

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبو بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : Télécommunication

Spécialité : Réseaux et Télécommunications

Par : **KOUIDRI Yassine** et **TOUATI Salaheddine**

Sujet

Etude des Antennes MIMO massives à Formation de Faisceaux

Soutenu en visioconférence, le 06 / 07 / 2021 devant le jury composé de :

M. MERZOUGUI .R	Professeur	Président	Univ. Tlemcen
M. DJAMAI. A	M.C.	Examineur	Univ. Tlemcen
M. BAHRI S.M	M.C.	Encadrant	Univ. Tlemcen

Remerciements

Ce document présente les travaux effectués dans le cadre de notre projet de fin d'étude de Master au Département de Télécommunication de la Faculté de Technologie de L'Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen.

Il nous est agréable et important de réserver cette page comme un témoin de reconnaissance à toutes les personnes qui nous ont soutenus et encadrés pour la réalisation de ce travail.

Tout d'abord je tiens à remercier ALLAH le tout puissant de m'avoir donné la santé, la volonté, le courage et la patience pour mener à terme ma formation et pourvoir réaliser ce travail de recherche.

Ce travail a été effectué sous l'encadrement de Dr. **Mr BAHRI SIDI MOHAMMED**, à qui nous voudrions témoigner toute notre reconnaissance, pour nous avoir offert les conditions nécessaires et nous avoir guidés dans l'élaboration de ce travail. Je lui transmets l'expression de ma plus profonde gratitude.

Nos remerciements les plus vifs s'adressent aussi à **Mr MERZOUGUI .R** Professeur à l'Université de Tlemcen, d'avoir accepté de présider ce travail, ainsi que **M. DJAMAI. A** maître de conférences à l'université de Tlemcen d'avoir bien voulu faire parti de ce jury et d'examiner ce travail.

De peur d'en avoir oublié, je souhaite remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de ce parcours universitaire.

Dédicace

Avec l'aide Allah le tout puissant clément et miséricordieux, j'ai pu accomplir ce travail que je dédie :

A mon cher père

Qui m'a appris a toujours gardé la tête haute et a ne jamais renoncer a mes rêves, En exprimant ma gratitude, mon profond d'amour et ma passion, pour sa confiance, son soutien moral et matériel

A ma chère mère

En exprimant de ma profonde gratitude et de mon incontestable reconnaissance Pour son grand amour, ses sacrifices et toute l'affection Qu'elle m'a toujours offerte

A mes chères sœurs Marwa, Safae ,Douha , Amel et son mari Abdelbasset ainsi que leurs enfants Mohammed et Sara

A mes Grands-parents et grands-mères

A ma famille

A tous mes amis, surtout à mon groupe

Aux personne qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagné durant mon chemin d'études supérieures.

Je vous dis merci

Yassine

Dédicace

Avec l'aide Allah le tout puissant clément et miséricordieux, j'ai pu accomplir ce travail que je dédie :

À l'être le plus chère de ma vie, **Ma Mère** à celui qui m'a fait de moi un homme

À mon cher **Père** pour son soutien, son affection et la confiance qu'il m'a accordé

À mes frères : **YOUCEF, RAYAN** et, mes sœurs : **CHAHINEZ, RINAD.**

À mes oncles : **ABDELKARIME** et **BOUZIANE .**

À ma famille et mes amis

Je vous dis merci

Salaheddine

Résumé

Résumé : Le besoin d'accueillir plus d'utilisateurs à des débits de données plus élevés avec une meilleure fiabilité tout en consommant moins d'énergie a imposé la naissance d'une nouvelle génération de communication mobile. C'est la 5G basant, parmi autre, sur la technique MIMO (multi-input, multi-output) massive, cette technique est appuyée sur le bénéfice de trajet multiple pour améliorer la capacité de système. Elle convient notamment à la technologie des ondes millimétriques. L'objectif de ce projet est d'étudier et simuler l'amélioration apportée aux performances du système par l'utilisation de cette technologie de MIMO massive associée avec la modulation multi-porteuses OFDM.

Mots clés : Réseau mobile ; 5G ; MIMO massive ; antennes intelligentes ; MIMO beamforming.

Abstract: The need to accommodate more users with higher data rates with better reliability while consuming less power has forced the birth of a new generation of 5G mobile communication based, among other things, on the technical MIMO (multi-input, multi-output) massive, this technique is relied on multi path benefit to enhance system capability. It is particularly suitable for millimeter wave technology. The objective of this project is to study and simulate the improvement brought to the performance of the system by the use of this massive MIMO technology associated with the OFDM multi-carrier modulation.

Keywords: Mobile network; 5G; massive MIMO; smart antenna ; MIMO beamforming.

Sommaire

Liste des Figures	I
Liste des Tableaux	II
Liste des Acronymes	III
Introduction Générale :	1

Chapitre 1 : La technologie MIMO massive

1.1 Introduction :.....	5
1.2 Système MIMO :	5
1.3 Types de MIMO	6
1.4 MIMO massive :	11
1.5 Caractéristiques de MIMO massive :.....	12
1.5.1 TDD vs FDD pour le MIMO massive :	12
1.5.2 L'évolutivité :	13
1.5.3 Propagation favorable :	13
1.6 Avantages du MIMO massive :.....	14
1.7 Types de MIMO massive :.....	14
1.7.1 Système MIMO mono-utilisateur :	14
1.7.2 MIMO massive multi-utilisateurs :	15
1.7.3 MU- Massive MIMO avec Multi-Cell scénario :	17
1.7.4 MIMO massive distribuée :	17
1.8 Comparaison entre MIMO et MIMO massive :.....	18
1.9 Utilité pour la 5G :	19
1.10 Défis des systèmes MIMO massive :.....	20
1.10.1 La contamination des séquences pilotes :	20
1.10.2 Propagation défavorable :	22
1.11 Conclusion :	23

Chapitre 2 : Antennes Intelligentes pour les MIMO massives

2.1 Introduction :.....	26
2.2 Antennes réseaux :	26
2.3 Antennes intelligentes :	28

2.4 Avantages des antennes intelligentes :	30
2.5 Types d'antennes intelligentes :	31
2.6 Les algorithmes adaptatifs :	34
2.7 Antennes MIMO Beamforming :	36
2.8 Antennes MIMO massive Beamforming :	38
2.9 Conclusion :	39

Chapitre 3 : Résultats de Simulaion

3.1 Introduction :	41
3.2 Le langage utilisé (Matlab) :	41
3.3 La technique MIMO-OFDM :	42
3.3.1 La chaine de transmission :	42
3.3.2 Description des blocs :	43
3.4 Simulation :	48
3.4.1 Impact du nombre d'antennes	48
3.4.2 Variation de la puissance de transmission :	52
3.4.3 Variation de la puissance d'interférence :	53
3.4.4 Changement d'angles :	55
3.4.5 Changement du nombre de trajets :	57
3.5 Conclusion :	59
Conclusion Générale :	60
Bibliographie :	62

Liste des Figures

Figure 1.1 : Illustration d'un système SISO.....	7
Figure 1.2 : Illustration d'un système SIMO.	7
Figure 1.3 : Illustration d'un système MISO.	8
Figure 1.4 : Illustration d'un système MIMO.	9
Figure 1.5 : Illustration d'un système Beamforming.	10
Figure 1.6 : Illustration du concept Massive MIMO.	11
Figure 1.7 : Système SU-MIMO.....	14
Figure 1.8 : Système MU-MIMO.	16
Figure 1.9 : Facteurs contribuant à une augmentation du trafic de données sans fil.	19
Figure 1.10 : Contamination de pilotes.	22
Figure 2.1 : Réseau linéaire.....	27
Figure 2.2 : Réseau planaire.....	27
Figure 2.3 : Réseau circulaire.	28
Figure 2.4 : Système à faisceau commuté.....	32
Figure 2.5 : Structure et principe du système adaptatif en (a) Réception et en (b) Emission.	33
Figure 2.6 : Classification des algorithmes adaptatifs.	35
Figure 2.7 : Configuration de canal MIMO avec Beamforming	37
Figure 3.1 : Chaîne de transmission MIMO-OFDM.....	43
Figure 3.2 : Schéma de principe du modulateur OFDM.	45
Figure 3.3 : Modulateur OFDM numérique.	46
Figure 3.4 : Démodulateur OFDM numérique.....	46
Figure 3.5 : Changement de faisceaux de formation en variant le nombre d'antennes.	49
Figure 3.6 : Changement des diagrammes de constellation en variant le nombre d'antennes.....	50
Figure 3.7 : Changement des diagramme de constellations en variant la puissance de transmission.....	52
Figure 3.8 : Changement des constellations en variant la puissance d'interférence.	53
Figure 3.9 : Changement de faisceaux de formation en variant l'angle d'interférence.	55
Figure 3.10 : Changement de diagramme de constellation en variant l'angle d'interférence.....	56
Figure 3.11 : Changement de diagramme de constellation en variant le nombre de trajet.	58

Liste des Tableaux

Tableau 1.1: Comparaison entre MIMO et MIMO massive.....	18
Tableau 3.1 : Récapitulatif des résultats avec variation de nombre d’antennes.	51
Tableau 3.2 : Récapitulatif des résultats avec variation de la puissance de transmission.	53
Tableau 3.3 : Récapitulatif des résultats avec variation de la puissance d’interférence.	54
Tableau 3.4 : Récapitulatif des résultats avec variation d’angle d’interférence.	57
Tableau 3.5 : Récapitulatif des résultats avec variation du nombre de trajets	58

Liste des Acronymes

4G	Quatrième Génération.
5G	Cinquième Génération.
AMRS	Accès Multiple par Répartition Spatiale.
AWGN	Additive White Gaussian Noise.
BER	Bit Error Rate.
BLAST	Bell. Labs Layered Space-Time.
BS	Base Station.
CB	Conjugate Beamforming.
CDMA	Code Division Multiple Access.
DBS	Digital Beamsteering.
DoF	Degrees of Freedom.
EGT	Equal Gain Transmission.
FDD	Frequency division duplex.
FDMA	Frequency Division Multiple Access.
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output.
MISO	Multiple-Input single -Output.
MMSE	Minimum Mean Square Error.
MSINR	Maximum Signal to Interference plus Noise Ratio.
MU-MIMO	Multi-User MIMO.
MVDR	Minimum Variance Distortionless Response.
NFFT	Non-equispacedFast Fourier Transform.
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing.

RF	Radio Frequency.
RSB	Rapport Signal à Bruit.
RSI	Rapport Signal à Interférent.
SDMA	Spatial Division Multiple Access.
SE	Spectral Efficiency.
SIMO	Single-Input Multiple -output.
SISO	Single-Input single-output.
SMMSE	Successive Minimum Mean Square Error.
SNR	Signal-to-Noise Ratio.
SU-MIMO	Single User MIMO.
TDD	Time Division Duplexing.
TDMA	Time Division Multiple Access.
TEB	Taux d'erreur binaire.
UT	User Terminal.
V-BLAST	Vertical – Bell – Laboratories –Layered –Space – Time.
ZF	Zero Forcing

Introduction Générale

Ces dernières années, nous assistons à un développement exponentiel de nouvelles applications et technologies dans les domaines de la santé, des médias, de l'industrie, du transport, de l'énergie... Cette évolution va de pair avec l'apparition de nouveaux services liés à une multiplication des objets connectés dont leur nombre va atteindre des milliards.

Le monde devient de plus en plus digitalisé où tout est connecté. Les objets seront connectés entre eux, sur internet et avec des milliards de personnes. Cette augmentation nécessite de nombreux progrès sur les systèmes de télécommunications mobiles, bien que, le réseau 4G actuel reposant sur la norme LTE (Long Term Evolution) a apporté de nombreuses solutions comme l'augmentation du débit et de la bande passante comparé aux anciennes générations de réseaux mobiles. En utilisant la technologie IP, la 4G permet une navigation internet confortable avec les Smartphones, les tablettes ou les ordinateurs portables. Cependant, ce réseau dont le spectre de fréquence est assez surchargé ne pourra plus bien assurer les diverses exigences dues à l'essor des objets connectés avec leurs différentes catégories d'usages.

Le développement de la cinquième génération (5G) est né dans le but de répondre aux besoins des nouvelles applications en matière de débit, de latence, de capacité de données et de nature des services. Pour répondre à cette panoplie d'exigence, les réseaux de nouvelle génération doivent franchir multiples obstacles. Parmi eux, MIMO massive, Beamforming et l'utilisation des bandes millimétriques.

- Massive MIMO : l'arrivée de la technologie Massive MIMO qui n'est rien d'autre qu'une densification du traditionnel MIMO (sortie multiple à entrées multiples) utilisée dans les générations. Avec leurs faibles longueurs d'ondes, l'utilisation des fréquences millimétriques facilitera l'intégration de centaines d'éléments rayonnants au niveau de la station de base.
- Beamforming : est une technique de formation de faisceaux pour des systèmes Multi-antennes (MIMO) qui permet l'exploitation de la diversité spatiale, constitue en effet une composante fondamentale des systèmes 4G actuels. Son importance va croître avec la

5G et la nécessité d'exploiter au mieux cette dimension spatiale à la fois à l'intérieur des cellules, et en intercellulaire.

- L'utilisation des bandes millimétriques : jusqu'à présent, seuls les spectres de fréquences sous 6GHz ont été largement utilisés pour les systèmes de communication civile terrestre. Pour le besoin de nouveaux canaux avec une bande passante plus large afin de prendre en charge l'hébergement simultané de centaines de milliards d'objets connectés, l'exploitation des fréquences millimétriques au-dessus de 6GHz pour la 5G devient plus que jamais indispensable malgré avec une atténuation des ondes millimétriques due aux obstacles comme les murs, la neige, les fortes chutes de pluie.

L'association de Massive MIMO et le Beamforming permet d'atteindre à la fois une haute efficacité spectrale, Une meilleure qualité et un débit élevé.

Le mémoire est constitué de trois chapitres :

Le premier chapitre présente une étude de la technologie MIMO et ses différentes configurations SISO, SIMO, MISO et MIMO, Nous proposons ensuite une présentation de la technologie MIMO massive tout en donnant leurs types et caractéristiques, ainsi qu'une comparaison entre le MIMO traditionnel et le MIMO massive, et on termine par ses Défis.

Dans le second chapitre, on se concentrera sur l'étude des antennes intelligentes et ses avantages. Nous proposons ensuite une étude sur les antennes MIMO Beamforming et MIMO massive Beamforming, passant par les algorithmes adaptatifs.

Le dernier Chapitre traite dans la première partie la chaîne de transmission MIMO-OFDM et une petite description pour chaque bloc. La seconde partie c'est la simulation du système MIMO-OFDM, nous présenterons l'influence du nombre d'antennes sur le taux d'erreur binaire et le diagramme de constellations, ainsi que l'influence de la puissance de transmission, la puissance d'interférence, l'angle du mobile et de l'interférence, et le nombre de trajets. Alors notre but c'est l'étude des performances du système MIMO-OFDM en variant plusieurs caractéristiques.

Chapitre 1 :

La Technologie MIMO Massive

1.1 Introduction :

MIMO massive ou Massive MIMO est une amélioration du système MIMO. C'est une forme du système MIMO multi-utilisateurs où les stations de base et le nombre d'utilisateurs sont très nombreux.

Le MIMO massive est une nouvelle technologie caractéristique de la 5G. Au lieu de mettre en place une seule antenne réceptrice-émettrice, le MIMO massive combine plusieurs antennes à la fois dans le but de renforcer le signal et réduire les interférences [1].

Il y a beaucoup de bénéfices à multiplier le nombre d'antennes dans un système de communication sans fils. Fondamentalement, cela permet d'avoir plus de degrés de liberté dans le domaine spatial, qui pourra être bien exploité pour différents gains : par exemple, augmenter le taux de données sans augmenter la bande passante et augmenter le lien de rentabilité à partir de la diversité spatiale.

Dans ce premier chapitre, nous allons voir tout ce qui concerne la technologie massive MIMO, dont nous présenterons en premier lieu d'abord, le système MIMO ; et en second lieu, le système Massive MIMO.

1.2 Système MIMO :

Multiple-input Multiple-output, en français entrées multiples, sorties multiples.

C'est une technique de multiplexage. Le MIMO exploite plusieurs antennes au niveau de l'émetteur et du récepteur pour augmenter le nombre de données transmises simultanément. MIMO tire parti du phénomène d'ondes radio multi-trajets, dans lesquelles les informations transmises rebondissent à partir des plafonds d'autres objets, jusqu'à atteindre le moment où l'antenne les reçoit sous différents angles et à des moments légèrement différents.

L'utilisation de l'antenne MIMO fonctionne plus intelligemment en permettant la combinaison de flux de données provenant de chemins différents et à des moments différents pour augmenter l'efficacité de la réception du récepteur. L'antenne intelligente utilise la technologie de diversité et permet une utilisation maximale de l'antenne.

S'il y a plus d'antennes que de flux spatiaux, les antennes supplémentaires augmenteront la diversité, et permettront ainsi au récepteur d'améliorer sa portée.

1.3 Types de MIMO

Il existe quatre modèles de configuration d'antenne de base, y compris :

- SISO: Single Input Single Output.
- SIMO: Single Input Multiple Output.
- MISO: Multiple Input Single Output.
- MIMO: Multiple Input Multiple Output.

SISO : (Entrée unique Sortie unique), Dans cette forme on utilise deux antennes, une pour l'émetteur et l'autre pour le récepteur. C'est la forme la plus simple de liaison radio, Comme présentée dans la **Figure 1.1**.



Figure 1.1 : Illustration d'un système SISO.

L'avantage du système SISO réside dans sa simplicité. Cependant, ses performances sont limitées par rapport au système MIMO qui utilise une certaine forme de diversité, les interférences et les évanouissements ont un impact plus important sur le système [3].

SIMO : (Entrée unique Sorties multiples), Dans ce système on utilise une seule antenne pour l'émission et plusieurs pour la réception. Ceci est également appelé réception de la diversité. Il est généralement utilisé pour permettre au système de réception de recevoir des signaux de plusieurs sources indépendantes pour permettre la résistance aux effets de l'évanouissement.

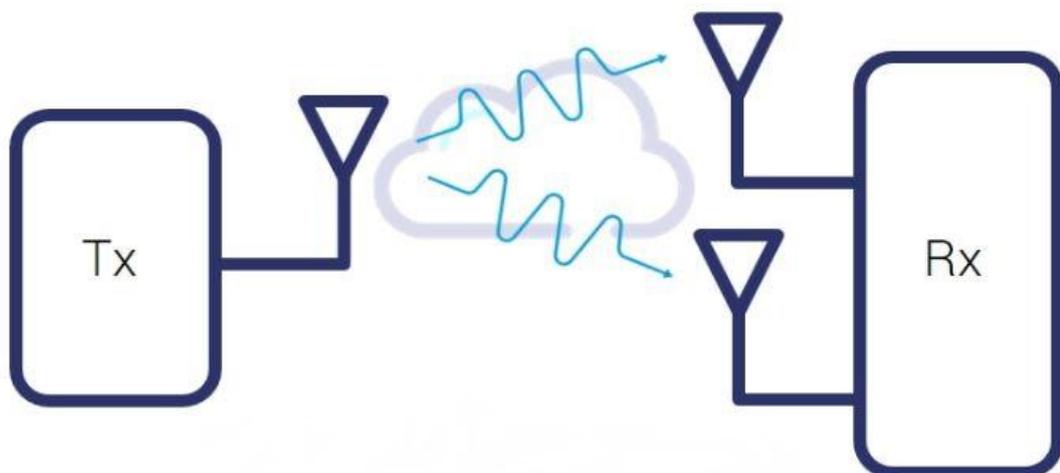


Figure 1.2 : Illustration d'un système SIMO.

MISO : (Entrée multiple Sortie unique), Dans ce système on utilise en émission plusieurs antennes et une seule antenne pour la réception. Ceci est également appelé émission de la diversité. On Transmet de manière redondante les mêmes données à partir de plusieurs antennes d'émission. Le récepteur est alors en mesure d'accueillir le meilleur signal, qui peut ensuite être utilisé pour extraire les données demandées [4].

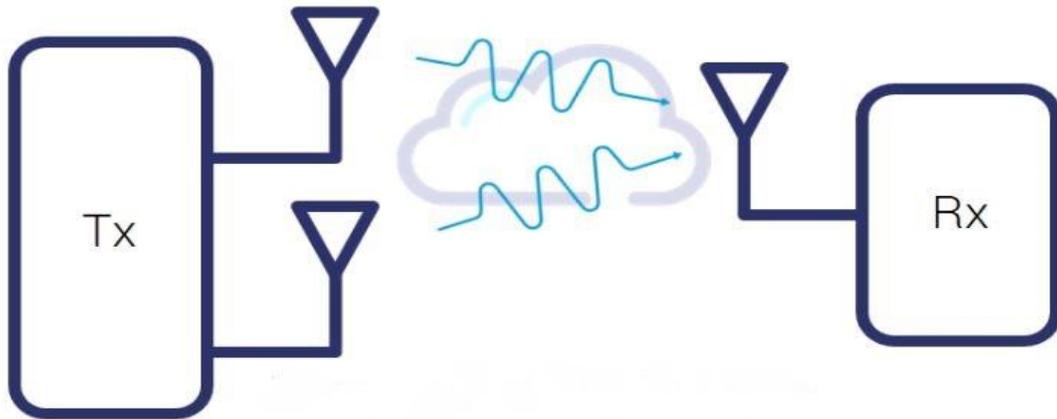


Figure 1.3 : Illustration d'un système MISO.

MIMO (Entrée multiple sortie multiple) : Lorsqu'on augmente le nombre d'antennes à chaque bout de la liaison radio, en utilisant plusieurs antennes pour l'émission et la réception, il s'agit de MIMO. Il consiste à accroître à la fois la portée de transmission et la quantité de données transmises à un récepteur pendant le même laps de temps en multipliant le nombre d'antennes émettrices et réceptrices. MIMO sert à augmenter la puissance et le débit du canal.

Le signal situé entre l'émetteur et le récepteur peut suivre plusieurs chemins.

De plus, en déplaçant l'antenne même sur une petite distance, le chemin utilisé changera également. Les différents chemins disponibles sont dus au nombre d'objets qui apparaissent sur le côté ou bien au chemin direct entre l'émetteur et le récepteur.

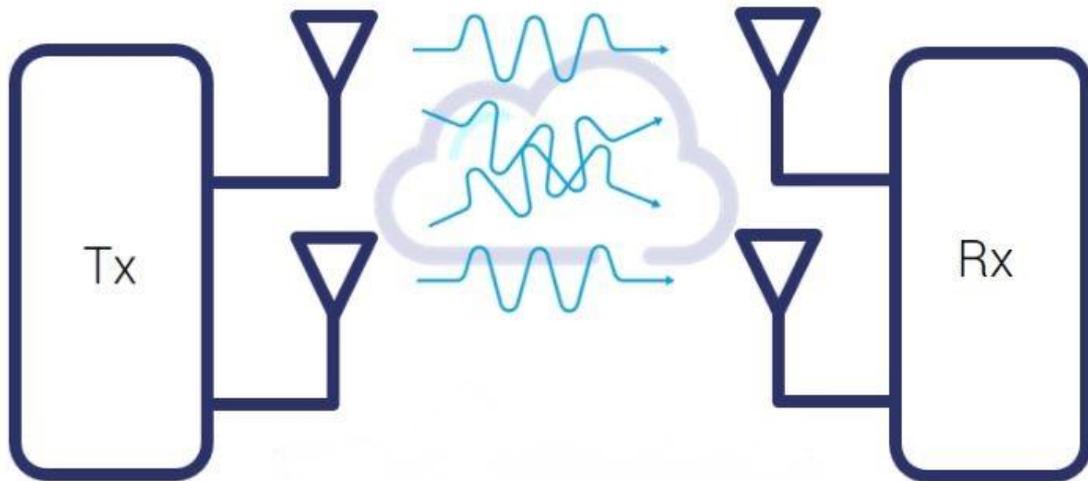


Figure 1.4 : Illustration d'un système MIMO.

Auparavant, ces chemins multiples n'étaient exploités que pour introduire des interférences. Lors de l'utilisation de MIMO, ces chemins supplémentaires peuvent être utilisés avantageusement. Ils peuvent être utilisés pour renforcer la liaison radio, améliorer le rapport signal / bruit ou multiplier la capacité de données de la liaison.

Les principaux formats de MIMO sont donnés ci-dessous :

- **MIMO à codage spatio-temporelle** : Pour améliorer la qualité. Le même message est transmis simultanément sur différentes antennes pendant la transmission. Ensuite, les signaux reçus sur chaque antenne de réception sont déphasés et ajoutés de manière cohérente. La version simplifiée utilise uniquement le meilleur signal reçu par l'une des antennes à un instant donné.
- **MIMO à multiplexage spatial** : Le multiplexage spatial permet de maximiser le débit d'informations sur un canal MIMO. Différents sous-messages sont transmis simultanément sur chaque antenne émettrice. Recomposez le signal reçu sur l'antenne de réception pour reconstruire le message d'origine. Cette technique a été introduite sous le nom de BLAST (Bell Labs Layered Space-Time). Bien qu'il existe différentes versions, la

version la plus répandue est la structure V-BLAST (vertical BLAST) où chaque couche est associée à une seule antenne de transmission.

Au lieu de profiter de la diversité du signal en envoyant les mêmes informations, il est possible de diviser les informations en plusieurs flux et d'envoyer chaque flux sur l'antenne lors de l'émission vers l'antenne et lors de la réception. Par conséquent, en faisant fonctionner les deux réseaux d'antennes d'émission et de réception en même temps, il est possible d'augmenter le débit de transmission. On parle alors de multiplexage spatial qui peut être mono-utilisateur, SU-MIMO (Single User MIMO) ou MU-MIMO (multiutilisateur) [2].

- **MIMO Beamforming** : pour améliorer la qualité et le débit. Le Beamforming fonctionne de telle façon que le signal soit reçu à l'endroit où il est utile à l'utilisateur et ne provoque pas de bruit perturbateur pour les autres ailleurs. Un logiciel pilote un ensemble de petits émetteurs de sorte que leurs signaux se rassemblent à l'endroit où il y en a besoin et s'annulent ailleurs.

Ces faisceaux de signaux ne sont émis que lorsqu'un appareil (smartphone, tablette ou ordinateur portable, etc.) a besoin de se connecter. Le signal transmis à l'appareil est donc personnalisé en fonction des besoins de l'utilisateur.

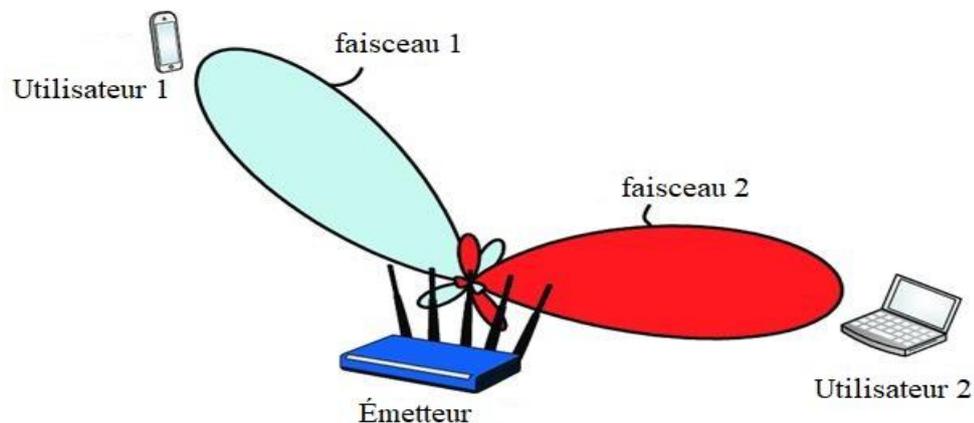


Figure 1.5 : Illustration d'un système Beamforming.

1.4 MIMO massive :

Massive MIMO : il s'agit du même concept du MIMO, mais avec plus d'antennes. Un système MIMO peut utiliser environ 4 émetteurs, tandis que le MIMO massive comptera 100 antennes, il est destiné pour la 5G. Une bonne description est que le MIMO massive utilisera trop d'antennes, de sorte que le nombre d'émetteurs dépasse le nombre d'utilisateurs. Toutes ces antennes permettront au MIMO massive d'offrir de meilleurs avantages par rapport au MIMO actuel [5].

Avec le MIMO massive plusieurs antennes d'émission d'une station de base peuvent émettre des signaux différents et plusieurs antennes de réception d'un appareil peuvent les recevoir et les partager simultanément grâce au multiplexage spatial.

Le MIMO massive peut être considéré comme une forme de Beamforming ou un MU-MIMO [5].

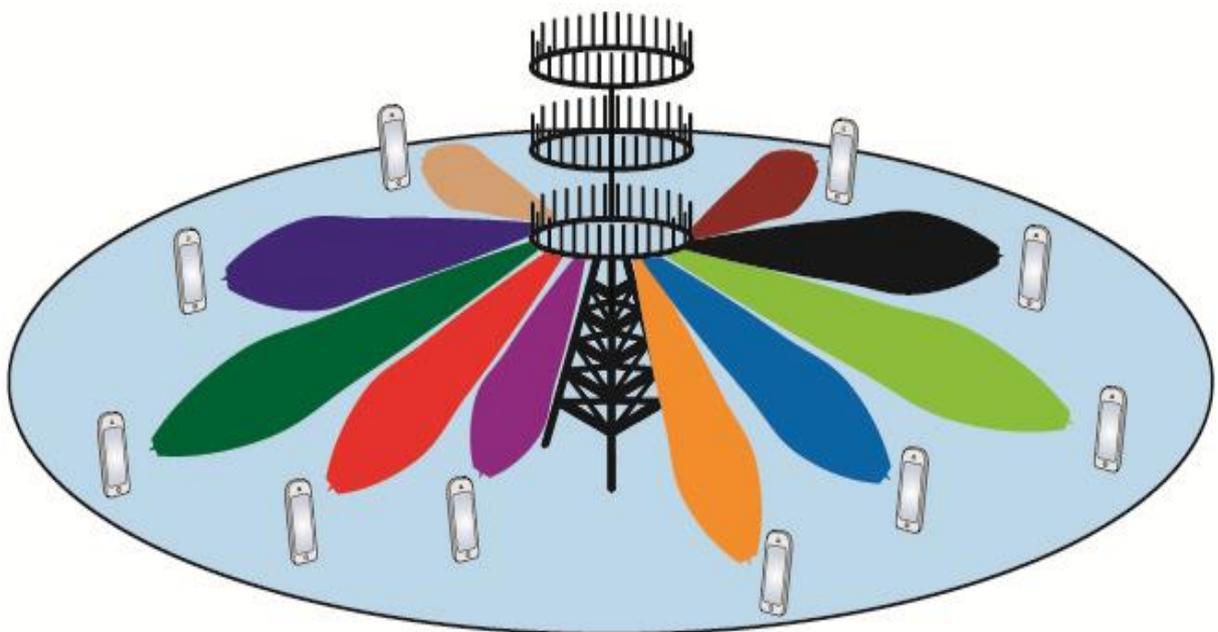


Figure 1.6 : Illustration du concept Massive MIMO.

- Beamforming :

Il s'agit d'un filtre spatial directif servant à favoriser le gain dans une direction souhaitée et atténuer la puissance de l'onde dans d'autres directions non souhaitées. Pour le contrôle et la formation des diagrammes de rayonnement, on applique à chaque antenne une pondération correspondant aux critères fixés comme la maximisation du gain dans une direction donnée, ou bien la maîtrise du niveau des lobes secondaires [2].

Le Beamforming peut être utilisé soit du côté émetteur ou du côté récepteur pour atteindre une sélectivité spatiale.

La pondération consiste à multiplier par des coefficients complexes, des signaux à émettre sur chaque élément du réseau d'antennes. Ce calcul est similaire au précodage effectué pour le multiplexage spatial, en remplaçant la matrice de précodage par une matrice de Beamforming nommée B et s'appuyant également sur la décomposition en valeurs singulières de la matrice, et de la méthode d'égalisation ZF ou SMMSE (Successive Minimum Mean Square Error) [2].

1.5 Caractéristiques de MIMO massive :

1.5.1 TDD vs FDD pour le MIMO massive :

Dans la plupart des études proposées, le schéma TDD est préféré à celui du FDD en MIMO massive. En utilisant la technique FDD où les sens montants et descendants utilisent des bandes de fréquences distinctes, il faut effectuer l'évaluation des canaux radio à la fois dans le sens montant et dans le sens descendant : les résultats des mesures effectuées par les terminaux doivent être retournés à la BS. Les travaux effectués sur ce sujet ont montré que le domaine d'efficacité du MIMO massive se trouvait notablement réduit et que son intérêt se trouvait limité à des scénarios particuliers, de faible mobilité et de basse fréquence, la période d'estimation du canal en DL dépend du nombre d'antennes M à la BS. En revanche, en utilisant le schéma TDD dans lequel les canaux montants et descendants se partagent dans le temps la même ressource en fréquences. Les canaux physiques de propagation montants et descendants ont alors les mêmes caractéristiques ; on les dit réciproques : il suffit d'évaluer le sens montant pour permettre à la station de base d'élaborer les paramètres à appliquer pour le précodage du signal descendant et à la combinaison des signaux reçus pour extraire le signal émis par chaque terminal.

Pour ce faire, les terminaux émettent périodiquement une séquence de pilotes : ces K séquences sont en principe orthogonales, l'estimation se fait uniquement en uplink, et la période d'estimation (nombre de pilotes nécessaires) ne dépend donc pas du nombre d'antennes M . Si on veut avoir un grand nombre d'antennes M à la BS, il y a avantage à utiliser le schéma TDD en MIMO massive [7].

Mais la limitation du MIMO massive au mode de duplexage TDD peut constituer une contrainte à son usage dans la mesure où l'ingénierie de beaucoup de réseaux est fondée sur le FDD. Pour le moment, les travaux menés sur ce thème ont montré que moyennant certaines hypothèses, la contrainte propre au FDD pourrait être levée. Mais on ne sait pas si ces hypothèses sont réalistes. On en retiendra que l'utilisation de MIMO massive reste pour l'heure liée au mode TDD.

1.5.2 L'évolutivité :

Dans le système MIMO massive, la station de base reçoit les canaux via la formation de la liaison montante, à partir de la technique TDD. Le temps nécessaire pour l'estimation de canal ne dépend pas du nombre d'antennes à la station de base et par conséquent, le nombre d'antennes à la station de base peut être rendu aussi large que l'on veut sans augmenter les frais généraux d'estimation de canal. En outre, le traitement du signal au niveau de chaque utilisateur est très simple et ne dépend pas de l'existence d'autres utilisateurs ; à savoir, aucun traitement de signal à multiplexage ou à démultiplexage est effectué au niveau des utilisateurs. Augmenter ou diminuer le nombre d'utilisateurs d'un service n'affectera pas les activités des autres utilisateurs [8].

1.5.3 Propagation favorable :

Signifie que la matrice de canal entre le réseau d'antennes de la station de base et les utilisateurs est bien conditionnée. En raison de la loi des grands nombres, le canal entre les terminaux et la station de base peut être bien conditionné. Par conséquent, la technologie MIMO massive exploite l'hypothèse selon laquelle les vecteurs de canal sont presque orthogonaux.

Ce phénomène est appelé propagation favorable où seul un traitement linéaire est suffisant pour des performances optimales [8].

1.6 Avantages du MIMO massive :

- Efficacité spectrale élevée.
- Efficacité énergétique élevée.
- Traitement simple du signal.
- Augmentation du débit binaire.
- Faible TEB, haute fiabilité de la communication (Suivi des utilisateurs).

1.7 Types de MIMO massive :

1.7.1 Système MIMO mono-utilisateur :

Un système MIMO dit mono-utilisateur (SU-MIMO ou single user MIMO), correspond à une simple liaison MIMO entre deux points de l'espace.

Dans un système SU-MIMO, un nombre multiple d'antennes situés sur un seul appareil à la réception (n_R) reçoit des données d'un nombre multiple d'antennes situés à la transmission (n_T).

La **Figure 1.7** représente un système SU-MIMO.

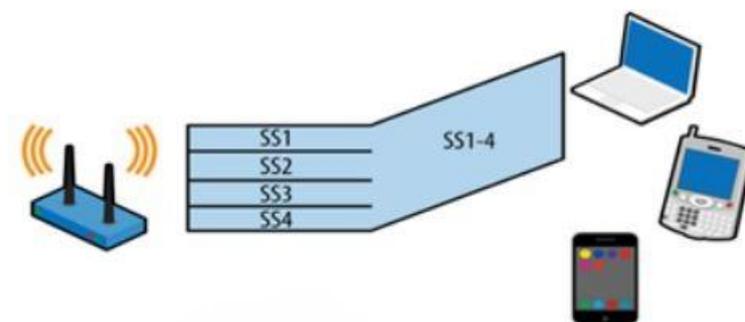


Figure 1.7 : Système SU-MIMO.

Les techniques de précodage peuvent permettre une amélioration de performances en termes d'accroissement de la fiabilité de la communication, qui est généralement mesurée en termes de gain et ordre de diversité obtenu par le précodage.

Considérons $n_T \times n_R$ le système MIMO à simple utilisateurs, avec $n_R \leq n_T$, où n_T et n_R sont respectivement les nombre d'antennes à la transmission et à la réception. On suppose que l'information sur l'état du canal est connue, que ce soit à la réception ou à la transmission.

Posons $(x_1, \dots, x_{n_T})^T$ le vecteur de symbole émis par n_T antennes à la transmission, dans un canal utilisé. Posons $H = \{ h_{ij} \}$, $i=1, \dots, n_R$, $j=1, \dots, n_T$, la matrice de canal à Coefficient $n_R \times n_T$. Le vecteur $n_R \times 1$ reçu est donné par :

$$\mathbf{y} = \mathbf{H} \mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (1.1)$$

Où \mathbf{H} de taille $M \times N$ est la matrice du canal ; \mathbf{x} , \mathbf{y} et \mathbf{b} représentent respectivement le vecteur signal émis de taille $N \times 1$, le vecteur signal reçu de taille $M \times 1$, et le vecteur bruit additif Gaussien de taille $M \times 1$. [9].

1.7.2 MIMO Massive multi-utilisateurs :

Un système MIMO dit multi-utilisateurs (MU-MIMO ou multi-user MIMO), concerne un ensemble de liaisons MIMO entre un ou plusieurs points de l'espace à l'émission et un ou plusieurs points de l'espace à la réception utilisant les mêmes ressources temps-fréquence. Cette utilisation des mêmes ressources temps-fréquence permet d'améliorer la capacité ou l'efficacité spectrale d'un réseau de transmission sans nécessairement augmenter la bande [6].

Les systèmes MU-MIMO requièrent l'exploitation des informations de canal de tous les utilisateurs à l'émission de manière à optimiser les liens vers chacun des utilisateurs en limitant les interférences générées sur les autres liens. Cette lutte anti-interférences à l'émission peut être envisagée de différentes manières telles l'exploitation de techniques d'alignement d'interférences par exemple [6].

C'est un système à multiples antennes M , avec K utilisateurs par station de base qui se caractérise par $M \gg K$ et qui fonctionne dans le mode TDD, qui utilise un processus linéaire pour la voie montante et descendante. C'est une stratégie de transmission multi antennes afin de supporter plusieurs utilisateurs actifs simultanément et traiter les techniques d'émission et réception très simplement pour atteindre un résultat presque optimal avec un nombre suffisant d'antennes [10].

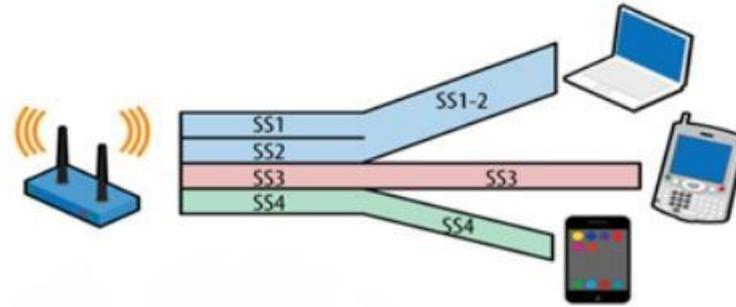


Figure 1.8 : Système MU-MIMO.

Le signal reçu sur la station de base d'un système MU-MIMO sur la liaison montante est :

$$\mathbf{y} = \sum_{k=1}^K \sqrt{P} \mathbf{u} \mathbf{h}_k s_k + \mathbf{n} \quad (1.2)$$

$$\mathbf{y} = \sqrt{P} \mathbf{u} \mathbf{H} \mathbf{S} + \mathbf{n} \quad (1.3)$$

\mathbf{y} est la matrice de signal reçu $M \times 1$,

$\mathbf{h}_k \in \mathbf{H}$. Ou $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1 \dots \mathbf{h}_k \dots \mathbf{h}_K]$ représente le vecteur de canal entre les antennes BS et le $k_{i\text{eme}}$ UT,

$\mathbf{s}_k \in \mathbf{S}$. Ou $\mathbf{S}_T = [\mathbf{s}_1 \dots \mathbf{s}_k \dots \mathbf{s}_K]$ représente le symbole transmis par le $k_{i\text{eme}}$ UT.

\mathbf{n} représente le bruit gaussien blanc additif (AWGN).

1.7.3 MU- Massive MIMO avec Multi-Cell scénario :

Dans ce cas, nous envisageons la restriction des systèmes MIMO multiutilisateurs cellulaires non coopératifs où M évolue sans limite. Dans MIMO massive multi-cellules, pour faire disparaître le bruit thermique et l'évanouissement de Rayleigh à petite échelle, il faut laisser M augmenter sans limite. Néanmoins, une interférence de cellule discrète causée par une contamination existera avec de nombreuses cellules [3].

L'estimation de canal calculée à l'aide de la station de base dans la cellule l est contaminée par la transmission pilote de la cellule j . La station de base de la cellule l transmettra son signal partiellement aux côtés des terminaux de la cellule adjacente. En raison de la formation de faisceau, le brouillage causé à la cellule j ne disparaît pas de manière asymptotique quand $M \rightarrow \infty$. [3].

Un système cellulaire multiutilisateur MIMO-OFDM avec des cellules hexagonales et des sous-porteuses NFFT est favorisé. Toutes les cellules desservent K terminaux indépendants et disposent de M antennes au niveau de la station de base. Les stations de base sont supposées non coopératives. La matrice de canaux composites $M \times K$ entre les K UT dans la cellule l et les BS dans la cellule j est notée \mathbf{H}_{jl} . En se basant sur la réciprocité, la matrice de canal de liaison descendante entre la station de base de la cellule j et les terminaux de la cellule l est présentée par \mathbf{H}_{jl}^T . Le signal reçu à la $j^{\text{ième}}$ BS sera le suivant:

$$y_j = \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K \sqrt{P} u_{h_{jlk}} s_{lk} + w \quad (1.4)$$

$$y_j = \sum_{l=1}^L \sqrt{P} u_{H_{jl}} s_l + w \quad (1.5)$$

1.7.4 MIMO massive distribuée :

Parmi les types de MU-MIMO, on trouve MIMO massive distribuée. Une capacité supérieure du système est fournie par MIMO massive distribuée ; ceci en utilisant des antennes déployées dispersées pour émettre et recevoir des signaux. L'un des mécanismes de MIMO massive

décaissée consiste à permettre la coopération entre les stations de base dans des cellules séparées, ce qui réduit les interférences entre les cellules. Cependant, la synchronisation devient un problème essentiel même pour les antennes distribuées dans la même station de base. Dans certains cas, la quantité massive d'antennes au niveau de la station de base peut en outre être positionnée à des endroits uniques (par exemple, au sommet des bâtiments). Dans ce cas, la synchronisation devient un problème, et l'interface RF, peu coûteuse, peut aussi causer de plus grands problèmes [3].

1.8 Comparaison entre MIMO et MIMO massive :

Contenu technologique	MIMO	MIMO massive
Le nombre d'antenne	≤ 8	≥ 100
Capacité de canal	Faible	haute
Gain de diversité	Faible	haute
Stabilité du lien	Faible	haute
Résistance au bruit	Faible	haute
Corrélation d'antenne	Faible	haute
Couplage	Faible	Faible

Tableau 1.1: Comparaison entre MIMO et MIMO massive. [11].

Et pour le MIMO massive :

- Faciliter l'allocation des ressources [3].
- Amélioration de l'efficacité spectrale SE.
- Quantité massif de degrés de liberté dans le domaine spatial.
- Bonnes performances système avec uniquement un schéma de pré-codage linéaire (simple), par ex Forçage nul, transmission du rapport maximal, erreur quadratique moyenne minimale.

1.9 Utilité pour la 5G :

Le monde du cellulaire commence vraiment à se lancer dans le MIMO massive qui est nécessaire pour la 5G. Le spectre disponible pour la 5G est limité, aussi l'efficacité spectrale est-elle très importante. Les réseaux 5G auront également besoin de connecter des milliards d'appareils. Pour cela, la précision millimétrique et l'efficacité énergétique du MIMO massive sont des atouts très importants.

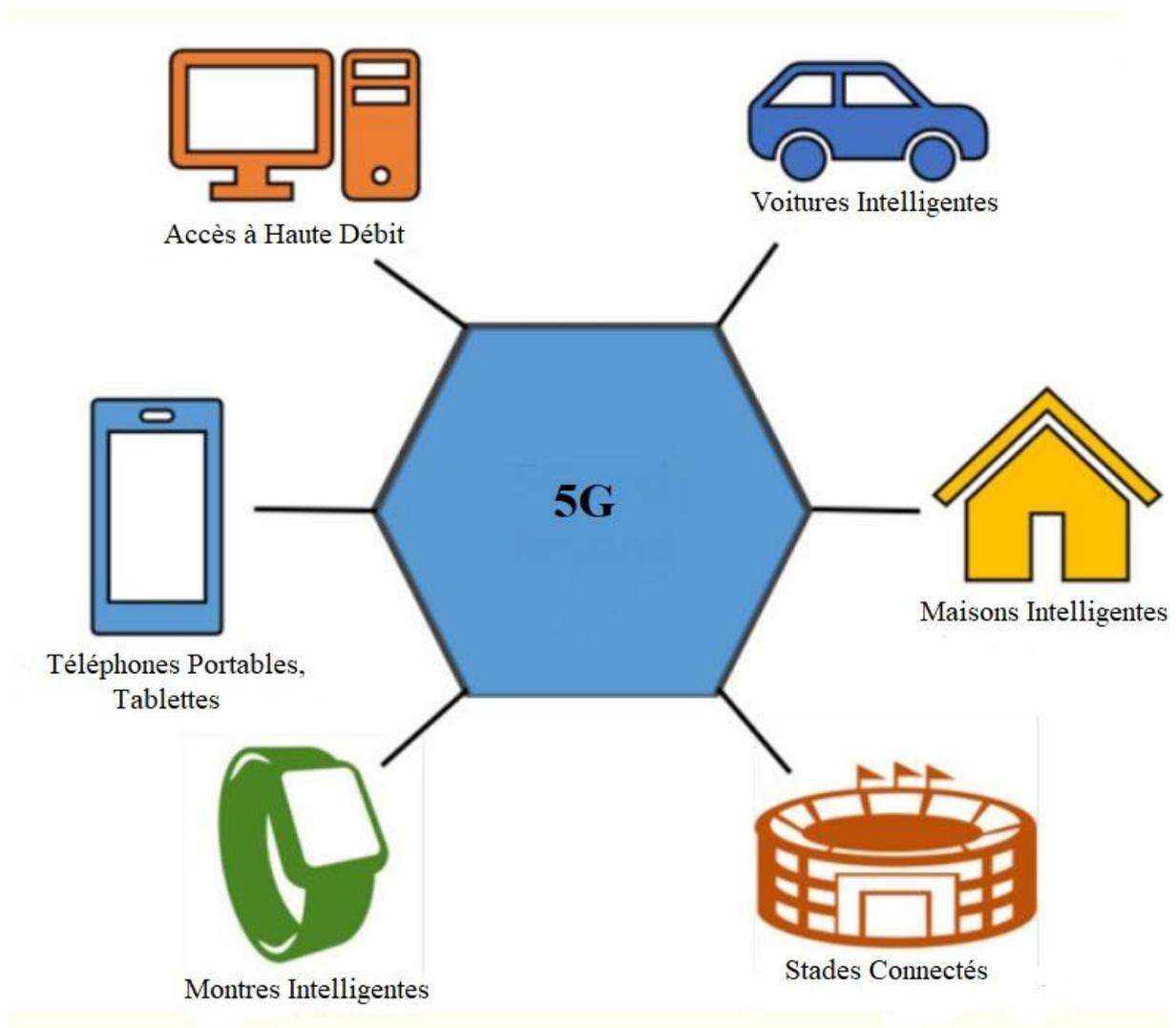


Figure 1.9 : Facteurs contribuant à une augmentation du trafic de données sans fil.

Au rythme effréné des innovations technologiques, notre monde actuel et futur devient de plus en plus connecté. L'décolle. Les voitures autopilotées (sans pilote) apparaissent à l'horizon. Et déjà, des réseaux sont en place pour établir des « villes intelligentes ». La 5G est sur le point d'investir tous ces domaines, et elle aura besoin de connecter des milliards d'appareils. Pour rendre cela possible, le MIMO massive devra être capable d'envoyer des données vers et à partir d'appareils mobiles de plus en plus nombreux et divers.

L'efficacité des systèmes MIMO massives a été validée dans divers environnements intérieurs et extérieurs. Il a également été prouvé que le système massif MIMO offre un fonctionnement robuste avec une fréquence radio de faible complexité et un circuit en bande de base.

La mise en œuvre matérielle d'un système MIMO massive a également été testée avec succès, et il a été prouvé que ces systèmes pouvaient être construits avec du matériel très peu complexe et peu coûteux pour les chaînes RF numériques en bande de base et analogiques. De plus, de nombreux algorithmes de précodage, de détection, d'ordonnancement (planification) et d'égalisation ont été conçus pour réduire davantage les coûts et la puissance.

Toutes ces nouvelles innovations et développements en MIMO massive favorisent un déploiement attractif et rentable de cette technologie pour la 5G, et au-delà, des réseaux sans fil [12].

Le MIMO massive est une technologie moderne, fiable et intéressante de tout point de vue, technique et économique. L'utilisation d'un nombre astronomique d'antennes permettra aux réseaux cellulaires de connecter de grands nombres d'utilisateurs, avec efficacité et fiabilité. Il se trouve que ces attributs sont également ceux dont on a besoin pour implémenter la 5G. Avec des milliards d'appareils en ligne et un spectre de fréquences limité, la 5G aura besoin du MIMO massive pour nous permettre de nous tourner vers l'avenir [13].

1.10 Défis des systèmes MIMO massives :

1.10.1 La contamination des séquences pilotes :

Ce phénomène pose un sérieux problème en MIMO massive car il fait apparaître une borne maximale qui limite les performances du système. En effet, en considérant un nombre d'antennes

très élevé à la BS ($M \rightarrow \infty$), la focalisation spatiale devient suffisamment précise (beamforming) et ceci empêche de considérer toutes les interférences intracellulaires comme négligeables.

En contrepartie, les interférences intercellulaires proviennent de la nature même des BS des cellules adjacentes à focaliser l'énergie. Ainsi, augmenter le nombre d'antennes ne fait qu'accroître leur potentiel à interférer. Ce comportement est illustré sur la **Figure 1.10**. Posons j la cellule considérée et ($l \neq j$) les cellules adjacentes exploitant les mêmes ressources temporelles et fréquentielles. Sous l'hypothèse d'un M très grand ($M \rightarrow \infty$), le rapport signal sur interférences (SIR) en réception des pilotes au niveau de la BS massive ne dépend plus que du rapport entre les pertes en espace libre de l'utilisateur ciblé, représenté par $\beta_k^{(j)}$ pour l'utilisateur K de la cellule j , et la somme des pertes en espace libre des cellules adjacentes :

$$\text{SIR}_k^{(j)} \xrightarrow{M \rightarrow \infty} \frac{\beta_k^{(j)}}{\sum_{l \neq j} \beta_k^{(l)}} \quad (1.6)$$

En effet, la BS massive de la cellule j va recevoir une somme de pilotes identiques **Figure 1.10**, chacun pondéré par sa propre atténuation en espace libre. Le précodage permettant la focalisation du faisceau vers l'utilisateur va alors percevoir l'utilisateur comme étant à plusieurs endroits différents et va répartir l'énergie vers l'ensemble. Cela a pour conséquence directe une perte d'énergie utile et la création d'interférences au niveau des utilisateurs des cellules adjacentes [14].

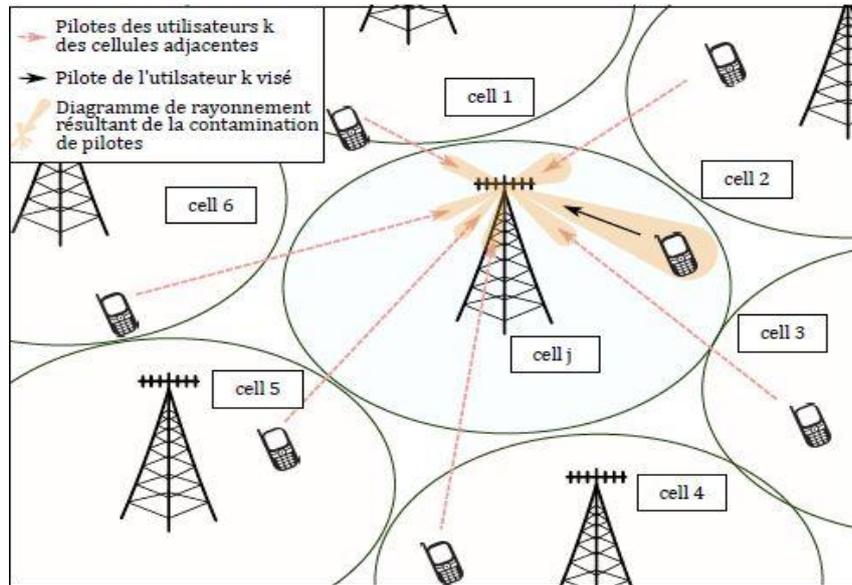


Figure 1.10 : Contamination de pilotes.

Lorsque le nombre d'antennes à la BS est supérieur au nombre d'utilisateurs $M > K$, on démontre que le nombre de degrés de liberté (DoF) du système n'augmente pas avec M mais avec le nombre d'antennes en réception (plus d'énergie captée). En revanche cela décuple la complexité d'un système MIMO massive. L'exploitation de K parmi M DoF permet d'effectuer la transmission et laisse les $(M-K)$ degrés restant pour être exploités à des fins énergétiques et autres besoins dépendant des scénarios. Les auteurs montrent que le nombre d'antennes requis pour dépasser un certain seuil dépend du type de précodeur utilisé. En effet, les précodeurs linéaires simples de type filtre adapté (cf. CB, EGT et DBS) nécessitent plus d'antennes que des précodeurs à inversion matricielle, plus complexes (cf. ZF et MMSE). Il y est également démontré que plus la contamination des pilotes est forte, moins les précodeurs complexes sont efficaces par rapport aux précodeurs simples, ce qui signifie que l'utilisation des filtres adaptés est plus intéressante dans ce genre de scénario [14].

1.10.2 Propagation défavorable :

Massive MIMO fonctionne théoriquement dans des environnements de propagation favorables. Cependant, dans la pratique, il peut y avoir des environnements de propagation qui ne le sont

pas. Par exemple, dans les environnements de propagation où le nombre de diffuseurs est petit par rapport au nombre d'utilisateurs, ou quand des canaux des différents utilisateurs BS partagent quelques diffuseurs communs, le canal n'est plus favorable. Pour résoudre ce problème, il existe une possibilité qui est de répartir les antennes BS sur une plus grande surface [15].

1.11 Conclusion :

La technologie MIMO massive est pour l'industrie une technologie clé dans la future 5G. Elle permet d'améliorer considérablement la capacité des canaux, l'efficacité énergétique et l'efficacité spectrale du système sans fil de télécommunication.

En particulier, le canal de transmission est le plus sensible aux effets du défaut de transmission comme le trajet multiple, l'effet doppler, l'évanouissement, etc... Et, c'est pour cela que la technique de diversité est introduite en utilisant la technologie d'antenne MIMO qui permet d'émettre et de recevoir des signaux simultanément via plusieurs antennes. Pour le MIMO massive, ce nombre d'antennes atteint plus d'une centaine d'éléments [8]. MIMO massive est capable de servir un très grand nombre d'utilisateurs simultanément et dans la même fréquence. Cette technologie MIMO massive ouvrira de nouveaux horizons et offrira un débit de données et une capacité de réseau beaucoup plus importants. Dans le prochaine chapitre on va répondre à la question suivants : Quels types d'antennes le MIMO massive utilise ?

Chapitre 2 :

Antennes Intelligentes pour les MIMO massives

2.1 Introduction :

Les systèmes de communications sans-fil traditionnels utilisent généralement des antennes classiques omnidirectionnelles ou tri-sectorisées. La répartition spatiale de l'énergie rayonnée par ces antennes est déterminée de façon à optimiser la couverture. Cependant, ces diagrammes sont configurés à la fabrication et ne peuvent pas s'adapter aux conditions de propagation, d'où la dissipation dans toutes les directions de la puissance. Mais comme les utilisateurs ne reçoivent des signaux qu'en provenance de certaines directions, le résultat est donc une perte d'énergie et une pollution de l'environnement électromagnétique. Par conséquent, on a les interférences entre systèmes qui deviennent problématiques : limitation du nombre d'utilisateurs, dégradation de la qualité des communications et restriction de la portée de la station de base.

Grâce au remarquable développement du traitement des signaux, les réseaux antennaires pourraient être employés pour recevoir dans une direction particulière l'énergie électromagnétique (ou l'information), tout en rejetant l'information, ou annulant l'énergie dans les directions non désirables. Par conséquent, les réseaux pourraient être employés pour atténuer ou bloquer carrément les interférences orientées vers le système de communication. Cependant, ce développement dans le traitement des signaux a mené au concept des réseaux d'antennes adaptatives qui appartiennent à une technologie vitale dite les antennes intelligentes. Ces réseaux ont adapté leur rayonnement ou leur modèle de réception en fonction de l'environnement dans lequel ils évoluent. Ceci a encore contribué, et d'une manière significative, à la capacité disponible des systèmes de communication sans fil.

2.2 Antennes réseaux :

Un réseau d'antennes est un ensemble d'antennes élémentaires, réparties dans l'espace, et dont les sorties sont pondérées en amplitude et /ou en phase avant d'être sommées entre elles.

Le diagramme de rayonnement du réseau dépend de l'amplitude et de la phase des signaux émis sur chaque source. Grâce à cette commande des sources en amplitude et/ou phase, les antennes réseaux peuvent produire des diagrammes de rayonnement ayant une forme voulue dans les directions désirées, par exemple par la création d'un lobe dans la direction du signal utile et un zéro dans la direction du signal interférant ou la création de plusieurs lobes simultanément en direction de plusieurs utilisateurs. Une antenne adaptative peut donc être définie comme étant un réseau capable de modifier en temps réel, son diagramme de rayonnement grâce à un outil numérique de synthèse [16].

Les antennes réseaux peuvent avoir plusieurs configurations géométriques ; ces configurations sont d'une grande variété, mais on peut les grouper comme suit :

- les réseaux linéaires : alignement des sources sur une droite,



Figure 2.1 : Réseau linéaire.

- les réseaux planaires : les sources sont disposées sur un plan,

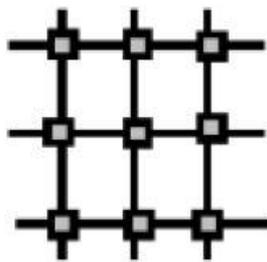


Figure 2.2 : Réseau planaire.

- les réseaux circulaires : les sources sont disposées sur un cercle,

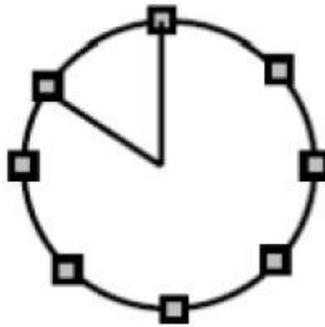


Figure 2.3 : Réseau circulaire.

- les réseaux volumiques : les sources sont réparties dans un volume [17].

Le champ total rayonné par le réseau est déterminé par l'addition des vecteurs champs rayonnés par les différents éléments. Pour rendre un modèle très directif, il est essentiel que les champs interfèrent de manière constructive dans les directions exigées et interfèrent nuisiblement dans l'espace restant [16].

Il y a plusieurs facteurs qui contribuent à la formation du diagramme de rayonnement de réseau :

- la configuration géométrique (linéaire, circulaire, planaire, volumique),
- l'espacement entre les sources,
- l'amplitude d'excitation pour chaque élément,
- la phase d'excitation pour chaque élément,
- la polarisation de chaque élément,
- le diagramme élémentaire [17].

2.3 Antennes intelligentes :

Une antenne intelligente est une structure antennaire composée de plusieurs éléments d'antennes directionnels où le signal de ces éléments est traité d'une manière adaptative afin d'exploiter le domaine spatial du canal radio-mobile. La technologie d'antenne intelligente

peut considérablement améliorer les performances et l'économie du système sans fil pour un ensemble d'utilisateurs potentiels. Elle permet aux opérateurs de réseaux cellulaires et de boucle locale sans fil de réaliser une amélioration significative dans la qualité du signal, la capacité du réseau, et la couverture.

En réalité, les antennes ne sont pas intelligentes mais ce sont plutôt leurs systèmes qui le sont. En général, un système d'antenne intelligente combine un réseau d'antennes avec une capacité de traitement numérique de signal pour transmettre et recevoir d'une manière adaptative et spatialement sensible. Autrement dit, un tel système est capable de modifier automatiquement la direction des diagrammes de rayonnement en fonction de l'environnement du signal. Ceci peut augmenter considérablement les caractéristiques de performance (comme la capacité) d'un système sans fil.

Les antennes intelligentes (aussi connus comme les antennes réseau adaptatif et les multi-antennes) sont des réseaux d'antennes avec des algorithmes intelligents de traitement du signal intégrés pour identifier une signature de signal spatial telle que la direction d'arrivée du signal qui est utilisée pour calculer les vecteurs de formation du faisceau, ou pour suivre et localiser le faisceau de l'antenne sur des cibles mobiles.

Une antenne intelligente est un système antennaire de communication numérique sans fil profitant de l'avantage de l'effet de la diversité au niveau de la source (émetteur), au niveau de la destination (récepteur), ou aux deux niveaux en même temps. L'effet de diversité implique la transmission et / ou la réception des multiples ondes radio fréquence (RF) pour augmenter la vitesse de données et réduire le taux d'erreur. Le résultat est un signal de mauvaise qualité au niveau du récepteur en raison du décalage de la phase. L'interférence du co-canal est une interférence entre deux signaux qui fonctionnent à la même fréquence. Une antenne intelligente permet d'assurer une plus grande capacité dans les réseaux sans fil en réduisant efficacement les multi-trajets et les interférences co-canal [18].

2.4 Avantage des antennes intelligentes :

L'utilisation des antennes intelligentes a de nombreux avantages qui peuvent être résumés comme suit :

- Annulation des brouillages co-canal, et donc une augmentation du rapport signal à interférent (RSI). L'annulation dans les directions des interférents est réalisée en formant des zéros dans le diagramme de rayonnement (formation de voies).
- Augmentation de la portée grâce au gain obtenu sur le rapport signal à bruit (RSB). Le lobe principal de l'antenne est orienté dans la direction du mobile, une localisation du mobile dans l'espace est donc nécessaire (d'où le terme "antenne intelligente").
- Limitation de la dispersion des retards en réduisant l'effet des trajets multiples: augmentation des débits, diminution de la complexité de l'égaliseur dans la chaîne de réception.
- Augmentation de la capacité:
 - Dans les systèmes cellulaires, l'annulation des interférences co-canal permet une réutilisation plus importante des fréquences (diminution du nombre de cellules par motif).
 - Technique d'Accès Multiple par Répartition Spatiale (AMRS ou SDMA: Spatial Division Multiple Access), dans une même cellule, plusieurs utilisateurs qui occupent le même canal (temps, fréquence ou code) peuvent être séparés spatialement par l'antenne à condition que leurs écarts angulaires soient suffisants.
- Meilleurs services: l'utilisation des systèmes à antenne intelligente permet au réseau d'avoir accès aux informations spatiales sur les utilisateurs. Cette information peut être envoyée pour évaluer la position des utilisateurs avec beaucoup plus de précision que dans le réseau existant. Ceci peut être appliqué dans des services comme ceux des appels d'urgence.

- Dépenses réduites: à cause du rendement de la puissance fournie par le système à antenne intelligente en combinant les entrées des multiples éléments pour optimiser le gain disponible vers l'utilisateur, et qui a pour résultat les coûts réduits d'amplificateur et la faible consommation d'énergie.
- Meilleure sécurité : Dans une société qui est de plus en plus dépendante de la conduite des affaires et de la transmission d'informations personnelles, la sécurité est une question primordiale. L'utilisation des systèmes à antenne intelligente diminue le risque de piratage de connexion. L'intrus doit être situé dans la même trajectoire que l'utilisateur quand on le regarde à partir de la station de base.
- Compatibilité: La technologie d'antenne intelligente peut être utilisée avec différentes techniques d'accès multiples, telles que TDMA, FDMA et CDMA. Elle est compatible avec presque toutes les méthodes de modulation et de bandes passantes [18].

2.5 Types d'antennes intelligentes :

Il existe deux systèmes d'antennes intelligentes :

- Le système à faisceaux commutés.
- Réseau adaptatif.

Les deux techniques ont pour objectif d'accroître le gain dans la direction de l'utilisateur. Ceci est réalisé en dirigeant le lobe principal dans la direction de l'utilisateur désiré et les zéros vers la direction des interférences [19].

- **Le système à faisceaux commutés :**

Ce système est composé de multiples faisceaux fixes qui ont une grande sensibilité dans des directions particulières. Le système détecte le signal le plus puissant et la commutation d'un faisceau à un autre se fait lorsque le mobile se déplace le long du secteur. Un système à

faisceaux commutés est formé essentiellement d'un réseau d'antennes lié à un réseau conformateur de faisceau (appelé aussi réseau d'alimentation de faisceaux), ce dernier est lié à un système de commutation permettant de choisir le faisceau le plus adéquat afin de localiser le signal d'intérêt propre à chaque usager. Les systèmes d'antennes à commutation faisceaux partagent l'espace angulaire en secteurs chacun contenant un diagramme de rayonnement prédéterminé. Lorsque l'utilisateur entre dans la zone de couverture du système et qu'il est détecté, le secteur où il se situe est déterminé par l'antenne et le système commute sur le faisceau correspondant.

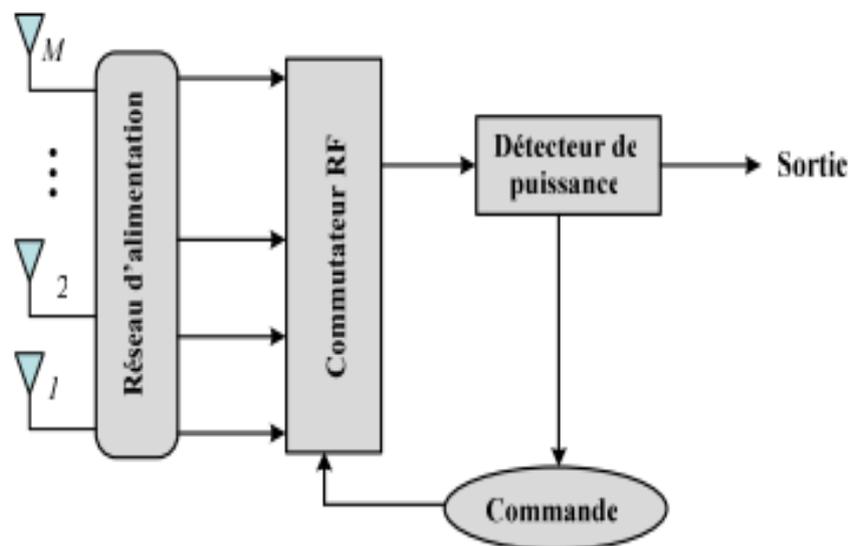


Figure 2.4 : Système à faisceaux commutés.

Si le mobile se trouve au bord de l'azimut du faisceau, le signal fort subi une dégradation rapide avant que l'utilisateur ne puisse se commuter d'un micro-secteur à l'autre. De plus, le système à faisceaux commutés ne distingue pas entre un signal désiré et les signaux de brouillage. Si le signal de brouillage se trouve à l'intérieur du faisceau sélectionné, la qualité du signal sera alors médiocre [16].

- **Réseaux adaptatifs :**

Ce type de système se compose d'un réseau d'antennes et d'un processeur récepteur adaptatif en temps réel qui attribue des poids aux éléments de l'antenne réseau afin d'optimiser le signal

de sortie selon des algorithmes de contrôle prédéfinis. Un système d'antennes réseau adaptatives est capable, grâce à une boucle retour de décision interne, de modifier son diagramme de rayonnement, sa réponse fréquentielle et d'autres paramètres, pendant son fonctionnement.

Les systèmes d'antennes adaptatives représentent les systèmes les plus avancés des systèmes d'antennes intelligentes. De même que pour le système à commutation faisceaux, l'antenne adaptative adapte son diagramme de rayonnement en fonction de la position des utilisateurs et des signaux parasites mais, contrairement au premier (à commutation faisceaux), ce dernier n'utilise pas de diagramme de rayonnement préétabli.

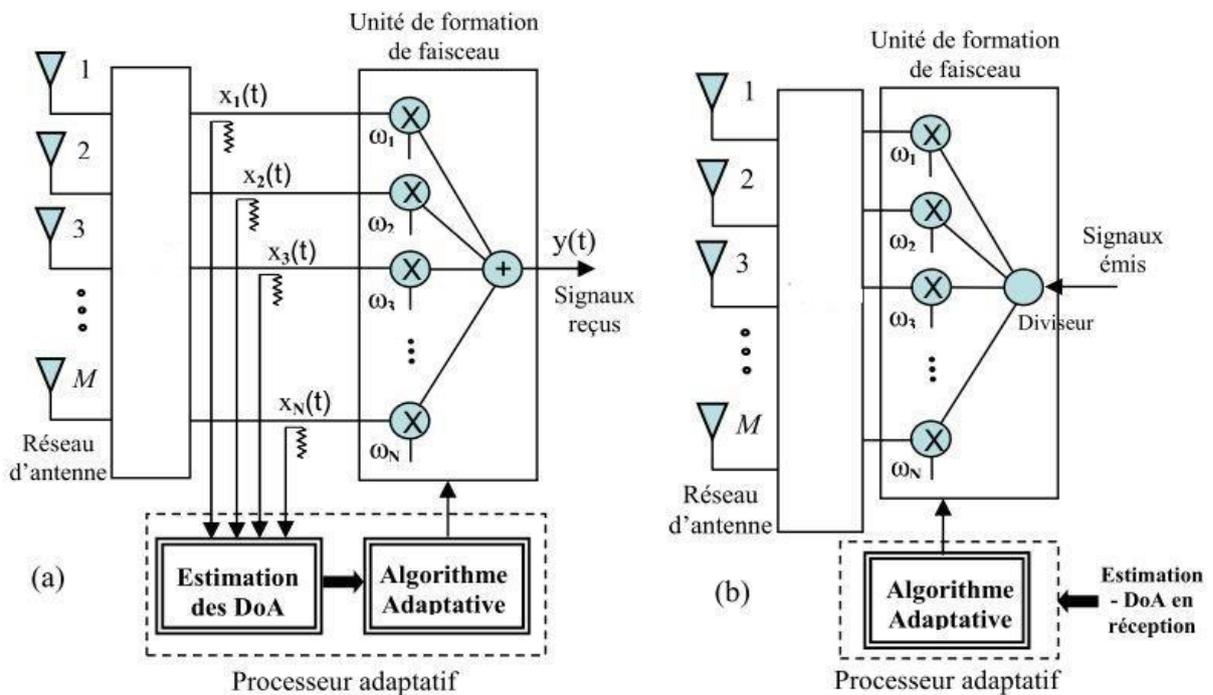


Figure 2.5 : Structure et principe du système adaptatif en (a) Réception et en (b) Emission.

C'est cette structure qui est la plus utilisée dans le domaine d'antenne intelligente pour la réalisation du démonstrateur. Son principe est le suivant : d'abord, la station de base intelligente capte et détermine les directions d'arrivées (DoA) des sources émises dans son environnement électromagnétique en utilisant les algorithmes de détection de DoA. Ensuite, le système identifie et sépare le signal utile provenant de l'utilisateur des autres signaux parasites. Enfin, il calcule les pondérations et forme le faisceau d'énergie orienté vers le

signal utile pour suivre un mobile tout au long de la communication et crée des zéros dans les directions interférentes pour limiter l'interférence créé par les autres signaux émis et ainsi réduire le niveau des signaux brouilleurs émis par d'autres mobiles [16].

2.6 Les algorithmes adaptatifs :

Il s'agit d'algorithmes capables de changer automatiquement leurs comportements en fonction de leurs contextes d'exécution pour atteindre des performances optimales.

Les algorithmes de formation de voies sont conçus pour optimiser certains critères spécifiques, tel que le critère de Minimum Variance Distortionless Response (MVDR), le critère de Maximum Signal to Interference plus Noise Ratio (MSINR), et le critère de Minimum Mean Square Error (MMSE). Le dernier critère est souvent utilisé comme critère d'optimisation où le filtre spatial est optimisé pour réduire au minimum la valeur de la moyenne carrée de l'erreur du signal. Lorsque l'optimum d'un critère peut être atteint par un algorithme, ce dernier est qualifié d'optimal au sens du critère considéré [18].

Plusieurs algorithmes, différents en complexité, existent pour obtenir les pondérations optimales. Ces algorithmes d'adaptation peuvent être divisés en deux groupes principaux:

- Méthodes aveugles.

- Méthodes non aveugles.

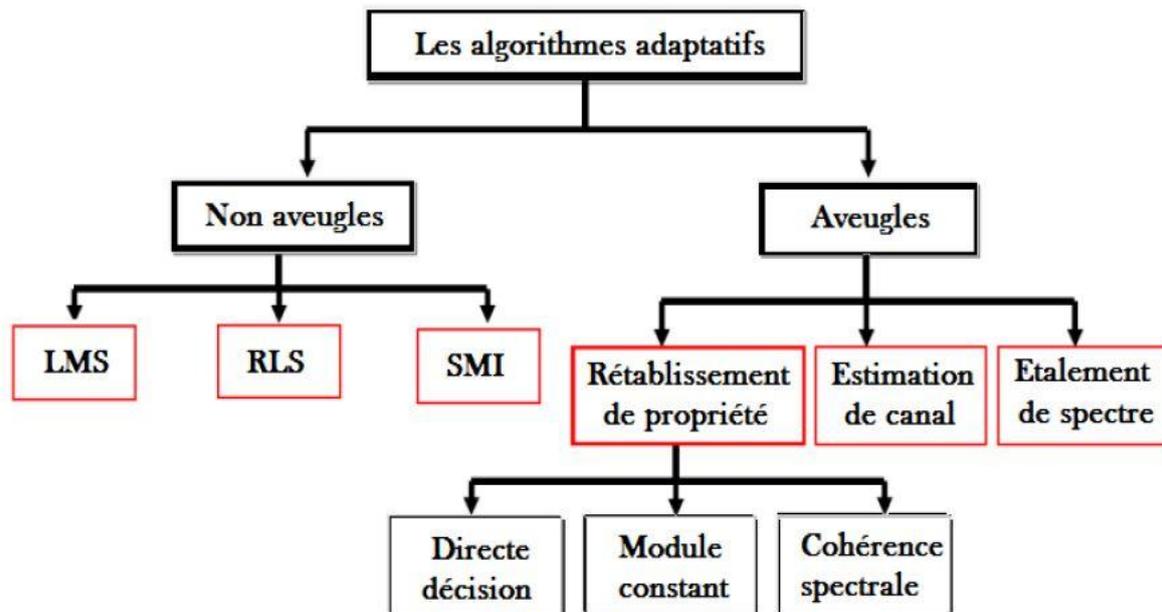


Figure 2.6 : Classification des algorithmes adaptatifs.

- Méthodes non aveugles :

Dans les méthodes non aveugles, un signal de référence (t) est utilisé pour ajuster le vecteur de pondération. Le signal (t) est connu par l'émetteur et le récepteur. Il est envoyé par l'émetteur pendant une période de référence au récepteur. L'algorithme formateur de faisceau utilise le signal de référence pour calculer le vecteur de pondération optimal. En pratique, le récepteur ne connaît pas le signal émis sur toute la durée d'une communication mais seulement sur un laps de temps associé à une séquence d'apprentissage.

- Méthodes aveugles :

Le terme aveugle vient du fait que ces méthodes dites aussi autodidactes ont pour but de restituer directement la séquence d'information transmise sans nécessiter ni l'accès à une séquence d'apprentissage, ni l'identification préalable du canal. Les détecteurs aveugles exploitent la connaissance de la signature temporelle de l'utilisateur désiré. Cette connaissance est également utilisée pour estimer la signature spatiale (la réponse des antennes) de l'utilisateur en question [18].

Les algorithmes les plus utilisés sont :

- L'algorithme à gradient stochastique (LMS) :
- L'algorithme des moindres carrés récurrents (RLS) :
- L'algorithme d'inversion directe de la matrice de convergence (DMI) :
- Algorithme à module constant (CMA- Constant modulus algorithm).

2.7 Antennes MIMO Beamforming :

Pour récupérer ou émettre des signaux dans des directions particulières, les antennes intelligentes utilisent la formation de faisceaux ou Beamforming, c'est une technique de traitement de signal. Elle peut être considérée comme un filtre spatial pour chaque direction d'intérêt qui favorise le gain pour la direction souhaitée et atténue les signaux émis dans les directions non souhaitées. Pour le contrôle et la formation des diagrammes de rayonnement, il est nécessaire d'appliquer sur les éléments rayonnants une pondération correspondant aux critères fixes comme la maîtrise du niveau des lobes secondaires, la maximisation du gain dans une direction donnée [30].

Nous proposons un système de communication de M antennes d'émission et N antennes de réception qui est illustré sur la **Figure 2.7** :

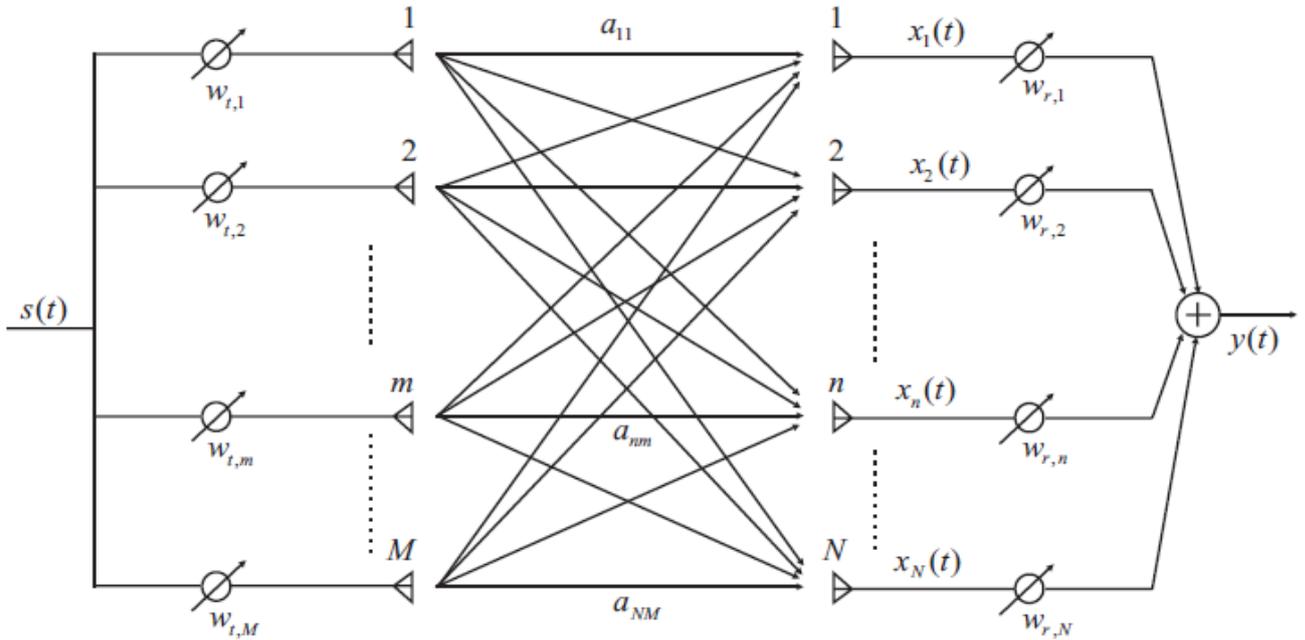


Figure 2.7 : Configuration de canal MIMO avec Beamforming [20].

Le signal de sortie $y(t)$ du système est donné par :

$$y(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} w_{r,n}^* a_{n,m} w_t s(t) + \sum_{n=0}^{N-1} w_{r,n}^* n_n(t) \quad (2.1)$$

L'équation $y(t)$ peut être exprimée sous une forme vectorielle :

$$y(t) = W_r^H A W_t(t) + W_r^H(n) \quad (2.2)$$

Où :

A : c'est la matrice de transmission, où a_n , représente la réponse de gain de canal entre le m -ième élément d'antenne dans l'émetteur et le n -ième élément d'antenne dans le récepteur.

$S(t)$: c'est le signal de transmission distribué au réseau d'antennes et multiplié par la pondération complexe w_t , pour le m -ième élément.

$n(t)$: Le bruit blanc gaussien multiplié par le poids complexe w_r pour le n -ième élément.

$$W_r = [w_{r,0}, w_{r,1}, \dots, w_{r,N-1}]^T$$

Et :

$$W_t = [w_{t,0}, w_{t,1}, \dots, w_{t,M-1}]^T$$

$(.)^H$: représente le transposé hermitien.

$(.)^*$: représente le conjugué.

$(.)^T$: représente le transposé du vecteur(ou matrices) [20].

2.8 Antennes MIMO massive Beamforming :

Les antennes MIMO massive sont constitués par un grand nombre de dipôles élémentaires appelés aussi éléments rayonnants de petite taille, et ceci est rendu possible grâce à l'utilisation de bandes de fréquences plus hautes. L'utilisation d'un grand nombre de dipôles élémentaires permet de bénéficier de plusieurs émetteurs/récepteurs. Dans ce cas, un émetteur/récepteur peut utiliser soit une seule antenne élémentaire soit un regroupement d'antennes élémentaires [21].

Si le nombre d'antennes à une BS est significativement plus grand que le nombre d'utilisateurs desservis, le canal de chaque utilisateur depuis la BS est presque orthogonal à celui de tout autre utilisateur. Cela permet à des techniques de traitement d'émission ou de réception très simples, telles que le Beamforming, d'être pratiquement optimales avec suffisamment d'antennes même en présence d'interférences.

Plus le nombre d'antennes est élevé au niveau de la BS, plus le lobe principal du diagramme de rayonnement dirigé vers un utilisateur est étroit et plus la réjection d'interférences est forte. C'est l'un des principaux atouts d'un système MIMO massive Beamforming [14].

L'utilisation de réseaux d'antennes de très grande taille aux BS apporte de nouveaux problèmes, tels que des coûts de traitement de matériel et de signal considérablement accrus. L'installation des réseaux d'antennes de grande taille peut être difficile en pratique, ce qui stimule la conception et la mise en œuvre de réseaux d'antenne pour s'adapter avec souplesse à l'environnement complexe [31].

Le MIMO massive améliore la couverture des zones surchargées comme les centres commerciaux, les gares, les stades ou les aéroports. Il permet aussi de réduire la latence, d'augmenter le niveau de qualité du SNR (rapport signal / bruit), d'améliorer la fiabilité et le débit de transmission. Et en intégrant le Beamforming, il permet de diminuer la pollution électromagnétique environnante en ciblant le récepteur [21].

2.9 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons effectué une étude particulière de l'antenne intelligente qui a été l'objet, récemment, de plusieurs travaux. Le domaine des antennes intelligentes représente une forte combinaison entre les réseaux antennaires et le traitement du signal. En effet, l'intelligence des antennes réseaux est contenue non pas dans leurs géométries mais dans leurs traitements. Parler de traitement d'antennes est donc évident. Nous avons commencé par l'antenne réseaux et l'antenne intelligente en introduisant ensuite les avantages des antennes intelligentes. Nous avons aussi détaillé les différents types de systèmes à antenne intelligente.

Une grande attention a été consacrée à la fin du chapitre afin de montrer les différents domaines touchés et concernés par l'utilisation de la technologie d'antennes intelligentes qui a vraiment suscité beaucoup d'intérêt dans le monde entier ces dernières années notamment avec l'essor considérable des communications sans fil. L'intérêt d'intégrer les antennes intelligentes dans les différents systèmes de communications sans fil réside dans la possibilité de diminuer les interférences et donc d'augmenter la capacité des réseaux et leurs performances.

Chapitre 3 :

Résultats de Simulation

3.1 Introduction :

Après avoir finalisé la partie théorique, nous passons dans ce chapitre à la partie simulation. Nous proposons dans le cadre de cette simulation, l'utilisation du langage Matlab.

Nous allons commencer par une présentation de la plateforme choisie pour cette simulation. Ensuite nous présenterons la chaîne de transmission pour le système MIMO-OFDM Beamforming avec une description de chaque bloc pour cette chaîne.

Le terme MIMO est utilisé pour décrire un système dans lequel plusieurs émetteurs ou plusieurs récepteurs sont présents. Dans la pratique, le système peut prendre de nombreuses différentes formes, telles que le système SIMO ou le système MISO.

La combinaison des techniques MIMO et OFDM a été adoptée dans les normes sans fil récentes, pour fournir un débit de données plus élevé. Comme la technique MIMO utilise des réseaux d'antennes, le Beamforming peut être adoptée pour améliorer le rapport signal/bruit **SNR** reçu, ce qui réduit le taux d'erreur binaire **BER**. Alors dans notre simulation nous étudierons l'impact du nombre d'antenne, la puissance d'émission, la puissance d'interférence, les angles du récepteur et d'interférence, et le nombre de trajet sur les performances du système en terme de Taux d'erreur binaire BER et de diagramme de constellations.

3.2 Le langage utilisé (Matlab) :

Pour étudier des projets et fait des simulations il faut choisir le bon environnement de la simulation ou de la programmation .Cela se fait en fonction de plusieurs facteurs : disponibilité de nombreuses fonctions de communication avec d'autres environnements, résistance de l'assemblage et facilité d'utilisation...etc.

Nous avons utilisé les outils logiciels MATLAB® pour réaliser les différentes simulations de notre système. Ce dernier est un langage de calcul scientifique de haut niveau et un environnement interactif de développement d'algorithmes, de visualisation et d'analyse de données, voire de calcul numérique (MATLAB signifie MATrixLABoratory).

MATLAB c'est un langage basé sur les matrices, il allie mathématique, modélisation graphique, programmation et dispose d'une large bibliothèque de fonctions intégrées et pré-écrites avec des notations simples et puissantes pour de nombreuses tâches de calculs communes par rapport aux autres simulateurs. Ces fonctions peuvent être construites dans tous les langages de programmation, MATLAB permet de les regrouper dans un seul endroit et permet aussi de résoudre les problèmes scientifiques et techniques.

3.3 La technique MIMO-OFDM :

L'association des deux systèmes MIMO et OFDM permet d'augmenter à la fois la vitesse de transmission, la portée et la robustesse de la liaison radio. Afin de réaliser cette combinaison, on applique l'OFDM sur plusieurs antennes qui transmettent les informations en parallèle [24].

3.3.1 La chaîne de transmission :

La **figure 3.1** illustrent, respectivement, le schéma bloc simplifiée de l'émetteur et du récepteur du système MIMO-OFDM. À l'émission, les données qui arrivent de la source d'information sous forme de bits, sont codés, étalés puis modulés en OFDM. Le signal résultant sera amplifié avant qu'il soit transmis via le réseau d'antennes.

A la réception, le signal reçu via le réseau d'antennes sera amplifié avant qu'il soit démodulé en OFDM et désétalé. À la fin, le décodage numérique est effectué pour retrouver le flux de données envoyé initialement.

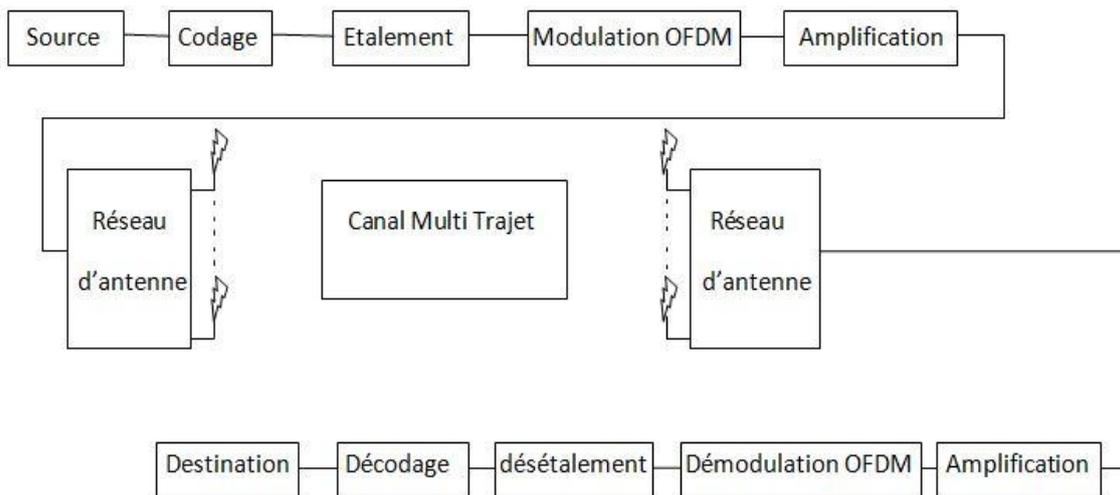


Figure 3.1: Chaîne de transmission MIMO-OFDM.

3.3.2 Description des blocs :

Source : La source fournit un message qui est une séquence de bits (le signal). Celui-ci peut être analogique ou discret. Nous nous intéresserons aux communications dites "numériques" le signal est donc discret et converti en binaire (numérisation).

Codage : Pour permettre au récepteur de pallier aux erreurs de transmission, le codage doit structurer le message [27]. Le codage consiste à associer à un bloc de données \mathbf{d} de k symboles issus de la source d'information un bloc \mathbf{c} , appelé mot de code, de n symboles avec $n \geq k$. La différence $(n-k)$ représente la quantité de redondance introduite par le code. Le rapport k/n est appelé rendement ou taux de codage du code. La connaissance de la règle de codage en réception permet de détecter et de corriger, sous certaines conditions, des erreurs [25].

Etalement : On peut définir un système d'étalement du spectre comme un système dans lequel l'énergie moyenne du signal émis se répartit sur une bande de fréquences beaucoup plus large que la bande de fréquences des informations proprement dite [28].

Modulation OFDM :

Parmi les types particuliers de transmissions multi-porteuses on trouve la modulation OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) dont l'originalité est de multiplexer l'information sur des sous-porteuses orthogonales. Dans l'hypothèse où les bandes passantes de ces sous porteuses sont suffisamment étroites, les distorsions induites par un canal sélectif en fréquence sont alors limitées à une simple atténuation sur chacune d'elles. Cette caractéristique représente un avantage certain pour cette modulation face à une transmission à porteuse unique, du fait de la simplicité du Système d'égalisation nécessaire en réception. En outre, la condition d'orthogonalité des sous-porteuses permet leur recouvrement réciproque sans interférence de l'une sur l'autre et accorde donc une haute efficacité spectrale au système. Enfin, les interférences entre sous-porteuses et les interférences entre trames induites par le canal étant fortement limitées [24].

- Principe de la modulation OFDM :

L'OFDM consiste à répartir les symboles sur un grand nombre de porteuses à bas débit, à l'opposé des systèmes conventionnels qui transmettent les symboles en série, chaque symbole occupant alors toute la bande passante disponible. Pour répartir les données à transmettre sur les N porteuses, les symboles c_k sont groupés par paquets de N. Les symboles c_k sont des nombres complexes ($c_k = a_k + jb_k$) définis à partir des éléments binaires par des constellations souvent de type MAQ de 2^n états (4, 16, 64...) [24].

La séquence de N symboles c_0, c_1, \dots, c_{N-1} constitue un symbole OFDM. Le $k_i^{\text{ème}}$ symbole module un signal de fréquence f_k . Le signal résultant s'écrit sous forme complexe :

$$P_k(t) = c_k e^{2j\pi f_k t} \quad (3.1)$$

L'enveloppe complexe du signal $s(t) = s_I(t) + js_Q(t)$ correspondant à l'ensemble des N symboles réassemblés en un symbole OFDM **Figure 3.2 :**

$$S(t) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{2j\pi f_k t}, t \in [0, T] \tag{3.2}$$

Où T est la durée du symbole OFDM.

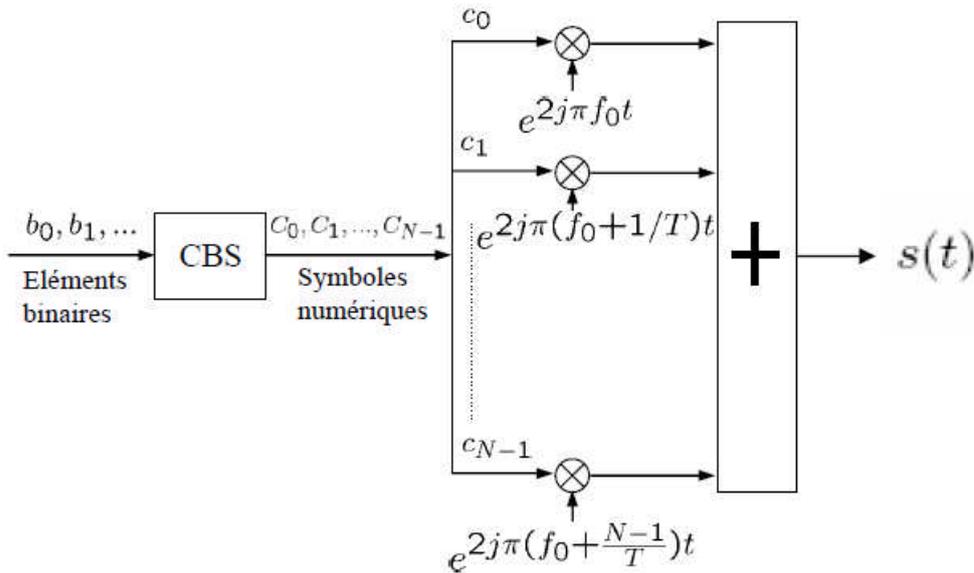


Figure3.2: Schéma de principe du modulateur OFDM.

Par application d’une transformée de Fourier discrète inverse sur N échantillons on obtient le signal OFDM en bande de base complexe:

$$\mathbf{x} = F_N^{-1} \{X\} \tag{3.3}$$

$$x_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X_n e^{2j\pi kn/K}, 0 \leq k < K \tag{3.4}$$

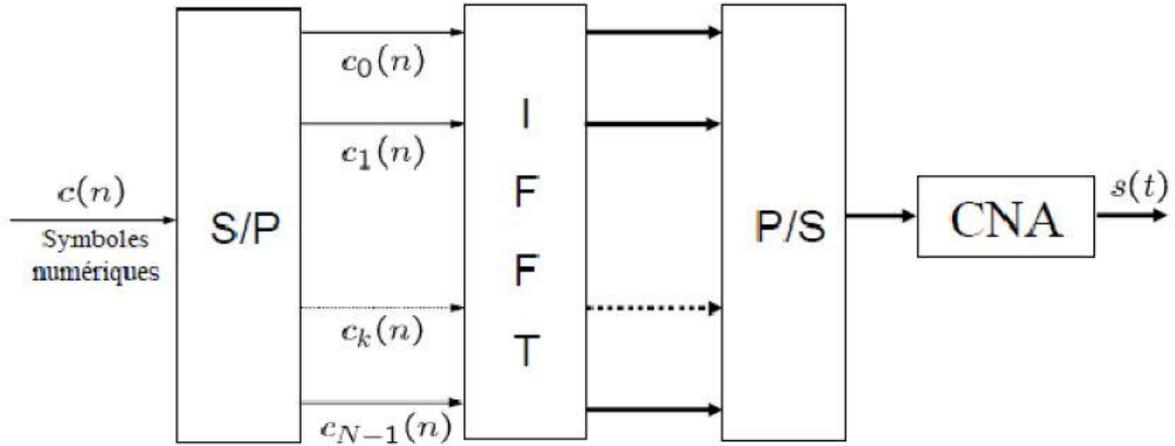


Figure 3.3 : Modulateur OFDM numérique.

La démodulation d'un signal OFDM est donc l'opération duale utilisant la transformée de Fourier discrète (TFD) telle que :

$$\mathbf{X} = F_N \{x\} \tag{3.5}$$

$$\mathbf{X}_n = \sum_{k=0}^{K-1} X_k e^{-2j\pi kn/N}, 0 \leq n < N \tag{3.6}$$

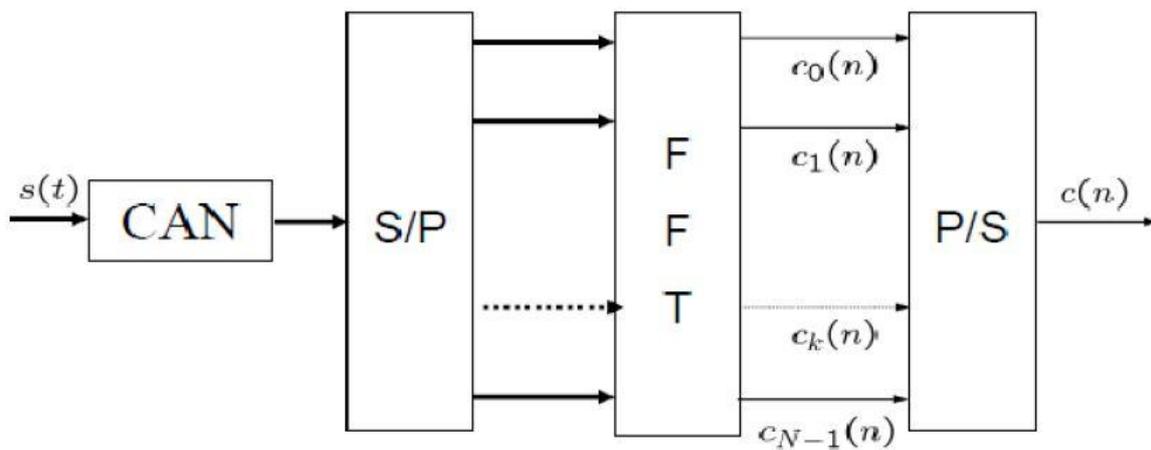


Figure3.4: Démodulateur OFDM numérique.

- Propriété d'orthogonalité :

Puisque La propriété d'orthogonalité permet de conjuguer une grande efficacité spectrale avec une lutte efficace contre les interférences entre les sous-porteuses d'une trame, donc elle est fondamentale en OFDM. En effet, l'orthogonalité des sous porteuses leur autorise un recouvrement réciproque partiel. L'OFDM utilise cette propriété dans le domaine fréquentiel en diffusant des informations indépendantes sur chacune d'elles. Il y a une condition essentielle pour maintien des bonnes performances du système, durant la transmission d'une trame sur un quelconque canal de propagation, et à plus forte raison lors de communications sans-fil, il convient de protéger cette orthogonalité [24].

- Avantages et inconvénients de l'OFDM :

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

- Une utilisation efficace des ressources fréquentielles en comparaison avec les solutions classiques de multiplexage fréquentiel.
- Les techniques OFDM ont une très grande flexibilité dans l'allocation du débit dan un contexte multi utilisateurs.
- L'OFDM est également très vulnérable aux problèmes de décalage en fréquence (Frequency offset) et de synchronisation.

Amplification : (ou amplificateur, ou ampli) C'est un système électronique accroître la puissance d'un signal électrique . L'énergie nécessaire à l'amplification est tirée de l'alimentation électrique du système. Si la sortie est une réplique exacte de l'entrée avec une puissance majorée alors on peut dire que c'est un amplificateur parfait.

Canal multi trajet : Lors d'une transmission à travers un canal radio entre un émetteur et un récepteur, le signal émis se propage dans plusieurs directions du milieu radio et parvient au récepteur sur des chemins différents. En effet, au moment de la propagation du signal, des

phénomènes impliquant la multiplicité des chemins interviennent généralement sous trois formes : La réflexion, la diffusion et la diffraction [29].

Du côté récepteur, les fonctions de démodulation OFDM, désétalement et de décodage sont les inverses respectifs des fonctions de modulation OFDM, étalement et de codage situées du côté émetteur.

3.4 Simulations :

Nous allons illustrer un système MIMO-OFDM en liaison descendante avec les caractéristiques suivantes : 12 antennes émettrices (à la station de base), en tant qu'émetteur). L'unité mobile est le récepteur avec une antenne unique.

Le reste du système est configuré comme suit : La puissance de l'émetteur est de 9 watts, le gain d'émission est de -8 dB, le récepteur mobile est stationnaire situé à 2750 mètres, à 3 degrés de la ligne de mire de l'émetteur, un brouilleur (interférence) ayant une puissance de 1 watt et un gain de -20 dB est situé à 9000 mètres, à 20 degrés de la ligne de visée de l'émetteur. Le nombre de bits générés par la source : 30714 bits. Le modulateur OFDM transmet 48 symboles avec un intervalle de garde de 16 symboles. Nous considérons aussi un canal MIMO à 5 trajets retardés avec un étalement de retard de 15 symboles et un étalement Doppler de 5 Hz.

Dans notre simulation nous allons faire varier : le nombre d'antennes, la puissance et l'angle du signal d'émission et d'interférence et le nombre de trajets. Pour chaque cas, nous allons noter le taux d'erreur binaire(BER), et présenter les diagrammes de constellations pour étudier les performances de système.

3.4.1 Impact du nombre d'antennes : Dans cette partie nous étudierons l'impact du nombre d'antennes sur les performances du système MIMO-OFDM. Pour cela nous utilisons successivement : 4, 8, 12, 16, 64 et 100 antennes.

Les diagrammes de rayonnement résultants sont donnés par la figure **Figure 3.5:**

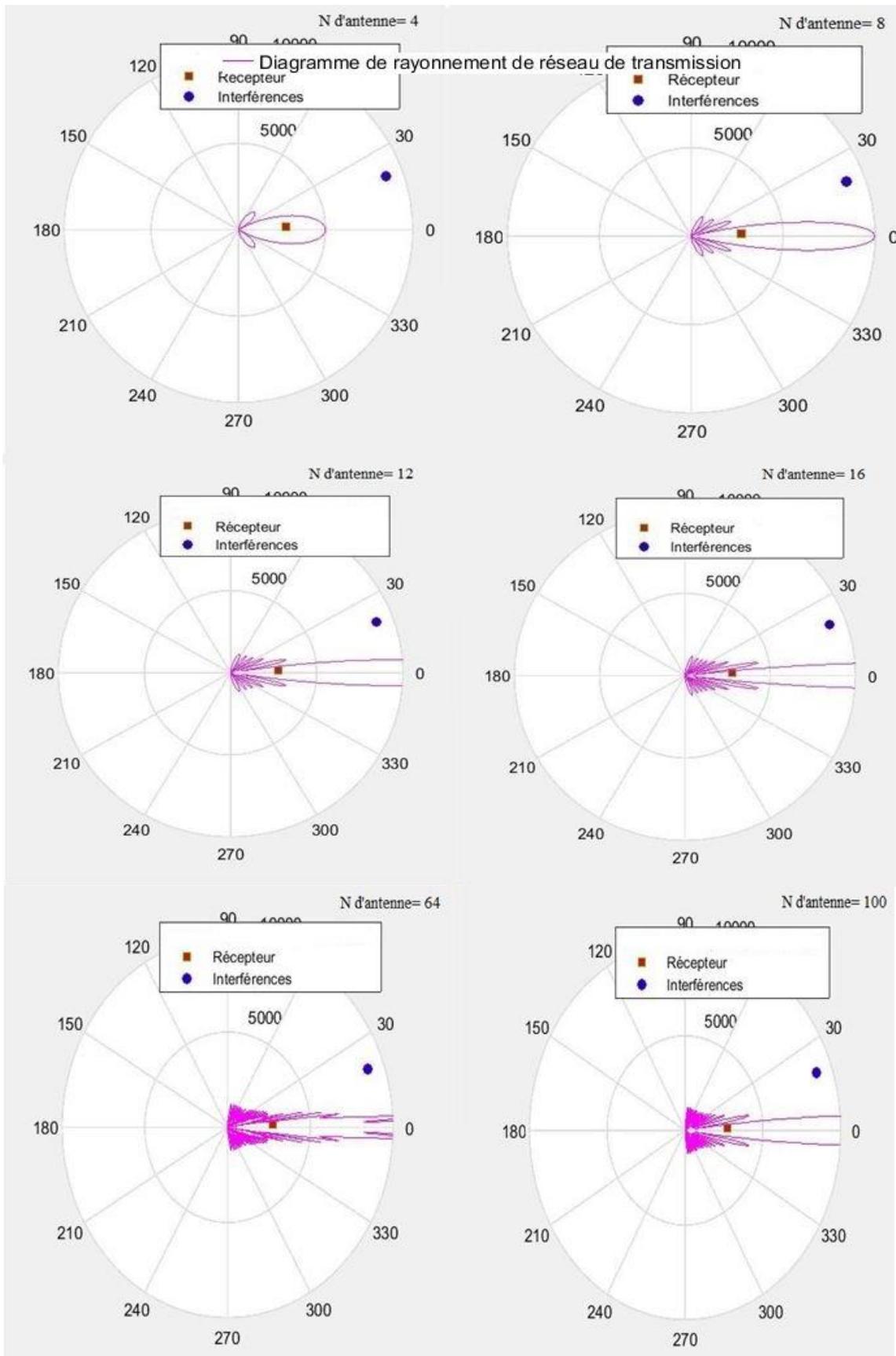
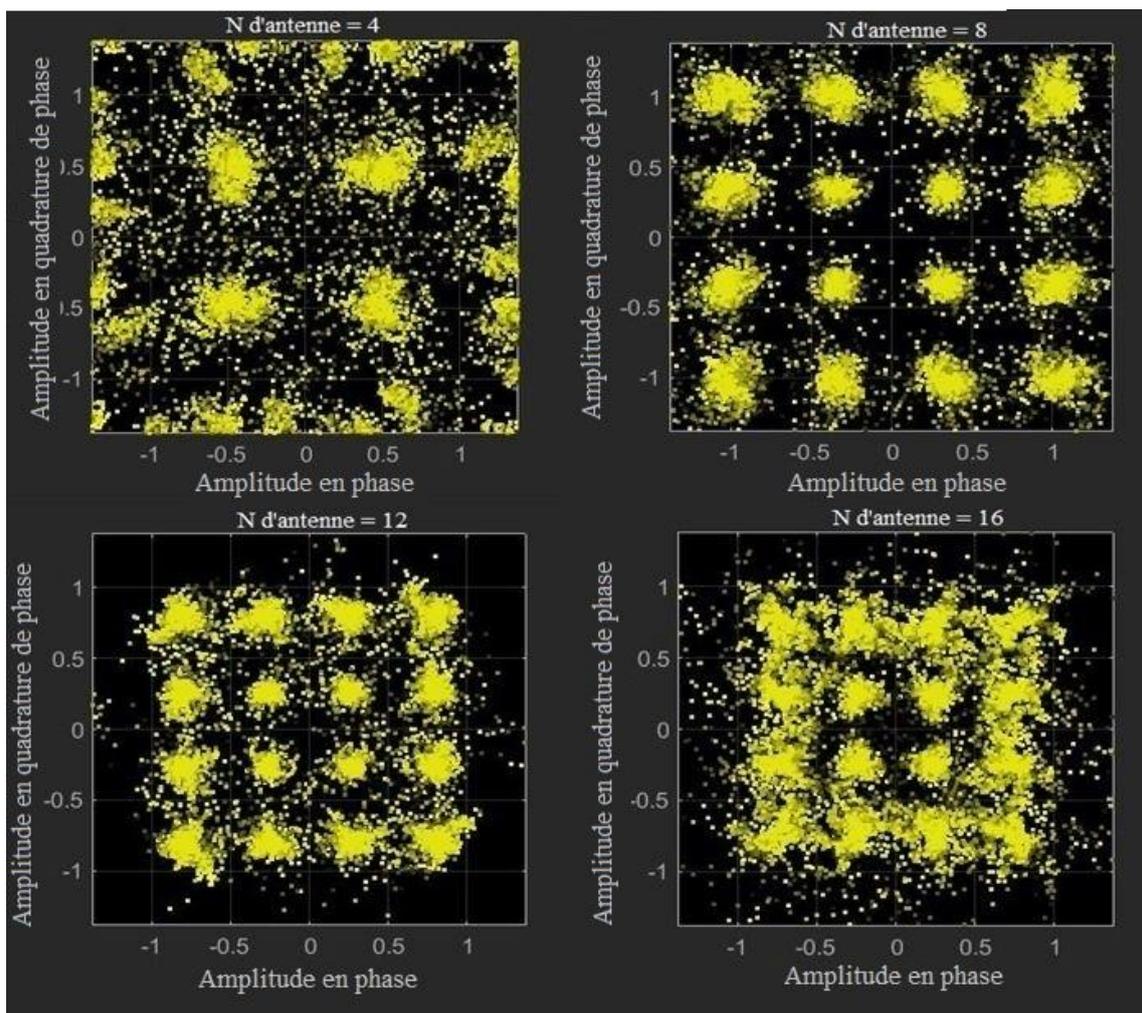


Figure 3.5: Changement de faisceaux de formation en variant le nombre d'antennes.

Dans chaque cas, on analyse le diagramme de constellation visualisé en fonction du nombre d'antennes. Nous rappelons que la représentation du diagramme de constellation est liée à la qualité du signal : plus le signal est idéal, plus les constellations sont nettes et représentées par des points bien définis et concentrés.



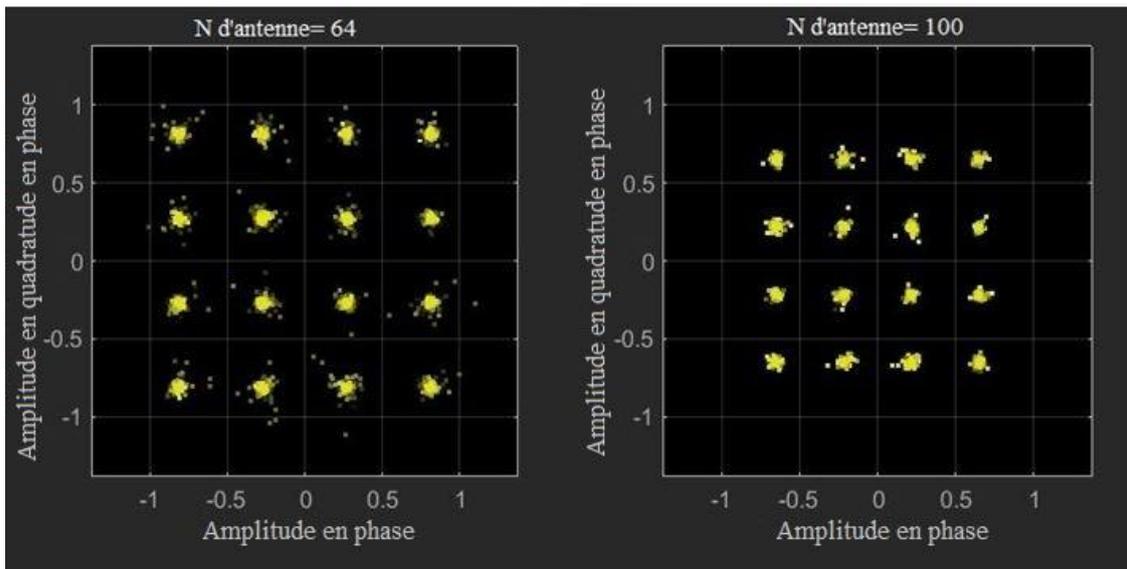


Figure 3.6 : Changement des diagrammes de constellation en variant le nombre d’antennes.

Les résultats obtenus en terme de BER sont enregistrés sur le **Tableau 3.1**:

Nombre d’antennes	Nombre total de bits	Nombre de bits erronés	Rapport nombre erronés /nombre total en %
4	30714	46	0.15
8	30714	5	0.02
12	30714	0	0.00
16	30714	0	0.00
64	30714	0	0.00
100	30714	0	0.00

Tableau 3.1: Récapitulatif des résultats avec variation de nombre d’antennes.

Dans cette partie de simulation, nous remarquons que, plus le nombre d’antennes augmente, plus les constellations deviennent nettes et le taux d’erreur binaire diminue et converge même vers 0. Ceci confirme, comme le stipule la théorie, que le MIMO massive a pour but d’améliorer la qualité du signal. Il faut donc augmenter le nombre d’antennes ce qui permettra d’améliorer d’une façon significative les performances d’un tel système.

3.4.2 Variation de la puissance de transmission :

Dans cette partie, nous allons varier la puissance de transmission et constater son influence sur le BER et les diagrammes des constellations. Les résultats obtenus sont dans la **Figure 3.7** :

Dans chaque cas, on analyse le diagramme de constellation visualisé en fonction de la puissance de transmission, on fixe le nombre d'antennes à 12. Le diagramme de constellation reflète la qualité du signal : un meilleur signal donne une constellation plus nette.

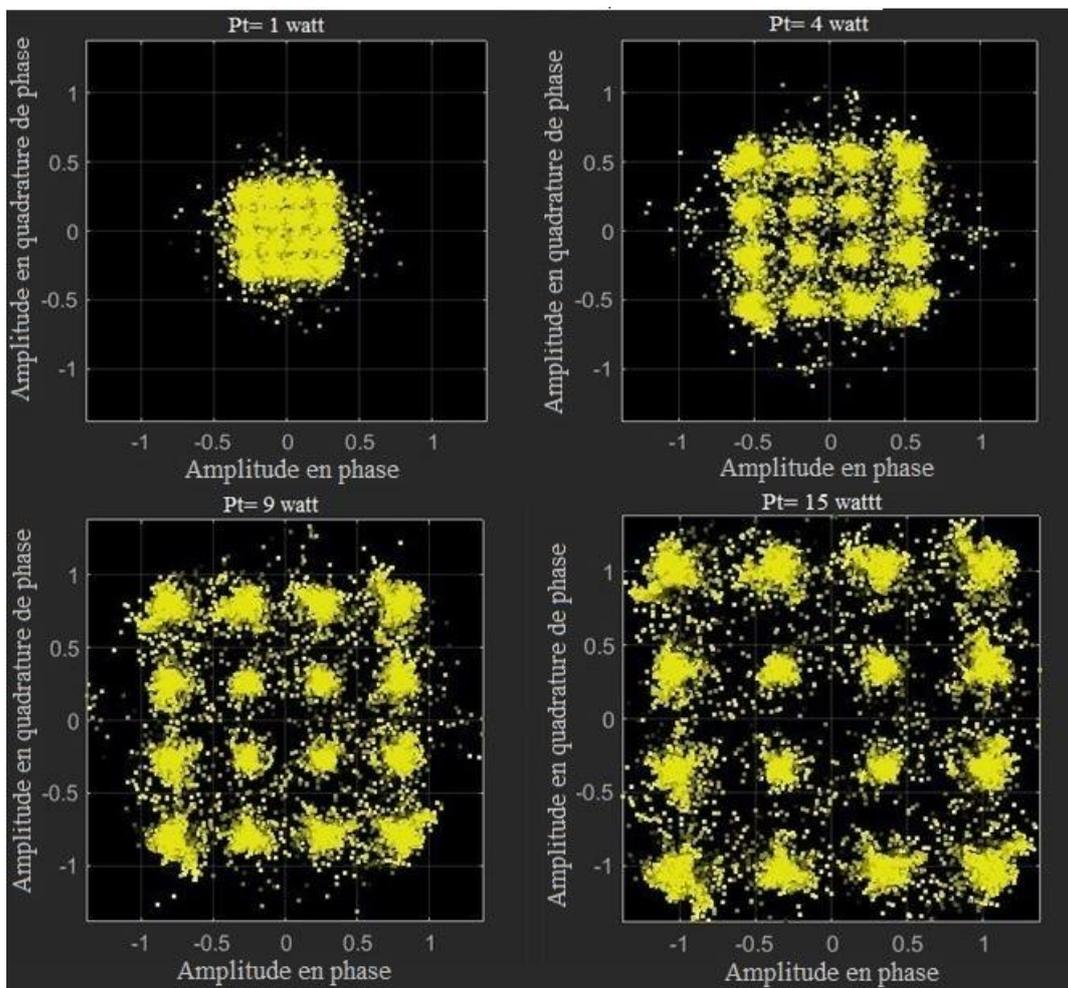


Figure 3.7 : Changement des diagramme de constellations en variant la puissance de transmission.

Les résultats obtenus en terme de BER sont enregistrés sur le **Tableau3.2** :

La puissance de transmission en W	Nombre total de bits	Nombre de bits erronés	Rapport nombre erronés /nombre total en %
1 W	30714	15428	50.23
4 W	30714	15409	50.17
9 W	30714	0	0.00
15 W	30714	0	0.00

Tableau3.2: Récapitulatif des résultats avec variation de la puissance de transmission.

On peut conclure que l'augmentation de la puissance de transmission stabilise les constellations qui deviennent plus nettes. En même temps, on remarque que le BER s'améliore lorsqu'on augmente la puissance de transmission. Il se stabilise à 0.00% à partir de la puissance 9 watts.

3.4.3 Variation de la puissance d'interférence :

Dans cette partie de simulation nous changeons successivement la puissance d'interférence entre 1watt, 4 watts, 9 watts et 15 watts. On fixe la puissance de transmission à 9 watts, les résultats sont ci-dessous dans la **Figure3.8** :

Pour chaque valeur, on analyse le diagramme de constellation visualisé en fonction de la puissance d'interférence. Nous rappelons que plus le signal est idéal, plus les constellations sont représentées par des points bien définis et concentrés.

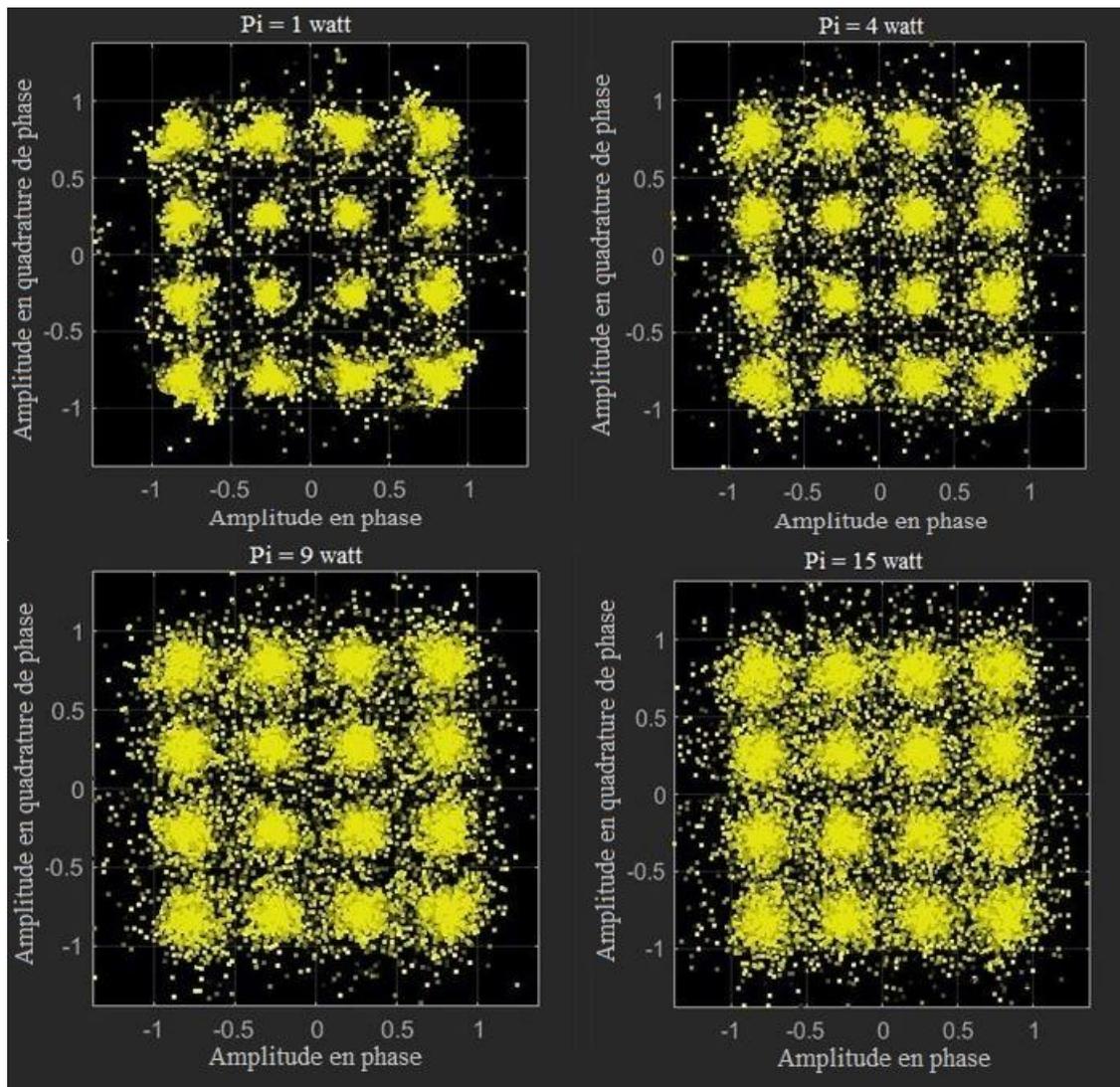


Figure3.8: Changement des constellations en variant la puissance d'interférence.

Les résultats obtenus en terme de BER sont enregistrés sur le tableau **Tableau3.3**:

La puissance d'interférence en W	Nombre total de bits	Nombre de bits erronés	Rapport nombre erronés /nombre total en %
1 W	30714	0	0.00
4 W	30714	28	0.09
9 W	30714	197	0.64
15 W	30714	767	2.50

Tableau3.3: Récapitulatif des résultats avec variation de la puissance d'interférence.

On peut voir que lorsqu'on augmente la puissance d'interférence les constellations deviennent moins nettes et se chevauchent. La même chose pour le taux d'erreur binaire (BER) : plus on augmente la puissance d'interférence, plus le taux d'erreur binaire augmente et le nombre de bit erronés s'accroît. Alors on a une dégradation du signal à cause de l'augmentation de la puissance d'interférences.

3.4.4 Changement d'angle :

Dans cette partie, nous varions l'angle d'interférence des valeurs suivantes : $5^\circ, 8^\circ, 20^\circ$ et 60° et on fixe l'angle du mobile à 3° . On constate les résultats en termes de BER et de diagramme de rayonnement suivants :

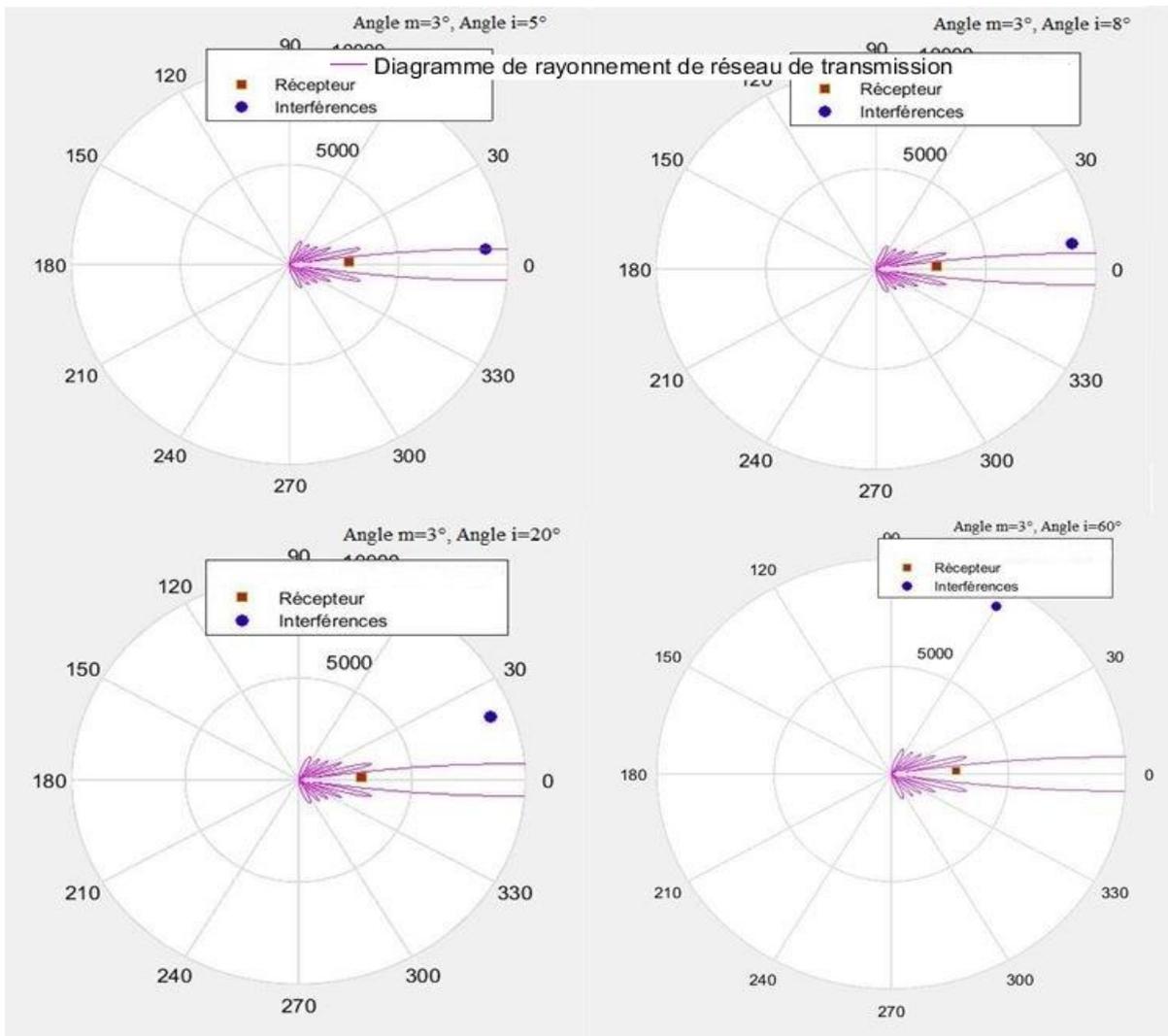


Figure 3.9 : changement de faisceaux de formation en variant l'angle d'interférence.

Dans chaque cas ici, on analyse le diagramme de constellation visualisé en fonction de l'angle d'interférence, On fixe la puissance d'interférence à 1 watt. Nous utilisons le diagramme de constellation pour connaître la qualité du signal en fonction d'angle.

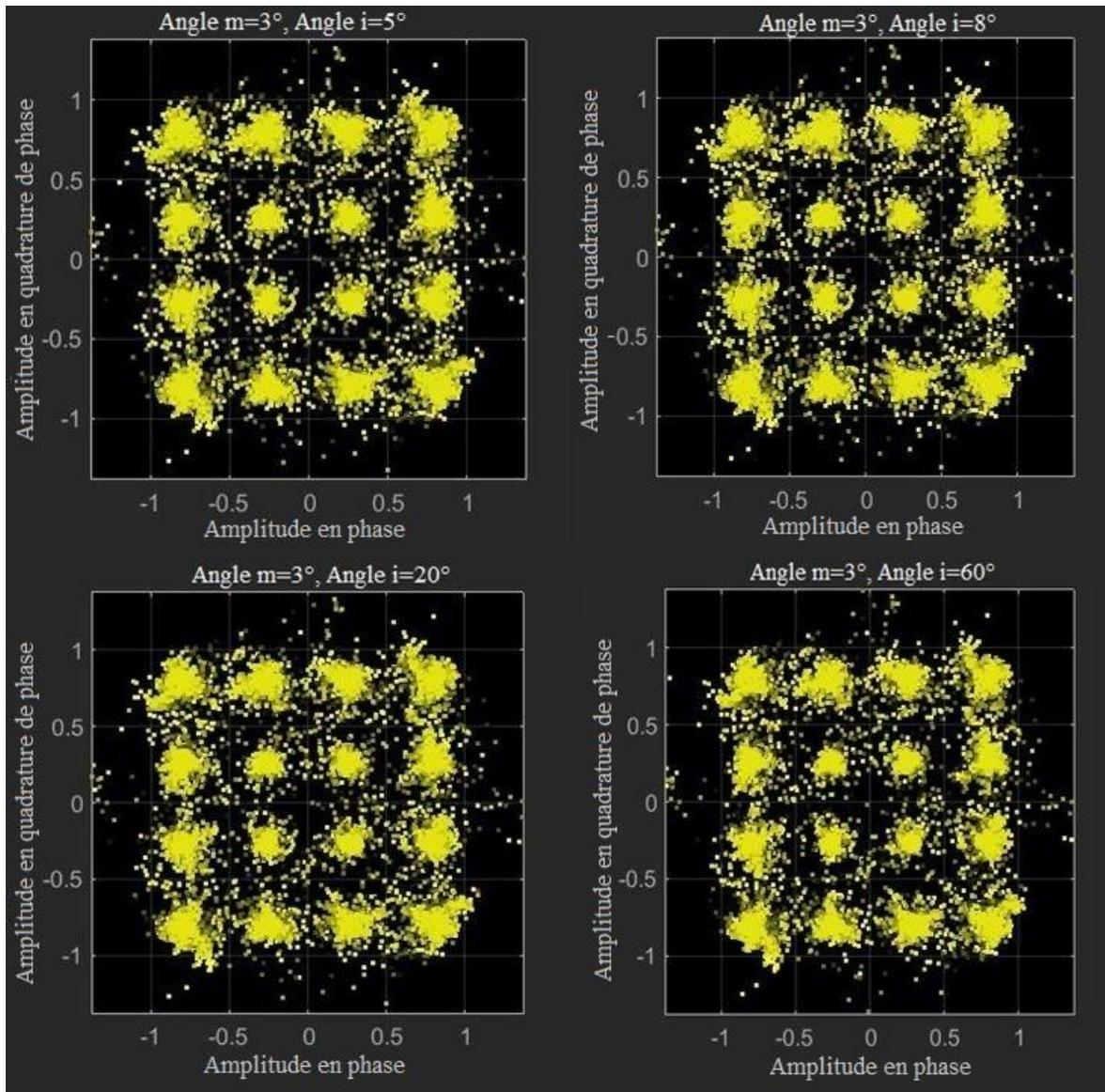


Figure 3.10 : changement de diagramme de constellation en variant l'angle d'interférence.

Les résultats obtenus en termes de BER sont enregistrés sur le tableau **Tableau3.4**:

L'angle d'interférence en °	Nombre total de bits	Nombre de bits erronés	Rapport nombre erronés /nombre total en %
5	30714	0	0.00
8	30714	0	0.00
20	30714	0	0.00
60	30714	0	0.00

Tableau3.4: Récapitulatif des résultats avec variation d'angle d'interférence.

Nous remarquons qu'à chaque variation de l'angle d'interférence, le taux d'erreur binaire (BER) reste le même ainsi que le diagramme de constellations qui ne change pas. Alors le système peut donc séparer le signal utile du signal d'interférence, et ce grâce à la formation de faisceaux (Beamforming). Donc l'angle d'interférence n'a aucune influence sur la qualité du signal.

3.4.5 Changement du nombre de trajets :

Dans cette partie nous allons changer le nombre de trajets. On fixe l'angle à 3° pour le mobile et à 20° pour l'interférence, les résultats sont dans la **Figure 3.11**:

Pour chaque nombre de trajets, on analyse le diagramme de constellation qui renvoie directement à la qualité du signal.

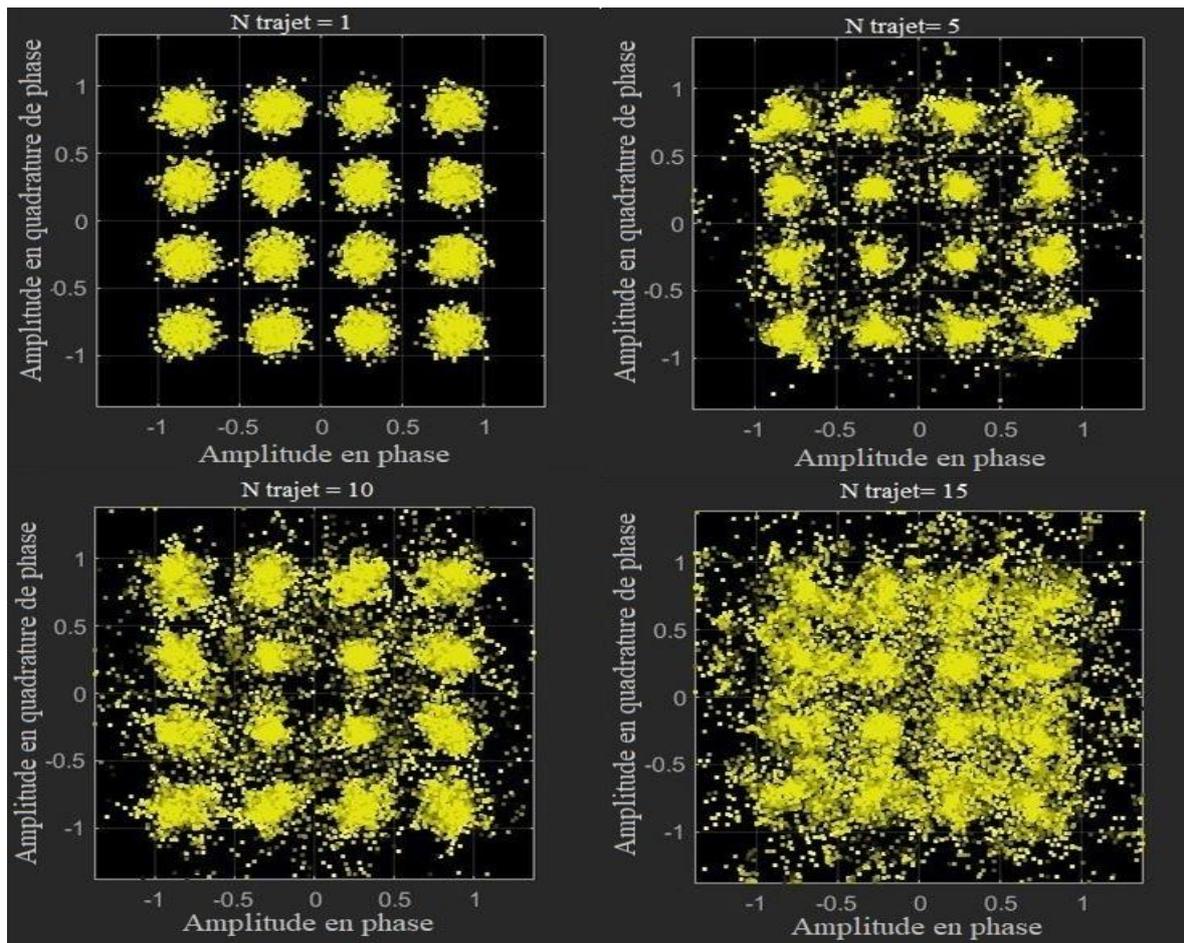


Figure 3.11 : changement de diagramme de constellation en variant le nombre de trajet.

Les résultats obtenus sont enregistrés sur le tableau **Tableau 3.5**:

Nombre de trajets	Nombre total de bits	Nombre de bits erronés	Rapport nombre erronés /nombre total en %
1	30714	0	0.00
5	30714	0	0.00
10	30714	12	0.04
15	30714	22	0.07

Tableau 3.5 : Récapitulatif des résultats avec variation du nombre de trajets.

Nous remarquons d'après ces résultats que les constellations deviennent moins nettes après chaque augmentation du nombre de trajets. La même chose pour le taux d'erreur binaire : plus on augmente le nombre de trajets plus le BER augmente ainsi que le nombre des bits erronés.

3.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié et simulé la chaîne de transmission MIMO-OFDM. Nous avons présenté dans un premier temps la chaîne de transmission MIMO-OFDM en détaillant la modulation multi-porteuses OFDM.

Pour étudier les performances du système en terme de BER, nous avons examiné l'impact du nombre d'antennes sur les performances du système. Ensuite nous avons étudié et analysé l'effet de la variation de la puissance et l'angle du signal d'émission et d'interférence sur les performances du système, et finalement nous avons étudié l'impact du nombre de trajets sur ces performances.

Nous constatons que le système MIMO-OFDM est plus performant lorsque nous augmentons le nombre d'antennes, ainsi que la puissance de transmission. On peut aussi constater que la diminution de la puissance d'interférence ou le nombre de trajets améliore la qualité du signal et permet d'obtenir de meilleurs résultats en terme de BER. Aussi les résultats montrent que l'association MIMO-OFDM permet d'obtenir de meilleures qualités du signal à la réception en luttant contre les interférences.

Conclusion Générale

La demande des nouveaux services et applications sans fil ainsi que le nombre d'utilisateurs augmentent rapidement, ce qui impose des contraintes de débit. Le besoin de toujours améliorer les débits de transmission de données, pousse les chercheurs dans le domaine des communications sans fils à améliorer sans cesse les systèmes de communications existants et à imaginer de meilleures solutions pour les futurs standards.

Dans ce mémoire, nous avons mené une étude orientée vers des problématiques originales en communications numériques basée sur des approches avancées en traitement du signal.

Nous avons structuré notre mémoire en trois chapitres. Dans le premier chapitre, nous avons mené une étude sur la technologie MIMO, nous avons aussi abordé dans ce chapitre la technologie MIMO massive. Passer en revue les caractéristiques, les avantages et les types de cette technologie. Enfin, nous avons vu l'utilité de MIMO massive pour la cinquième génération. 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.

Les systèmes MIMO massives sont rapidement devenus une technologie sans fil inévitable car cette technologie permet la transmission parallèle et simultanée de données sur la même fréquence avec plusieurs antennes au niveau de l'émetteur et du récepteur. Ceci peut être utilisé pour augmenter le débit et minimiser le taux d'erreur binaire (TEB).

Le MIMO massive dispose des caractéristiques prometteuses pour accroître la capacité des réseaux au travers des techniques de formation des faisceaux, appelées Beamforming.

Le deuxième chapitre répond à la question suivante : Quels types d'antennes le MIMO massive utilise ?

Nous avons survolé dans un premier temps sur les antennes intelligentes avec ses avantages et ses types. On a montré l'importance des antennes intelligentes qui est associée à un dispositif complet, permettant la détection de l'angle d'arrivée et la formation du diagramme

de rayonnement en direction du récepteur. Seule l'utilisation d'antennes intelligentes permet d'obtenir une efficacité du spectre élevée. Ensuite un focus particulier sur les antennes MIMO Beamforming et MIMO massives Beamforming a été présenté.

La combinaison des techniques MIMO massive et Beamforming a été adoptée dans les communications sans fil pour avoir un signal optimal au niveau de la réception, en se basant sur le grand nombre d'antennes, qui aident à augmenter le débit de données et l'efficacité du spectre d'antennes, et le Beamforming qui maximise la puissance de signal reçu ainsi que la capacité.

Dans le dernier chapitre, en utilisant le logiciel Matlab, nous avons simulé les performances du système MIMO-OFDM avec plusieurs combinaisons. Il est intéressant de noter que l'augmentation du nombre d'antennes ou la puissance de transmission est nécessaire pour garantir un signal optimal et des meilleures performances.

Une analyse des performances a été réalisée en évaluant le taux d'erreur binaire BER et le diagramme de constellations en variant le nombre de trajets, ainsi que la puissance d'interférence, en créant des perturbations qui augmentent ou diminuent dans le même sens. Enfin, grâce à cette simulation nous avons vérifié et confirmé ce qu'on a stipulé dans la partie théorique.

Bibliographie

- [1] Marwa Chouk: Annulation des interférences inter-cellulaires pour les systèmes MIMO massive dans les réseaux hétérogènes 5G, université LAVAL, 2019.
- [2] Frédéric Launay, Les réseaux de mobiles 4G et 5G, 18 février 2021.
- [3] Daci Kaoutar, Dou Warda : Etude de massive MIMO pour 5G, Université Echahid Hamma Lakhdar El-Oued, juin 2019.
- [4] Study Paper on: Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) Technology.
[<https://tec.gov.in/public/pdf/Studypaper/Test%20Procedure%20EM%20Fields%20From%20BTS%20Antennae.pdf>].
- [5] Cyril Buey, thèse de doctorat : Conception et Mesure de systèmes Multi-Antennes pour les Futures Technologies 5G, Université côte d'azur, 19 avril 2018.
- [6] Pascal Chevalier, Inbar Fijalkow : Systèmes MIMO massives et non massifs pour les liaisons "Beyond 5G" et la "6G", Mai 2020.
- [7] Haddouche Khaled : contamination des pilotes en MIMO massive, université Saad Dahlab de Blida, 2018.
- [8] Rakotondrafara Nomena Tsirilaza : Etude des Performances du Massive MIMO avec la communication D2D dans le Réseau 5G université d'antananarivo, 08 Août 2019.
- [9] Randriamiadana Zakaso Arilova : Evaluation de Performance d'un Système MIMO massive en Termes d'Efficacité Spectrale, université d' antananarivo, décembre 2016.
- [10] Sadaoui Kenza, Menni Nouara : Modélisation et caractérisation des canaux millimétriques mmWave , université Akli Mohand Oulhadj-Bouira, 2019.
- [11] Abir El Azzaoui : Research on Massive MIMO Key Technology in 5G, 2018.
- [12] Robin Chataut, Robert Akl : Massive MIMO Systems for 5G and beyond Networks— Overview, Recent Trends, Challenges, and Future Research Direction, 2020.
- [13] Les avantages du MIMO massive pour l'infrastructure cellulaire 5G, 24 Août 2017.
[<https://resources.altium.com/fr/p/advantages-of-massive-mimo-for-5g-cellular-infrastructure>]
- [14] Antoine Rozé : Massive MIMO, une approche angulaire pour les futurs systèmes multi-utilisateurs aux longueurs d'onde millimétriques, université Bretagne Loire, 17 octobre 2016.
- [15] HienQuoc Ngo, Erik G. Larsson, and Thomas L. Marzetta, Energy and Spectral Efficiency of Very Large Multi user MIMO Systems, 21 Mai 2012.
- [16] Rafiou Mohamed : Contribution de l'Antenne Intelligente Face Aux Interférences 4G Et TNT, Université d'antananarivo, 25 Janvier 2017.

- [17] Ahmad Elsayed Ahmad : Conception d'antennes réseaux aux performances optimisées par la prise en compte des couplages inter éléments. Application à la formation de faisceau et à la polarisation circulaire, université de Limoges, 14 décembre 2010.
- [18] Aounallah Naceur : Utilisation des antennes intelligentes dans les systèmes de communication sans fil, université Djillali Llabbes de Sidi Bel Abbes, 2015.
- [19] Mourad Nedil : Développement d'un réseau d'antennes à formation de faisceaux basé sur de nouvelles Matrices de Butler, Université du Québec, 2006.
- [20] Mokhefi Akila et Metahri Imene : Etude et simulation de méthode de Beamforming pour des systèmes de Modulation multi-porteuse pour la 5 G, Université Abou bakr Belkaïd Tlemcen, 21 juin 2018.
- [21] Yasser Abou baker Hachemi : Etude et simulation d'un système Beamforming hybride à ondes millimétriques pour les réseaux 5G, Université Abou bakr Belkaïd Tlemcen, 19 septembre 2020.
- [22] Fernandez J, Corden J.R, Barrett M, "Adaptive array algorithms for optimal combining in digital mobile communications systems", in Eighth International Conference on Antennas and Propagation.
- [23] Stuber,G.L; " Broadband MIMO-OFDM wireless communications".
- [24] Bouaziz Samir : Réduction du PAPR du système OFDM-MIMO en 4G, Université Ferhat Abbas – Setif 1, 07 Janvier 2015.
- [25] [En ligne] [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-2-287-32740-7_4].
- [26] Alexandre Boyer : Canaux de Transmissions Bruites, Institut National Des Sciences Appliquées De Toulouse.
- [27] Rhouma.R : Codage canal et codes en de bloc linéaires, École Supérieure d'Économie Électronique, April 2015.
- [28] L'utilisation Des Techniques D'étalement Du Spectre.
- [29] Mohamed Maâlej : Etude et implémentation d'un système sans fil multi-antennes dans un contexte MC-CDMA, Ecole Polytechnique de Tunisie - Ingénieur Polytechnicien, 2008.
- [30] Ismehehne Chahbi : Exploitation des antennes multiples pour l'optimisation dans les réseaux sans fil, Ecole doctorale EDITE, 23 Mai 2014.
- [31] Rasoanantenaina Lantonirina Elysa : Etude de Performance des Nouvelles Formes D'Ondes Et Du MASSIVE MIMO Sur Le Réseau 5G, université D'Antananarivo, Mars 2017.