDM assurée par le CP	30
Figure 2.3	Symboles OFDM avec ZP.	30
Figure 2.4	Structure d'un système MIMO-OFDM	33
Figure 2.5	a. Block pilot. b Comb pilot	35
Figure 2.6	2 * 2 canaux MIMO	37

Chapitre 3

Figure 3.1	Comparaison entre les capacités des canaux SISO et MIMO	43
Figure 3.2	Capacité de canal MIMO aléatoire sans CSI avec des matrices corrélées uniformes et non uniformes	45
Figure 3.3	Comparaison de la capacité de (4 *4) canaux corrélés spatialement avec des CSI connus et inconnus au niveau de l'émetteur.	46
Figure 3.4	Transmettre la diversité contre recevoir la diversité	48
Figure 3.5	Système Alamouti 2*2	49

Liste des tableaux

Tableau. 3.1	Capacités MIMO en fonction du SNR.....	44
Tableau. 3.2	Capacités MIMO Avec des matrices de corrélation (uniformes/ non uniformes) fonction du SNR.	45
Tableau. 3.3	Comparaison entre Avec CSI connu à l'émetteur et Avec CSI inconnu l'émetteur.....	46
Tableau. 3.4	Paramètres de simulation :(Transmettre la diversité contre recevoir la diversité)	47
Tableau.3.5	Paramètres de simulation (système Alamouti 2×2).....	49

Listes des acronymes et abréviations :

5G	5th Generation
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BS	Base Station
BER	Bit Error Rate
CP	Cyclic Prefix
CSI	Channel State Information
CNA	Convertisseur Numérique Analogique
DL	Down Link
DFT	Discrete Fourier Transform
EE	Energy Efficiency
EQMM	Erreur Quadratique Moyenne Minimale
FFT	Fast Fourier Transforme
ICI	Inter carrier interférence
ISI	Inter-symbole interférence
IES	Interférences Entre Symboles
IFFT	Inverse Fast Fourier Transforme
IEEE	Institute of Electrical and Electronics
LTE	Long Term Evolution
LS	Loosely Synchronous
MB-OFDM	Multi Bande- OFDM
MMSE	Minimum Mean Square Error
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MISO	Multi Input Single Output
M-MIMO	Massive MIMO
MU-MIMO	Multi-User MIMO
MV	Maximum de Vraisemblance
NO-STBS	Non-Orthogonal Space-Time Block Codes
OL-MIMO	Open loop Multi Input Multi Output
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing

O-STBC	Orthogonal Space-Time Block Codes
PHY	Couche Physique
Q-STBC	Quasi-orthogonal Space-Time Block Codes
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RSB	Rapport Signal sur Bruit
RF	Radio Frequency
SDMA	Spatial Division Multiple Access
SIMO	Single Input Multi Output
SISO	Single Input Single Output
SNR	Signal-to-Noise Ratio
STC	Space Time Code
STTC	Space-Time Trellis Codes
STBC	Space-Time Block Codes
SB	Station de Base
SE	Spectral Efficiency
UE	User Equipment
UWB	Ultra-Wide Band
WALAN	Wireless Local Area Networks
WIFI	Wireless Fidelity
WIMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
ZF	Zero forcing
ZP	Zero Padding

Symbols:

TX	Transmitter
RX	Receiver
NT	Nombre d'antennes à l'émission
NR	Nombre d'antennes à la réception
H	Channel matrix
j	the receive antenna index
i	The transmit antenna index
y	représente les symboles reçus
x	le vecteur de symboles émis
n	noise
h _{ij}	les coefficients du canal
C	Consummation
Eh[]	The mathematical expectation
D	débit du canal
CP	(circuit power) puissance du circuit
BP	Bande passante du canal
F	FFT matrix
(.) ^H	Hermitien
(.) [*]	Complexe conjugué
I _N	La matrice identité de taille N×N
h	La réponse impulsionnelle d'un canal
F/F $\mathcal{H}$	La matrice de transformée de Fourier rapide FFT / IFFT
T _S	Durée symboles
T _g	Durée CP
T _m	L'étalement temporel
I ^(m.v)	Trajet entre la m-ième antenne de transmission et la v-ième antenne de réception
r	The vecteurs observation
h̃	La réponse fréquentielle du cana

Introduction générale

Les techniques de transmissions numériques sans fil connaissent depuis quelques années une grande révolution. Cette révolution vient d'une part de la demande croissante en matière de télécommunication et en matière d'échange de données.

La révolution en transmission numérique sans fil se manifeste dans l'émergence de plusieurs nouvelles technologies permettant d'augmenter considérablement les débits de transmission et d'améliorer la qualité de transmission. Parmi ces technologies, on a choisi pour notre étude la technologie MIMO (Multiple Input Multiple Output) et l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiple Xing).

La technologie MIMO présente une solution prometteuse pour augmenter l'efficacité spectrale et en transmettant les données à travers un réseau multi-antennes en émission et en réception. En effet, elle offre un débit important et une bonne qualité de transmission grâce à la diversité spatiale. Cependant, une source importante de dégradation des performances dans les systèmes MIMO est la sélectivité fréquentielle du canal. Les techniques basées sur L'OFDM sont des solutions prometteuses pour combattre cette sélectivité. En effet, la modulation OFDM transforme un canal sélectif en fréquence en plusieurs sous-canaux non sélectifs en fréquences.

L'objectif de ce projet de fin d'études est à présenter, expliquer les deux techniques et d'étudier la technique MIMO associée à la technique OFDM afin d'associer les avantages de ces deux techniques dans un seul système.

Ce travail comporte trois chapitres organisés de la manière suivante :

Le premier chapitre présente l'étude générale de la technologie MIMO et la technologie MIMO massif.

Nous consacrons le deuxième chapitre à l'étude de l'OFDM C'est une technique de transmission très performante pour les réseaux sans fil à hauts débits numériques, qui s'adapte parfaitement aux communications mobiles, et semble incontournable pour les futurs standards de troisièmes et quatrièmes générations. Ensuite on va expliquer la connectivité entre la technique MIMO et la technique OFDM.

Le troisième chapitre propose une analyse graphique sur certains des problèmes cruciaux de simulation par Matlab en fonction de la conception du système proposé. Puis les paramètres utilisés pour les simulations sont donnés. Nous allons présenter et interpréter les résultats obtenus.

Chapitre 1

1.1 INTRODUCTION

MIMO (Multiple Inputs and Multiple Outputs) est une technologie sans fil qui utilise plusieurs émetteurs et plusieurs récepteurs pour transmettre simultanément de grandes quantités de données. Dans ce chapitre, nous en apprendrons plus sur le système MIMO, ses types, la capacité de chaque type, ses avantages, ses évolutions et ses domaines d'utilisation.

1.2 Développement et l'histoire du MIMO

La technologie MIMO a été développée pendant de nombreuses années. Non seulement les concepts de base du MIMO étaient couverts, mais de nouvelles technologies étaient nécessaires pour permettre la mise en œuvre complète du MIMO. De nouveaux niveaux de traitement étaient nécessaires pour permettre certains des avantages du multiplexage spatial ainsi que pour tirer parti de certains des gains de diversité spatiale.

Jusque à les années 1990, la diversité spatiale était souvent limitée aux systèmes qui commutaient entre deux antennes ou des signaux combinés pour fournir le meilleur signal. Diverses formes de commutation de paquets ont également été mises en œuvre, mais étant donné les niveaux de traitement impliqués et les degrés de traitement disponibles, les systèmes en général ont été relativement limités.

Les premiers travaux sur les systèmes MIMO se sont concentrés sur la diversité spatiale de base - ici, le système MIMO a été utilisé pour réduire la dégradation causée par la propagation par trajets multiples. Cependant, ce n'était que la première étape car le système a alors commencé à tirer parti de la propagation par trajets multiples à son avantage, en convertissant des trajets de signal supplémentaires en ce qui pourrait effectivement être considéré comme des canaux supplémentaires pour une transmission de données supplémentaire [01].

Un brevet est déposé pour les communications sans-fil utilisant des antennes multiples en 1984 par M. Jack Winters du Bell Laboratoires. M. Jack Salz publia un article sur le MIMO basé sur les travaux de M. Winters en 1985. Par la suite, de 86 à 95, plusieurs auteurs ont fait publications dans le domaine. En 1996, Greg Rayleigh et Gérard J. Foschini ont inventé des nouvelles approches accroissant l'efficacité du MIMO. Aussi, il a été démontré que la capacité du canal MIMO augmente avec le nombre d'antennes de façon proportionnelle [02].

1.3 Notion de diversité :

Pour éviter l'effet d'évanouissement par trajets multiples et améliorer la qualité de la transmission sans fil, sans augmenter la capacité de transmission ni sacrifier la bande passante, les technologies de diversité sont largement utilisées. Il est intéressant d'envoyer le même signal sur des canaux indépendants pour assurer une meilleure récupération du signal émis lors de la réception. Plus le nombre de canaux indépendants est élevé, plus la probabilité d'évanouissement profond est faible pour tous les canaux indépendants, cette caractéristique correspond à la notion de diversité [03].

C'est la transmission de plusieurs copies identiques d'informations sur des canaux séparés afin de pouvoir lutter contre le fading. L'ordre de diversité D est défini comme le nombre de répliques indépendantes disponibles pour le récepteur. La probabilité d'erreur à un rapport signal sur bruit élevé diminue de façon exponentielle avec D . Un certain nombre de techniques de diversité sont utilisées pour atteindre les performances requises, et ces techniques sont :

1.3.1 Diversité temporelle :

Le plus simple à mettre en œuvre et on l'obtient en envoyant des messages identiques sur des périodes de temps différentes. Il permet d'envoyer de nombreuses répliques de la même information à des moments différents. Il peut être utilisé dans le cas de canaux à évanouissement rapide.

1.3.2 Diversité de fréquence :

Cela peut être réalisé lorsque le canal est sélectif en fréquence, l'émetteur envoie le même signal sur différentes fréquences. Cette technique permet d'obtenir du gain en diversité à condition que les différentes fréquences utilisées soient au moins séparées de la bande de canal cohérente tout en tenant compte de la bande de fréquence disponible. Cette diversité est à la base des technologies à spectre étendu ou multi porteuses.

1.3.3 Diversité spatiale :

La diversité spatiale utilise des antennes suffisamment séparées pour créer des canaux sans fil indépendants. La diversité spatiale, également connue sous le nom de diversité d'antennes, est la technologie de diversité la plus ancienne et la plus simple, et la diversité spatiale peut être obtenue en envoyant le même signal à de nombreux éléments d'antenne afin que plusieurs copies du signal transmis soient reçues sur différentes antennes. Que les

Chapitre 1 Technologie MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)

amplitudes de fondus correspondant à chaque antenne quasi indépendante, les antennes doivent être espacées d'au moins une demi-longueur d'onde.

La diversité spatiale peut être classée comme diversité de transmission et de réception, Cela dépend de la longueur d'onde et varie entre les antennes d'émission et de réception. Contrairement aux techniques de diversité temporelle et fréquentielle, la diversité spatiale n'entraîne pas de perte d'efficacité spectrale. Cette fonctionnalité est très intéressante dans les systèmes de communication sans fil à haut débit du futur. Il existe plusieurs technologies pour exploiter la diversité qu'offre le canal. Des techniques de chiffrement peuvent être utilisées, pour exploiter cette diversité d'émission et de réception. Le chiffrement peut être réalisé à plusieurs niveaux, [04] il est possible de distinguer deux niveaux principaux :

Le codage de canal numérique vise à convertir une séquence d'informations utiles en une séquence distincte appelée mot de code, et il peut être binaire ou non binaire. L'importance du codage de l'information numérique est de récupérer avec succès l'information à la réception, avec le moins d'impact possible du bruit du canal de transmission.

Le codage espace-temps est associé aux systèmes MIMO. Il consiste à exploiter la diversité spatiale et temporelle en introduisant dans le domaine spatial et temporel de la redondance ou de la corrélation entre les symboles transmis. L'intérêt des systèmes MIMO est justement qu'ils apportent une dimension supplémentaire (spatiale) au système de transmission.

1.4 Explication générale de la 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

Chapitre 1 Technologie MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)

générale est de tirer profit de la dimension spatiale du canal et d'exploiter les trajets multiples plutôt que de les supprimer. [05]

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) [06].

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 y a différents types de transmission MIMO, MISO, SIMO et SISO (Figure 1.1) [07].

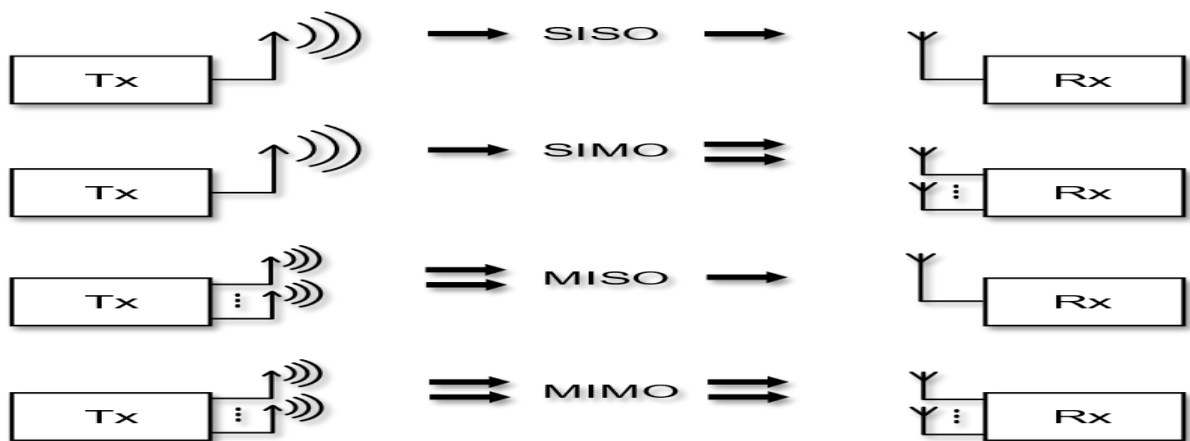


Fig.1.1 : Schémas représentatifs du SISO, MISO, SIMO et MIMO

La (figure 1.2) 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

Chapitre 1 Technologie MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)

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 :

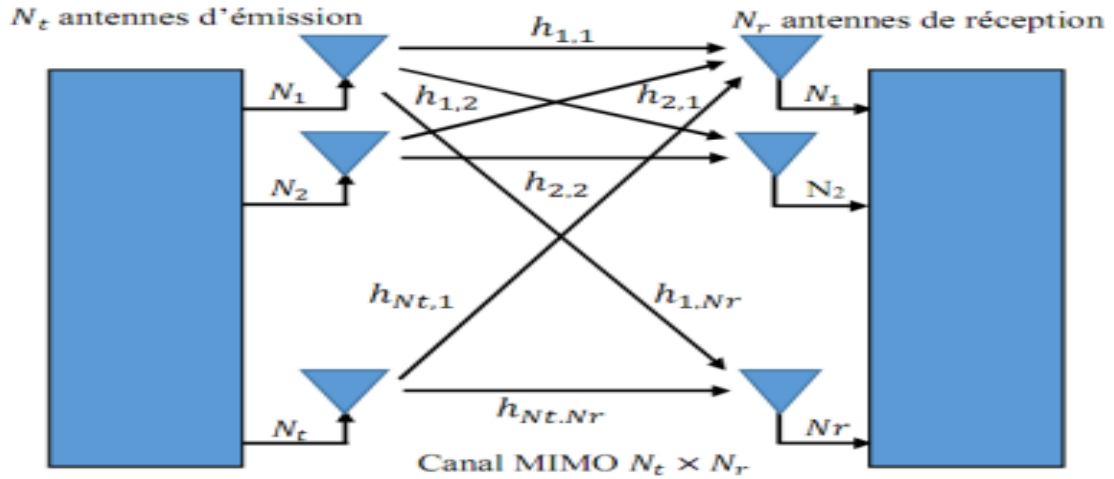


Fig. 1.2 : Modèle de canal MIMO

$$y = Hx + n \quad (1.1)$$

y : représente les symboles reçus

H : matrice de canal

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & \dots & h_{1Nr} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & \dots & h_{2Nr} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & \dots & h_{3Nr} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ h_{Nt1} & h_{Nt2} & h_{Nt3} & \dots & h_{NtNr} \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

x : le vecteur de symboles émis, $x = \{x_1; x_2; \dots, x_N\}$

n : noise $n = \{n_1; n_2; \dots, n_N\}$

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

1.5 Le 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

Chapitre 1 Technologie MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)

l'environnement, ce qui diminue la qualité de transmission et donc le débit ainsi que la portée [08]. La figure 1.3 montre : Principe de système MIMO

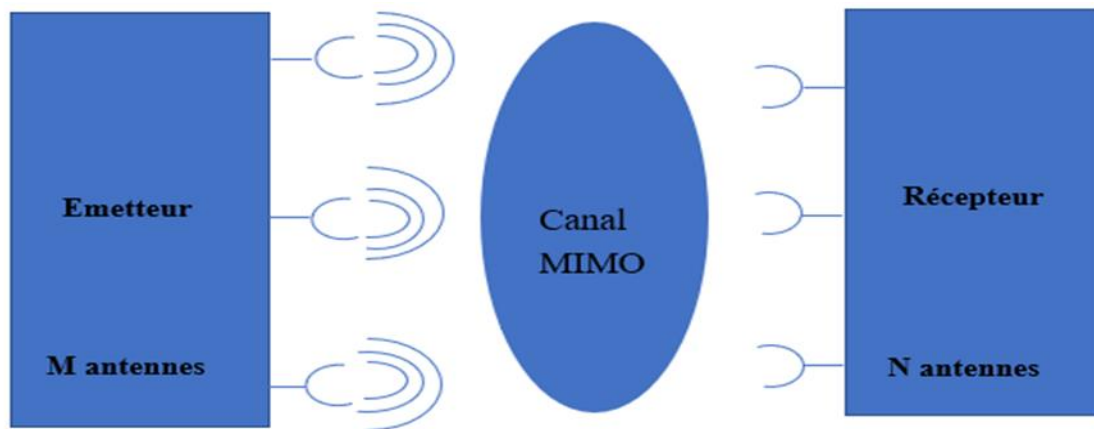


Fig. 1.3 : Principe de système MIMO

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.

1.6 Les types des canaux MIMO :

1.6.1- SYSTEME MIMO-SISO (Single Input Single Output) :

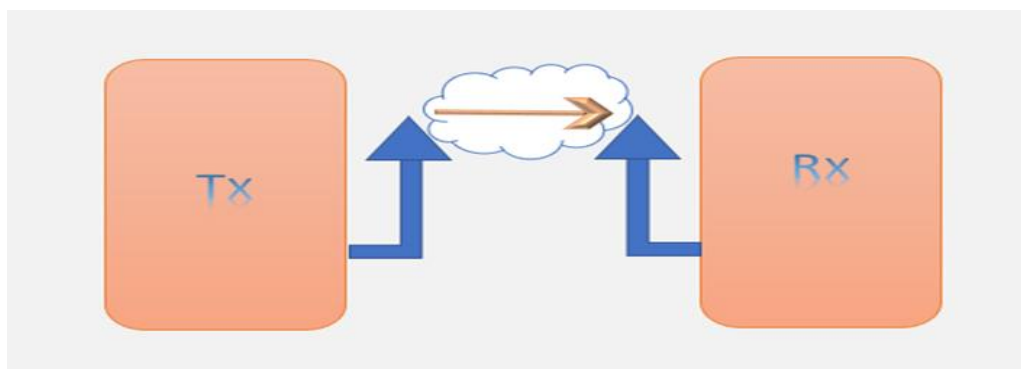


Fig. 1.4 : canal SISO

Un Système SISO (Single Input Single Output) : est un système possédant une seule entrée et une seule sortie comme le montre la (figure1. 4). Ce sont les systèmes les plus simples La forme la plus simple de liaison radio. Il s'agit en fait d'un canal radio standard - cet émetteur fonctionne avec une antenne, tout comme le récepteur. Il n'y a pas de diversité et aucun traitement supplémentaire n'est requis.

➤ La capacité de système SISO :

Lorsque le récepteur connaît instantanément le canal à chaque fois, le système est équivalent à un canal AWGN conditionnel à h

$$C_{SISO} = E_h[\log_2(1 + \text{SNR}|h|^2)] \quad \text{bit/s/Hz} \quad (1.3)$$

$E_h [.]$: est l'opérateur d'espérance par rapport au coefficient de canal h

SNR : SNR est le rapport signal sur bruit moyen pour chaque antenne de réception. Ceci est souvent appelé (capacité ergodique) Pour un h donné, il n'y a qu'une seule façon d'augmenter la capacité du canal SISO et c'est en augmentant le SNR.

1.6 .2-SYSTEME MIMO-SIMO (Single Input Multiple Output):

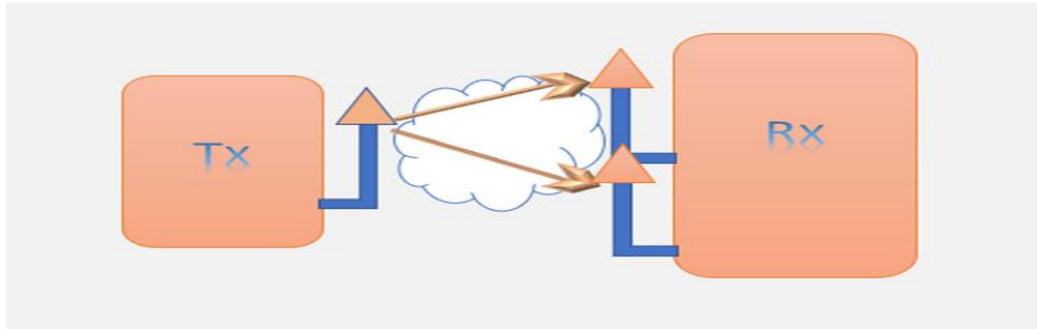


Fig.1.5 : Canal SIMO

La version SIMO de MIMO se produit lorsque l'émetteur a une antenne et le récepteur a plusieurs antennes. Comme le montre la (figure 1.5) Ceci est également connu sous le nom de diversité de réception. Il est souvent utilisé pour permettre à un système de réception de recevoir des signaux d'un certain nombre de sources indépendantes afin de lutter contre les effets de l'évanouissement. 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.

➤ La capacité de système SIMO :

$$C_{SIMO} = E_h[\log_2(1 + \text{SNR} \sum_{i=1}^{N_r} |h_i|^2)] \quad \text{bit/s/Hz} \quad (1.4)$$

Où C est la capacité normalisée avec la bande passante du canal. À la Relation on remarque que l'augmentation du nombre d'antennes de réception entraîne une augmentation du gain du réseau par la sommation, qui à son tour est liée à la capacité de manière logarithmique.

1.6.3-SYSTEME MIMO-MISO (Multiple Input Single Output):

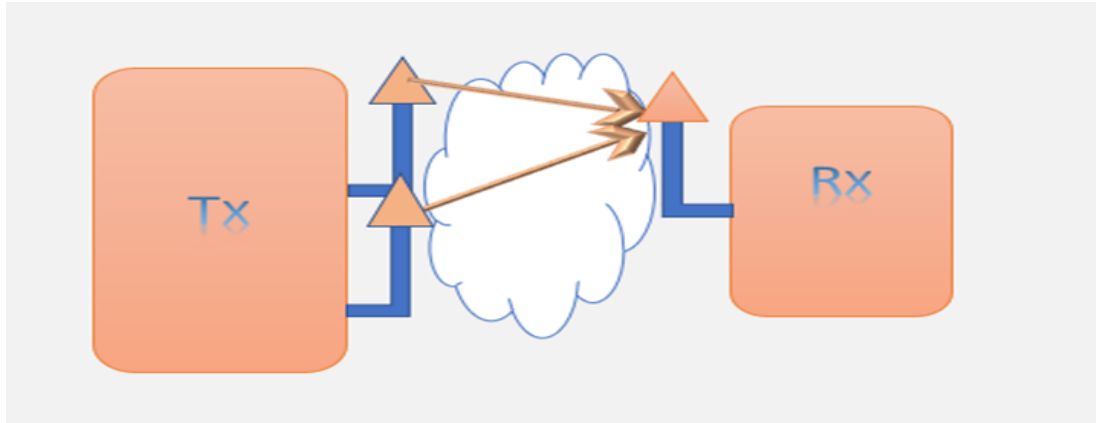


Fig.1.6 : Canal MISO

Multiple Input Single Output (MISO) est également appelé diversité de transmission comme la montre là (figure1.6). Dans ce cas, les mêmes données sont transmises de manière répétée depuis les deux antennes d'émission. Le récepteur est alors en mesure de recevoir le signal optimal qu'il peut utiliser pour recevoir les données requises.

➤ **La capacité de système MISO :**

$$C_{MISO} = E_h \left[\log_2 \left(1 + \frac{SNR}{N_t} \sum_{i=1}^{N_t} |h_i|^2 \right) \right] \text{ bit/s/Hz} \quad (1.5)$$

1.6.4 -SYSTEME MIMO Multiple Inputs and Multiple Outputs:

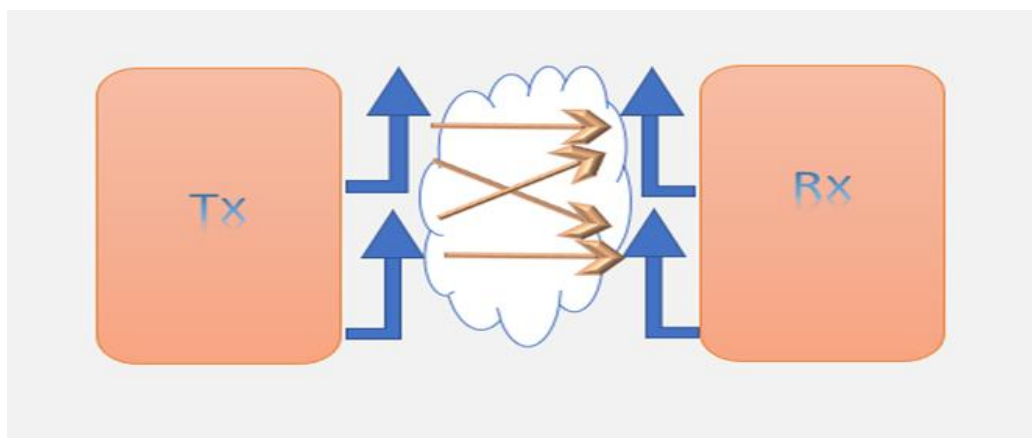


Fig. 1.7 : Canal MIMO

MIMO est une technologie d'antenne radio efficace qui utilise plusieurs antennes dans l'émetteur et le récepteur pour permettre à une variété de chemins de signal de transporter des

Chapitre 1 Technologie MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)

données comme la montre là (figure 1.7). Et choisit des chemins séparés pour chaque antenne afin de permettre l'utilisation de plusieurs chemins de signal.

De plus, entre l'émetteur et le récepteur il y a un signal qui peut emprunter plusieurs chemins. En déplaçant les antennes même sur une petite distance, les trajets utilisés changeront.

La variété des chemins disponibles est due au nombre d'objets apparaissant sur le côté ou même dans le chemin direct entre l'émetteur et le récepteur. Auparavant, ces trajets multiples ne servaient qu'à introduire des interférences.

Avec MIMO, ces chemins supplémentaires peuvent être utilisés pour en tirer parti. Ils peuvent être utilisés pour apporter une robustesse supplémentaire à la liaison radio en améliorant le rapport signal sur bruit, ou en augmentant la capacité des données de la liaison.

➤ La capacité d'un système MIMO peut s'écrire :

Pour N_t antennes d'émission et N_r antennes de réception, la capacité de canal à évanouissement plat MIMO peut être exprimée comme suit :

$$N_r < N_t : C_{MIMO} = E_H \left[\log_2 \left(\det \left(I_{N_r} + \frac{SNR}{N_t} H H^H \right) \right) \right] \text{ dps/Hz} \quad (1.6)$$

$$N_r > N_t : C_{MIMO} = E_H \left[\log_2 \left(\det \left(I_{N_t} + \frac{SNR}{N_t} H^H H \right) \right) \right] \text{ dps/Hz} \quad (1.7)$$

1.7 Algorithmes d'émissions associés aux systèmes MIMO :

Les techniques de traitement associées aux systèmes MIMO peuvent être séparées selon l'état du canal ou CSI (Channel State Information) à l'émission (Tx CSI) et à la réception (Rx-CSI), ou uniquement à la réception [03]. Ces deux systèmes Ils sont respectivement appelés systèmes MIMO en boucle ouverte et MIMO en boucle fermée.

1.7. 1-Systèmes MIMO à boucle ouverte :

Les systèmes MIMO en boucle ouverte (OL-MIMO) définissent des systèmes qui ne considèrent CSI que du côté récepteur (Rx-CSI). Ce groupe peut être divisé en trois sous-groupes comme suit :

1.7.1.1- Multiplexage spatial :

Dans un système MIMO où les coefficients d'évanouissement entre les différentes antennes d'émission et de réception sont indépendants, la technique dite de multiplexage spatial peut être mise en œuvre.

Le multiplexage spatial est représenté en divisant Les données sont concaténées en plusieurs flux et transmises sur des canaux indépendants de l'espace. Le système transmet ensuite les flux en une seule période. Le but est d'augmenter le flux d'informations par rapport au système SISO. Les informations à transmettre sont réparties en fonction du nombre d'antennes émettrices avec codage canal. L'indication est que selon cette technologie les antennes rayonnent de manière aveugle sans aucune préférence de direction particulière. Pour séparer différents systèmes dans le cadre du SISO, on évite d'utiliser le même spectre de fréquences afin qu'il n'y ait pas d'interférences dans le même canal. Grâce à la corrélation décorative des signaux amenés en réception par le canal multi trajets, les différents signaux reçus peuvent être séparés. Des sous-canaux sont alors créés qui fonctionnent en parallèle. Le multiplexage spatial a été présenté comme un BLAST espace-temps en couches des Bell Labs. La version la plus courante est V-BLAST (Vertical BLAST) seul le multiplexage spatial tire parti de la diversité de réception. Afin de profiter de la diversité dans la transmission, la redondance peut être incluse dans la transmission, on parle alors de codage spatio-temporel. L'ajout de redondance n'augmente pas directement le débit, mais améliore plutôt la transmission en exploitant la diversité [03]. Dans ce cas, le système peut utiliser des modulations de haut niveau, qui permettent une efficacité spectrale accrue pouvant être atteinte à un rapport signal sur bruit donné. La figure 1.8 montre Principe de multiplexage spatial.

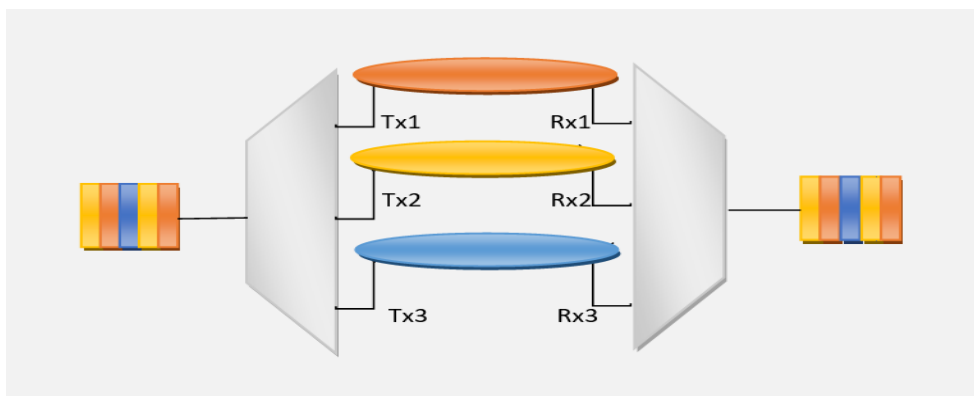


Fig.1.8 : Principe de multiplexage spatial.

1.7.1-2- Codage espace-temps (STC) :

Le codage espace-temps est utilisé dans les communications sans fil pour transmettre un seul flux de données à la fois via plusieurs antennes de transmission à des moments différents. Le but de ce chiffrement est d'exploiter différentes versions des données afin d'améliorer la fiabilité de leur transmission [04]. Il est divisé en deux catégories :

A- Les codes temps-espace en treillis (STTC) :

Les chiffrements STTC sont utilisés simultanément pour le codage de canal et le gain de diversité. Ils combinent codage et modulation de canal sur les antennes d'émission, et peuvent être considérés comme une extension des codes en treillis classiques pour le cas d'antennes multiples à l'émission et à la réception. Le STTC établit des relations entre les signaux à la fois dans l'espace (antennes émettrices multiples) et dans le temps (symboles en cascade). Le codeur est constitué d'un polynôme générateur qui définit les codes émis simultanément. Les codes émis par les STTCs s'enchaînent naturellement grâce à la séparation physique des antennes. La réception dépend de l'estimation des coefficients d'évanouissement du canal et de l'algorithme de décodage, et la complexité des décodeurs STTC ne cesse d'augmenter.

B- Le code temps-espace en blocs (STBC) :

Est une stratégie de transmission d'un flux de données dans un système MIMO exploitant la diversité spatiale [03]. Ce type de codage se base principalement sur trois proches. Les codes temps-espace en blocs orthogonaux (Orthogonal Space-Time Block Codes (O-STBC)), les codes temps-espace en blocs non-orthogonaux (Non Orthogonal Space-Time Block Codes (NO-STBC)) et, les codes temps-espace en blocs quasi-orthogonaux (Quasi-orthogonal Space-Time Block Codes (Q-STBC)) qui appartiennent à la classe des NO-STBC.

1.7 .2-Systèmes MIMO à boucle fermé :

Dans le cas de la transmission à boucle fermée, le terminal utilisateur (UE) mesure le canal descendant à l'aide du signal de référence envoyé par la station de base (SB), chaque (UE) renvoi à la (SB) sa propre information sur l'état du canal (CSI), la (BS) collecte toutes les informations disponibles sur les canaux descendants qui seront utilisés [09]. Se basant sur cette information, la (SB) peut choisir les paramètres appropriés pour la transmission dans le sens descendant (DL). La figure 1.9 montre Transmission en boucle fermée.

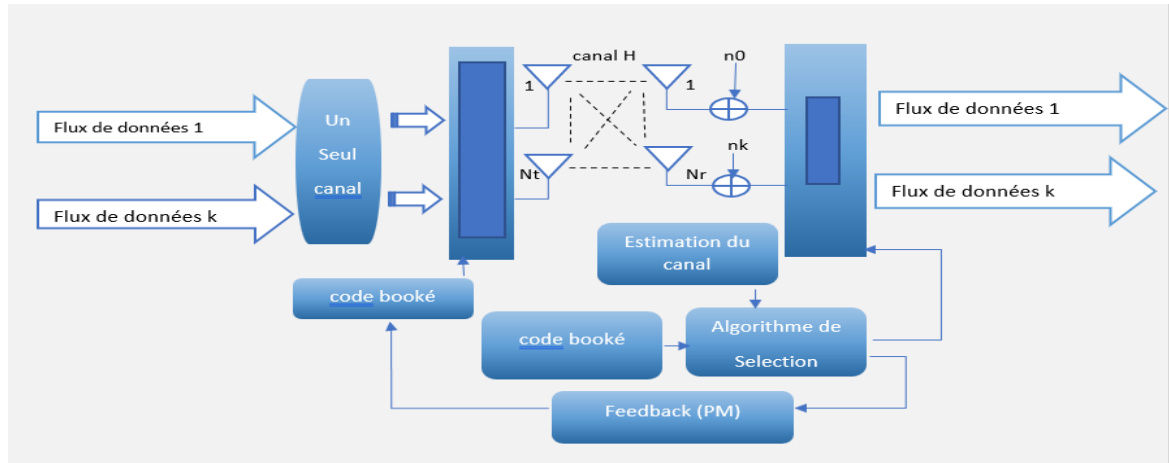


Fig.1. 9 : Transmission en boucle fermée.

1.8 Algorithme de réception associées aux systèmes MIMO :

Les moins complexes sont les récepteurs linéaires basés sur le critère d'effet zéro (ZF) ou la minimisation MMSE et MV. Dans ce qui suit, nous présenterons quelques récepteurs.

1.8.1- Technique de forçage à zéro (ZF):

C'est la plus simple des techniques qui inverse la matrice de canal en supposant que (H) est inversible [03], alors le vecteur de symboles estimé en taille $nt \times 1$ est donné par la relation.

$$\hat{X} = H^{-1}.Y \quad (1.8)$$

Le récepteur ZF sépare parfaitement les symboles (X_i) $i=1.....nt$ transmis dans le même canal. Lorsque la condition H est mal conditionnée, le récepteur ZF donne des résultats corrects pour le SNR élevé, et dans le cas d'un SNR faible, le bruit perturbe sérieusement les performances.

En pratique, si H n'est pas carré (c'est-à-dire si $nt \neq nr$), le récepteur gauche frappe le pseudo-inverse de la matrice de canal pour récupérer tous les symboles. Dans ce cas, le vecteur estimé s'écrit.

$$\hat{X} = H^+.Y = (H^*H)^{-1}H^*.Y \quad (1.9)$$

Si un codeur est employé, on peut employer la redondance temporelle et spatiale pour retrouver les données.

1.8.2 Minimisation de l'erreur quadratique moyenne (EQMM) :

Le but du récepteur est de minimiser l'erreur quadratique moyenne due au bruit et aux interférences entre symboles [03]. La solution proposée est :

$$\hat{X} = \left(H^* H + \frac{nt}{RSB} \right)^{-1} H^* . Y \quad (1.10)$$

Travail RSB sur Il améliore les performances du faible rapport signal sur bruit (SNR), le terme nt/RSB tend vers zéro à haut RSB et les récepteurs ZF et EQMM deviennent alors équivalents.

1.8.3 Récepteur à Maximum de Vraisemblance (MV) :

Équivalents Les meilleures performances en termes de taux d'erreur sont obtenues par le récepteur utilisant le maximum de vraisemblance (MV)[09]. Après avoir estimé en réception la matrice canal, le récepteur génère la constellation de tous les symboles possibles et recherche la distance minimale entre le symbole reçu et les symboles générés :

$$\hat{X} = \arg \min_x \|Y - H_x\| \quad (1.11)$$

Si les symboles sont résolubles et si les canaux parallèles NT sont indépendants alors ce récepteur est la solution. Cette méthode se complique lorsque le nombre de points de constellation est important et que le nombre d'antennes augmente. si M représente la taille de la constellation le récepteur doit calculer M^{NT} distances ce qui devient rapidement exorbitant en terme de calcul, Par exemple :

1-Modulation de constellation (QAM-256) et (NT = 2), c'est-à-dire que le récepteur parcourt 65 536 vecteurs différents.

2-Modulation de constellation (QAM - 64) et (NT = 3), c'est-à-dire que le récepteur doit parcourir 262 144 vecteurs différents.

1.9 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

Chapitre 1 Technologie MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)

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.

1.9 .1 La technologie MIMO dans WiMax :

WiMax est le nom de marque de technologie pour l'exécution de la norme IEEE 802.16. 802.16 indique interface d'air au PHY (couche physique) et à l'IMPER (couche moyenne de contrôle d'accès). Hormis indiquer l'appui de diverses largeurs de bande de canal et modulation et codage adaptatifs. Les réalisations de WiMax qui emploient la technologie de MIMO sont devenues importantes. L'utilisation de la technologie de MIMO améliore la réception et tient compte d'une meilleure extension et taux de transmission. L'exécution de MIMO donne également à WiMax une augmentation significative d'efficacité spectrale [11].

1.9 .2 La technologie MIMO dans Wifi :

La norme 802.11n est disponible depuis le 11 septembre 2009. Le débit théorique atteint les 300 Mbit/s (débit réel de 100 Mbit/s dans un rayon de 100 mètres) grâce aux technologies MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) et OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiple Xing) [11].

1.10 Avantages de la technologie MIMO :

La technique MIMO présente multiples avantages, nous citons :

1. 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.

1.11 La technologie Massive MIMO :

Massive MIMO est la nouvelle technologie d'accès sans fil en 5G. Depuis sa création il y a une dizaine d'années, il a évolué d'une idée « académique » sauvage pour devenir la technologie de base qui sera probablement utilisée dans toutes les futures technologies sans fil. Le système Massive MIMO consiste à utiliser simultanément les mêmes fréquences radioélectriques pour Transmettre des signaux différents. Cela signifie que plusieurs antennes d'émission d'une station de base peuvent émettre des signaux différents et que plusieurs antennes de réception d'un Appareil. La figure 1.10 montre Modèle d'un canal Massive MIMO M antennes et K utilisateurs0

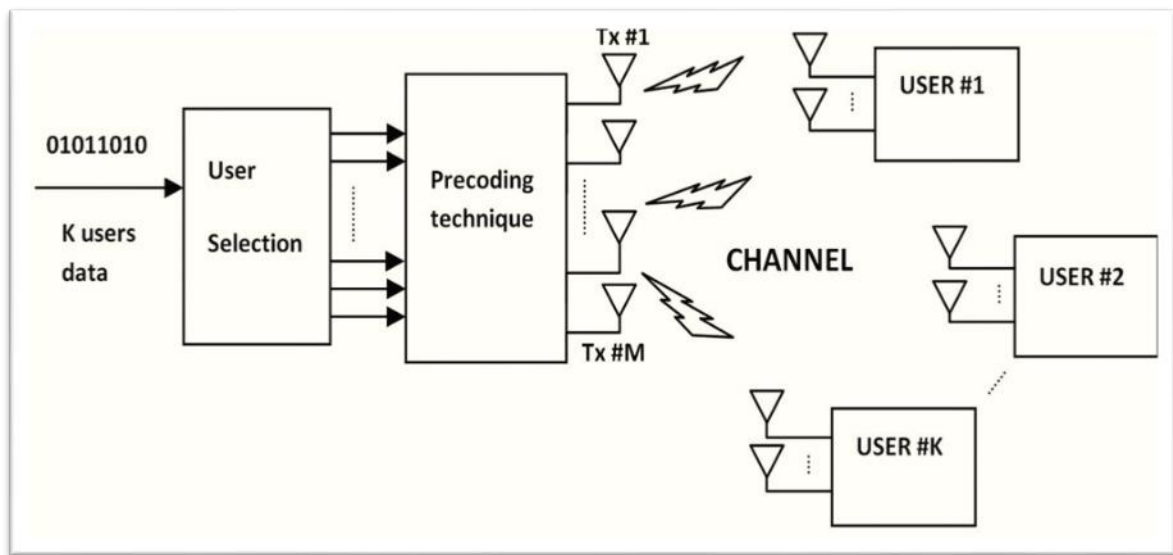


Fig.1.10 : Modèle d'un canal Massive MIMO

Le Massive MIMO propose deux innovations majeures :

1.11.1- Beamforming (Formation de faisceau) :

Est un système de signalisation du trafic pour stations de base cellulaires qui identifie la voie de transmission de données la plus efficace pour un utilisateur particulier et réduit les interférences pour les utilisateurs à proximité. Aux stations de base MMIMO, des algorithmes de traitement du signal tracent le meilleur itinéraire de transmission par voie aérienne vers chaque utilisateur. Il est ainsi possible de créer des lobes constructifs/destructifs et optimiser une transmission entre l'émetteur et la cible. Les techniques de Beamforming permettent à la fois d'étendre une couverture radio (d'une station de base ou d'un point d'accès par exemple) et de limiter les interférences entre utilisateurs et la pollution électromagnétique environnante (en ciblant le récepteur visé) [12].

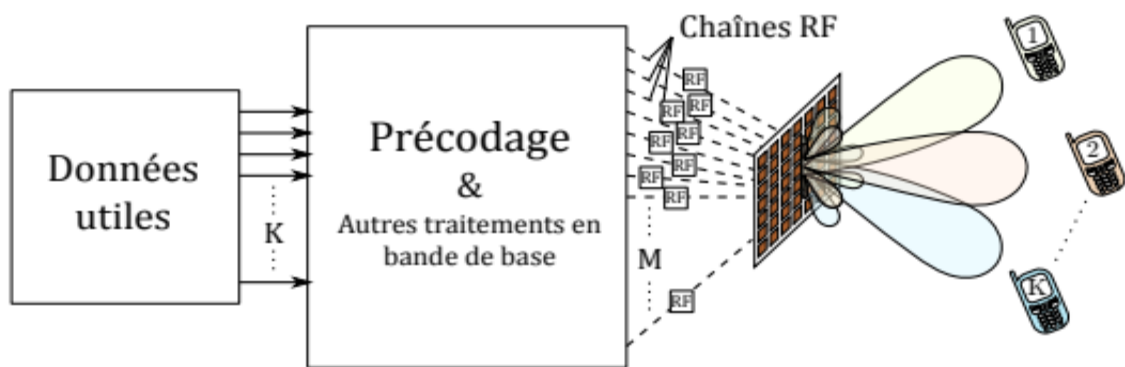


Fig. 1.11: Système Massive MIMO en transmission multi-utilisateurs

1.11.2 -Multi-User MIMO (MU-MIMO) :

Ce système augmente encore la capacité totale par station de base en permettant la communication avec plusieurs périphériques utilisant les mêmes ressources, créant ainsi un côté périphérique pratiquement unifié. L'utilisation simultanée des antennes de plusieurs périphériques permet de créer des canaux virtuels MIMO à grande échelle. La combinaison de ces deux innovations permet d'augmenter la vitesse de transmission sans fil en augmentant le nombre d'antennes de la station de base sans consommer plus de bande passante ni augmenter les valeurs de modulation [13].

1.12 Liaison montante et descendante massive MIMO (Massive MIMO up Link and down Link) :

1.12.1- Up Link Transmission :

Un canal de liaison montante est utilisé pour envoyer des données et un signal pilote du terminal utilisateur à la station de base, dans un système de liaison montante MIMO massif équipé d'antennes M dans station de base et Il communique avec les utilisateurs d'antenne individuels N ($M \ll N$) en même temps [14]. Si le signal envoyé par l'utilisateur est x , Le signal reçu à la station de base pendant la liaison montante est donné par : $Y=H.X +n$ (*up Link*).

Où (y) est le signal reçu à la station de base, H est le vecteur de canal entre le terminal utilisateur et la station de base. Le terme supplémentaire (n liaison montante) est l'addition des interférences de plusieurs transmissions et du bruit du récepteur L'interférence ajoutée est indépendante du signal utilisateur x , mais elle peut dépendre du canal H

Chapitre 1 Technologie MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)

$$n(\text{uplink}) = n(\text{uplink}) - \text{interference} + n(\text{noise}) \quad (1.12)$$

1.12.2 Down Link Transmission :

Le canal de liaison descendante est utilisé pour envoyer des données ou estimer le canal entre l'utilisateur et la station de base. Dans système MIMO massif de liaison descendante, la station de base est équipée d'antennes M , desservant un nombre N d'utilisateurs avec une antenne simultanément [14]. La station de base envoie des informations indépendantes à plusieurs utilisateurs simultanément, et le signal reçu, y_k sur l'utilisateur k est :

$$y(k) = H(k) \cdot X(k) + n(\text{down Link}) \quad (1.13)$$

Où H_k est un vecteur canal entre un utilisateur k et une station de base dont les éléments sont indépendants et identiques. x_k est le signal envoyé par la station de base à l'utilisateur k , (n pour la liaison descendante) est le bruit supplémentaire constitué du bruit du récepteur (n bruit) et de la n érence de la liaison descendante causée par la transmission simultanée à d'autres utilisateurs et est donné par :

$$n(\text{downlink}) = n(\text{downlink}) - \text{interference} + n(\text{noise}) \quad (1.14)$$

1.13 L'efficacité spectrale (SE) :

Est le débit d'information qui peut être transmis avec succès sur une bande passante donnée pendant une période de temps donnée dans un système de communication. L'unité de SE est le bit/s/Hz. Mesure l'efficacité avec laquelle une couche physique ou un protocole de canal utilise le spectre de fréquences. L'efficacité spectrale est essentiellement la capacité des canaux à transmettre des informations pour une bande passante donnée [15].

Dans les communications sans fil, le débit des informations dépend de la bande passante du support de transmission ainsi que du rapport signal sur bruit. D'après le théorème de Shannon-Hartley qui définit la capacité du canal [16], C Qui sera comme suit :

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (I.15)$$

B = fait référence à la bande passante du canal et $\frac{S}{N}$ = fait référence au rapport signal sur bruit.

Nous pouvons exprimer la formule d'efficacité spectrale comme suit :

$$SE = D/B \quad [\text{bit/s/Hz}] \quad (I.16)$$

D : débit de la source en bits/s

B : Bande passante du canal en Hz

Chapitre 1 Technologie MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)

1.14 Efficacité énergétique (EE) :

La définition la plus courante de l'efficacité énergétique d'un réseau cellulaire est "le nombre de bits qui peuvent être transférés de manière fiable à travers chaque unité de puissance"

L'efficacité énergétique peut être dérivée comme [17]

$$EE = \frac{D \frac{\text{bit}}{\text{s}} / \text{cell}}{C \text{ w} / \text{cell}} \quad (\text{I.17})$$

C= Consommation

➤ Consommation électrique du réseau : [(PC) power consumption]

Nous devons calculer l'ETP (effective transmit power) nécessaire, car il calcule l'efficacité de l'amplificateur de puissance (PA) (power amplifier). L'efficacité de l'amplificateur de puissance est essentielle pour le calcul de la consommation électrique du réseau

$$PC = ETP + CP \quad (\text{I.18})$$

CP :(circuit power) puissance du circuit

Où la puissance de transmission effective (ETP) fait référence à la quantité exacte de puissance nécessaire pour transmettre avec succès un paquet de données pour un nombre fixe de bits. La puissance du circuit (CP) fait référence à la puissance consommée et (la station de base pour les signaux de commande et l'infrastructure) pour les processeurs de connexion et (la puissance indépendante de la charge) pour les processeurs de bande de base. Il s'agit d'un montant fixe qui absorbe environ un quart de l'énergie totale consommée, la forme courante de la puissance du circuit (CP) est : $CP = P_{\text{FIX}}$

Pour desservir un plus grand nombre d'UE, nous avons besoin de plus de CP. Ce ne sont pas les seules modifications pour évaluer la force des liaisons montantes et descendantes du MASSIV MIMO avec la forme requise. On montrera qu'il faut également prendre en compte la puissance consommée par le traitement numérique du signal, les signaux de conduction, le codage, le décodage, les chaînes d'émission et de réception, et l'estimation de canal [16]. Le modèle de puissance de circuit (CP) des réseaux MASSIV MIMO est

$$CP = P_{\text{FIX}} + P_{\text{TC}} + P_{\text{CE}} + P_{\text{C/D}} + P_{\text{BH}} + P_{\text{SP}} \quad (\text{I.19})$$

Où P_{FIX} est égal à la puissance fixe requise pour la signalisation de commande et la puissance indépendante de la charge de l'infrastructure de liaison et des processeurs de bande de base d'une cellule

Chapitre 1 Technologie MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)

P_{CE} : Puissance requise pour le processus d'estimation de canal

P_{TC} : est l'énergie consommée par les chaînes d'émetteurs-récepteurs dans la cellule. Nous mettons, par exemple, la cellule n , cette partie peut être mesurée comme suit :

$$P_{TC,n} = M_n P_{BS,n} + P_{LO,n} + K_n P_{UE,n} \quad (I.20)$$

M_n : fait référence au numéro de l'antenne dans BS n $P_{BS,n}$: est la puissance nécessaire pour calculer les composants du circuit dans la cellule n

$P_{LO,n}$: puissance de l'oscillateur local K_n : Indique le numéro d'antenne dans UE, n $P_{UE,n}$: tient compte de la puissance requise pour tous les composants du circuit

$P_{C/D}$: Capacité de codage de canal requise (Par exemple pour DL, BS n envoie à l'équipement utilisateur une série de jetons d'information en appliquant un codage et une modulation de canal. Ensuite, chaque UE utilise un algorithme de processus à complexité fixe pour décoder sa séquence de données. Pour le codage et le décodage UL, le contraire est mis en œuvre). La forme éligible de PC/D dans la cellule n est :

$$P_{C/D}^n = (P_{COD} + P_{DEC}) TR_n \quad (I.21)$$

Où P_{COD} et P_{DEC} sont respectivement la puissance de codage et de décodage (W/bit/s) TR_n Est le débit (bit/s) de la cellule n

P_{BH} : Indique la puissance nécessaire pour calculer les signaux de conduction dépendant de la charge

Et être comme suit :

$$P_{BH,n} = P_{BT} * TR_n \quad (I.22)$$

P_{BT} : est la puissance du trafic de liaison (W/bit/s) et pour plus de simplicité

P_{SP} : La puissance nécessaire pour traiter le signal (recevoir l'agrégation et envoyer le pré codage) à la station de base. Il est calculé comme suit :

$$P_{SPn} = P_{SP-R}^n + P_{SP-C,n}^{UL} + P_{SP-C,n}^{DL} \quad (I.23)$$

P_{SP-R}^n : Puissance totale consommée pour une agrégation donnée et un vecteur pré-encodé par l'envoi DL et la réception UL [12].

Chapitre 1 Technologie MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)

$P_{SP-C,n}^{UL}$ Et $P_{SP-C,n}^{DL}$: sont la puissance nécessaire dans la cellule n pour calculer respectivement les vecteurs de combinaison et de pré codage.

BS : Station de base

DL : Liaison descendante (Down Link)

UL : Liaison montante (Up Link)

1.15 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les systèmes MIMO et le principe de la technologie MIMO et nous concentrant sur ses différents types d'antennes : MIMO, SISO, MISO et SIMO et donné les capacités correspondantes. Cette technologie MIMO est basée sur l'utilisation combinée de réseaux d'antennes à l'émission et à la réception. Nous avons également fourni un aperçu de la technologie massive MIMO et ses innovations et la présentation d'Efficacité énergétique et Efficacité spectrale.

Cette technologie est devenue essentielle pour les systèmes de communication WLAN, LTE et 5G. Elle a la capacité d'augmenter le débit du canal, l'efficacité spectrale et la durabilité contre la décoloration et les interférences du signal. Contrairement à SISO, l'utilisation de la technologie MIMO peut augmenter considérablement la capacité de liaison des systèmes WLAN, LTE et 5G.

Chapitre 2

2.1 INTRODUCTION

Les techniques d'antennes multiples (MIMO-OFDM) ont été utilisées pour les futurs systèmes mobiles et la raison est due à leur puissance et à leur efficacité dans l'utilisation du spectre.

Dans les systèmes sans fil à large bande, les canaux MIMO sont fortement affectés par l'évanouissement sélectif en fréquence ou l'évanouissement potentiel par trajets multiples. Cet effet de fading complique la conception des codes ST du fait de l'ISI (Inter-symbole Interaction). Pour surmonter ce problème, MIMO peut être combiné avec le système OFDM appelé MIMO-OFDM. La combinaison de MIMO et OFDM a le potentiel de répondre à cette exigence stricte car MIMO peut améliorer les gains d'amplitude et de diversité et OFDM peut atténuer les effets néfastes dus à l'évanouissement par trajets multiples

Dans ce chapitre, nous allons découvrir la technologie OFDM, qui est classée comme une technologie puissante pour les systèmes de communication à haut débit. Après avoir décrit le système MIMO-OFDM, nous présenterons le principe de fonctionnement et les composants de la chaîne OFDM, déterminerons le taux d'erreur binaire (BER), et enfin nous verrons l'état du canal et l'équation des canaux MIMO.

2.2 Explication du système OFDM

2.2.1 Systèmes OFDM :

OFDM est défini comme une méthode de codage de signaux numériques par division en fréquences orthogonales sur plusieurs sous-porteuses. OFDM envoie des données en utilisant un grand nombre de porteuses à bande étroite. La fréquence porteuse et l'espace temporel sont choisis de manière à ce que les porteuses soient orthogonales pour éviter les interférences. Pour implémenter OFDM, (FFT) est utilisé, qui est le principal. La technologie OFDM permet une égalisation de faible complexité afin de lutter contre les canaux sélectifs en fréquence [18].

Lorsqu'il existe plusieurs trajets, des canaux sélectifs en fréquence apparaissent et présentent un grand danger en raison du taux de transmission élevé. C'est la principale raison pour laquelle cette technologie a été largement adoptée dans la plupart des applications à grande vitesse.

2.2.2 Principe de l'OFDM

Le problème des trajets multiples est l'un des principaux problèmes de transmission à grande vitesse. OFDM est une méthode spéciale de multiplexage de fréquence qui présente de nombreux avantages [19]. Le principe OFDM est expliqué comme suit :

"Division multiple", double division... ; L'idée de base de l'OFDM réside dans le fait qu'un train binaire à grande vitesse est divisé en plusieurs sous-canaux, qui sont modulés à basse vitesse "fréquence orthogonale" ... pour les fréquences orthogonales ; Chacun de ces sous-canaux est modulé à une fréquence différente, et l'espacement entre chaque fréquence reste constant. Ces fréquences forment une base orthogonale : le spectre du signal OFDM présente donc une occupation optimale de la bande allouée en autorisant le recouvrement des sous-canaux.

2.2.3. La chaîne de transmission d'un système OFDM

La fiabilité de l'envoi d'un message nécessite une série de traitements à l'émission pour préparer le signal et son adaptation au canal de propagation, ainsi qu'une série de traitements inverses à la réception pour retrouver le message d'origine et éliminer divers désagréments causés par la transmission et amplification. La fig.2.1 montre une chaîne de communication sans fil entre la source (émetteur) et la destination (récepteur).

Avec de grandes opérations en bande de base, les opérations de codage, de modulation et d'égalisation ainsi que les opérations de conversion et d'amplification permettent de passer à une fréquence plus élevée. Le choix des technologies de transmission dans les systèmes numériques est principalement déterminé par le canal de propagation correspondant et certaines restrictions sur les coûts de mise en œuvre [20].

Le bloc de modulation de la figure 10 contient la technologie OFDM. Les informations qui seront traitées par cette technologie sont les codes de constellation QPSK ou QAM.

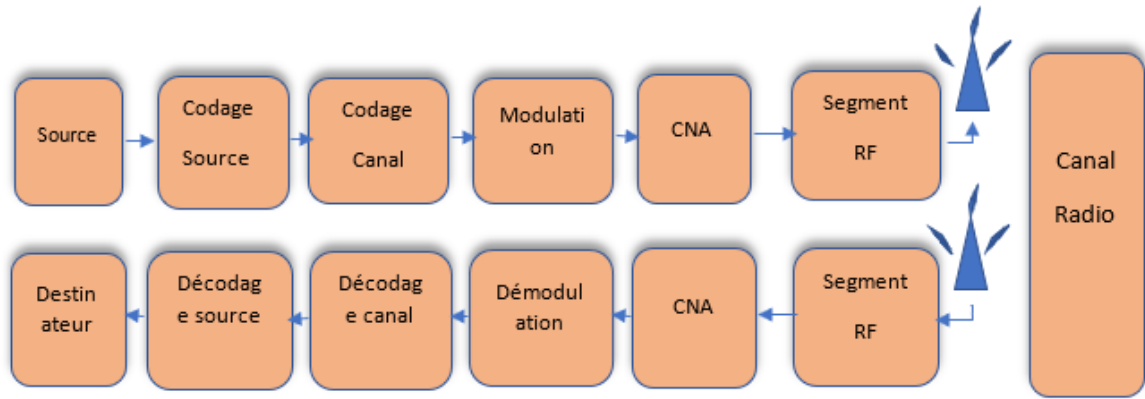


Fig.2.1 : chaîne de radiocommunications entre une source (émetteur) et un destinataire (récepteur)

2.2.4. L'expression du signal OFDM :

L'expression du signal OFDM transmis est donnée par :

$$S(t)_{OFDM} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{m=0}^{2M-1} a_{n,m} e^{j\theta_{n,m}} g(t - n\tau_0) e^{j2\pi m v_0 t} \quad (2.1)$$

$A_{n,m}$ représente l'information envoyée sur la même porteuse du même symbole, $2M (= N)$ est le nombre des sous-porteuses [21], v_0 l'espace inter-porteuse, τ_0 la durée d'un symbole OFDM, Le terme $g(t - n\tau_0)$ représente la fonction prototype de mise en forme temporelle du signal décalée dans le temps tous les $n\tau_0$.

2.2.5. Intervalles de garde :

Dans le canal, il existe plusieurs trajets caractérisés par un retard et une atténuation. Les derniers composants de l'OFDM interfèrent avec les premiers composants de l'OFDM en raison de la mémoire de canal, ce qui conduit au phénomène IES qui dégrade la qualité du signal. La solution utilisée dans les systèmes OFDM actuels afin d'éliminer le phénomène IES est d'ajouter un séparateur de garde [21].

Il existe principalement deux types d'intervalles de garde utilisés :

2.2.5.1 Préfixe cyclique (CP) :

Le CP est une copie de la dernière partie du symbole OFDM comme indique la figure 11 il est nécessaire de rajouter le CP de durée T_g après l'opération de IFFT (Inverse Fast Fourier Transform). Pour éliminer complètement les interférences entre symboles, la taille du CP doit être plus grande que le délai maximum (τ_{max}) de propagation dans un canal à trajets multiples soit $T_g \geq \tau_{max}$.

Après son insertion, l'espacement entre les sous-porteuses est toujours ($\Delta f = 1/T_s$), alors que la durée des symboles OFDM est, $T_{tot} = T_s + T_g$, ce qui entraîne la perte d'orthogonalité entre les sous-porteuses. Au niveau du récepteur, la condition d'orthogonalité entre les sous-porteuses sera restaurée si durant la fenêtre rectangulaire de durée (T_s), chacune des composantes sinusoïdales du symbole OFDM comprend un nombre entier de périodes même en présence d'un canal dispersif en temps. La suppression de l'intervalle de garde permet de restituer l'orthogonalité entre les sous-porteuses. La Fig.2.2 Explique de la protection contre les interférences entre symboles OFDM assurée par le CP la garde est la recopie des échantillons de fin de symbole OFDM, cet intervalle peut être exploité pour la synchronisation temporelle du signal OFDM.

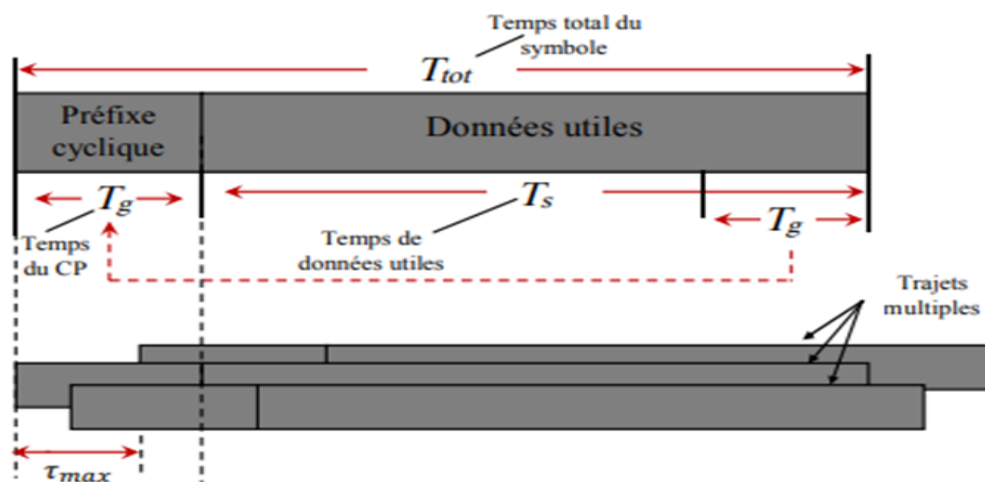


Fig.2.2. La protection contre les interférences entre symboles OFDM assurée par le CP

2.2.5.2. Zéro pudding (ZP) :

Dans ce cas, l'intervalle de garde ne contient que des zéros. Cette approche particulière est adoptée par OFDM multi bande (MB-OFDM) dans un système à bande ultra large (UWB) [22]. La fig.2.3 représente des symboles OFDM avec ZP.

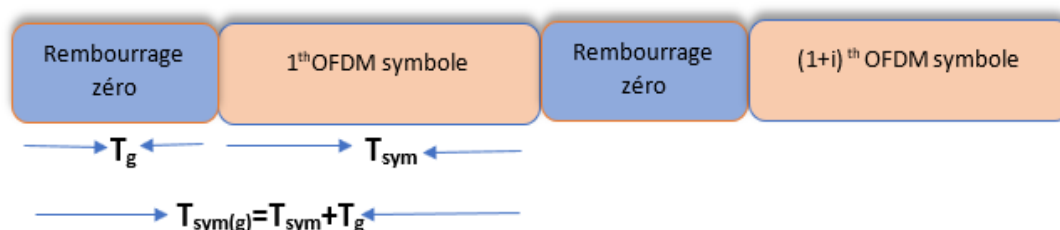


Fig.2.3 : symboles OFDM avec ZP

2.2.6. Les Avantages et les inconvénients de l'OFDM

La technologie OFDM présente de nombreux avantages, notamment :

1. L'OFDM a une grande flexibilité dans l'attribution de bits à chaque sous-porteuse et dans l'attribution du débit binaire dans un contexte multiutilisateurs.
2. Les techniques multi-porteuses sont robustes en termes d'égalisation.
3. Les interférences entre symboles (ISI) et entre porteuses (ICI) peuvent être Évitées à l'émission et corrigées en réception.
4. Améliorer la qualité de transmission des données.
5. L'OFDM permet une égalisation de fréquence simple.

Malgré ses nombreux avantages, l'OFDM présente des inconvénients :

1. L'OFDM est sensible au décalage fréquentiel qui peut causer une perte d'orthogonalité entre les sous-porteuses.
2. L'OFDM souffre de sensibilité de la synchronisation en temps et en fréquence au niveau de récepteur, cela intervenir dégradant considérablement les performances du système global.

2.3 MIMO -OFDM :

2.3.1 La combinaison MIMO-OFDM :

Dans les systèmes sans fil à large bande (l'évanouissement sélectif en fréquence ou l'évanouissement par trajets multiples) cela affecte très gros effet sur les canaux MIMO, ce problème peut être surmonté en combinant les deux systèmes (MIMO) et (OFDM). Il est possible de combiner la technologie MIMO avec tout type de modulation, mais des recherches récentes dans ce domaine indiquent que la combinaison des systèmes MIMO et OFDM est la plus efficace. La combinaison des deux systèmes (MIMO-OFDM) répond à de nombreuses exigences de qualité dans les communications sans fil car (MIMO) peut améliorer la capacité et le gain de diversité et (OFDM) peut atténuer les effets néfastes de l'évanouissement par trajets multiples [22] [23].

La combinaison (MIMO-OFDM) a été adoptée dans la communication sans fil en raison des nombreux avantages de l'OFDM et des avantages des systèmes MIMO. Par exemple, la technologie MIMO-OFDM est utilisée dans la norme de communication sans fil (IEEE 802.11n) pour augmenter la capacité des canaux, ainsi que dans les technologies LTE et WiMax.

MIMO-OFDM est une combinaison particulièrement puissante car (MIMO) ne tente pas d'atténuer la propagation par trajets multiples et (OFDM) évite le besoin d'égalisation du signal.

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

2.3.1.1 Dans le multiplexage spatial de MIMO-OFDM :

Plusieurs flux de données sont transmis simultanément à partir de différentes antennes d'émission dans chaque sous-porteuse de fréquence. Étant donné que tous les signaux porteurs sont orthogonaux les uns aux autres et qu'un (CP) est inséré entre des blocs (OFDM), les signaux de multiplexage spatial n'ont pas de (ISI) dans les domaines temporel et fréquentiel.

Ainsi, si ces signaux arrivent au réseau d'antennes du récepteur avec des signatures spatiales suffisamment différentes et que le récepteur dispose d'un (CSI) précis, il peut séparer ces flux en canaux parallèles et décoder le signal émis [24]. Ce schéma augmente le débit du système puisque différentes informations peuvent être transmises simultanément sur plusieurs antennes.

2.3.1.2 Un code espace-temps (STC) :

Est une méthode utilisée pour améliorer la fiabilité de la transmission de données en utilisant la redondance dans l'espace et dans le temps. Les (STCs) reposent sur la transmission de plusieurs copies redondantes d'un flux de données sur un certain nombre d'antennes dans le but qu'au moins certaines d'entre elles survivent au chemin physique du canal entre l'émission et la réception dans un état suffisamment bon pour permettre un décodage fiable [25].

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

2.3.2 Le principe d'un système MIMO-OFDM :

D'après ce qui précède, l'une des techniques les plus efficaces pour améliorer l'efficacité spectrale de la communication radio est l'utilisation de plusieurs antennes pour l'émission et la réception.

Le principe du MIMO-OFDM repose sur l'application d'une modulation (IFFT) et d'une démodulation (FFT) OFDM à chaque antenne d'émission (Tx) et à chaque antenne de réception (Rx), respectivement [26]. La fig.2.4 présenté le schéma global d'un système MIMO-OFDM.

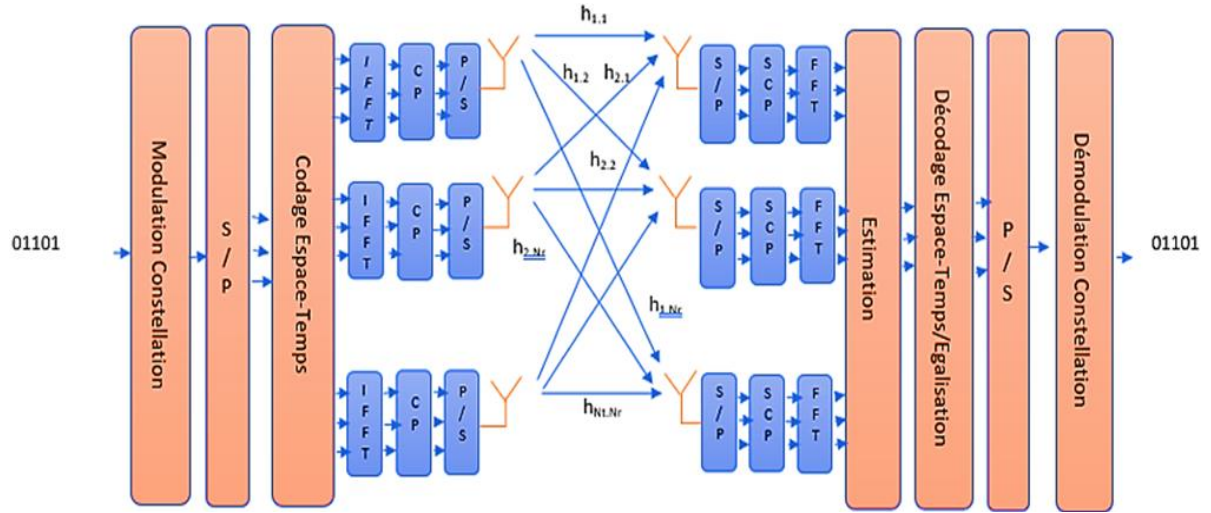


Fig.2.4 : structure d'un système MIMO-OFDM

Un canal de transmission MIMO composé de sous-canaux primaires $N_t \times N_r$ (SISO) non corrélés sélectionnés dans le temps et en fréquence.

Ici, nous supposons que les longueurs de sous-canal SISO sont inférieures ou égales à L et sont constantes pendant toute la durée de vie du bloc OFDM [26].

L'expression du signal reçu sur l'antenne de réception (v) dans le domaine temporel après la suppression de CP est donnée par :

$$r_{i,v} = \sum_{m=0}^{N_t-1} H^{m,v} F^{\mathcal{H}} x_{i,m} + \eta_{i,v} \quad (2.2)$$

Pour N_r antennes de réception, le signal reçu s'exprime par :

$$R_i = H F^{\mathcal{H}} X_i + N_i \quad (2.3)$$

Ou

$$\begin{aligned} R_i &= [r_{i,0}^T \dots r_{i,v}^T \dots r_{i,N_r-1}^T]^T \\ X_i &= [x_{i,0}^T \dots x_{i,m}^T \dots x_{i,N_t-1}^T]^T \\ N_i &= [\eta_{i,0}^T \dots \eta_{i,v}^T \dots \eta_{i,N_r-1}^T]^T \\ F &= \begin{bmatrix} F & 0 & \dots & 0 \\ 0 & F & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & F \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Le signal en sortie du démodulateur FFT est donné par :

$$z_{i,v} = \sum_{m=0}^{N_t} D(\tilde{h}^{m,v}) x_{i,m} + \tilde{\eta}_{i,v} \quad (2.5)$$

$Z_{i,v}$: est le i -ième bloc de données reçues par la v – ième antenne de réception à la Sortie de la FFT. $D(\tilde{h}^{m,v})$: est une matrice diagonale contenant des échantillons($\tilde{h}^{m,v}$) de la réponse en fréquence du canal reliant l'antenne d'émission m - ième à l'antenne de réception v - ième, donnée par :

$$D(\tilde{h}^{m,v}) = \begin{bmatrix} \tilde{h}_{m,r}(0) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \tilde{h}_{m,r}(1) & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \tilde{h}_{m,r}(N-1) \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

où les échantillons $\tilde{h}_{m,r}(n)$ sont spécifiés par :

$$\tilde{h}_{m,r}(n) = \sum_{l=0}^{L-1} h_{m,r}(l) e^{-j \frac{2\pi \eta l}{N}} \quad (2.7)$$

$\tilde{h}$: La réponse fréquentielle du canal.

Remarque*

- STBC (Space-Time Block Codes) : Ces codes sont définis sous forme matricielle, et les symboles à transmettre sont codés par des opérations matricielles. Le code espace-temps en blocs (STBC) est une stratégie de transmission d'un flux de données dans un système MIMO en exploitant la diversité spatiale. Les signaux qui sont codés avec STBC sont orthogonaux les uns aux autres. Cette orthogonalité réduit dès lors l'interférence entre les différents signaux transmis et améliore la performance du récepteur qui distingue les différents signaux reçus.
- (FFT) et (IFFT) (Fast Fourier Transforme) et (Inverse Fast Fourier Transforme) :

Le processus de modulation OFDM le plus gourmand en calculs est (IFFT), et de même, le cœur de la démodulation OFDM est (FFT). Le haut débit (FFT) est essentiel dans les systèmes à large bande, en particulier lorsque la FFT est partagée sur plusieurs chemins de données.

2.4 Taux d'erreur binaire (BER)

Le TEB ou BER (en anglais Bit Error Rate) Comme son nom l'indique, un taux d'erreur Binaire est défini comme étant le taux auquel les erreurs se produisent dans un système de Transmission [26]. Ceci peut être traduit directement par le nombre d'erreurs qui se produisent dans un train d'un nombre déterminé de bits. La définition du taux d'erreur binaire peut être traduit en une formule simple :

$$\text{BER} = \text{Nombres des erreur} / \text{Nombres des Bit envoyés.} \quad (2.8)$$

Si le canal idéal et le rapport signal/bruit sont élevés, le taux d'erreur binaire sera très faible - peut-être insignifiant et n'ayant pas d'effet notable sur le système dans son ensemble.

Principales causes de la dégradation du canal de données et du taux d'erreur sur les bit correspondant, le taux d'erreur sur les bits mesure les changements dans le chemin de propagation [27]. Les deux effets (bruit et canal) ont tous deux une composante aléatoire, le bruit suivant une fonction de probabilité gaussienne tandis que le modèle de propagation suit un modèle de Rayleigh. Cela signifie que l'analyse des caractéristiques du canal est généralement effectuée à l'aide de techniques d'analyse statistique.

2.5 Estimation du canal :

Dans l'estimation de canal basée sur la formation, les symboles de formation ou les tonalités pilotes utilisés sont connus à la fois de l'émetteur et du récepteur. Les connaissances de pilote transmises. Symboles au niveau du récepteur est exploité pour estimer le canal. Le pilote de type bloc.

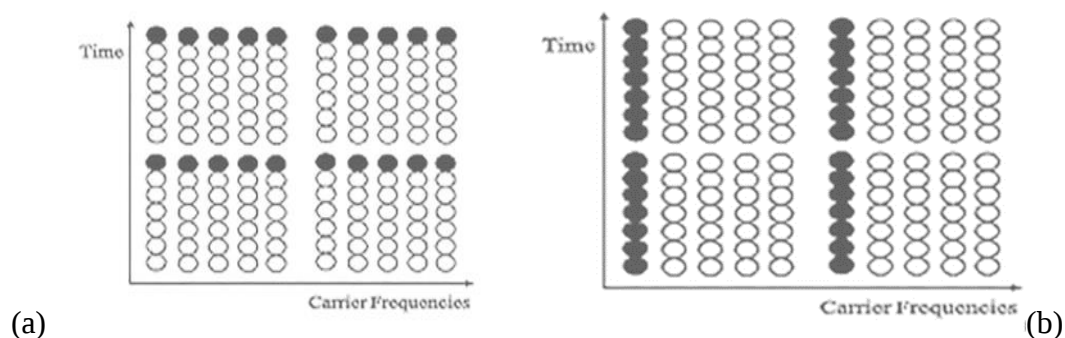


Fig.2.5: a Block pilot. b Comb pilot

L'agencement est représenté sur la Fig. 2.5 (a) dans laquelle les symboles pilotes sont transmis périodiquement pour l'estimation du canal. L'agencement de pilote de type peigne est illustré dans Fig. 2.5 (b), où les pilotes sont transmis à tout moment mais avec un espacement régulier

sur les sous-porteuses pour l'estimation de canal. L'estimation peut être effectuée en utilisant LS [26-27]. Les symboles d'entraînement pour N les sous-porteuses peuvent être représentées par la matrice diagonale suivante en supposant que toutes les sous-porteuses sont orthogonales.

$$S = \begin{bmatrix} s(0) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & s(1) & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & s(N-1) \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Où $s(k)$ désigne une tonalité pilote à la Kth sous-porteuse, avec $E\{s(k)\} = 0$; $\text{Var}\{s(k)\} = \sigma^2$, $k = 0; 1; 2; \dots; N-1$. Pour un gain de canal donné $H(K)$ correspondant à la Kth sous-porteuse, le signal d'apprentissage reçu $Y(K)$ peut être représenté comme :

$$Y \triangleq \begin{bmatrix} Y(0) \\ Y(1) \\ \vdots \\ Y(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s(0) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & s(1) & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & s(N-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H(0) \\ H(1) \\ \vdots \\ H(N-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \eta(0) \\ \eta(1) \\ \vdots \\ \eta(N-1) \end{bmatrix} = SH + \eta \quad (2.10)$$

Où η est un vecteur de bruit avec $E\{\eta(k)\} = 0$; $\text{Var}\{\eta(k)\} = \sigma^2$, et $k = 0; 1; 2; \dots; N-1$.

2.5.1 Estimation du canal LS :

Le LS est une méthode bien connue et largement utilisée pour l'estimation en raison de sa simplicité. L'estimation du canal LS est représentée par :

$$\hat{H} = S^{-1}Y \quad (2.11)$$

Les sous-porteuses pilotes sont interpolées pour estimer le canal pour les symboles de données.

2.5.2 Estimation de canal basée sur DFT :

La technique d'estimation de canal basée sur DFT améliore les performances de LS estimation de canal en supprimant l'effet du bruit à l'extérieur du canal maximal retard.[28] L>IDFT de l'estimation de canal :

$$\text{IDFT} \{ \hat{H}(K) \} = h(n) + \eta(n) = \hat{h}(n), n=0, 1, \dots, N-1 \quad (2.12)$$

Où $\hat{H}(K)$ est l'estimation du canal H à la kth sous-porteuse, obtenue par LS, et $\eta(n)$ désigne la composante de bruit. Si le retard maximal du canal est δC_d alors :

$$\hat{h}_{\text{DFT}}(n) = \begin{cases} h(n) + \eta(n), & n=0, 1, \dots, \delta C_d - 1 \\ 0, & \text{autrement} \end{cases} \quad (2.13)$$

Et retransformé dans le domaine fréquentiel comme suit :

$$\hat{H}_{\text{DFT}}(n) = \text{DFT} \{ \hat{h}_{\text{DFT}}(n) \} \quad (2.14)$$

2.6 MIMO-OFDM Channel Estimation :

En utilisant eq (10.7), l'estimation LS du canal entre le jth émetteur et le ith antenne réceptrice pour le système MIMO – OFDM peut être exprimée comme :

$$\hat{H}_{LS}^{(j,i)} = (s^{(j)})^{-1} y^{(i)} \quad (2.15)$$

$s^{(j)}$ Est une matrice diagonale $N * N$ avec les pilotes de la jth antenne d'émission comme éléments diagonaux, et $y^{(i)}$ est reçu vecteur de longueur N à l'antenne du récepteur i.

2.6.1 Égalisation des canaux MIMO :

Considérons un système de communication sans fil dans lequel l'émetteur contient N_T Antennes et le récepteur possède des antennes N_R . Considérons un $2 * 2$ MIMO canal

($N_t = 2, N_r = 2$) comme indiqué sur la Fig2.6. Le signal reçu pour le $2 * 2$ Le canal MIMO peut être exprimé :

$$y_j = \sum_{i=1}^2 h_{j,i} x_i + \eta_j \quad (2.16)$$

Ici $h_{j,i}$ ($i=1,2 ; j=1,2$) sont des variables aléatoires complexes indépendantes et à distribution identique (i.i.d), représentant les coefficients de canal du ith émetteur antenne à la jth antenne réceptrice, x_i sont des symboles transmis et η_j sont du bruit échantillons et i.i.d variables AWGN complexes.

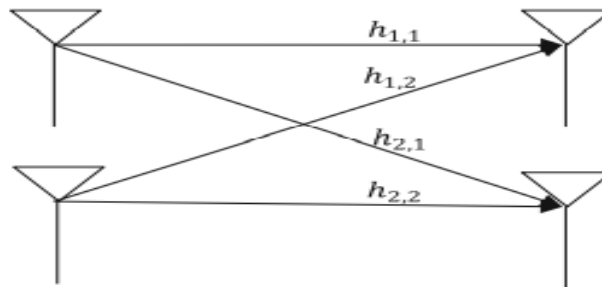


Fig.2.6 : $2 * 2$ canaux MIMO

2.6.1.1 Égalisation du forçage zéro (ZF) :

Pour résoudre pour s , nous savons que nous devons trouver une matrice W qui satisfait $WH=1$.

Le détecteur linéaire de forçage zéro (ZF) pour répondre à cette contrainte est donné par :

$$W = (H^H H)^{-1} H^H \quad (2.17)$$

2.6.1.2 Égalisation de l'erreur quadratique moyenne minimale (MMSE) :

L'approche de l'erreur quadratique moyenne minimale (MMSE) essaie de trouver W qui minimise le critère $E \{ [WY-S] [Wy-s]^H \}$. Résolution $W = [H^H H + N_0]^{-1} H^H$ quand le terme de bruit est égal à zéro, l'égaliseur MMSE se réduit à zéro forçant l'égaliseur.

2.6.1.3 Égalisation de probabilité maximale :

La détection ML (Maximum Likelihood) affiche les meilleures performances dans tous les algorithmes de détection MIMO. Ce trouve le $\hat{s}$, qui minimise :

$$J = \|y - H\hat{s}\|^2 \quad (2.18)$$

2.7 Conclusion

Dans cette partie, nous avons présenté la combinaison entre les deux techniques MIMO et OFDM. Les différents signaux transmis par les différentes antennes d'émission peuvent être séparés au niveau des récepteurs. Les systèmes de codage temps-espace sont utilisés pour améliorer la robustesse et la fiabilité du système. Le problème principal dans les systèmes de transmission sans-fil et notamment dans les systèmes MIMO-OFDM est la synchronisation. Les récepteurs doivent résoudre ce problème afin de récupérer les données transmises. Nous avons également fourni un aperçu de l'Estimation du canal qui basée sur DFT et aussi on a vu Égalisation des canaux MIMO.

Chapitre 3

3.1 Introduction :

Du point de vue de la mise en œuvre pratique, certains problèmes de simulation peuvent devoir être pris en compte et des paramètres de simulation appropriés doivent être définis en conséquence. Ce chapitre traite de certains des problèmes cruciaux de simulation par Matlab en fonction de la conception du système proposé. Puis les paramètres utilisés pour les simulations sont donnés.

Avant de concevoir des systèmes de communication, il est nécessaire d'évaluer leurs performances. Cependant, le but de ce travail est de parvenir à une implémentation de simulation qui aborde les performances des systèmes MIMO et (MIMO OFDM) et de vérifier qu'ils répondent aux objectifs spécifiés, nous étudierons la relation entre l'amplitude du canal et le rapport signal sur bruit (SNR) selon la théorie de théorème de Shannon pour le calcul de la capacité du canal Gardant à l'esprit que (SNR) égal à (E_b/N_0) . Nous utiliserons différents nombres d'antennes et étudierons l'état de canal (en anglais CSI : Channel state information) avec le système (MIMO OFDM).

De plus, ce chapitre analyse les graphiques de BER vs E_b/N_0 (dB) obtenus en effectuant des simulations sur une plage de points E_b/N_0 pour générer des résultats de BER dans les mécanismes de rétroaction

Remarque ;

E_b/N_0 (le rapport énergie par bit/densité spectrale de puissance de bruit) est un paramètre important dans la communication numérique ou la transmission de données. Il s'agit d'une mesure normalisée du rapport signal sur bruit (SNR), également connue sous le nom de "SNR par bit". Il est particulièrement utile pour comparer les performances du taux d'erreur sur les bits (BER) de différents schémas de modulation numérique sans tenir compte de la bande passante. E_b/N_0 est un rapport adimensionnel.

3.2 Capacité des systèmes MIMO:

3.2.1 Etude de performance de la capacité de système MIMO :

La capacité des systèmes MIMO est l'un des sujets les plus importants et les plus courants où nous présentons ici le minimum pour s'intéresser à la transmission du MIMO. Pour que nous puissions comparer les différentes capacités que nous verrons.

La limite physique que le canal impose à la quantité d'informations transmises nous incite à trouver une solution pour améliorer le débit, tout en maintenant la complexité matérielle raisonnablement faible. L'augmentation de la puissance du signal transmis augmente l'augmentation logarithmique de l'efficacité du spectre.

Si vous souhaitez augmenter la puissance, vous devez doubler considérablement la puissance de l'émetteur, ce qui n'est pas toujours possible.

Certaines techniques ont été utilisées pour améliorer qualitativement ou quantitativement les informations transmises, telles que la technologie de diversité spatiale de transmission (MIMO) ou la technologie de diversité spatiale de réception.

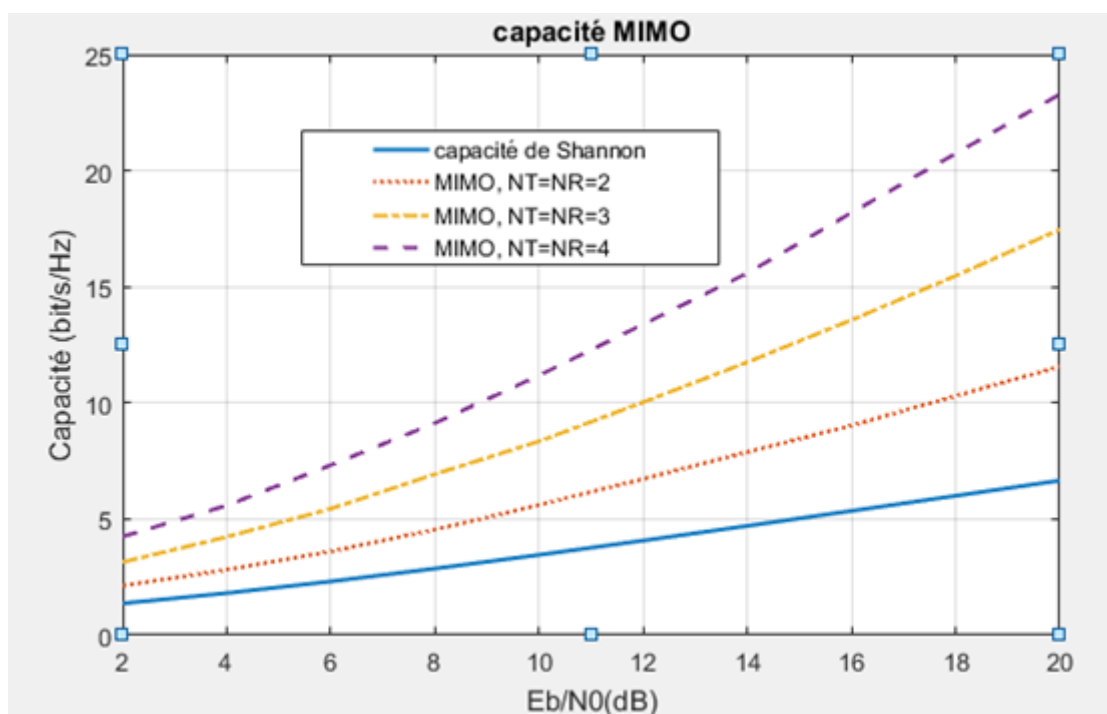


Fig3.1 : Comparaison entre les capacités des canaux SISO et MIMO

Où :

- Antennes Shannon (SISO 1*1)
- N_T : le nombre d'antenne émettrice
- N_R : le nombre d'antenne réceptrice

La fig. 3.1 présente la variation de capacité de canal en fonction du rapport signal sur bruit pour des systèmes dotés par des antennes Shannon (1*1) et (MIMO), (2*2), (3*3), (4*4) pour différent matrice d'antennes MIMO.

- ✓ Dans le cas de l'amplitude théorique de Shannon, l'amplitude est comprise entre 1,75 et 6,25 bits/s/Hz. Il augmente considérablement avec le rapport signal sur bruit $\text{SNR}(\text{Eb}/\text{N}_0)$, mais reste un peu faible et montre des limites de transmission.
- ✓ Dans le cas de MIMO ($N_t = N_r = 2$), l'amplitude augmente de 5,25 bits/s/Hz par rapport à l'amplitude de Shannon. L'amplitude MIMO augmente plus rapidement et se termine par une augmentation d'environ 50 % à 10 dB SNR.
- ✓ Les mêmes commentaires peuvent être faits pour les systèmes MIMO à ($N_t = N_r = 3$), ($N_t = N_r = 4$). On peut également noter que la capacité d'un système MIMO à 4 antennes est le double de celle de 2 antennes

Tableau.3.1 : capacités MIMO en fonction du SNR.

Capacité $\text{Eb}/\text{N}_0(\text{dB})$	SISO (Shannon) $N_r=N_t=1$	MIMO $N_r=N_t=2$	MIMO $N_r=N_t=3$	MIMO $N_r=N_t=4$
SNR= 4dB	1.80 bits/s/Hz	2.85 bits/s/Hz	4.30 bits/s/Hz	5.90 bits/s/Hz
SNR=8dB	2.90 bits/s/Hz	4.91 bits/s/Hz	7.10 bits/s/Hz	9 bits/s/Hz
SNR=16dB	5.20 bits/s/Hz	9 bits/s/Hz	13.95 bits/s/Hz	21.02 bits/s/Hz

Le résultat obtenu confirme que l'augmentation du nombre d'antennes dans le système donne une meilleure amplitude en améliorant le rapport signal sur bruit $\text{SNR}(\text{Eb}/\text{N}_0)$.

3.2.2 Amplitude de canal MIMO aléatoire par MATLAB :

Nous supposons que les canaux MIMO sont déterministes. En général, les canaux MIMO changent de manière aléatoire. La matrice est une matrice aléatoire, ce qui signifie que l'amplitude de son canal change également de manière aléatoire.

Nous avons travaillé sur les Simulation de capacité du canal MIMO aléatoire sans CSI avec des matrices interconnectées régulières et irrégulier au moyen du programme Matlab et le résultat obtenu est le suivant :

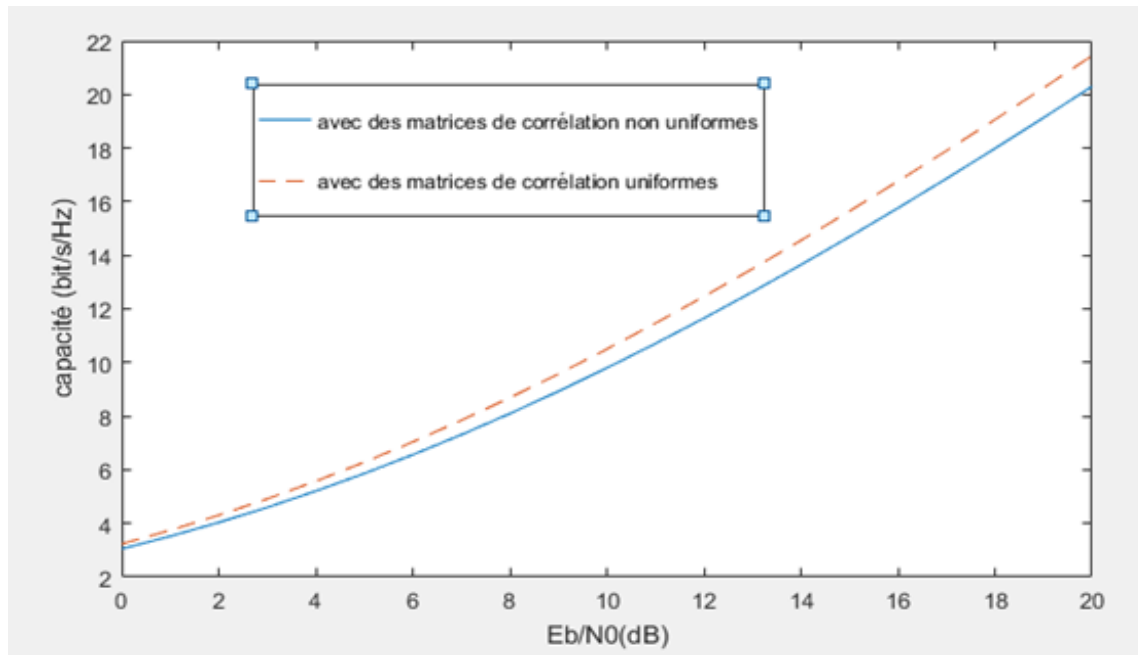


Fig. 3.2 : Capacité de canal MIMO aléatoire sans CSI avec des matrices corrélées uniformes et non uniformes

On remarque sur le résultat que la capacité du canal aléatoire MIMO sans CSI à matrices interconnectées régulières est légèrement supérieure à l'amplitude du canal aléatoire sans CSI à matrices interconnectées irrégulières.

Par exemple :

Tableau.3.2 : capacités MIMO Avec des matrices de corrélation (uniformes/ non uniformes) fonction du SNR(E_b/N_0).

Capacité (NT=NR =4) Eb/N0 (dB)	Avec des matrices de corrélation uniformes	Avec des matrices de corrélation non uniformes
SNR=4 dB	4.55 bit/s/HZ	4.40 bit/s/HZ
SNR=8 dB	8.1 bit/s/HZ	7.50 bit/s/HZ
SNR=16 dB	15.30 bit/s/HZ	14.2 bit/s/HZ

La capacité du canal MIMO aléatoire sans CSI et matrices interconnectées régulières donne de meilleures performances que les matrices interconnectées non uniformes, et plus le SNR(E_b/N_0) est grand, plus la capacité est grande

3.2.3 Simulations de canaux 4*4 liés spatialement par Matlab :

A ce stade de la simulation, nous comparons la capacité de (4*4) canaux liés spatialement avec un CSI connu et inconnu au niveau de l'émetteur pour connaître l'effet du CSI sur les canaux. Ces simulations sont faites par MATLAB

Le résultat est donné comme suit :

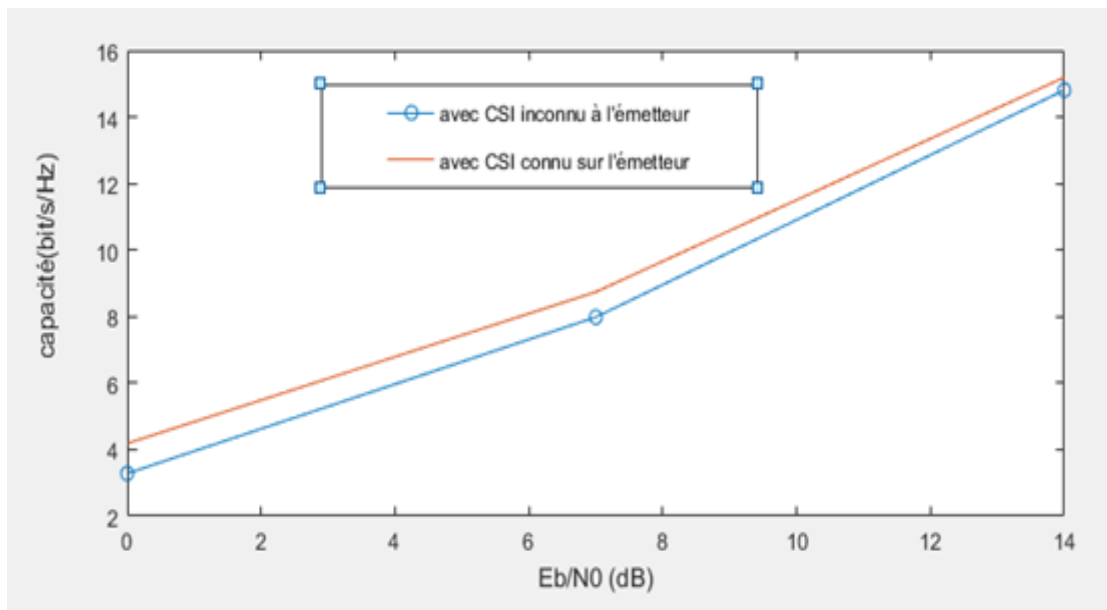


Fig. 3.3: Comparaison de la capacité de (4 *4) canaux corrélés spatialement avec des CSI connus et inconnus au niveau de l'émetteur.

D'après la figure 3, nous remarquons que la capacité de 4 canaux corrélés spatialement avec un CSI connu à l'émetteur donne de meilleures performances qu'avec un CSI inconnu à l'émetteur. Nous notons que le rapport entre (CSI) connu et inconnu au niveau de l'émetteur diminue avec l'augmentation de SNR(E_b/N_0) Il peut s'avérer être égal.

Tableau.3.3 : comparaison entre Avec CSI connu à l'émetteur et Avec CSI inconnu À l'émetteur.

Capacite (Nt=Nr=4) Eb/N0(dB)	Avec CSI connu à l'émetteur	Avec CSI inconnu à l'émetteur
SNR=4 dB	6.40 bit/s/HZ	5.60 bit/s/HZ
SNR=8 dB	9.40 bit/s/HZ	8.05 bit/s/HZ
SNR=14 dB	15.03 bit/s/HZ	14.80 bit/s/HZ

Nous concluons que la disponibilité du CSI peut améliorer la capacité du canal lorsque le $\text{SNR}(\text{Eb}/\text{N}_0)$ est faible et que la disponibilité du CSI peut ne pas améliorer la capacité du canal lorsque le $\text{SNR}(\text{Eb}/\text{N}_0)$ est très élevé.

3.3. Transmettre la diversité contre recevoir la diversité :

L'utilisation de la réception diversifiée est une technique bien connue pour atténuer les effets de l'évanouissement sur une liaison de communication.

Alamouti propose un schéma de diversité de transmission qui fournit des gains de diversité similaires, en utilisant plusieurs antennes dans l'émetteur. Ceci est conçu pour être plus pratique car il ne nécessitera que plusieurs antennes à la station de base par rapport aux multiples antennes par téléphone portable dans un système de communication cellulaire.

Dans cette section, nous comparerons la diversité d'émission et de réception en simulant une modulation binaire cohérente d'entrée de déphasage (BPSK) sur des canaux Rayleigh à évanouissement plat. Pour la diversité de transmission, nous utilisons deux antennes d'émission et une antenne de réception (2x1 légalement), tandis que pour la diversité de réception, nous utilisons une antenne d'émission et deux antennes de réception (1x2 légalement).

Tableau.3.4 : Paramètres de simulation :(Transmettre la diversité contre recevoir la diversité)

Longueur du cadre	100
Nombre de paquets	1000
Eb/No	20dB
Antennes Tx(N)	2
Antennes Rx(M)	2

Nous exécutons la simulation sur un ensemble de points Eb/No pour générer des résultats BER qui nous permettent de comparer différents systèmes.

On obtient le résultat suivant :

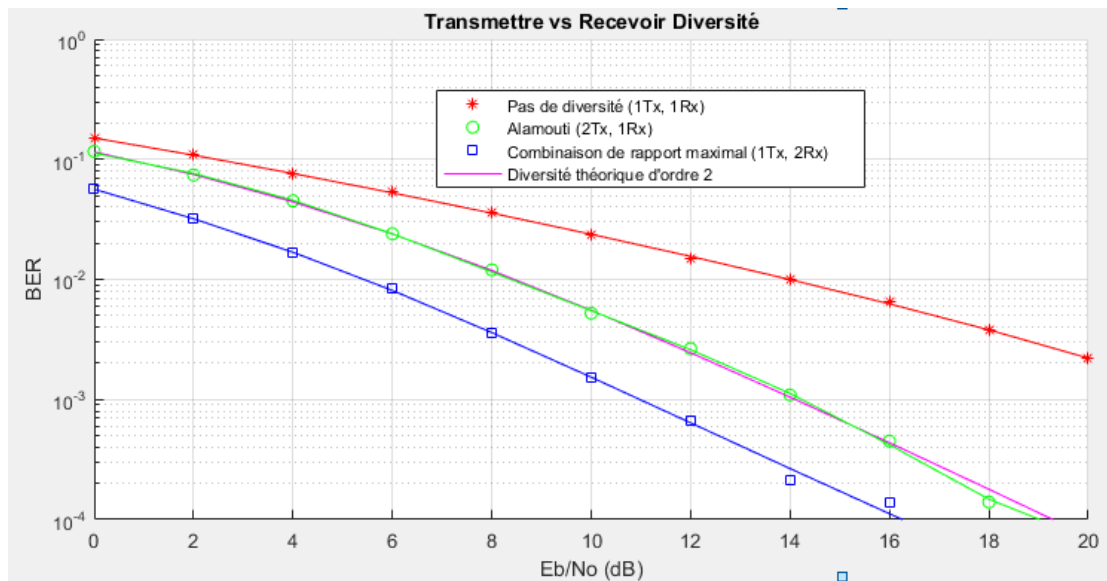


Fig3.4 : Transmettre la diversité contre recevoir la diversité

Les résultats de simulation qui en résultent montrent que l'utilisation de deux antennes d'émission et d'une antenne de réception (Alamouti) fournit le même (ordre de diversité).

Tels que le système commun à rapport maximal (CRM) d'une antenne émettrice et de deux antennes réceptrices.

Nous notons également que la diversité de transmission a un défaut de (3 dB) par rapport à la diversité de réception (CRM). La raison est due à notre résurrection (modélisant que la puissance totale transmise est la même dans les deux cas). Si on calibre la puissance émise pour que la puissance reçue pour ces deux états soit la même, les performances seront identiques. Les performances théoriques d'une liaison de diversité de second ordre sont identiques à celles d'un système de diversité de transmission car elles normalisent la puissance totale sur toutes les branches de diversité.

3.4. Codage de bloc spatio-temporel avec estimation de canal :

Sur la base de la théorie (conceptions orthogonales), Tarrush et al. Le système de diversité de transmission d'Alamouti s'est généralisé à un nombre aléatoire d'antennes d'émission, donnant naissance à la notion de codes spatio-temporels. Pour les tours de signalisation complexes, ils montrent que le schéma Amoti est le seul schéma de débit complet pour deux antennes d'émission.

Cette section évalue les performances du système MIMO lorsque CSI a été mis à disposition à l'extrémité de l'émetteur et analyse également le graphique obtenu après simulation.

La simulation a été réalisée dans des systèmes ((2 *2) MIMO) avec et sans l'estimation de canal. On suppose que le canal reste inchangé pendant toute la durée du paquet. (C'est-à-dire qu'il subit une décoloration lente).

Tableau.3.5 : Paramètres de simulation (système Alamouti 2*2)

Longueur du cadre	100
Nombre maximal d'erreurs	300
Nombre maximal de paquets	3000
Nombre de symboles pilotes par image	8
E_b/N_0	12dB
Antennes Tx(N)	2
Antennes Rx(M)	2

Une fois tous les paramètres définis, la simulation a été effectuée. Lorsque le CSI n'est pas connu au niveau du récepteur, il doit être extrait du signal reçu. On a supposé que l'estimateur de canal effectuât cela en utilisant des signaux pilotes orthogonaux ajoutés à chaque paquet.

La comparaison est faite entre le canal connu et le canal estimé et le graphique suivant montre les performances du canal connu et du canal estimé avec 8 symboles pilotes/trame

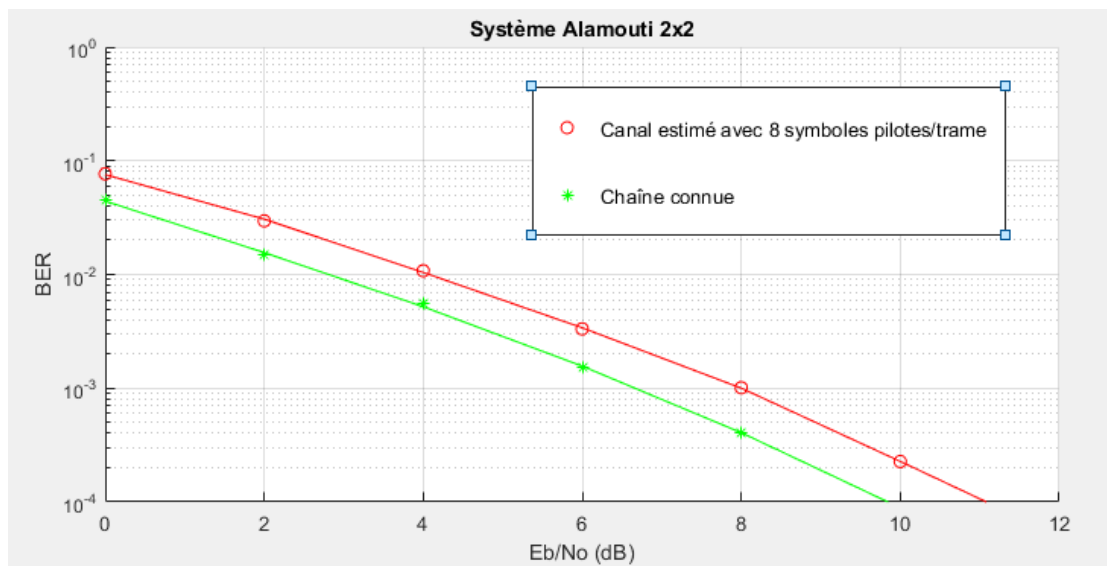


Fig. 3.5 : système Alamouti 2*2

Il convient de noter ici à partir de la Figure 3.5 qu'avec 8 symboles pilotes pour 100 symboles de données, l'estimation de canal provoque une dégradation d'environ 1 dB du BER pour la plage E_b/N_0 sélectionnée.

Cela s'améliore avec une augmentation du nombre de symboles pilotes par trame, mais ajoute à la surcharge de la liaison. Dans cette comparaison, nous gardons le SNR transmis par symbole pour qu'il soit le même dans les deux cas

3.5. Conclusion :

Ce chapitre présente les résultats de simulation menés dans MATLAB pour concevoir un mécanisme de rétroaction permettant d'obtenir un CSI à l'extrémité émettrice d'un système MIMO et également pour déterminer la capacité d'un canal MIMO avec et sans CSI à l'extrémité émettrice.

En comparant différents histogrammes obtenus après simulations, il a été observé et démontré que les performances MIMO s'amélioreraient significativement avec Available from CSI à la fin de l'émetteur. La capacité de canal du système MIMO augmente également lorsque CSI est fourni à l'extrémité de l'émetteur.

Conclusion générale

Le but de ce mémoire était d'étude la technologie MIMO et MIMO massif en générale et la technique OFDM. Après on a expliqué la relation entre chaque technique, et on a proposé une analyse graphique sur certains des problèmes cruciaux de simulation ce qui a été accompli à l'aide de Matlab pour les résultats théoriques.

De manière générale, il présente au chapitre 1 un aperçu introductif de la technologie MIMO et de ses projets en cours ; Passer en revue les avantages et les défis de cette technologie. Massive MIMO marque une rupture nette avec la pratique actuelle en utilisant un excès important des antennes de service sur les terminaux actifs. Des antennes supplémentaires permettent de concentrer l'énergie dans des régions de plus en plus petites afin d'améliorer considérablement le débit et l'efficacité énergétique rayonnée. Bien que la technologie MIMO massive supprime de nombreux problèmes de recherche traditionnels, Il reste encore des défis à relever pour concrétiser tout le potentiel de la technologie, notant la complexité de calcul, la réalisation d'algorithmes de traitement distribué, le problème d'interférence inter et intracellulaire et la contamination des pilotes.

Ensuite, au chapitre 2, un focus particulier sur les systèmes OFDM et MIMO-OFDM :

L'OFDM (Orthogonal Fréquence Division Multiple Xing) a démontré un grand potentiel qui l'a positionnée parmi les solutions fiables pour les futurs réseaux de télécommunications sans fil.

La combinaison de l'OFDM avec les systèmes MIMO permet de réduire la complexité du récepteur et d'offrir des communications à très haut débit à travers les canaux sélectifs en fréquence. En conclusion, nous pouvons dire que l'intégration des MIMO-OFDM dans les communications sans-fil souterraines, ouvra la porte à une vaste gamme d'applications, Toutes ces applications sont destinées à faciliter le travail.

Le chapitre 03 a présenté l'analyse graphique de la simulation par Matlab. A travers ces simulations, nous avons conclu que l'amélioration du rapport signal sur bruit (SNR) en augmentant le nombre d'antennes donne une meilleure amplitude.

De plus, la disponibilité de CSI peut améliorer la capacité de canal lorsque le SNR est faible et la disponibilité de CSI peut ne pas améliorer la capacité de canal lorsque le SNR est trop élevé.

Il a montré que les performances MIMO s'amélioreraient considérablement avec Available CSI côté émetteur. La capacité de canal du système MIMO augmente également lorsque CSI est fourni à l'extrémité de l'émetteur.

Références

- [01] <https://www.electronics-notes.com/articles/antennas-propagation/mimo/what-is-mimo-multiple-input-multiple-output-wireless-technology.php>
- [02] Djiknavorian, P. (2007). MIMO pour les nuls. Laboratoire de Radio télécommunications et du Signal Université LAVAL, édition révisé Janvier.
- [03] THESE Présentée pour l'obtention du grade de DOCTORAT 3ème Cycle En : Télécommunications Spécialité : Télécommunications Par : MAHI Sarra Sujet Etude et implémentation d'algorithmes innovants de précodage MIMO associés aux codes LDPC. Année (2018)
- [04] A thesis presented for the degree of Doctor of Philosophy In Electrical and Computer Engineering at the University of Canterbury, Christchurch, New Zealand. MIMO Systems with Multifunctional Reconfigurable Antennas Année(2019)
- [05] D. karakolah. Conception de prototypage d'un récepteur itératif pour les systèmes de transmission MIMO avec pré-codage linéaire. Thèse de doctorat, université Bretagne-sud, France, 2009.
- [06] THESE DE DOCTORAT Présentée devant L'université Djillali Liabes de SidiBel-Abbes 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)
- [07] Staudy Paper on Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) Technologie.
- [08] CST Microwave Studio, Computer Simulation Technology, version 2013
- [09] *Mehassouel, M. (2018). Application de la technologie MIMO a la 4G du mobile (Doctoral dissertation*
- [10] ALDHAHERI, A. S. A. CONCEPTION ET SIMULATION D'UNE ANTENNE MIMO Année(2019)
- [11] BOUMANA, H., & HASNAOUI, F. (2019). Etude et Conception d'une Antenne MIMO (Multi-Entrées Multi Sorties) pour des Communications Ultra-Large-Bande (Doctoral dissertation, Université Ziane Achour de Djelfa).
- [12] ROZÉ, Antoine. Massive MIMO, une approche angulaire pour les futurs systèmes multi-utilisateurs aux longueurs d'onde millimétriques. 2016. Thèse de doctorat. INSA de Rennes.
- [13] The Role of Massive MIMO in 5G. Michael Wang. Oct 23, 2018 [Enligne]. <https://medium.com/@miccowang/the-role-of-massive-mimo-in-5g-c362e790ef61> [consulté le 03 Avril 2019].
- [14] Chataut, R., & Akl, R. (2020). Massive MIMO systems for 5G and beyond networks—overview, recent trends, challenges, and future research direction. *Sensors*, 20(10), 2753.

- [15] ELECTRONIQUE, M., & DU, V. D. L. O. EVALUATION DE PERFORMANCE D'UN SYSTEME MIMO MASSIF EN TERMES D'EFFICACITE SPECTRALE. Année (2015)
- [16] Syed Jobairul Alam ENERGY AND SPECTRAL EFFICIENCY TRADEOFF IN WIRELESS COMMUNICATION Faculty of Information Technology and Communication Sciences Master of Science Thesis October 2019
- [17] neeth Satheeskumar Varma. Energy efficiency optimization in wireless networks. Other [condmat.other]. Université Paris Sud - Paris XI, 2014. English. ffNNT : 2014PA112123ff. fftel-01124376
- [18] Kaur, S., & Bharti, G. (2012). Orthogonal frequency division multiplexing in wireless communication systems: A Review. International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology, 1(3). SOTINDJO, P. C., HOUNKONNOU, N., BEDJA, K. S., KORA, A., ASSOGBA, K. M., VIANOU, A., ...
- [19] & DJOGBE, L. (2016). Etude et simulation des performances de la modulation multiporteuse OFDM dans les liaisons optiques IM/DD utilisant de nouvelles sources optiques (Doctoral dissertation, EPAC/UAC).
- [20] Ogbi, M. (2021). Implantation d'applications Radio Logicielle sur architectures reconfigurables pour les systèmes multi-porteuses et multi-antennes (Doctoral dissertation).
- [21] Rachini, A. (2014). Etude de la synchronisation temporelle dans les systèmes MIMO-OFDM appliqués aux réseaux mobiles (Doctoral dissertation, Rennes, INSA).
- [22] Cheng, C. (2016). MIMO signal design, channel estimation, and symbol detection (Doctoral dissertation, Université Paris-Saclay (ComUE)).
- [23] BESSEGHIER, M. (2017). Estimation du CFO et des canaux pour les systèmes à porteuses multiples (Doctoral dissertation).
- [24] Smaali, F., & Lashab, M. (2020). Etude d'un système de communication sans fils MIMO-OFDM.
- [25] [Boumechache, Y., Messaoudi, F., & Lashab, M. (2021). Etude De La Communication Sans Fils Multi Porteuse UPMC.
- [26] Tufvesson, F., Maseng, T.: Pilot assisted channel estimation for OFDM in mobile cellular systems. In: IEEE VTC'97, vol. 3, pp. 1639–1643 (1997) 5. Heiskala, J., Terry, J.: OFDM Wireless LANs: A Theoreti
- [27] Lau, H.K., Cheung, S.W.: A pilot symbol aided technique used for digital signals in multipath environments. In: IEEE ICC'94, vol. 2, pp. 1126–1130 (1994).
- [28] Cho, Y.S., Kim, J., Yang, W.Y., Kang, C.G.: MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB. Wiley, Hoboken (2010)