

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

**Université Aboubakr Belkaïd-Tlemcen**

**Faculté de Technologie**

**Département de Télécommunications**

## **MEMOIRE**

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

**En : Télécommunications**

**Spécialité : Systèmes des Télécommunications**

**Présenté par : HATTAB Soumia & MEDJAHDI Widad**

## **Thème**

***Annulation des interférences inter-cellulaires pour les  
systèmes MIMO massive dans les réseaux 5G***

Soutenu en 08/07/2021, devant le jury composé de :

<b>M<sup>r</sup> BORSALI Ahmed Riad</b>	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
<b>M<sup>r</sup> BENADDA Belkacem</b>	Professeur	Univ. Tlemcen	Examineur
<b>M<sup>r</sup> BAHRI Sidi Mohammed</b>	M.C.B	Univ. Tlemcen	Encadrant

**Année Universitaire 2020-2021**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# Remerciement

*Nous remercions Dieu le Tout-Puissant qui nous a donné le courage pour élaborer ce modeste travail.*

*Ce travail a été accompli à l'aide de plusieurs personnes que nous tenons à Remercier absolument. Nous remercions tout d'abord notre encadreur Monsieur «BAHRI Sidi Mohammed» de nous avoir apporté leurs valeureux conseils et soutiens durant la réalisation de ce mémoire.*

*Nous remercions également les membres de jury de nous avoir fait l'honneur en acceptant d'examiner et de juger notre travail. Mes remerciements vont aussi à tous mes professeurs, enseignants et toutes les personnes qui m'ont soutenus jusqu'au bout, et qui n'ont pas cessé de me donner des conseils très importants en signe de reconnaissance.*

*Finalement, nous remercions tous ceux qui ont participé de prêt ou de loin dans l'élaboration de ce travail avec un conseil ou autre.*

# Dédicace

*Je dédie ce modeste travail, en première lieu, aux êtres qui me sont les plus chers ;*

*Mes parents qu'ont toujours aimé me voir réussir*

*A mon père « Mahammed » pour son soutien moral et financier, leur énormes sacrifices et leurs Encouragements qu'ils m'ont apportés tout au long de ces cinq années d'études.*

*A ma mère « Naima » ange de l'âme, source de l'espoir et de la tendresse, pour ton amour, pour tous ce que tu as sacrifié pour moi, Tu es maman idéale.*

*« Je vous aime »*

*Vous m'avez tout donné sans rien demander « Je prie Dieu vous donne une bonne santé et vous prête une longue et heureuse vie »*

*A mes grand-pères : « Hbibî Bouziane » qui je l'aime beaucoup et « Mohammed » « Allah yarhamhom »*

*A mes grand-mères : « Fatima » « Allah yarhamha » et « Zahra » « Allah yhafda »*

*Pour tout ce que vous avez fait pour moi Vous êtes mon parangon,*

*« Je vous adore »*

*A mes très chers frères : « Mahmoud » et « Zakaria » qui ont toujours été présent pour moi,*

*Mon beau frères « Gacem », et mon fiancé « Zakaria »*

*A mes chères sœurs : « Yasmina », « Wissem », « Hadjer » et mes belles « Ines, Israe » et mes chères tantes à leurs têtes « Rachida »*

*Et mes oncles « Abdelrahman » et sa familles, « Rachid » et sa familles et « Abdelhafid » « Allah yarahmo »*

*Pour tous les bons moments passés avec vous*

*« Je vous souhaite une vie joyeuse pleine de succès dans tous les domaines »*

*A mon cher binôme « Soumia » et sa famille pour leurs efforts et Leurs soutien et pour tous les agréables moments qu'on a passé ensemble*

*A tous mes amis et Mes chères cousines : « Imen », « Samia », « Wassila », « Ikram », et*

*« Latifa », « Asma », « Marwa », « Oumayma », « Rania », « Yousra », « Lina »*

*Pour avoir rempli ces années d'études de souvenirs en tous genres*

*Pour avoir toujours été là, dans les bons comme dans les mauvais moments*

*« Je n'oublierais jamais les moments que nous avons passés ensemble » et Tous mes collègues de l'étude sans exception. A tous les professeurs et enseignants qui ont collaboré à ma formation.*

*Medjahdi Widad*

# Dédicace

*Je dédie ce modeste travail, en première lieu, aux êtres qui me sont les plus chers ;*

*Mes parents qu'ont toujours aimé me voir réussir*

*A mon père « Lahbib » pour son soutien moral et financier, leur énormes sacrifices et leurs Encouragements qu'ils m'ont apportés tout au long de ces cinq années d'études.*

*A ma mère « Nadja » ange de l'âme, source de l'espoir et de la tendresse, pour ton amour, pour tous ce que tu as sacrifié pour moi, Tu es maman idéale.*

*« Je vous aime »*

*Vous m'avez tout donné sans rien demander « Je prie Dieu vous donne une bonne santé et vous prête une longue et heureuse vie »*

*A mes grand-pères : « Rabah » « Allah yarhamo » et « Mohammed » « Allah ychafih »*

*A mes grand-mères : « Yamina » « Allah yarhamha » et « Merieme » « Allah yhafda »*

*Pour tout ce que vous avez fait pour moi Vous êtes mon paragon,*

*« Je vous adore »*

*A mes très chers frères : « Rabah Merouane » et « Mohammed Rayane » qui ont toujours été présent pour moi, A ma chère sœur : « Amina » et son mari « Mohamed » et ma belles « Ibtissem » et mes chères tantes « Souhila », « Fatima Zohra », « hanane » et « Houria », « Zohra », « Malika », « Zoubida »*

*Et mes chères oncles « Chafik, Lahcene, Haroune » et « Nouredine, Waheb, Sidi Mohamed, Aziz » et leurs épouses et ces enfants*

*Pour tous les bons moments passés avec vous*

*« Je vous souhaite une vie joyeuse pleine de succès dans tous les domaines »*

*A mon cher binôme « Widad » et sa famille pour leurs efforts et*

*Leurs soutien et pour tous les agréables moments qu'on a passé ensemble*

*A tous Mes amies et Mes chères cousines : « Chaima », « Sarah », « Yamina », « Fatima », « ikram »*

*« Soumia », et « Amel », « Imane », « Merieme »*

*Pour avoir rempli ces années d'études de souvenirs en tous genres*

*Pour avoir toujours été là, dans les bons comme dans les mauvais moments*

*« Je n'oublierais jamais les moments que nous avons passés ensemble » et*

*Tous mes collègues de l'étude sans exception.*

*A tous les professeurs et enseignants qui ont collaboré à ma formation.*

***A toute ma grande famille***

***Hattab Soumia***

## **Résumé :**

La nécessité d'augmenter la capacité et la qualité des réseaux mobiles avec des débits de données plus importants et une meilleure efficacité tout en consommant moins d'énergie a imposé la transition vers une nouvelle génération de communication mobile : La 5G, qui repose sur la technique MIMO massive. Cette technique est une forme du système MIMO Multi-Utilisateurs où les stations de base sont équipées d'un grand nombre d'antennes stimulant le principe de transmission simultanée par multiplexage spatial. Dans ce mémoire, nous introduisons les systèmes Hybrides Numériques et Analogiques ayant récemment été proposés afin de permettre à une station de base de conserver un large nombre d'antennes, nécessaire à l'obtention d'un fort gain de beamforming, tout en réduisant le nombre de chaînes Radiofréquences (RF). On commence par décrire une solution permettant à un terminal de former un faisceau dont la direction s'adapte à sa propre inclinaison, en temps réel, pour toujours viser la station de base. On compare ensuite les performances de tels récepteurs, associés à des stations de base Massive MIMO, avec celles d'une solution hybride connue, le nombre de chaînes RF des deux systèmes étant identiques. Principalement, la flexibilité et la capacité d'évolution de ces systèmes est mise en avant, ces deux atouts étant particulièrement pertinents pour de nombreux environnements à forte densité de population.

**Mots-clés:** MIMO massive, beamforming, annulation des interférences, 5G, Antennes intelligentes.

## **Abstract:**

The need to increase the capacity and quality of mobile networks with higher data rates and better efficiency while consuming less energy has forced the transition to a new generation of mobile communication: 5G, which is based on the massive MIMO technique. This technique is a form of the Multi-User MIMO system where base stations are equipped with a large number of antennas stimulating the principle of simultaneous transmission by spatial multiplexing. In this memory, introduce the Hybrid Analog and Digital Beamforming systems that have recently emerged to retain a high number of antennas without as many Radio Frequency (RF) chains, in order to keep high beamforming gains while lowering the complexity of conceiving many antenna base stations. We first describe a user equipment solution allowing the system to form a beam that adapts to its own movement so that it always focuses its energy toward the base station, using an onboard analog array and an Inertial Measurement Unit. Then we compare the performance of a known Hybrid solution with a fully digital Massive MIMO system, having as many RF chains as the Hybrid system, but serving user equipments with beamforming abilities. Mostly we emphasize how such a system allows for great flexibility and evolution, both traits being invaluable features in many future networks

**Keywords:** massive MIMO, beamforming, interference cancellation, 5G, smart antenna.

## ملخص:

أدت الحاجة إلى زيادة سعة وجود شبكات الهاتف المحمول مع معدلات بيانات أعلى وكفاءة أفضل مع استهلاك طاقة أقل إلى الانتقال إلى جيل جديد من الاتصالات المتنقلة الجيل الخامس، الذي يعتمد على متعدد هوائيات الإرسال والخروج الاستقبال الضخمة. هذه التقنية هي شكل من أشكال نظام متعدد المستخدمين متعدد المداخل والمخارج حيث تكون المحطات الأساسية مجهزة بعدد كبير من الهوائيات التي تحفز مبدأ الإرسال المتزامن عن طريق تعدد الإرسال المكاني.

في هذه الرسالة، نقدم الأنظمة الهجينة الرقمية والتناظرية التي تم اقتراحها مؤخرًا من أجل السماح لمحطة أساسية بالاحتفاظ بعدد كبير من الهوائيات الضرورية للحصول على كسب عالي لتشكيل الحزمة، مع تقليل عدد سلاسل الترددات الراديوية. نبدأ بوصف الحل الذي يسمح للمحطة بتشكيل حزمة يتكيف اتجاهها مع ميلها الخاص، في الوقت الفعلي، لاستهداف المحطة الأساسية دائمًا. ثم تتم مقارنة أداء هذه المستقبلات المرتبطة بمحطات قاعدة ضخمة بأداء حل هجين معروف، حيث يكون عدد سلاسل الترددات الراديوية للنظامين متطابقًا. بشكل أساسي، يتم التأكيد على مرونة هذه الأنظمة وقابليتها للتوسع، وهاتان القوتان مهمتان بشكل خاص للعديد من البيئات المكتظة بالسكان.

الكلمات الرئيسية: متعددة المداخل ومخارج متعددة، تشكيل الحزم، إلغاء التداخل، الجيل الخامس.

# Table des matières

Résumé : .....	I
Liste des figures.....	VI
Acronymes et Abréviations .....	VII
Introduction générale : .....	1
Chapitre I : La technologie MIMO massive .....	3
<b>I. 1. Introduction :</b> .....	<b>3</b>
<b>I. 2. Système MIMO :</b> .....	<b>3</b>
<b>I. 3. Principe de MIMO :</b> .....	<b>3</b>
<b>I. 4. Types de MIMO :</b> .....	<b>4</b>
<b>I. 5. MIMO Massive :</b> .....	<b>7</b>
<b>I. 6. Caractéristiques de MIMO massive :</b> .....	<b>8</b>
<b>I. 6.1. TDD vs FDD pour le MIMO massive :</b> .....	<b>8</b>
<b>I. 6.2. L'évolutivité :</b> .....	<b>9</b>
<b>I. 6.3. Propagation favorable :</b> .....	<b>9</b>
<b>I. 7. Avantages du MIMO massive :</b> .....	<b>10</b>
<b>I. 8. Types de MIMO massive :</b> .....	<b>10</b>
<b>I. 8.1. Système MIMO mono-utilisateur :</b> .....	<b>10</b>
<b>I. 8.2. Système MIMO Massive Multi-utilisateurs :</b> .....	<b>11</b>
<b>I. 8.3. MU- Massive MIMO avec Multi-Cellscénario :</b> .....	<b>11</b>
<b>I. 8.4 MIMO massive distribuée :</b> .....	<b>12</b>
<b>I. 9. Comparaison entre MIMO traditionnel et MIMO massive :</b> .....	<b>13</b>
<b>I. 10. Utilité pour la 5G :</b> .....	<b>13</b>
<b>I. 11. Défis des systèmes MIMO massive :</b> .....	<b>14</b>
<b>I. 12. Conclusion :</b> .....	<b>14</b>
Chapitre II : Antennes intelligentes pour les MIMO massives.....	15
<b>II. 1. Introduction :</b> .....	<b>15</b>
<b>II. 2. Définition d'antenne :</b> .....	<b>15</b>
<b>II. 3. Antennes réseaux :</b> .....	<b>16</b>
<b>II. 4. Antennes intelligentes :</b> .....	<b>17</b>
<b>II. 4.1. Concept d'antennes intelligentes :</b> .....	<b>17</b>
<b>II. 4.2. Structure d'une antenne intelligente :</b> .....	<b>18</b>
<b>II. 5. Avantages des antennes intelligentes :</b> .....	<b>20</b>
<b>II. 6. Types des antennes intelligentes :</b> .....	<b>21</b>
<b>II. 6.1. Systèmes d'antennes à faisceaux commutés SBA :</b> .....	<b>21</b>
<b>II. 6.2. Antennes adaptatives :</b> .....	<b>22</b>
<b>II. 7. Les algorithmes adaptatifs :</b> .....	<b>23</b>

<b>II.</b>	<b>8. Antennes MIMO beamforming :</b> .....	23
<b>II.</b>	<b>8. 1. Concept de base :</b> .....	23
<b>II.</b>	<b>9. Antennes MIMO massives beamforming :</b> .....	25
<b>II.</b>	<b>9. 1. Sélection d’antennes souples :</b> .....	27
<b>II.</b>	<b>10. Conclusion :</b> .....	29
Chapitre III : Résultats et simulations. ....		30
<b>III. 1.</b>	<b>Introduction :</b> .....	30
<b>III. 2.</b>	<b>Notion de base sur langage utilisé :</b> .....	30
<b>III. 3.</b>	<b>Principe de simulation :</b> .....	30
<b>III. 4.</b>	<b>Simulations et discussion des résultats :</b> .....	34
<b>III. 4. 1.</b>	<b>Impact de la variation du nombre d’antennes à l’émission et à la réception :</b> .....	34
<b>III. 4. 2.</b>	<b>Impact de la variation du nombre de chaines RF à l’émission et à la réception :</b> .....	40
<b>III. 4. 3.</b>	<b>Impact de la variation du nombre des signaux :</b> .....	41
<b>III. 5.</b>	<b>Conclusion :</b> .....	42
Conclusion générale : .....		43
Références bibliographiques : .....		44

# Liste des figures

<b>Figure I. 1 :</b> Dispositif MIMO.....	3
<b>Figure I. 2 :</b> Modèles de configuration d'antenne de base. ....	4
<b>Figure I. 3 :</b> SISO - Single Input Single Output. ....	4
<b>Figure I. 4 :</b> SIMO - Single Input Multiple Output. ....	5
<b>Figure I. 5 :</b> MISO - Multiple Input Single Output. ....	5
<b>Figure I. 6 :</b> MIMO - Multiple Input Multiple Output. ....	6
<b>Figure I. 7 :</b> Un système MIMO massive [8]. ....	7
<b>Figure I. 8 :</b> Scénarios d'application des technologies MIMO massives.....	7
<b>Figure I. 9 :</b> La contrainte de M et K sur TDD et FDD pour un système MIMO massive.....	9
<b>Figure I. 10 :</b> MIMO massive mono-utilisateur. ....	10
<b>Figure I. 11 :</b> Système MU-MIMO massive. M-antennes de BS dessert K simple antenne UT.....	11
<b>Figure I. 12 :</b> La BS dans la l-ième cellule et le k-ième UT dans la j-ième cellule.....	12
<b>Figure II. 1 :</b> Schéma général d'une antenne en mode transmission.....	15
<b>Figure II. 2 :</b> L'antenne en mode d'émission(a) et réception (b). ....	16
<b>Figure II. 3 :</b> Différentes géométries de réseaux pour les antennes intelligentes.....	17
<b>Figure II. 4 :</b> Le principe de base d'opération d'une antenne intelligente. ....	18
<b>Figure II. 5 :</b> Schéma représentatif d'une antenne adaptative.....	19
<b>Figure II. 6 :</b> Augmentation de la capacité.....	20
<b>Figure II. 7 :</b> Structure d'un système à faisceaux commutés. ....	22
<b>Figure II. 8 :</b> Réseau adaptatif à 4 éléments. ....	23
<b>Figure II. 9 :</b> Configuration de canal MIMO à bande étroite avec Beamforming.....	24
<b>Figure II. 10 :</b> Le diagramme de bloc d'un précodeur numérique. ....	26
<b>Figure II. 11 :</b> Le diagramme de bloc d'un beamforming analogique. ....	27
<b>Figure II. 12 :</b> Schéma fonctionnel des structures hybrides de beamforming.....	28
<b>Figure III. 1 :</b> Schéma fonctionnel simplifié d'un système monoposte à ondes millimétriques avec précodage numérique en bande de base suivi d'un précodage radiofréquence contraint mis en œuvre à l'aide de déphaseurs RF.....	31
<b>Figure III. 2 :</b> Résumé d'un système monoposte à ondes millimétriques (émission- réception).....	32
<b>Figure III. 3 :</b> Diagramme de rayonnement de la technique optimale lorsque $N_t=16$ et $N_r=4$ . ....	35
<b>Figure III. 4 :</b> Diagramme de rayonnement de la technique hybride lorsque $N_t= 16$ et $N_r=4$ .....	35
<b>Figure III. 5 :</b> Diagramme de rayonnement de la technique optimale lorsque $N_t= 64$ et $N_r=16$ . ....	36
<b>Figure III. 6 :</b> Diagramme de rayonnement de la technique hybride lorsque $N_t= 64$ et $N_r=16$ .....	36
<b>Figure III. 7 :</b> Diagramme de rayonnement de la technique optimale lorsque $N_t= 100$ et $N_r=25$ . ....	37
<b>Figure III. 8 :</b> Diagramme de rayonnement de la technique hybride lorsque $N_t= 100$ et $N_r=25$ .....	37
<b>Figure III. 9 :</b> Diagramme de rayonnement de la technique optimale lorsque $N_t= 400$ et $N_r=25$ . ....	38
<b>Figure III. 10 :</b> Diagramme de rayonnement de la technique hybride lorsque $N_t= 400$ et $N_r=25$ .....	38
<b>Figure III. 11 :</b> Comparaison entre la technique optimale et la technique hybride avec la variation de $N_t$ et $N_r$ . ....	39
<b>Figure III. 12 :</b> Comparaison entre la technique optimale et la technique hybride avec la variation de $N_t$ RF et $N_r$ RF.....	40
<b>Figure III. 13 :</b> Comparaison entre la technique optimale et la technique hybride avec la variation de $N_s$ . ....	41

# Acronymes et Abréviations

<b>3G</b>	3ieme Génération.
<b>4G</b>	4ieme Génération.
<b>5G</b>	5ieme Génération.
<b>IoT</b>	Internet of Things.
<b>M2M</b>	Machine à Machine.
<b>MIMO</b>	Multiple Input Multiple Output.
<b>SISO</b>	Single Input Single Output.
<b>SIMO</b>	Single Input Multiple Output.
<b>MISO</b>	Multiple Input Single Output.
<b>BS</b>	Base Station.
<b>UT</b>	User Terminal.
<b>TDD</b>	Time-Division Duplex.
<b>FDD</b>	Frequency Division Duplex.
<b>RF</b>	Radio Frequency.
<b>SNR</b>	Signal-to-Noise Ratio.
<b>AWGN</b>	Additive White Gaussian Noise.
<b>MU-Massive MIMO</b>	Multi User massive MIMO.
<b>MIMO-OFDM</b>	MIMO- Orthogonal Frequency Division Multiplexing.
<b>NFFT</b>	Nonequispaced Fast Fourier Transform.
<b>TEB</b>	Taux d'Erreur Binaire.
<b>LTE</b>	Long Term Evolution.
<b>CST</b>	Codage Spatio Temporel.
<b>CSI</b>	Channel State Information.
<b>RSI</b>	Rapport Signal sur Interférent.
<b>RSB</b>	Rapport Signal sur Bruit.
<b>AMRS</b>	Accès Multiple par Répartition Spatiale.
<b>SDMA</b>	Spatial Division Multiple Acces.
<b>TDMA</b>	Time Division Multiple Access.
<b>FDMA</b>	Frequency Division Multiple Access.
<b>CDMA</b>	Code Division Multiple Access.
<b>SBA</b>	Switching Beam Antenna.
<b>LMS</b>	Lest Mean Square.
<b>DMI</b>	Direct Matrix Inverse.
<b>RLS</b>	Recursive least Squares algorithm.
<b>CMA</b>	Constant Modulus Algorithm.

<b>MRC</b>	Maximal Ratio Combining.
<b>CAN</b>	Convertisseur Analogique Numérique.
<b>CNA</b>	Convertisseur Numérique Analogique.
<b>MF</b>	Matched Filter.
<b>ZF</b>	Zero Forcing.
<b>MmWave</b>	Millimètre Wave.
<b>IEEE</b>	Institute of Électrisa and Electronics Engineers.
<b>IEEE 802.15</b> (IEEE).	working group of the Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>IEEE 802.15.3c</b>	The first IEEE wireless standard for data rates over 1 Gb/s .
<b>MATLAB</b>	MATrix LABoratory.



***INTRODUCTION***

***GENERALE***

## Introduction générale :

Aujourd'hui, les réseaux représentent un secteur important dans le monde. En effet, des services tels que les appels vidéo, les jeux en ligne et les applications de médias sociaux comme Facebook et WhatsApp ont radicalement changé nos vies grâce aux capacités de la troisième génération (3G), de la quatrième génération (4G) et de la cinquième génération (5G).

De plus, l'introduction de nouveaux concepts tels que l'Internet des objets (IoT) et la communication de machine à machine (M2M) contribuent également à l'augmentation du trafic sans fil.

Par conséquent, le développement continu du réseau sans fil pose un problème majeur car il doit dépendre soit d'une augmentation de la bande passante (spectre), soit de la densification des cellules pour atteindre le débit requis. Ces ressources sont rares et atteindront leur point de saturation d'ici quelques années. En plus, l'augmentation de la bande passante ou la densification des cellules augmente le coût du matériel et accroît la latence.

Pour cela, il faut utiliser la technologie la plus prometteuse pour répondre aux besoins des réseaux qui utilisent des centaines, voire des milliers d'antennes connectées à une station de base pour améliorer l'efficacité spectrale et le débit.

Pour résoudre ce problème, il est important de trouver une technologie d'accès sans fil qui répond aux besoins des réseaux 5G par exemple, la technologie MIMO massive et antennes intelligentes et MIMO beamforming.

-MIMO massive : (Massive Multiple-Input Multiple-Output) : 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.

-Le MIMO Beamforming est un système MIMO basé sur les antennes intelligentes à l'émission et à la réception qui permettent de réduire les niveaux des lobes secondaires existants dans les directions des interférences, tout en maintenant le lobe principal en direction utile, dans le but d'augmenter le débit et la qualité de transmission.

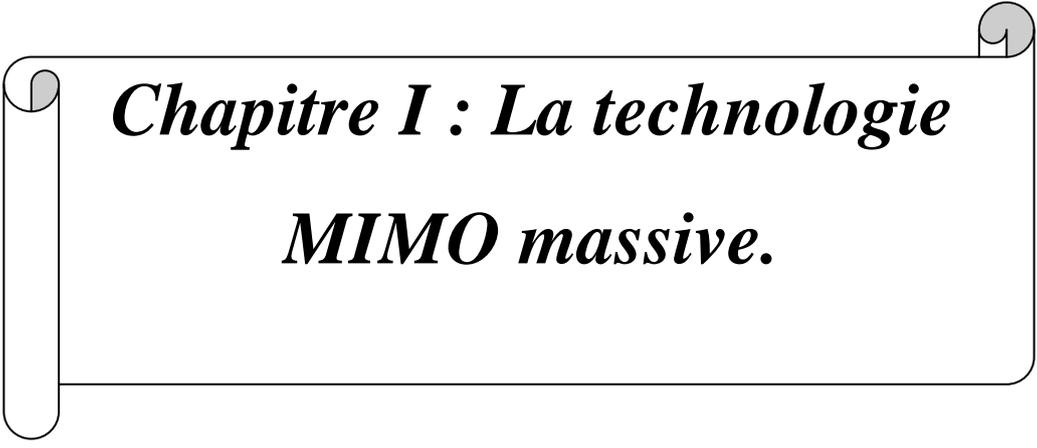
L'objectif de notre travail est l'étude de la combinaison du MIMO massive et du Beamforming qui permet d'obtenir à la fois une efficacité spectrale élevée, une meilleure qualité et un débit important.

Le mémoire est constitué de trois chapitres :

Le premier chapitre contient une présentation de la technologie MIMO et de ses différents types. Nous présenterons ensuite la technologie Massive MIMO en donnant leurs configurations et caractéristiques, ainsi qu'une comparaison entre le MIMO traditionnel et le Massive MIMO, et nous terminerons 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, passent par les algorithmes adaptatifs.

Le dernier chapitre est consacré aux simulations et résultats. Nous commençons par une présentation de la plateforme choisie pour les différentes simulations. Pour comparer les performances du système MIMO massive hybride beamforming en termes d'efficacité spectrale par rapport au système MIMO beamforming optimal, nous étudierons dans un premier temps l'impact du nombre d'antennes à l'émission et à la réception sur les performances du système. Ensuite nous examinerons l'effet de la variation du nombre de chaînes RF à l'émission et à la réception sur l'efficacité spectrale du système et finalement nous étudierons l'impact du nombre de flux de données sur ces performances.



*Chapitre I : La technologie*

*MIMO massive.*

## Chapitre I : La technologie MIMO massive

### I. 1. Introduction :

Le but de ce chapitre est de présenter un réseau massive à entrées multiples et sorties multiples (MIMO) appelé massive MIMO. Cette technologie émergente se présente comme l'une des méthodes les plus prometteuses pour les systèmes révolutionnaires de la cinquième génération des réseaux mobiles (5G) et de l'internet des objets [1]. Le développement de la technologie exigera un système de communication puissant et fiable. Cela nécessite de nombreuses avancées sur le système actuel. L'une des améliorations possibles est massive MIMO. Par conséquent, nous avons exploré la technologie traditionnelle MIMO.

### I. 2. Système MIMO :

Les techniques MIMO, acronyme de Multiple Input Multiple Output, sont apparus dans les années 90 grâce à Gerard. J. Foschini [2]. L'objectif de système MIMO est d'augmenter le débit de façon linéaire avec le nombre d'antenne de réception et de contrer l'évanouissement du canal. Il minimise la probabilité d'évanouissement et l'atténuation du signal. La différence entre un système MISO et un système MIMO est la suivante : MISO envoie les mêmes paquets aux antennes qui transmettent à la même fréquence. Alors que MIMO envoie des paquets différents aux antennes qui transmettent à la même fréquence (Figure I-1) [3].

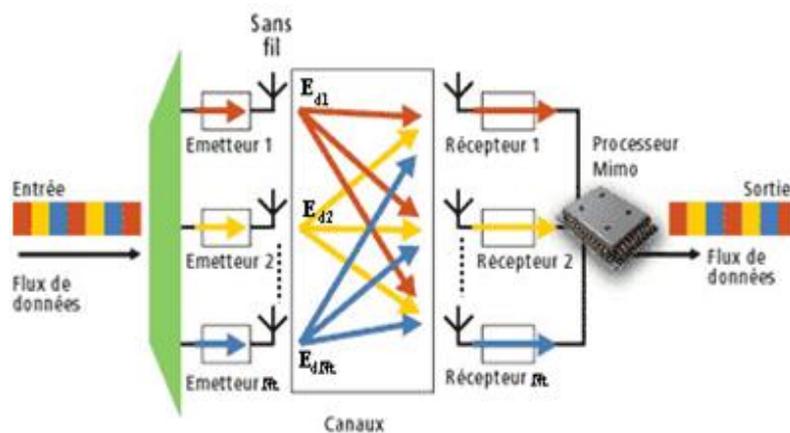


Figure I. 1 : Dispositif MIMO.

### I. 3. Principe de MIMO :

Le principe de la technologie MIMO est de transmettre des signaux dans le même canal sur des antennes différentes, lors de la réception également avec un certain nombre d'antennes et un traitement approprié, il s'agit de simuler cette réception dans la même bande pour n canaux différents. La technologie MIMO utilise ces technologies pour augmenter la vitesse de transfert de données.

## I. 4. Types de MIMO :

Il existe quatre modèles de configuration d'antennes de base qui incluent :

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

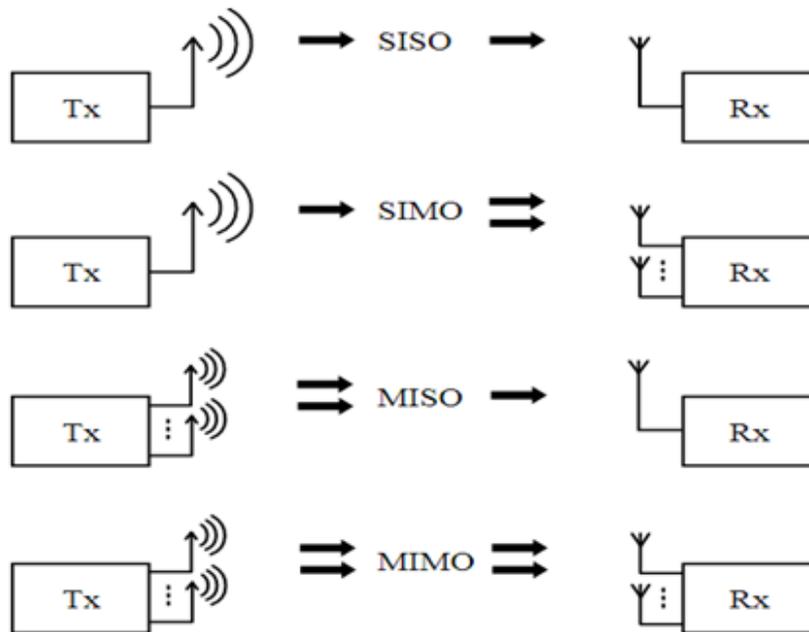


Figure I. 2 : Modèles de configuration d'antenne de base.

### ➤ Système SISO :

La forme la plus simple de la liaison radio peut être définie en termes de MIMO comme SISO- Single Input Single Output. Cet émetteur fonctionne avec une antenne, tout comme le récepteur comme le montre la figure (I.3).



Figure I. 3 : SISO - Single Input Single Output.

L'avantage du système SISO est sa simplicité. SISO n'a besoin d'aucun traitement pour la variété des formes qui peuvent être utilisées. Cependant, les performances du canal SISO sont limitées. Par

## Chapitre I : La technologie MIMO massive.

rapport à un système MIMO qui utilise une certaine forme de diversité, les interférences et les évanouissements ont un impact plus important sur le système.

### ➤ Système SIMO :

La version SIMO à entrée unique et à plusieurs sorties est apparue lorsque l'émetteur n'a qu'une seule antenne et que le récepteur a plusieurs antennes comme la montre (la figure I.4). Ceci est également appelé réception de diversité. Il est généralement utilisé pour permettre à un système de réception qui reçoit des signaux de plusieurs sources indépendantes de lutter contre les effets de l'évanouissement. Il est utilisé depuis de nombreuses années par les stations d'écoute/réception d'ondes courtes pour lutter contre les effets de l'évanouissement et des interférences ionosphériques.



Figure I. 4 : SIMO - Single Input Multiple Output.

L'avantage du SIMO est qu'il est relativement facile à mettre en œuvre, même si un certain traitement est nécessaire dans le récepteur. L'utilisation de SIMO peut être tout à fait acceptable dans de nombreuses applications, mais quand le récepteur est placé sur un appareil mobile tel qu'un téléphone cellulaire, les niveaux de traitement peuvent être limités par la taille, le coût et la charge de la batterie.

### ➤ Système MISO :

MISO est également appelé diversité de transmission. Dans ce cas, les mêmes données sont transmises de manière redondante à partir des deux antennes d'émission (figure I.5). Le récepteur est alors en mesure de recevoir le meilleur signal, qui peut ensuite être utilisé pour extraire les données requises.



Figure I. 5 : MISO - Multiple Input Single Output.

## Chapitre I : La technologie MIMO massive.

L'avantage d'utiliser MISO est que les antennes multiples et le codage/traitement de la redondance sont déplacés du récepteur vers l'émetteur. Dans des cas comme celui des téléphones portables, cela peut constituer un avantage significatif en termes d'espace pour les antennes et de réduction du niveau de traitement requis dans le récepteur pour le codage de redondance. Cela a un impact positif sur la taille, le coût et la durée de vie de la batterie, car le niveau de traitement inférieur nécessite une consommation moindre de la batterie [7].

### ➤ Système MIMO :

MIMO est une technologie d'antenne radio puisqu'elle utilise plusieurs antennes au niveau de l'émetteur et du récepteur pour permettre une variété de chemins de signaux pour transporter les données, en choisissant des chemins séparés pour chaque antenne afin de permettre l'utilisation de plusieurs chemins de signaux (Figure I.6).

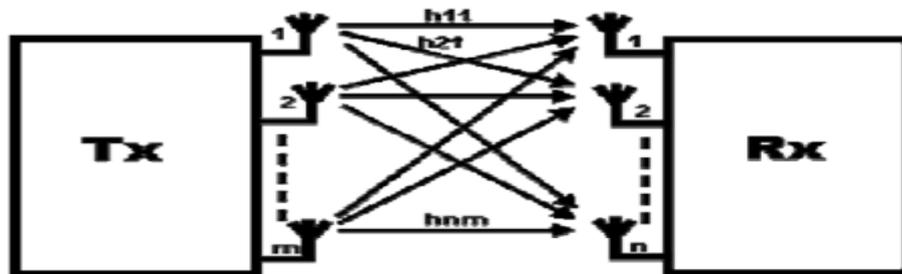


Figure I. 6 : MIMO - Multiple Input Multiple Output.

L'une des idées centrales des systèmes sans fil MIMO est le traitement du signal spatio-temporel dans lequel le temps est complété par la dimension spatiale inhérente à l'utilisation d'antennes multiples réparties dans l'espace, c'est-à-dire l'utilisation de plusieurs antennes situées en différents points. En conséquence, les systèmes sans fil MIMO peuvent être considérés comme une extension logique des antennes intelligentes qui sont utilisées depuis de nombreuses années pour améliorer la technologie sans fil.

On constate qu'entre un émetteur et un récepteur, le signal peut emprunter plusieurs chemins. De même, en déplaçant les antennes, même d'une petite distance, les chemins utilisés vont changer. La variété des chemins disponibles résulte du nombre d'objets qui apparaissent sur le côté ou même dans le chemin direct entre l'émetteur et le récepteur. Autrefois, ces chemins multiples ne servaient qu'à introduire des interférences. En utilisant le MIMO, ces chemins supplémentaires peuvent être utilisés de manière avantageuse. Ils peuvent être utilisés pour fournir une robustesse supplémentaire à la liaison radio en améliorant le rapport signal/bruit, ou en augmentant le débit de transmission et la capacité des données de la liaison.

## I. 5. MIMO Massive :

La dernière grande nouvelle de la 5G est l'utilisation du MIMO massive. Cette technologie utilise un grand nombre d'antennes pour connecter M Antenne à K périphérique. Comparé à K, M est ici très grand. La figure (I.7) donne une description de la technique MIMO massive. La technologie MIMO massive peut être 100 à 1000 fois plus efficace que les technologies 4G. L'idée est d'effectuer plusieurs communications simultanées en utilisant la même ressource temps-fréquence. L'efficacité spectrale est beaucoup plus forte grâce à cette technique.

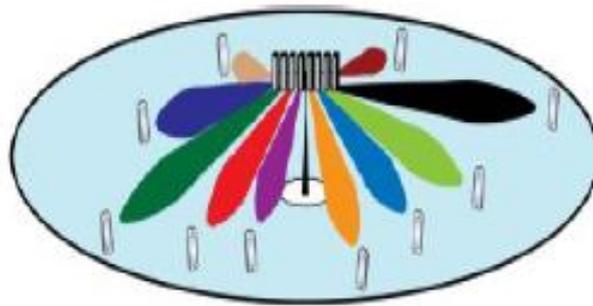


Figure I. 7 : Un système MIMO massive [8].

Ce concept fait référencer au grand nombre d'antennes utilisées dans un réseau MIMO [9].

La figure I.8 montre les principaux scénarios d'application de la technologie massive MIMO dans le système de communication 5G. Les cellules se divisent en macro-cellules et microcellules, elles peuvent être déployées sur un réseau dans les scénarios intérieur ou extérieur. Le nombre d'antennes pour la station de base est illimité, et le nombre d'antennes pour les utilisateurs peut être augmenté [10].

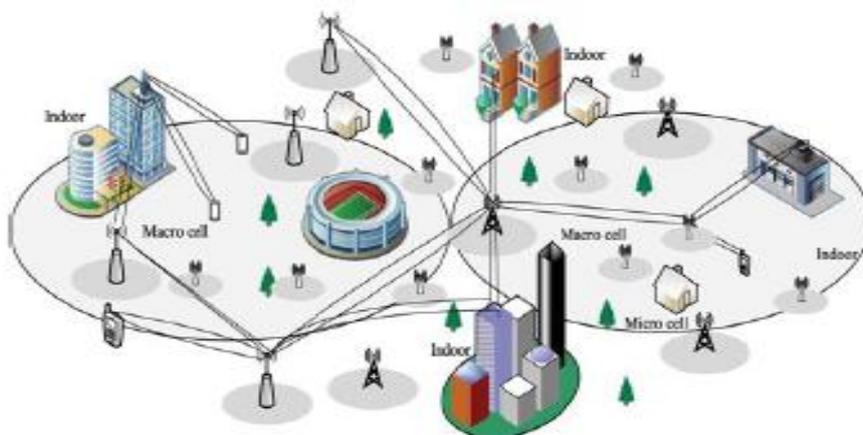


Figure I. 8 : Scénarios d'application des technologies MIMO massives.

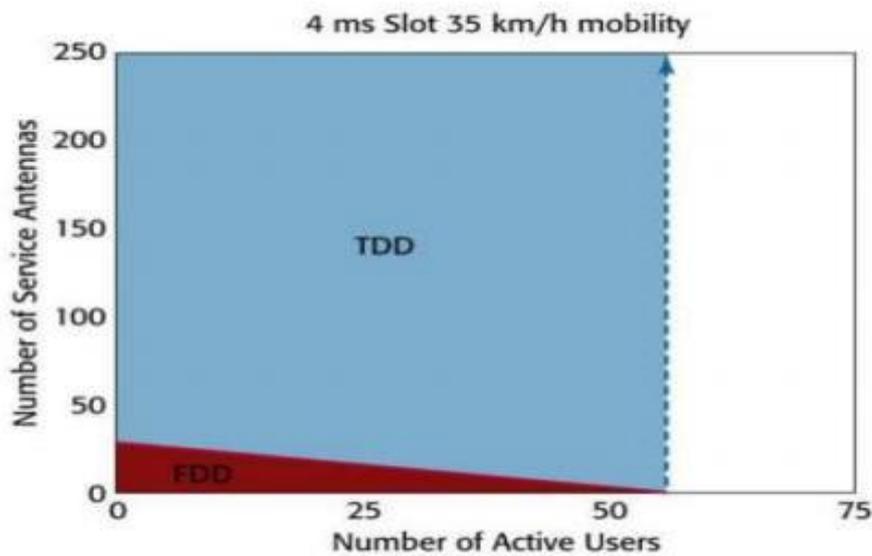
### I. 6. Caractéristiques de MIMO massive :

MIMO massive est une forme de structure MU-MIMO dans laquelle la variété d'antennes BS et le nombre d'UT sont importants. Dans un massive MIMO, des milliers d'antennes BS fournissent simultanément des services à des dizaines, voire des centaines d'utilisateurs avec la même ressource de fréquence. Certains points de base essentiels de massive MIMO sont :

#### I. 6.1. TDD vs FDD pour le MIMO massive :

Le système MIMO massive utilise le multiplexage spatial, il est donc nécessaire d'avoir une bonne connaissance du canal, tant au niveau de la liaison montante que de la liaison descendante. Au niveau de la liaison montante, il est plus facile d'estimer le canal lorsque les terminaux envoient des signaux à la station de base, alors que c'est plus difficile au niveau de la liaison descendante. La station de base transmet d'abord des signaux aux terminaux, puis estime le canal afin de pouvoir le quantifier. Enfin, l'estimation résultante est renvoyée à la station de base. Cette technique est impossible pour massive MIMO pour deux raisons. Premièrement, le signal au niveau de la liaison descendante doit être orthogonal, c'est-à-dire que plus le nombre d'antennes augmente, plus la fréquence et le temps sont utilisés par rapport au MIMO classique. Deuxièmement, comme chaque terminal accepte plusieurs signaux, l'estimation du canal augmente ensuite avec le nombre d'antennes d'émission.

La solution à ce problème est donc d'utiliser la technique du Duplexage par Répartition dans le Temps (ou Time-Division Duplex, TDD) et de compter sur la réciprocité des liaisons montantes et descendantes du canal. En mode FDD (Frequency Division Duplex), l'estimation du canal est basée sur le nombre  $M$  d'antennes de la station de base. En revanche, en mode TDD, le temps d'estimation du canal n'est pas biaisé par  $M$ . En MIMO massive,  $M$  est grand, et le fonctionnement TDD est donc préférable. Par exemple, supposons que l'intervalle de cohérence soit de  $T=200$  symboles (correspondant à un temps de cohérence de 1 ms et une largeur de bande de cohérence de 200 kHz). Dans les systèmes FDD, le nombre d'antennes de station de base et le nombre d'unités de traitement sont limités par  $M + K < 200$ , alors que dans les systèmes TDD, la contrainte sur  $M$  et  $K$  est  $2K < 200$ . On peut voir sur la figure I.9 que la région FDD est plus petite que la région TDD. Avec le TDD, l'ajout d'antennes supplémentaires n'affecte plus les sources nécessaires à l'acquisition du canal [11].



**Figure I. 9 :** Le gain écrasant de TDD sur FDD pour les UT.

La figure I.9 présente le gain considérable du TDD par rapport au FDD pour les UT. L'axe vertical est le nombre d'antennes de la station de base et l'axe horizontal est le nombre des UTs. La zone bleu clair montre la taille de l'équipement utilisateur accessible avec le TDD par rapport à la zone rouge beaucoup plus petite du FDD.

## I. 6.2. L'évolutivité :

Dans le système MIMO massive, la station de base effectue l'apprentissage du canal par l'intermédiaire d'un entraînement sur la liaison montante, selon la technique TDD. Le temps nécessaire à l'estimation du canal est indépendant du nombre d'antennes de la station de base. Par conséquent, le nombre d'antennes de la station de base peut être aussi grand que souhaité sans augmenter le temps d'estimation du canal.

## I. 6.3. Propagation favorable :

Une propagation favorable, définie comme l'orthogonalité mutuelle entre les canaux vectoriels aux terminaux, est l'un des facteurs clés du canal radio utilisé dans massive MIMO. Cependant, peu de travaux ont été réalisés sur cette question en détail. Au fur et à mesure que le nombre d'antennes de la station de base utilisée augmente, le MIMO massive tend à avoir une propagation favorable. Ceci est dû au contrôle du grand nombre [12].

### I. 7. Avantages du MIMO massive :

Les principaux avantages des systèmes MIMO massives peuvent être résumés comme suit [13] :

- Gain d'efficacité spectrale élevé.
- Gain d'efficacité énergétique élevé.
- Traitement simple.
- Robustesse et fiabilité accrues.
- Réduction des coûts dans les composants RF.
- Augmentation du débit de données.
- Augmentation du rapport signal sur bruit de liaison de base.
- Renforcement des canaux.

### I. 8. Types de MIMO massive :

#### I. 8. 1. Système MIMO mono-utilisateur :

Le système MIMO mono-utilisateur se compose d'une station de base avec plusieurs antennes d'un côté et d'un utilisateur unique de l'autre côté. Du point de vue de l'efficacité énergétique, l'utilisation d'un réseau d'antenne massive pour desservir un seul ou un petit nombre d'utilisateurs finaux n'est pas judicieuse [12].

Dans le cas d'un système MIMO mono-utilisateur, le signal reçu par l'utilisateur est donné par :

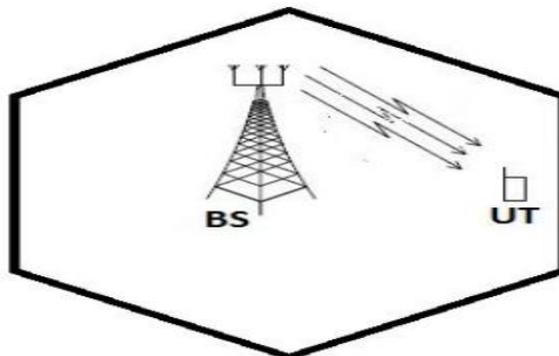


Figure I. 10 : MIMO massive mono-utilisateur.

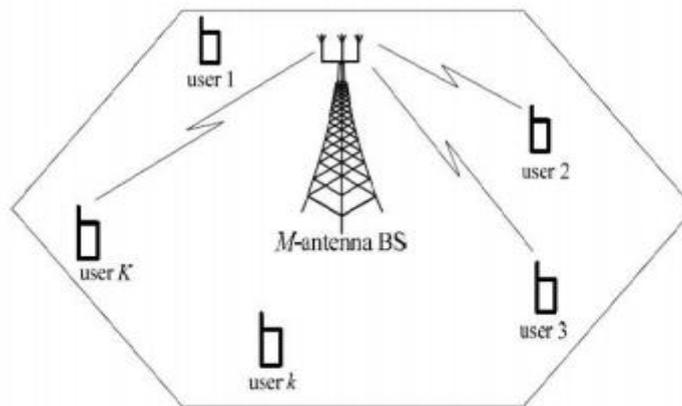
$$Y = \sqrt{Pu} \mathbf{h} \mathbf{s} + \mathbf{w} \quad (\text{I.2})$$

Dénotez par  $Pu$  le SNR de la liaison montante, par  $\mathbf{h}$  le vecteur de réponse de canal, par  $\mathbf{s}$  le vecteur de symbole et par  $\mathbf{w}$  vecteur de bruit AWGN.

### I. 8.2. Système MIMO Massive Multi-utilisateurs :

Le système MIMO massive multi-utilisateurs est un système contenant un nombre d'antennes  $M$  relativement élevé ( $M > 10$ ) au niveau de la station de base. Ce grand nombre d'éléments rayonnants, chacun contrôlé numériquement, va permettre un contrôle fin du rayonnement global de la station de base.

Bien que tout à fait adaptée aux transmissions point à point, cette particularité fait que cette solution est souvent associée aux techniques multi-utilisateurs en raison de son potentiel à concentrer l'énergie sur plusieurs positions particulières dans l'espace. Cette caractéristique est mise en œuvre par le processus de précodage, dont le rôle est d'exploiter une certaine connaissance du canal de propagation pour diriger plusieurs utilisateurs et les servir simultanément. Chacun d'entre eux peut alors bénéficier de la totalité de la bande passante et obtenir un débit très élevé. Notons que de nombreuses études considèrent des terminaux à antenne unique car l'ensemble du traitement est effectué à la station de base, l'utilisateur ne dispose pas des informations nécessaires pour effectuer le traitement de post-codage [14].



**Figure I. 11 :** Système MU-MIMO massive.  $M$ -antennes de BS dessert  $K$  simple antenne UT.

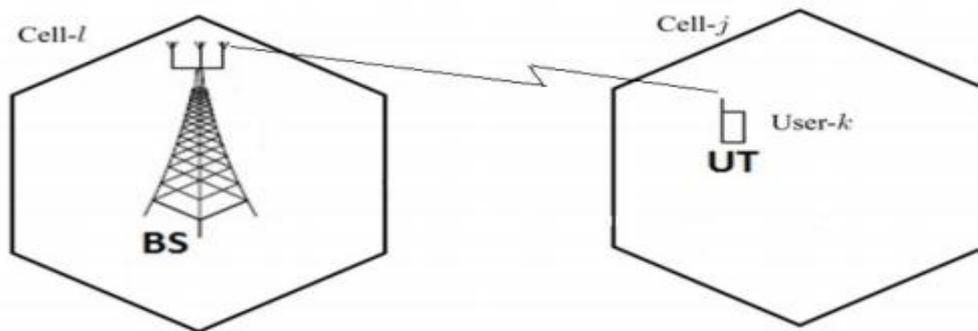
### I. 8.3. MU- Massive MIMO avec Multi-Cellscénario :

Dans cette partie, nous examinons la restriction des systèmes MIMO multi-utilisateurs pour les cellules non coopératives lorsque  $M$  croît de manière non limitée. Pour les systèmes MIMO à une seule cellule et à plusieurs cellules, l'augmentation illimitée de  $M$  annule le bruit et les évanouissements de Rayleigh. Cependant, l'interférence due à la contamination du pilote persiste.

L'idée de la contamination du pilote est nouvelle dans un contexte MU-MIMO cellulaire et est illustrée à la figure I.12. L'estimation du canal de la station de base de la cellule l est contaminée par le pilote de la cellule j. La station de base de la cellule l transmet son signal partiellement à côté des terminaux de la cellule adjacente. En raison du beamforming, le brouillage causé à la cellule j ne disparaît pas asymptotiquement lorsque  $M \rightarrow \infty$ . Pour cela, nous considérons le système cellulaire multi-utilisateurs MIMO-OFDM avec des cellules hexagonales et des sous-porteuses NFFT. Toutes les cellules ont M antennes à la station de base et couvrent K terminaux différents. Les stations de base sont supposées être non critiques. La matrice du canal composite  $M \times K$  entre les K UT de la cellule l et les BS de la cellule j est désignée par  $h_{jl}$ . Sur la base du principe de réciprocité, la matrice du canal de la liaison descendante entre la station de base de la cellule j et les terminaux de la cellule l est présentée par  $h_{jl}$ . Le signal reçu à la jème station de base sera le suivant :

$$Y_j = \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K \sqrt{P_u} h_{jlk} s_{lk} + w \quad (\text{I.3})$$

$$Y_j = \sum_{l=1}^L \sqrt{P_u} h_{jlk} s_{lk} + w \quad (\text{I.4})$$



**Figure I. 12 :** La BS dans la l-ième cellule et le k-ième UT dans la j-ième cellule.

### I. 8.4 MIMO massive distribuée :

Le MIMO massive distribuée et MU-MIMO peuvent être traités séparément pour fournir une capacité système supplémentaire en utilisant des antennes distribuées pour transmettre et recevoir des signaux. L'un des mécanismes du MIMO à dispersion massive est de permettre la coopération entre les stations de base dans des cellules distinctes, ce qui réduit les interférences entre les cellules. Cependant, même pour des antennes réparties dans la même station de base, la synchronisation devient un problème indispensable. Dans certains cas, la station de base peut également être placée dans un emplacement unique (par exemple, au sommet d'un bâtiment). En l'occurrence, la synchronisation est un problème, et les interfaces RF peu coûteuse peuvent également poser de plus grands problèmes.

### I. 9. Comparaison entre MIMO traditionnel et MIMO massive :

Par rapport à MIMO, les bienfaits de MIMO massive comprennent :

- Les effets du fast fading et du bruit non corrélé disparaissent avec le nombre croissant d'antennes dans la station de base.
- Grande efficacité spectrale.
- Haute fiabilité de la communication, faible TEB (taux d'erreur binaire).
- Traitement du signal simple. Les schémas simples de traitement linéaire.
- Faciliter l'allocation des ressources [15].
- Exploitation avancée de la diversité et des techniques de multiplexage.
- Augmentation de la capacité du système en termes de débit binaire.

### I. 10. Utilité pour la 5G :

Le monde cellulaire commence vraiment à entrer dans le MIMO massive, car la 5G en a besoin. Le spectre disponible pour la 5G est limité, donc l'efficacité du spectre est très importante. Les réseaux 5G devront également connecter des milliards d'appareils. Pour cela, ils ont besoin de la précision millimétrique et de l'efficacité énergétique d'un MIMO massive. Le gouvernement américain a récemment ouvert des nouvelles parties du spectre haut fréquence à la technologie 5G. Cela sera très utile à l'avenir, mais dans une courte période de transition, les fréquences inférieures à 6 GHz permettront une transition en douceur de la 4G / LTE. En fait, le MIMO massive fonctionne mieux à des fréquences inférieures à 6 GHz. Avec cette bande de fréquences, l'efficacité spectrale exceptionnelle du MIMO massive en fait un candidat idéal. Dans le processus d'innovation technologique, notre monde est devenu de plus en plus proche. L'internet des objets prend son envol, les voitures sans conducteur sont sur le point d'apparaître et des réseaux ont été mis en place pour construire des « villes intelligentes ». La 5G reprendra tous ces domaines et devra connecter des milliards d'appareils. Pour cette raison, le MIMO massive devra être en mesure d'envoyer des données dans les deux sens avec des appareils mobiles. L'efficacité énergétique du MIMO massive signifiera également que ces réseaux n'auront pas besoin d'énergie supplémentaire pour fonctionner. Il s'avère que ces attributs sont également nécessaires pour réaliser la 5G. Avec des milliards d'appareils en ligne et un spectre limité, la 5G nécessitera un MIMO massive pour nous aider à regarder vers l'avenir [16].

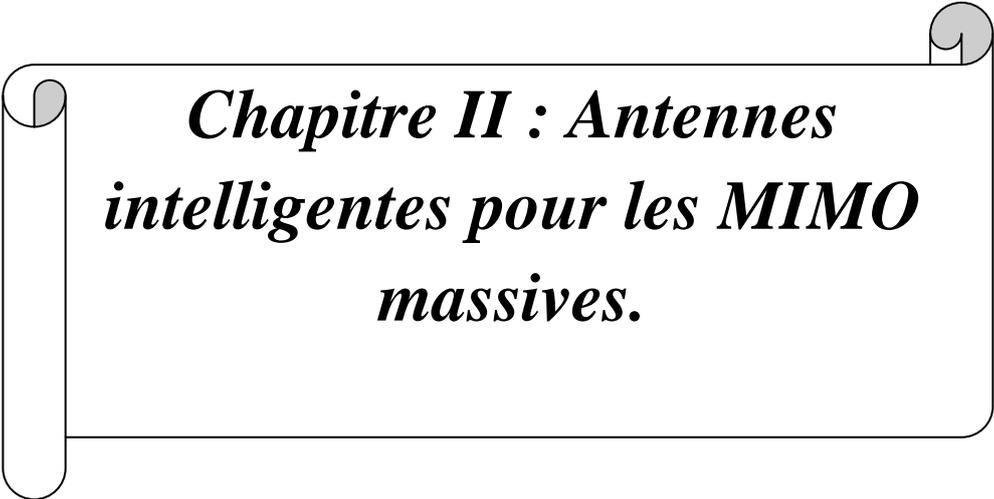
### I. 11. Défis des systèmes MIMO massive :

Les systèmes MIMO massives ont beaucoup fait parler d'eux depuis l'introduction des objectifs de débit de la 5G. Il s'agit d'une technologie de pointe qui, bien qu'elle réponde aux exigences de la prochaine génération, elle présente de nouveaux défis pour l'avenir. Selon la littérature actuelle sur le MIMO massive [17]. Les principales orientations de recherche sur les MIMO massives sont :

- La gestion des ressources.
- Précodage et détection.
- Performance et limitation physique.
- Stratégies de déploiement d'antennes.
- Contamination pilote.
- Estimation du canal.
- Efficacité énergétique.
- Efficacité spectrale.

### I. 12. Conclusion :

Les systèmes MIMO massives à entrées multiples et à sorties multiples renvoient à l'idée d'équiper les stations de base cellulaires d'un très grand nombre d'antennes afin d'augmenter le débit du canal par multiplexage spatial et d'améliorer l'efficacité de la transmission. Soit plusieurs émetteurs transmettent via différentes antennes sur des canaux de propagation indépendants afin d'augmenter la capacité de transmission d'un ou plusieurs utilisateurs, ou les mêmes utilisateurs, soit le même signal de sortie est transmis via plusieurs antennes et combiné dans le récepteur pour faire évoluer la qualité du signal (diversité de réception). Les systèmes MIMO massives utilisent des techniques de diversité, de multiplexage spatial ou beamforming pour améliorer la qualité du signal et les performances de la liaison.



***Chapitre II : Antennes  
intelligentes pour les MIMO  
massives.***

### Chapitre II : Antennes intelligentes pour les MIMO massives

#### II. 1. Introduction :

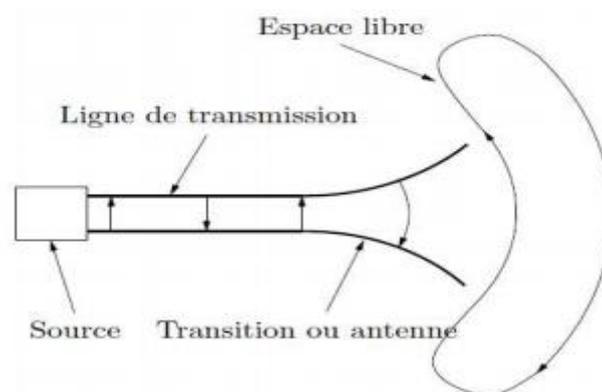
Alors que l'utilisation des systèmes de communication sans fil continue de progresser, nous devons nous concentrer sur le déploiement de nouvelles technologies pour rendre le réseau de plus en plus efficace. Il a été proposé d'utiliser cette technologie appelée MIMO pour des réseaux d'antennes équipés d'émetteurs et de récepteurs pour une transmission à haut débit. Par conséquent, l'utilisation de cette technologie peut améliorer considérablement le débit et la qualité de la transmission des données.

L'objectif de ce chapitre est de présenter en détail les concepts liés aux systèmes d'antennes intelligentes. Un aperçu sur le mode de fonctionnement ainsi que les concepts liés aux systèmes MIMO massives des antennes intelligentes afin de faire une projection sur l'objectif des travaux menés durant notre mémoire.

#### II. 2. Définition d'antenne :

L'antenne est le transducteur entre le milieu de propagation et le système dans lequel elle fonctionne. Il est un dispositif qui transforme les ondes électromagnétiques guidées en ondes rayonnées dans l'espace libre en mode émission ou l'inverse en mode réception, donc de recevoir ou d'émettre des ondes radioélectriques [20].

Les antennes font partie d'un système de télécommunication et sont utilisées pour rayonner ou recevoir des ondes électromagnétiques.



**Figure II. 1 :** Schéma général d'une antenne en mode transmission.

1. L'antenne en mode d'émission (Figure II.2a).
2. L'antenne en mode et réception (Figure II.2b).

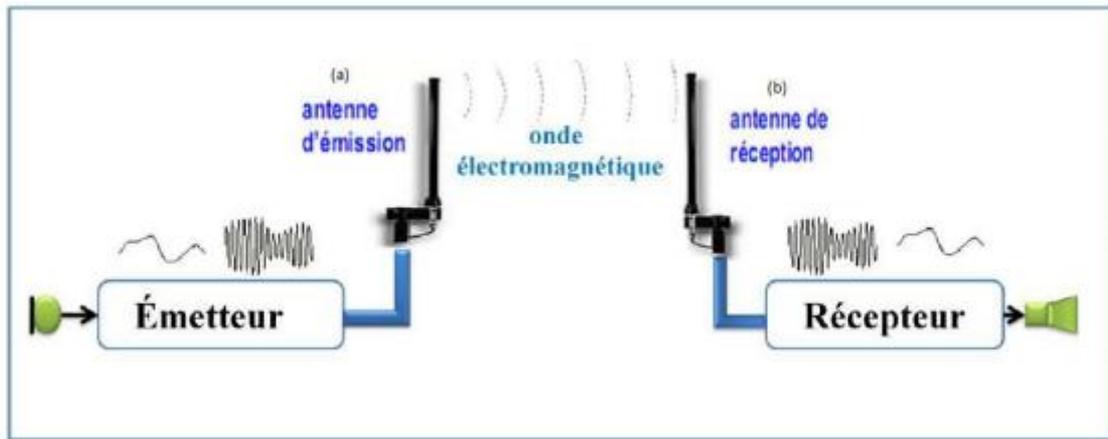


Figure II. 2 : L'antenne en mode d'émission(a) et réception (b).

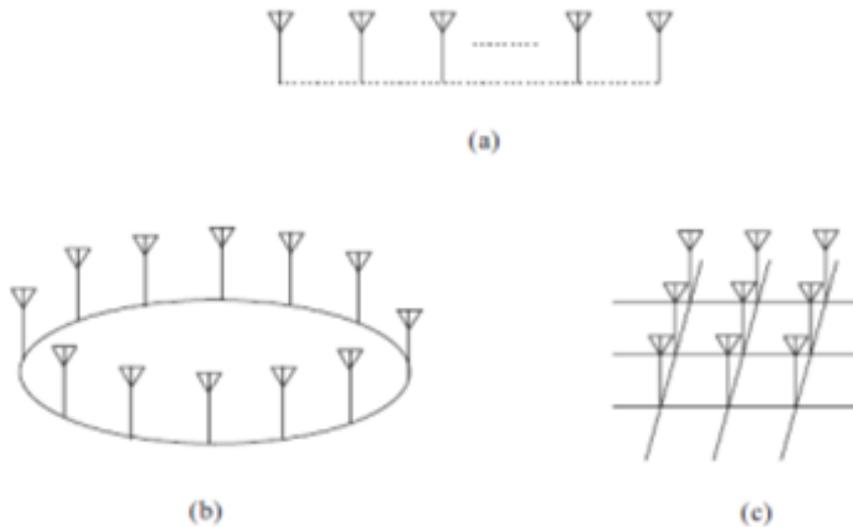
### II. 3. Antennes réseaux :

Le réseau d'antennes est composé de capteurs spatialement séparés et la sortie des capteurs est introduite dans le réseau pondéré. En général, toute combinaison d'éléments dans différentes structures géométriques peut former un réseau [21].

- L'espacement entre les éléments du réseau est suffisamment petit pour qu'il n'y ait pas de changement d'amplitude entre les signaux reçus aux différents éléments.
- Il n'y a pas de couplage mutuel entre les éléments.
- Tous les champs incidents peuvent être décomposés en nombres discrets d'ondes planes. En d'autres termes, le nombre de signaux est limité.
- Par rapport à la fréquence porteuse, la bande passante du signal incident sur le réseau est plus petite.

Il existe plusieurs types de réseaux d'antennes tels que le réseau linéaire uniforme, planaire et circulaire [22], comme le montre la figure II.3.

- ❖ **Antennes en réseaux linéaires (lignes droites) :** Pour les réseaux linéaires, les éléments rayonnants sont placés l'un après l'autre par des déplacements parallèles sur une même droite comme le montre la figure II.3a.
- ❖ **Antennes en réseaux circulaires :** Une antenne composée d'un groupe d'éléments rayonnants identiques, où chaque groupe de points est placé sur un cercle, comme le montre la figure II.3b.
- ❖ **Antennes en réseaux plans :** Pour les réseaux plans, les éléments rayonnants sont dérivés les uns des autres par translation parallèle au même plan. Figure II.3c.



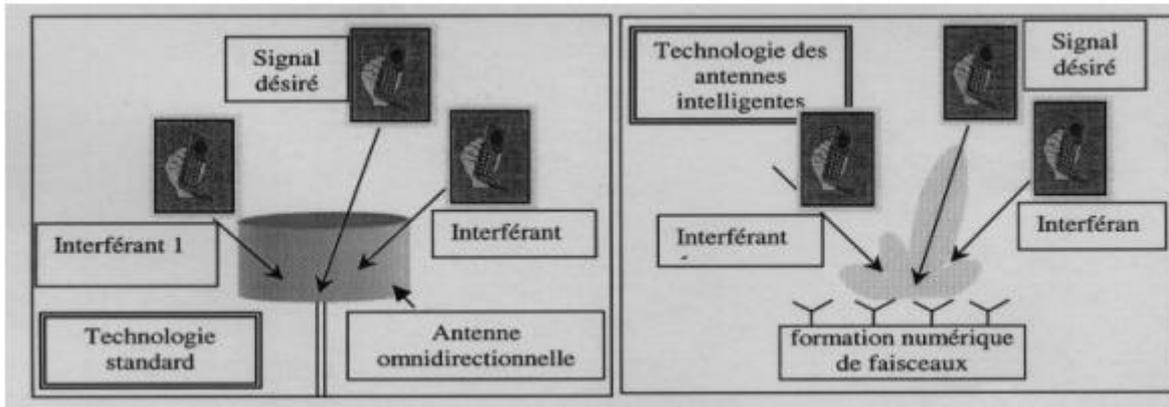
**Figure II. 3 :** Différentes géométries de réseaux pour les antennes intelligentes.

### II. 4. Antennes intelligentes :

Les systèmes à antennes intelligentes (smart antenna) entrent dans un domaine technologique multidisciplinaire dont la croissance a été très importante dans le courant de ces dernières décennies. Ils bénéficient des interactions croissantes entre l'électromagnétisme et le traitement de signal. L'intérêt de ces systèmes est leur capacité à réagir automatiquement, en temps réel, à des modifications du canal de propagation. Ils permettent de réduire les niveaux des lobes secondaires existants dans la direction de l'interférence, tout en maintenant le lobe principal en direction utile [23]. Habituellement, ces systèmes reposent sur un réseau d'antennes et sur un processeur récepteur adaptatif en temps réel qui attribue des pondérations aux éléments, afin d'optimiser le signal de sortie selon les algorithmes de contrôle prédéfinie [24].

#### II. 4. 1. Concept d'antennes intelligentes :

Les antennes intelligentes représentent un moyen prometteur pour améliorer la capacité des systèmes de transmission. L'idée est d'utiliser la dimension spatiale des capteurs. La figure II.4 présente ce principe.



**Figure II. 4 :** Le principe de base d'opération d'une antenne intelligente.

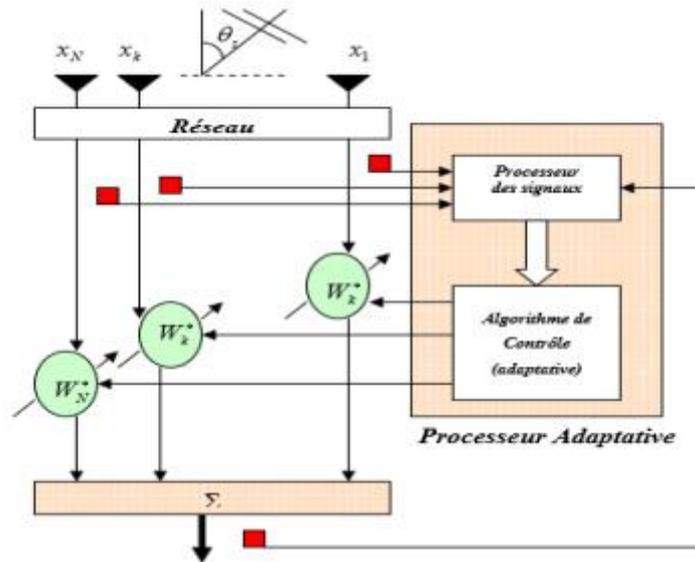
Le principe de base peut se résumer aux étapes suivantes :

- 1- La station de base intelligente focalise sur un signal en particulier plutôt de capter les signaux provenant de toutes les directions.
- 2- Former des faisceaux d'énergie orientés vers un usager particulier sans avoir à connaître l'emplacement de cet usager. Cela serait comparable à un dispositif de poursuite, une sorte de signature spatiale. C'est comme doter chaque téléphone cellulaire de sa propre liaison sans fil.
- 3- Il faut moins d'énergie pour focaliser un signal sur 20 degrés qu'il en faut pour l'orienter sur 360 degrés. Cette économie d'énergie prolongerait en outre la durée de vie de la pile.

Donc, en ajoutant un éventail d'antennes et ayant recours à un mode perfectionné de traitement numérique des signaux, on peut créer les antennes intelligentes [25].

### **II. 4. 2. Structure d'une antenne intelligente :**

La structure de l'antenne intelligente est illustrée sur la figure II.5. Il est constitué d'un réseau de  $M$  antennes élémentaires dont la sortie est pondérée par un nombre complexe  $\omega$  avant d'être sommée. L'unité de contrôle de la pondération rend possible la mise en forme d'un diagramme de rayonnement en ajustant "intelligemment" l'amplitude et/ou la phase avec lesquelles les signaux reçus (ou émis) sur les différents éléments sont combinés.



**Figure II. 5 :** Schéma représentatif d'une antenne adaptative.

La sortie du réseau s'écrit [26] :

$$Y(t) = [w_1, w_2, \dots, w_N] \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_1(t) \\ \cdot \\ \cdot \\ x_N(t) \end{bmatrix} = w^H(t)x(t) \quad \text{(II.1)}$$

Où  $w^H(t)$  est le conjugué de la transposée complexe de du vecteur de poids.

$x_i(t)$  Désigne le signal reçu par la  $i$ -ème antenne.

Si nous posons que le premier élément de réseau est la référence de phase, le déphasage relatif du signal reçu au  $n^{i\text{ème}}$  élément est :

$$\phi_n = [2\pi d(n-1)/\lambda] \sin\theta_s \quad \text{(II.2)}$$

Nous désignons par  $\theta_s$  la direction du signal incident et  $e$  le diagramme élémentaire. Alors le signal sur le  $n^{i\text{ème}}$  élément est :

$$x_n(t) = e \cdot \exp j (wt + \phi_n) \quad \text{(II.3)}$$

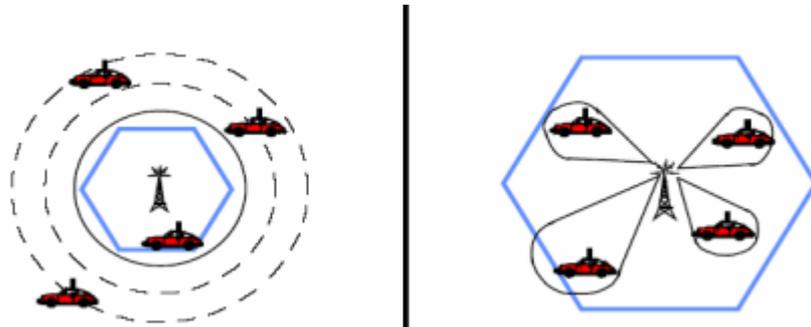
Nous obtenons en fin :

$$y(t) = \sum_{n=1}^N e \cdot w_n \cdot \exp j \left[ wt + \left( \frac{2nd(n-1)}{\lambda} \right) \sin\theta_s \right] \quad \text{(II. 4)}$$

### II. 5. Avantages des antennes intelligentes :

Les avantages de l'utilisation d'antennes intelligentes sont nombreux :

- Annulation des brouillages, 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 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.



**Figure II. 6 :** Augmentation de la capacité.

- Meilleurs services : l'utilisation des systèmes à antenne intelligente permet au réseau d'avoir l'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.

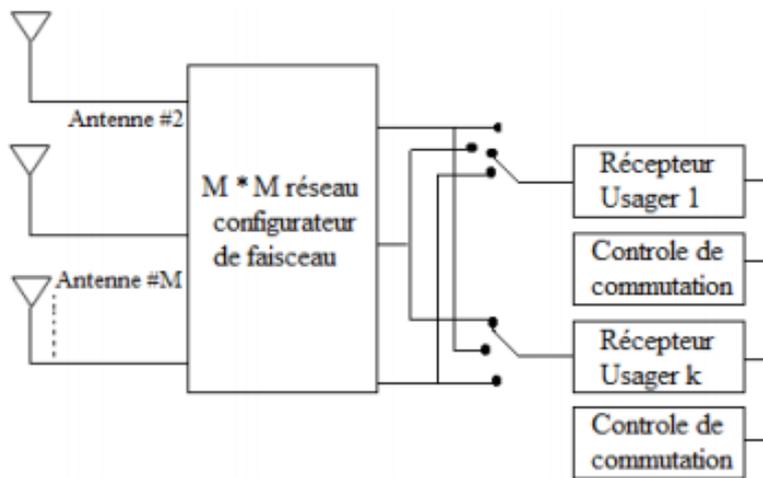
- Dépenses réduites à cause du rendement de la puissance fournie par le système à antenne intelligente en combinant les entrées des multiples éléments pour optimiser le gain disponible vers l'utilisateur, et qui résulte dans les coûts réduits d'amplificateur et la faible consommation d'énergie.
- Meilleure sécurité : Dans une société qu'est de plus en plus dépendante de la conduite des affaires et de la transmission de renseignements personnels, la sécurité est une question importante. L'utilisation des systèmes à antenne intelligente diminue le risque de tapement de connexion. L'intrus doit être situé dans le même sens que l'utilisateur comme on le voit à partir de la station de base [27].
- Compatibilité : La technologie d'antenne intelligente peut être appliquée à différentes techniques d'accès multiples, telles que TDMA, FDMA et CDMA. Elle est compatible avec presque toutes les méthodes de modulation et des bandes passantes [28].

### II. 6. Types des antennes intelligentes :

Il existe deux types de systèmes d'antennes intelligentes, le système d'antenne à faisceau commutés (SBA) et le système de réseau d'antennes adaptatif. Les deux types de systèmes peuvent augmenter le gain en fonction de l'emplacement de l'utilisateur. Cependant, un seul système adaptatif peut obtenir le meilleur gain en identifiant, en suivant et en minimisant les interférences de signal.

#### II. 6. 1. Systèmes d'antennes à faisceaux commutés SBA :

Le système se compose de plusieurs faisceaux fixes avec une sensibilité élevée dans des directions spécifiques. Le système détecte le signal le plus fort, et lorsque le mobile se déplace dans tout le secteur, il achèvera le passage d'un faisceau à un autre. Ce procédé de faisceau de commutation peut être considéré comme une extension du système cellulaire en forme de secteur, offrant ainsi une plus grande sélectivité spatiale. Comme le montre la figure II.7, un système à faisceaux commutés est formé essentiellement d'un réseau d'antennes lié à un réseau commutateur 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 [29].



**Figure II. 7 :** Structure d'un système à faisceaux commutés.

Si le dispositif mobile est situé au bord de l'azimut du faisceau, le signal fort s'atténuera rapidement avant que l'utilisateur ne passe d'un micro-secteur à un autre. De plus, le système de faisceau commuté ne peut pas faire la distinction entre les signaux souhaités et les signaux d'interférence. Si le signal d'interférence est à l'intérieur du faisceau sélectionné, la qualité du signal sera dégradée. A noter qu'il existe deux types de systèmes séparateurs de faisceaux, à savoir les types quasi-optiques, comme les lentilles et les circuits Rotman (matrice de Blass, matrice de Butler ...).

### II. 6. 2. Antennes adaptatives :

Depuis les travaux pionniers de Howells et Applebaum à l'Université de Syracuse dans les années 1960, les antennes adaptatives ont fait l'objet de travaux de recherche importants initialement développés pour les applications radar, sonar et sismologie, elles ont depuis environ deux décennies fait leur apparition dans le domaine des radiocommunications fixes et mobiles [30]. Le système d'antenne adaptative continuera de s'adapter aux changements de l'environnement radio. Sur la base d'algorithmes complexes de traitement du signal, ils peuvent distinguer en permanence les signaux utiles des signaux à trajets multiples et d'interférence et calculer leur direction d'arrivée. Avec la possibilité de suivre et de supprimer avec précision les interférences, plusieurs utilisateurs peuvent partager le même canal dans la même cellule. L'antenne focalise son lobe principal en direction de la source de détection. En utilisant un système d'antenne adaptative, il est possible d'obtenir des performances supérieures à celles obtenues en utilisant un système SBA (Switching Beam Antenna). En commutant les faisceaux d'une antenne multifaisceaux, il est aisé d'exclure les équipements brouilleurs ou brouillés qui ne se trouvent pas sur le faisceau principal. Théoriquement, une antenne à  $M$  composants peut supprimer  $(M-1)$  brouilleurs en appliquant une pondération adéquate aux éléments [31]. En pratique, cette capacité de suppression diminue en présence des composants multi-trajets.

La figure II.8 montre le principe de fonctionnement d'un réseau adaptatif.

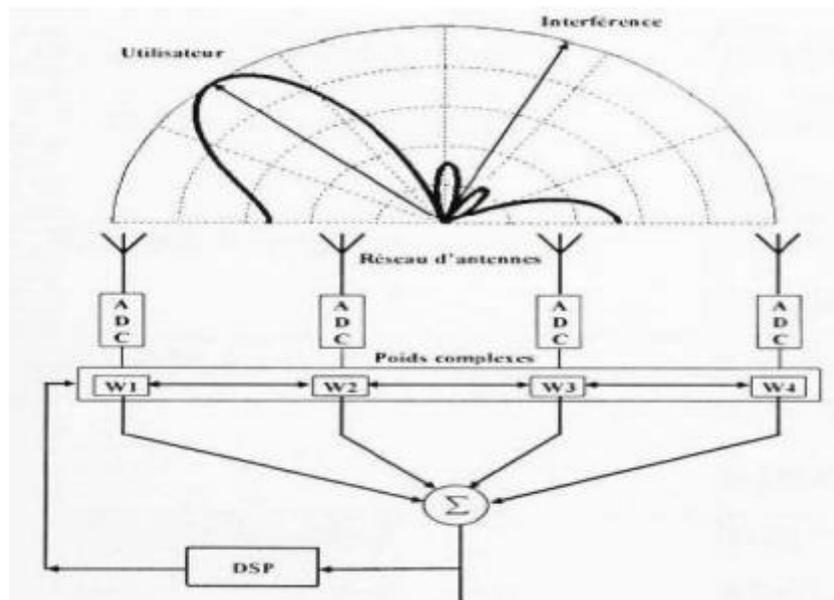


Figure II. 8 : Réseau adaptatif à 4 éléments.

### II. 7. Les algorithmes adaptatifs :

Pour obtenir les pondérations optimales, diverses méthodes sont possibles. Le choix de l'algorithme qui permet d'atteindre la solution optimale est une étape cruciale car de lui dépendent la vitesse de convergence et la complexité d'intégration matérielle. Les algorithmes utilisés sont [32] :

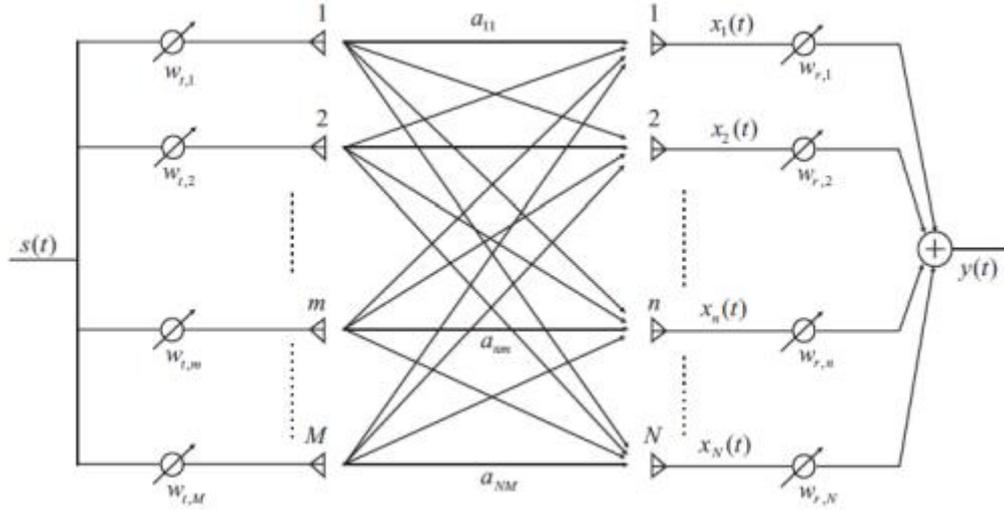
1. LMS (Least Mean Square) : Algorithme des moindres carrés. L'algorithme LMS est certainement l'algorithme adaptatif le plus populaire qui existe en raison de sa simplicité.
2. Algorithme des moindres carrés récursifs (RLS, Recursive least squares algorithm).
3. Inversion directe de la matrice de convergence (DMI).
4. Algorithme à module constant (CMA- Constant modulus algorithm).

### II. 8. Antennes MIMO beamforming :

Les systèmes MIMO beamforming permettent de diriger les signaux numériques sur les différentes antennes vers une direction d'intérêt à l'émission et à la réception. Ceci peut être réalisé par la pondération à l'émission et à la réception des signaux, que nous utilisons pour les canaux à évanouissement sélectif en fréquence.

#### II. 8. 1. Concept de base :

Un système de communication à bande étroite de M antennes d'émission et N antennes de réception est illustré à la figure II.9.



**Figure II. 9 :** Configuration de canal MIMO à bande étroite avec Beamforming.

Dans l'hypothèse d'un évanouissement plat, la caractéristique de propagation entre ces réseaux est exprimée par la matrice de transmission  $A$ , où  $a_{n,m}$  représente la réponse du gain du canal entre le  $m$ -ième élément d'antenne dans l'émetteur et le  $n$ -ième élément d'antenne dans le récepteur. Le signal de transmission  $s(t)$  est distribué au réseau d'antennes et multiplié par la pondération complexe  $\omega_t$ , pour le  $m$ -ième élément. En ajoutant le bruit blanc gaussien et en multipliant par le poids complexe  $\omega_r$ , pour le  $n$ -ième élément, le signal de sortie  $y(t)$  du système est donné par [33] :

$$y(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} \omega_{r,n}^* a_{n,m} \omega_t s(t) + \sum_{n=0}^{N-1} \omega_{r,n}^* n_n(t) \quad (\text{II. 5})$$

L'équation (II.5) peut être exprimée sous une forme vectorielle.

$$y(t) = W_r^H A W_t^H s(t) + W_r^H n(t) \quad (\text{II.6})$$

Où :

$$W_r = [\omega_{r,0}, \omega_{r,1}, \dots \dots \dots , \omega_{r,M-1}]^T \quad (\text{II.7})$$

Et

$$W_t = [\omega_{t,0}, \omega_{t,1}, \dots \dots \dots \omega_{t,-1}]^T \quad (\text{II.8})$$

Ici  $(.)^H$ ,  $(.)^*$ , et  $(.)^T$  représente le transposé hermitien, le conjugué et le transposé du vecteur (ou matrices).

Sur la base de la méthode de combinaison de rapport maximal (MRC), avec les vecteurs de pondération d'émission et de réception  $w_t$  et  $w_r$  en terme de la contrainte  $\|w_t\| = \|w_r\| = 1$ , le maximum du rapport signal sur bruit de la sortie est donné par :

$$SNR_{out} = \frac{w_r^H A w_t w_t^H A^H w_r}{\|w_r\|} \frac{P_S}{P_N} \quad (\text{II.9})$$

Où  $P_S$  et  $P_N$  sont la puissance du signal transmis et le bruit. Ainsi,  $\frac{P_S}{P_N}$  est mesuré à l'entrée SNR.

Si la matrice du canal  $A$  est bien connue des deux côtés, le SNR reçu est optimisé en choisissant les vecteurs de poids  $w_r$  et  $w_t$  en tant que vecteurs propre principal de gauche et de droite de la matrice du canal  $A$ . Le SNR reçu correspondant est donné par :

$$SNR_{out} = \lambda_{max} SNR_{in} \quad (\text{II.10})$$

Où  $\lambda_{max}$  est la plus grande valeur propre de la matrice de Wishart  $AA^H$ .

La capacité résultante peut être donnée par [34] :

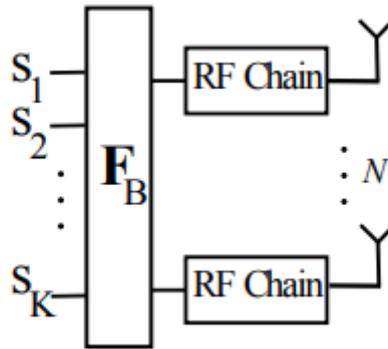
$$C = \frac{\log_2(1 + \lambda_{max} SNR_{in}) b/s}{Hz} \quad (\text{II.11})$$

### II. 9. Antennes MIMO massives beamforming :

En général, le beamforming est défini comme un type de technique de filtrage spatial pour exploiter les propriétés spatiales des signaux à partir des capteurs multiples. Par exemple, en manipulant la phase et l'amplitude des signaux de chaque capteur, la formation des faisceaux peut être effectuée de telle sorte que les signaux d'une direction désirée soient ajoutés de manière constructive ou déconstruite. Le terme beamforming est souvent utilisé comme technique à la fois à l'émetteur et au récepteur pour augmenter le SNR reçu. Alors que les termes précodage et combinaison sont toujours utilisés lorsque le filtre spatial est conçu pour atteindre le multiplexage spatial à l'émetteur et au récepteur.

Dans les systèmes MIMO conventionnels, chaque élément d'antenne est connecté au processeur de bande de base. Cela nécessite un mélangeur, un convertisseur analogique-numérique (CAN) ou un convertisseur numérique-analogique (CNA), des filtres et des amplificateurs dédiés par antenne. La série des composants qui relient les antennes à la bande de base sont appelés chaînes de radiofréquence (RF). Par conséquent, le précodage et la combinaison peuvent être effectués à la bande de base par des techniques numériques de formation de faisceaux où il y a un contrôle total sur la phase et l'amplitude des signaux à partir de chaque élément d'antenne. La figure II.10 montre le diagramme de bloc d'un précodeur numérique avec  $N$  antennes et chaînes RF [35].

Plus le nombre d'éléments d'antenne au niveau de l'émetteur-récepteur est important, plus les gains de diversité et de multiplexage sont élevés et plus la matrice du canal tend à présenter des conditions favorables [36,37]. En outre, la puissance totale de transmission peut être réduite à mesure que de grands gains de formation de beamforming sont fournis.



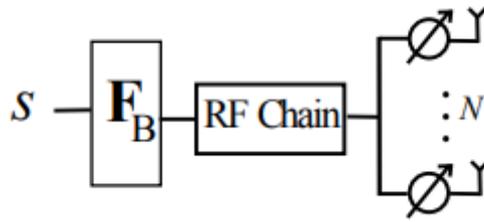
**Figure II. 10 :** Le diagramme de bloc d'un précodeur numérique.

Il a également été démontré que les techniques de précodage et de combinaison linéaire telles que le filtrage adapté (MF) et le forçage à zéro (ZF) peuvent donner lieu à une performance asymptotiquement optimale en raison des propriétés de propagation favorables [36]. Cependant, les chaînes RF sont chères et ont une consommation d'énergie élevée [38], en particulier dans les systèmes mmWave qui ont une grande bande passante [39,40]. Par conséquent, la consommation de coûts et d'énergie peut devenir un facteur prohibitif dans l'application de beamforming numériques dans des scénarios MIMO massives.

Afin de réduire le nombre de chaînes RF dans les systèmes MIMO avec des grands réseaux, des techniques de sélection d'antennes difficiles et progressives sont proposées [41].

Dans la sélection dure, les chaînes RF sont reliées aux antennes par un réseau de commutateurs. Selon la mesure des performances, par exemple en maximisant l'efficacité spectrale, le meilleur ensemble d'antennes est sélectionné. La performance optimale est obtenue par une recherche exhaustive sur différentes combinaisons des antennes sélectionnées. Cependant, il s'agit d'un problème d'optimisation combinatoire et il impose une grande complexité de calcul. Par conséquent, des approches sous-optimales, basées sur l'optimisation convexe pour maximiser l'efficacité spectrale, sont proposées dans [42]. L'inconvénient de la sélection des antennes dures est que de grands gains de formation de faisceaux ne peuvent pas être réalisés lorsque le nombre d'antennes est significativement plus grand que le nombre de chaînes RF en raison de la perte de gain de réseau.

Dans la sélection des antennes souples, les chaînes RF et les antennes sont connectées par un réseau de déphaseurs [39,41]. La section suivante présente un résumé des techniques de sélection souple les plus récentes, notamment le beamforming analogique et le beamforming hybride.



**Figure II. 11 :** Le diagramme de bloc d'un beamforming analogique.

### II. 9. 1. Sélection d'antennes souples :

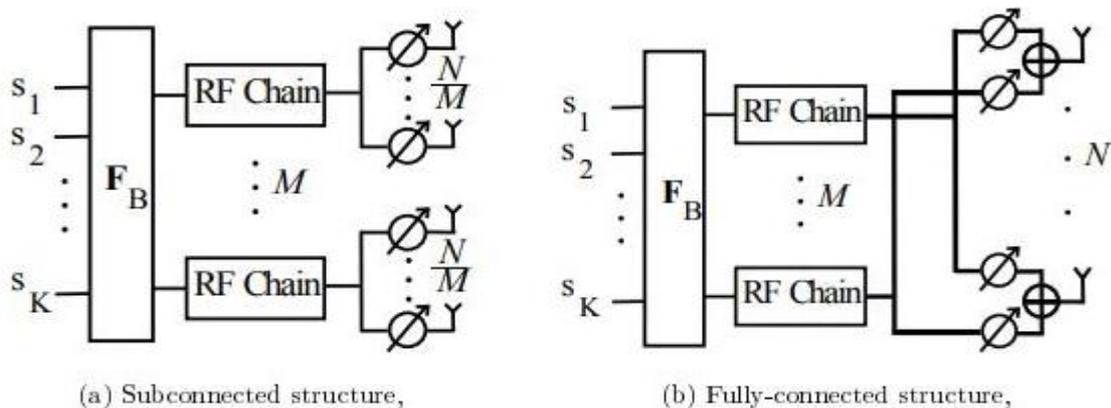
Dans cette approche, un réseau de déphasage est utilisé pour connecter la bande de base au réseau d'antennes. Ensuite, la procédure de formation des faisceaux peut être divisée en beamforming numérique et beamforming RF. Le beamforming RF est effectué en utilisant des circuits analogiques en changeant la phase des signaux sur les antennes. Puisque le processus de beamforming a lieu dans le domaine RF et en utilisant des dispositifs analogiques, les termes beamforming analogique et RF beamforming sont couramment utilisés de façon interchangeable dans la littérature ainsi que dans ce mémoire. Toutefois, il est à noter que le terme « beamforming analogique » dans la littérature fait également référence à la structure de la fig. II.11 où le réseau d'antennes avec des  $N$  éléments est relié à une seule chaîne RF. Dans ce schéma, chaque antenne est équipée d'un déphaseur. La structure du beamforming analogique dans fig. II.11 est connue comme la technique de sélection d'antenne souple la plus simple.

En ajustant la phase de chaque élément, il est possible d'atténuer les interférences et d'augmenter le SNR à l'utilisateur prévu. Le beamforming analogique est déjà utilisé pour les communications mmWave à courte portée comme dans la norme IEEE 802.15. Un des problèmes associés à la formation analogique de beamforming est la contrainte constante de module imposée par les déphaseurs. Selon les critères de formation des beamforming, résoudre le problème d'optimisation peut devenir une tâche difficile [43]. Ce problème devient encore plus difficile lorsque l'on tient compte des contraintes pratiques telles que la résolution quantifiée des quarts de phase, ce qui peut entraîner un énorme fardeau informatique.

Dans [44,45], les pondérations de beamforming sont trouvées via un algorithme de transmission itératif où l'émetteur et le récepteur doivent collaborer l'un avec l'autre. L'inconvénient de ces travaux est que la complexité et le temps d'apprentissage augmentent au fur et à mesure que le nombre d'antennes augmente. Dans [46,47], un protocole de beamforming analogique à largeur de beamforming adaptative pour les applications intérieures est proposé et il a été adopté par IEEE 802.15.3c. Il se compose de trois étapes : liaison appareil-appareil, recherche au niveau du secteur et recherche au niveau du beamforming. Afin de réaliser chaque étape de l'algorithme, un livre de codes prédéfini est proposé pour réduire la zone de recherche. Le beamforming proposée commence

par un rayonnement quasi-homogène, puis finalement l'espace de recherche est rétréci au niveau du secteur et au niveau du beamforming final où le gain et la directivité maximaux du réseau sont atteints. Les auteurs de [46] ont proposé qu'en produisant simultanément plusieurs beamforming avec des signatures uniques, le temps d'apprentissage pouvait être réduit. Alors que les algorithmes de [46,47] conviennent aux environnements intérieurs, un beamforming à structure arborescente à plusieurs niveaux utilisant des techniques de sous-réseau pour un scénario de backhaul sans fil extérieur est présentée dans [48,49]. Dans ces travaux, les auteurs considèrent l'impact des déphaseurs numériques et les désalignements du beamforming dus aux vibrations provoquées par le vent. L'inconvénient de [43,49] est que ces algorithmes ne sont conçus que pour la formation de faisceaux analogique qui ne peut supporter qu'une transmission à un seul flux, et les gains de multiplexage spatial ne puisse pas être exploités.

Afin de fournir un compromis entre les performances et le coût des beamforming numérique et analogique, des beamforming hybrides analogiques et numériques ont été proposés. Dans ces structures, comme le montre la figure II.12, un petit nombre de chaînes RF sont connectées à un grand nombre d'antennes à travers un réseau de déphaseurs. Deux configurations courantes pour le réseau de déphaseurs sont les structures sous-connectées et entièrement connectées [50,51]. Dans la structure sous-connectée, représentée sur la figure II.12 a, chaque chaîne RF est connectée à un sous-ensemble d'antennes où chaque élément d'antenne est équipé d'un déphaseur monophasé. Pour la structure entièrement connectée, figure II.12 b montre qu'il y a une connexion de chaque chaîne RF à toutes les antennes et un plus grand nombre de déphaseurs est nécessaire. Ça peut offrir un gain de beamforming et une efficacité spectrale plus élevés que l'architecture sous-connectée. Cependant, la fabrication de la configuration entièrement connectée est plus difficile en raison du nombre requis de chemins RF ainsi que de la consommation d'énergie élevée dans le beamforming RF [50,51]. Par conséquent, la structure sous-connectée est plus adaptée en pratique. Dans les travaux théoriques, cependant, le modèle de réseau déphaseurs entièrement connecté est fréquemment utilisé.



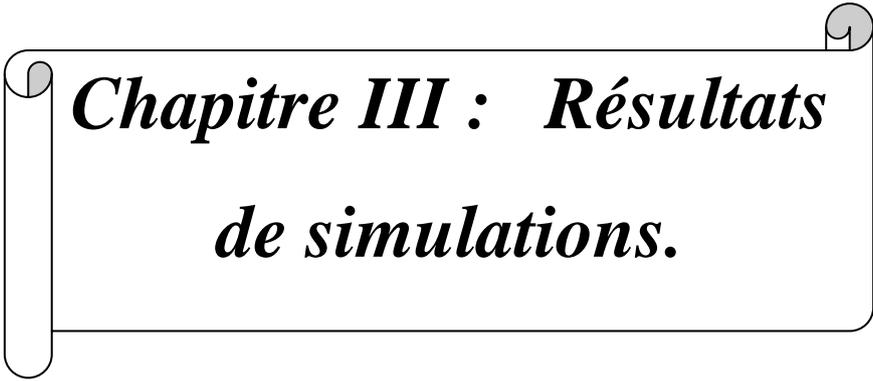
**Figure II. 12 :** Schéma fonctionnel des structures hybrides de beamforming.

Comme pour les beamforming analogiques, les défis de conception surviennent lorsque la propriété de module constant et la résolution discrète des déphaseurs sont prises en compte. Ces contraintes font de l'optimisation de la conception hybride de beamforming un problème non convexe et combinatoire difficile. De plus, comme la performance globale dépend du formateur de faisceaux sur la conception conjointe des beamforming analogiques et numériques, les procédures de conception sont différentes de la beamforming traditionnelle dans les systèmes MIMO. Cela est dû au fait que les systèmes traditionnels ne reposaient que sur des techniques de beamforming analogiques ou numériques, et pas la combinaison des deux méthodes. Le problème de l'optimisation avec la phase numérique devient un problème combinatoire avec un énorme espace de recherche. Par exemple, si des déphaseurs avec une résolution de 3 bits sont utilisés dans une configuration entièrement connectée avec 8 chaînes RF et 64 antennes, puis  $2^3 \times 8 \times 64 = 2^{576}$  combinaisons possibles de phases sont possibles.

Il est à noter que le problème de conception de beamforming hybride peut être étudié en se basant sur divers critères dans différents scénarios. Par exemple, maximisation de l'efficacité spectrale peut être envisagé dans les canaux point à point / Multi-utilisateurs, bande étroite / large bande, avec CSI parfait / imparfait, avec conception conjointe / séparée des beamforming numériques et analogiques.

### **II. 10. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les antennes intelligentes pour le MIMO massive. Premièrement, nous avons introduit la définition des antennes et les antennes réseaux. Nous avons aussi introduit le concept, la définition et les avantages des antennes intelligentes et de deux catégories d'antennes (les systèmes à faisceaux commuté SBA et les systèmes de réseaux adaptatifs). Puis, nous avons présenté des algorithmes adaptatifs. Ensuite, nous avons également présenté plus en détail les antennes MIMO beamforming et les antennes MIMO massives beamforming.



***Chapitre III : Résultats  
de simulations.***

### **Chapitre III : Résultats de simulations.**

#### **III. 1. Introduction :**

Dans ce chapitre, nous étudierons le système MIMO massive hybride beamforming qui comprend deux vecteurs de pondérations à l'émission et deux vecteurs de pondération à la réception. Le but de cette architecture hybride est de simplifier et minimiser le coût de réalisation du système en diminuant le nombre des canaux RF. Pour comparer les performances du système en termes d'efficacité spectrale par rapport au système MIMO beamforming optimal, nous étudierons dans un premier temps l'impact du nombre d'antennes à l'émission et à la réception sur les performances du système. Ensuite nous examinerons l'effet de la variation du nombre de chaînes RF à l'émission et à la réception sur l'efficacité spectrale du système et finalement nous étudierons l'impact du nombre de flux de données sur ces performances.

#### **III. 2. Notion de base sur langage utilisé :**

Afin de réaliser les différentes simulations de notre étude, nous avons utilisé les outils du logiciel MATLAB®.

MATLAB est un logiciel commercial de calcul matriciel, de développer et d'exécuter des algorithmes, de visualisation et de programmation numérique/scientifique puissant et convivial développé par The Math Works Inc. Le nom de MATLAB vient de MATrix LABoratory. Les éléments de données de base manipulés par MATLAB étant des matrices de dimension quelconque (tableaux n-D, pouvant se réduire à des matrices 2D, vecteurs et scalaires) qui ne nécessitent ni déclaration de type ni dimensionnement (typage dynamique). Contrairement aux langages de programmation classiques (scalaires), les opérateurs et fonctions MATLAB permettent de manipuler directement ces tableaux (donc la plupart du temps sans programmer de boucles), rendant ainsi MATLAB particulièrement efficace en calcul numérique, analyse et visualisation de données en particulier. MATLAB est disponible sur les systèmes d'exploitation standards (Windows, GNU/Linux, Mac OS X...) [52].

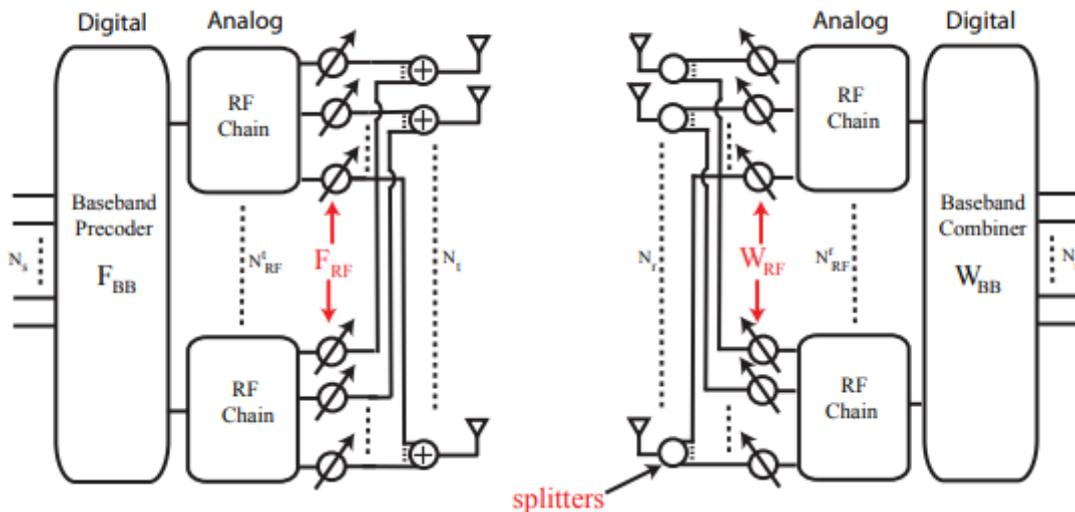
#### **III. 3. Principe de simulation :**

Les systèmes de communication sans fils modernes utilisent le multiplexage spatial pour améliorer le débit de données du système dans un environnement riche en diffusion. Afin de transmettre plusieurs flux de données sur un canal, un ensemble de pondérations prédéfinies est dérivées de la matrice du canal. Ensuite, chaque flux de données peut être récupéré indépendamment. Ces pondérations contiennent les termes d'amplitude et de phase applicables dans le domaine numérique.

## Chapitre III : Résultats de simulations.

La demande croissante de débit de données et d'une plus grande facilité d'utilisation augmente la nécessité d'utiliser le spectre plus efficacement. Par conséquent, les systèmes sans fil de la prochaine génération 5G, utiliseront la bande des ondes millimétriques (mmWave) pour tirer parti de sa plus grande largeur de bande. En outre, les systèmes 5G déploient des réseaux d'antennes à grande échelle pour atténuer les pertes de propagation dans la bande des ondes millimétriques. Cependant, ces configurations présentent des défis techniques uniques.

Par rapport aux systèmes sans fil actuels, la longueur d'onde dans la bande millimétrique est beaucoup plus petite. Bien que cela permette à un réseau de contenir plus d'éléments avec la même dimension physique, il devient beaucoup plus coûteux de fournir un module (récepteur-émetteur) pour chaque élément d'antenne. C'est pourquoi, à titre de compromis, un commutateur (récepteur-émetteur) est souvent utilisé pour alimenter plusieurs éléments d'antennes. Il s'agit du même concept que la configuration de sous-réseau utilisée dans le système radar. L'une des configurations unique est illustrée dans la figure III.1. Et qui groupe 4 vecteurs (2 vecteurs à l'émission (analogique et numérique) et 2 vecteurs à la réception (analogique et numérique)). Un exemple de simulation d'un tel système peut être trouvé dans le but d'améliorer le rapport signal/bruit et la capacité de communication sans fil en utilisant des réseaux d'antennes.



**Figure III. 1 :** Schéma fonctionnel simplifié d'un système monoposte à ondes millimétriques.

La figure ci-dessus montre que : du côté de l'émetteur, le nombre de commutateurs (récepteur-émetteur)  $N_{RF}^t$  est inférieur au nombre d'éléments d'antennes  $N_t$ . Pour offrir plus de flexibilité, chaque élément d'antenne peut être connecté à une ou plusieurs unités (récepteur-émetteur). De plus, un déphaseur analogique peut être inséré entre chaque unité (récepteur-émetteur) et l'antenne pour fournir une capacité de pilotage limitée. La configuration sur le côté récepteur est similaire. Le nombre maximal de flux de données,  $N_s$ , que ce système peut prendre en charge est plus petit que  $N_{RF}^t$  et  $N_{RF}^r$ .

## Chapitre III : Résultats de simulations.

Dans cette configuration, il n'est plus possible d'appliquer des pondérations numériques sur chaque élément d'antenne. Au lieu de cela, les pondérations numériques ne peuvent être appliquées qu'à chaque chaîne RF. Au niveau de l'élément, le signal est ajusté par des déphaseurs analogiques, qui ne modifient que la phase du signal. Ainsi, le précodage ou la combinaison sont en fait effectués en deux étapes. Comme cette approche réalise le beamforming dans les domaines numérique et analogique, elle est appelée beamforming hybride.



**Figure III. 2 :** Résumé d'un système monoposte à ondes millimétriques (émission- réception).

Dans un système de multiplexage spatial avec beamforming comprenant un paquet numérique complet, le signal est modulé par un ensemble de pondérations (précodées), qui est propagé dans le canal, et récupérés par un réseau de pondérations composites.

Au niveau de l'émission, le signal émis est donné par :

$$X = F_{RF} \cdot F_{BB} \cdot S. \quad (\text{III.1})$$

Avec  $S$  le signal émis et  $(F_{RF}, F_{BB})$  les pondérations à l'émission.

A la réception le signal reçu est donné par :

$$Y_1 = H \cdot X + n. \quad (\text{III.2})$$

Avec  $H$  est l'effet du canal et  $n$  est le bruit.

En remplaçant  $X$  par l'expression donnée par l'équation III.1, l'équation III.2 devient :

$$Y_1 = H \cdot F_{RF} \cdot F_{BB} \cdot S + n.$$

Le signal à la sortie du récepteur s'écrit :

$$Y = W_{RF}^* \cdot W_{BB}^* \cdot Y_1.$$

$$Y = \sqrt{\rho} \cdot W_{RF}^* \cdot W_{BB}^* \cdot H \cdot F_{RF} \cdot F_{BB} \cdot S + W_{RF}^* \cdot W_{BB}^* \cdot n. \quad (\text{III.3})$$

Où  $W_{RF}^*, W_{BB}^*$  : Les pondérations à la réception,  $\rho$  est l'atténuation.

Le flux de signaux est identique dans un système de beamforming hybride. Tant les pondérations de précodage que les pondérations de combinées sont des combinaisons de pondérations numériques en bande de base et de pondérations analogiques en bande RF.

Les pondérations numériques en bande de base convertissent les flux de données entrants en signaux d'entrées à chaque chaîne RF et les pondérations analogiques convertissent ensuite le signal à chaque chaîne RF en signal rayonné à chaque élément d'antennes. Notez que les poids analogiques ne peuvent contenir que des déphaseurs.

### ➤ Calcul des pondérations :

Il existe 4 vecteurs de pondérations : deux vecteurs à l'émission ( $F_{BB}, F_{RF}$ ) et deux vecteurs à la réception ( $W_{BB}, W_{RF}$ ). Nous cherchons à concevoir des précodeurs hybrides en ondes millimétriques ( $F_{RF}, F_{BB}$ ) qui maximisent l'expression de l'efficacité spectrale dans (III.5). Dans le cas du précodage des ondes mm, les contraintes non convexes sur  $F_{RF}$  et  $W_{RF}$  rendent peu probable la recherche d'une solution exacte. Pour simplifier la conception de l'émetteur-récepteur, nous découplons temporairement le problème d'optimisation conjoint émetteur-récepteur et nous nous concentrons sur la conception des précodeurs hybrides  $F_{RF}F_{BB}$ . Par conséquent, au lieu de maximiser l'efficacité spectrale, nous concevons le modèle  $F_{RF}F_{BB}$  pour maximiser l'information mutuelle obtenue par la signalisation gaussienne sur le canal à ondes millimétriques.

Les pondérations à l'émission  $F_{BB}$  et  $F_{RF}$  sont calculées comme suit :

$$(F_{RF}^{opt}, F_{BB}^{opt}) = \operatorname{argmax}_{F_{RF}, F_{BB}} I(F_{RF}, F_{BB}) \quad (\text{III.4})$$

$$\|F_{RF}F_{BB}\|_F^2 = N_s,$$

Le but de ce travail est de calculé  $F_{BB}$  et  $F_{RF}$  suivant un critère de maximisation de l'efficacité spectrale.

➔ **L'efficacité spectrale** : est l'une des mesures de performance d'un système 5G. Tels que :

$$I(F_{RF}, F_{BB}) = \log_2 \left( \left| I + \frac{\rho}{N_s \sigma_n^2} H \cdot F_{RF} F_{BB} \cdot F_{RF}^* \cdot F_{BB}^* \cdot H^* \right| \right). \quad (\text{III.5})$$

$W_{BB}$  et  $W_{RF}$  sont calculées suivant le critère LMS (Least Mean Square) en minimisant l'erreur quadratique moyenne entre le signal émis et le signal reçu.

$$(W_{RF}^{opt}, W_{BB}^{opt}) = \operatorname{argmin}_{W_{RF}, W_{BB}} E [\|S - W_{RF}^* \cdot W_{BB}^* Y\|_2^2] \quad (\text{III.7})$$

La comparaison des diagrammes de beamforming obtenu en utilisant les pondérations optimaux et les pondérations hybrides est similaire pour les faisceaux dominants. Cela signifie que les flux de données peuvent être transmis avec succès sur ces paquets en utilisant des pondérations hybrides [53].

### III. 4. Simulations et discussion des résultats :

Dans notre simulation, nous étudierons les diagrammes de rayonnement et l'efficacité spectrale en fonction du rapport signal sur bruit pour les systèmes MIMO beamforming à précodage optimale et hybride en variant le nombre d'antennes, le nombre du canaux RF et le nombre de flux de données. Nous considérons pour cela des réseaux linéaires espacés de  $\frac{\lambda}{2}$  et un canal multi-trajets avec diffuseurs.

#### III. 4. 1. Impact de la variation du nombre d'antennes à l'émission et à la réception :

Nous considérons une station de base MIMO beamforming optimal et MIMO hybride beamforming avec  $N_{tRF} = N_{rRF} = 4$  et deux flux de données ( $N_s=2$ ). Nous considérons aussi un canal MIMO à 8 trajets, chaque trajet contient 6 diffuseurs distribués aléatoirement dans l'espace. Nous varions le nombre d'antennes à l'émission et à la réception pour évaluer les diagrammes de rayonnement et les performances en termes d'efficacité spectrale.

##### ➤ Les diagrammes de rayonnement :

Les figures suivantes présentent les diagrammes de rayonnement des techniques de précodage optimal et hybride beamforming respectivement. Nous considérons dans cette simulation  $N_{tRF} = N_{rRF} = 4$  et  $N_s=2$  et nous varions le nombre d'antennes à l'émission et à la réception.

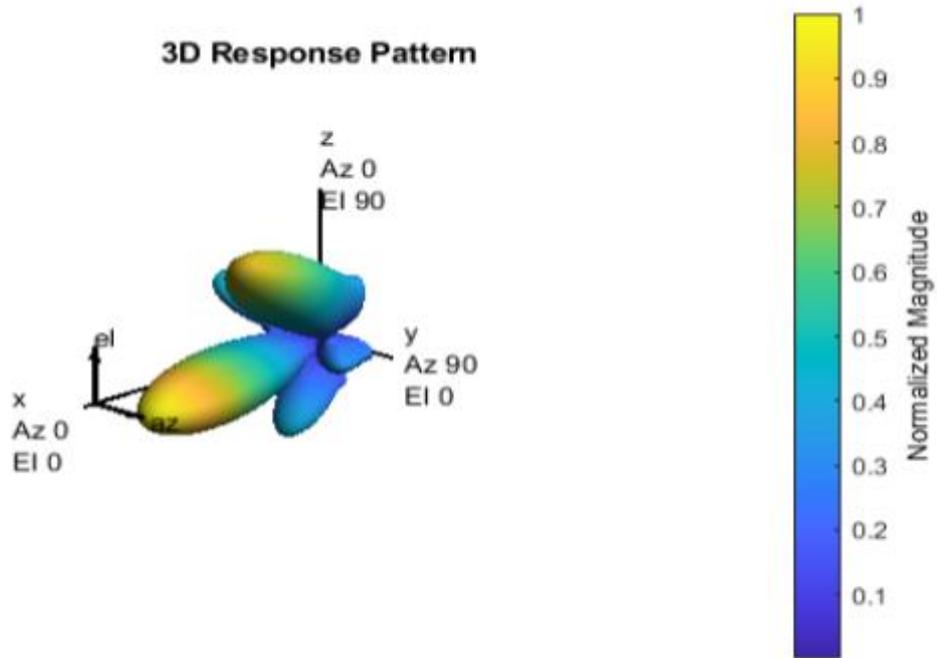


Figure III. 3 : Diagramme de rayonnement de la technique optimale lorsque  $N_t=16$  et  $N_r=4$ .

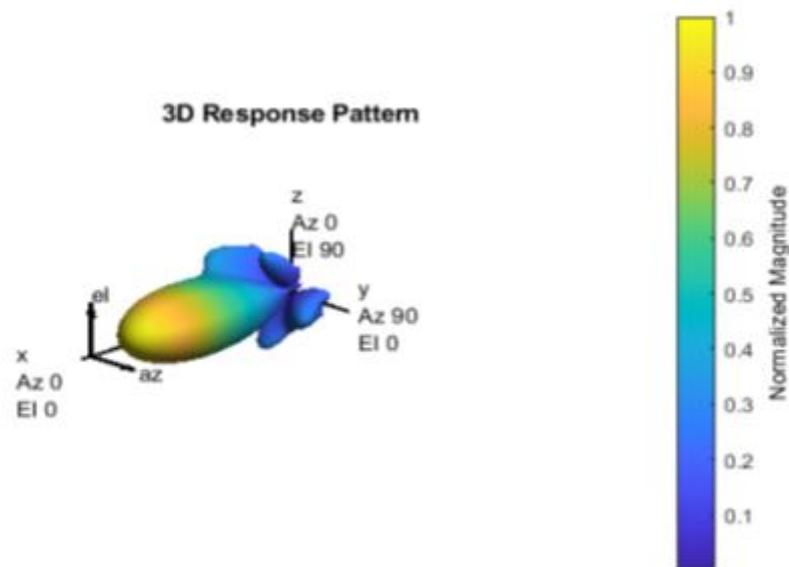


Figure III. 4 : Diagramme de rayonnement de la technique hybride lorsque  $N_t= 16$  et  $N_r=4$ .

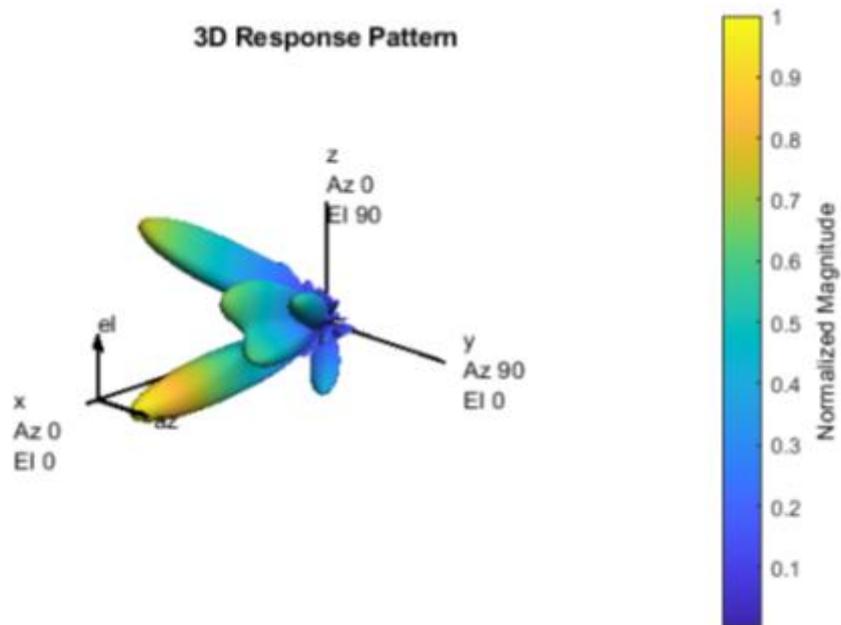


Figure III. 5 : Diagramme de rayonnement de la technique optimale lorsque  $N_t=64$  et  $N_r=16$ .

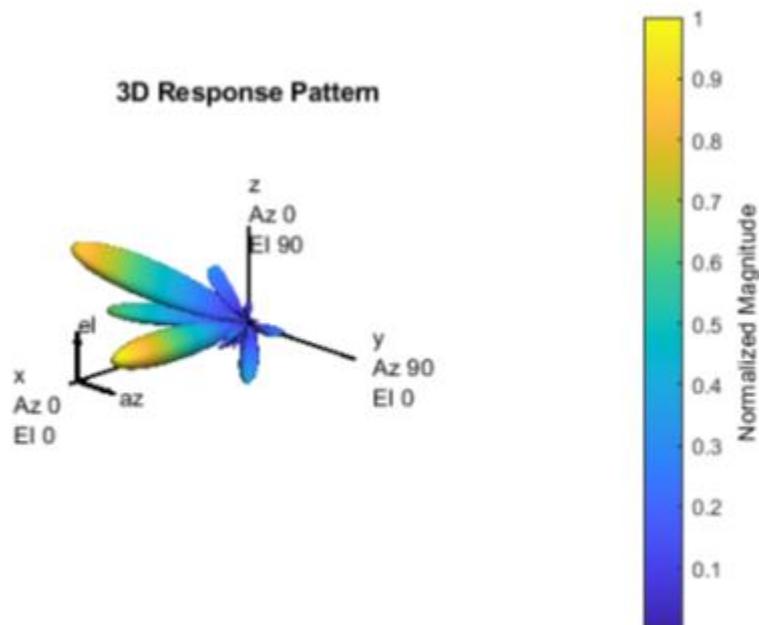


Figure III. 6 : Diagramme de rayonnement de la technique hybride lorsque  $N_t=64$  et  $N_r=16$ .

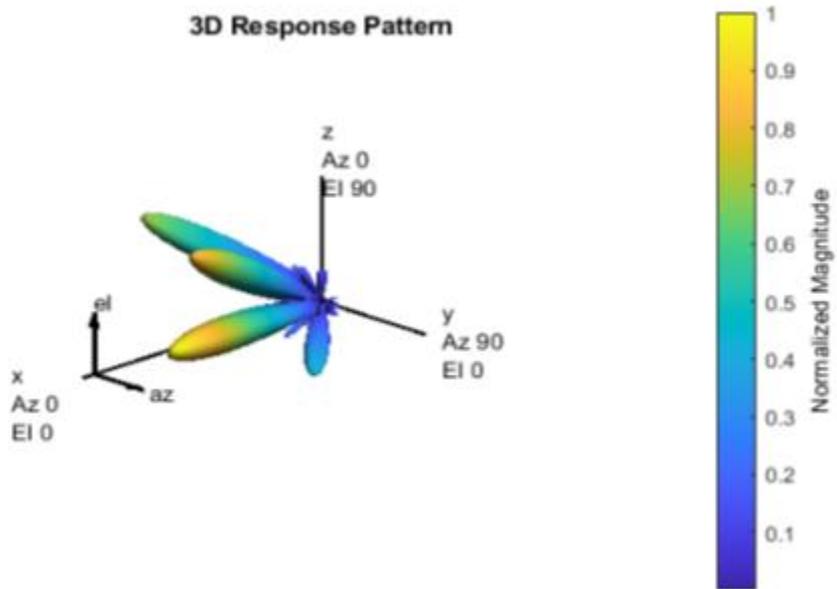


Figure III. 7 : Diagramme de rayonnement de la technique optimale lorsque  $N_T=100$  et  $N_r=25$ .

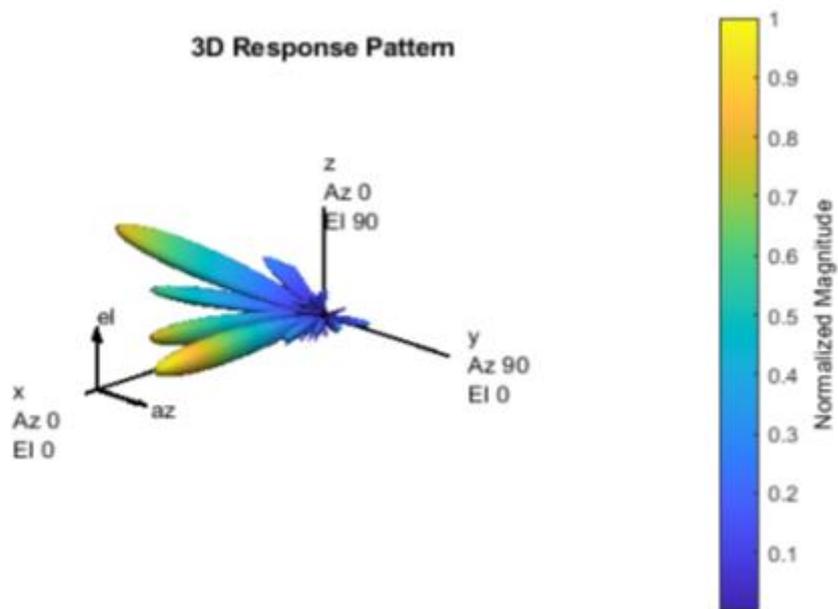
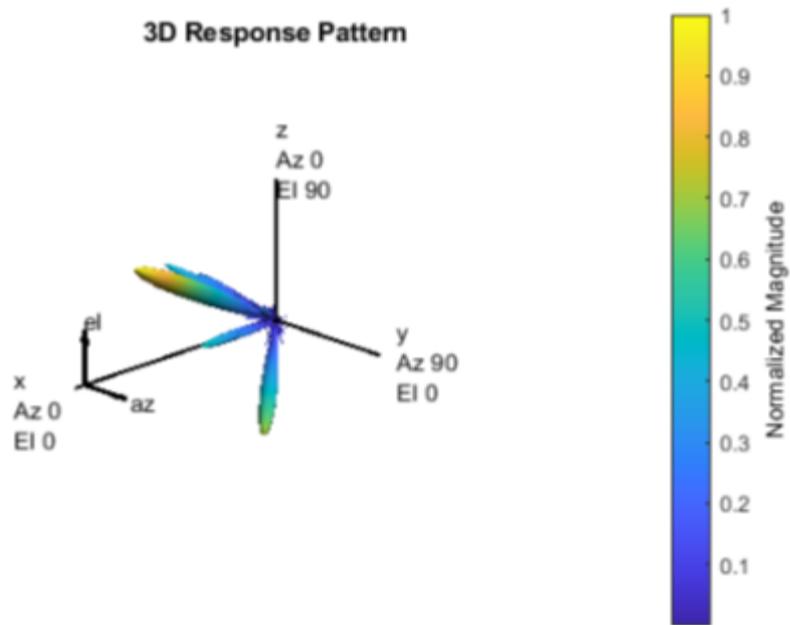
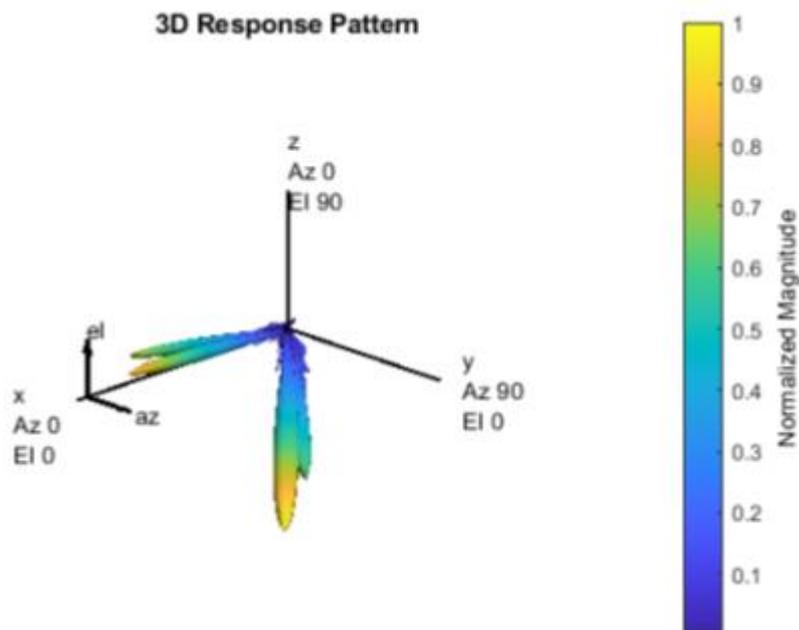


Figure III. 8 : Diagramme de rayonnement de la technique hybride lorsque  $N_T=100$  et  $N_r=25$ .



**Figure III. 9 :** Diagramme de rayonnement de la technique optimale lorsque  $N_t= 400$  et  $N_r=25$ .



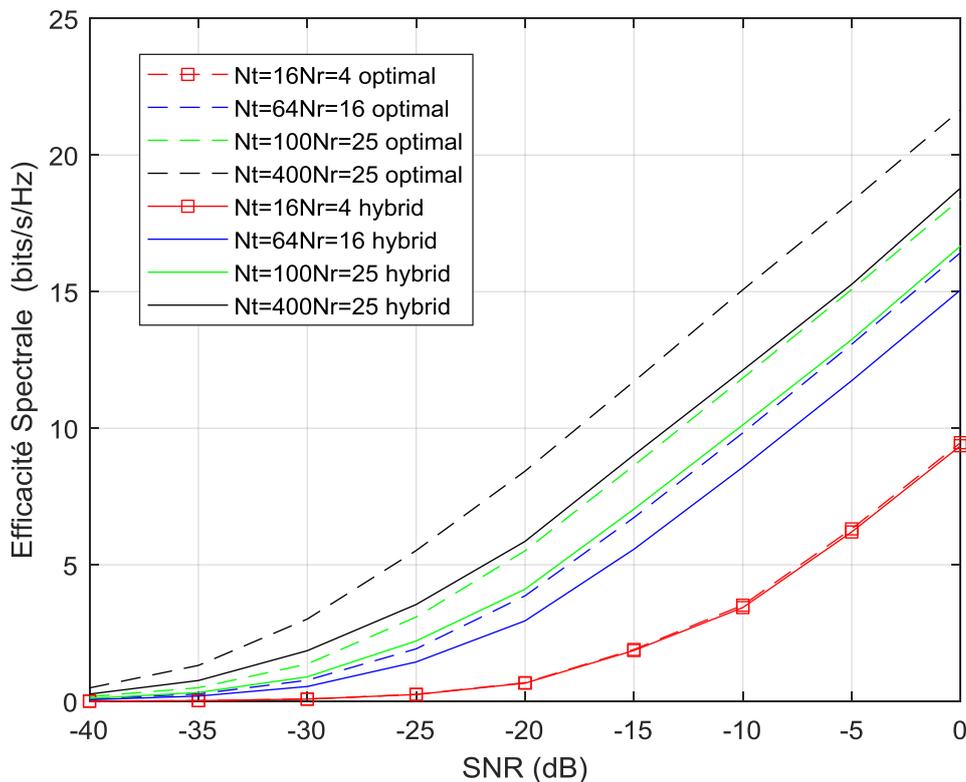
**Figure III. 10 :** Diagramme de rayonnement de la technique hybride lorsque  $N_t= 400$  et  $N_r=25$ .

Nous remarquons d'après ces résultats la présence d'un lobe principal dirigé vers le récepteur et des lobes secondaires de niveaux élevés dans le cas de la technique beamforming optimale par rapport à la technique hybride beamforming. Nous remarquons aussi que si le nombre d'antennes à l'émission et à la réception augmente, le lobe principal devient plus directif et permet d'augmenter la capacité et l'efficacité spectrale et énergétique du système. Lorsqu'on utilise  $N_s=2$ , c'est-à-dire

deux flux de données pour la transmission cela signifie qu'on a une meilleure utilisation des ressources spectrales et que le multi-flux aide à optimiser ces ressources très convoitées.

### ➤ L'efficacité spectrale en fonction de rapport signal sur bruit SNR:

Dans cette section, nous évaluons la variation de l'efficacité spectrale en fonction du rapport signal sur bruit (SNR). Nous considérons pour cela une station de base MIMO beamforming optimal et MIMO hybride beamforming avec  $N_t R_F = N_r R_F = 4$  et  $N_s = 2$ . Nous varions dans un premier temps le nombre d'antennes à l'émission et à la réception. Les résultats sont évalués dans la plage de SNR  $[-40, 0]$ .



**Figure III. 11 :** Comparaison entre la technique optimale et la technique hybride avec la variation de  $N_t$  et  $N_r$ .

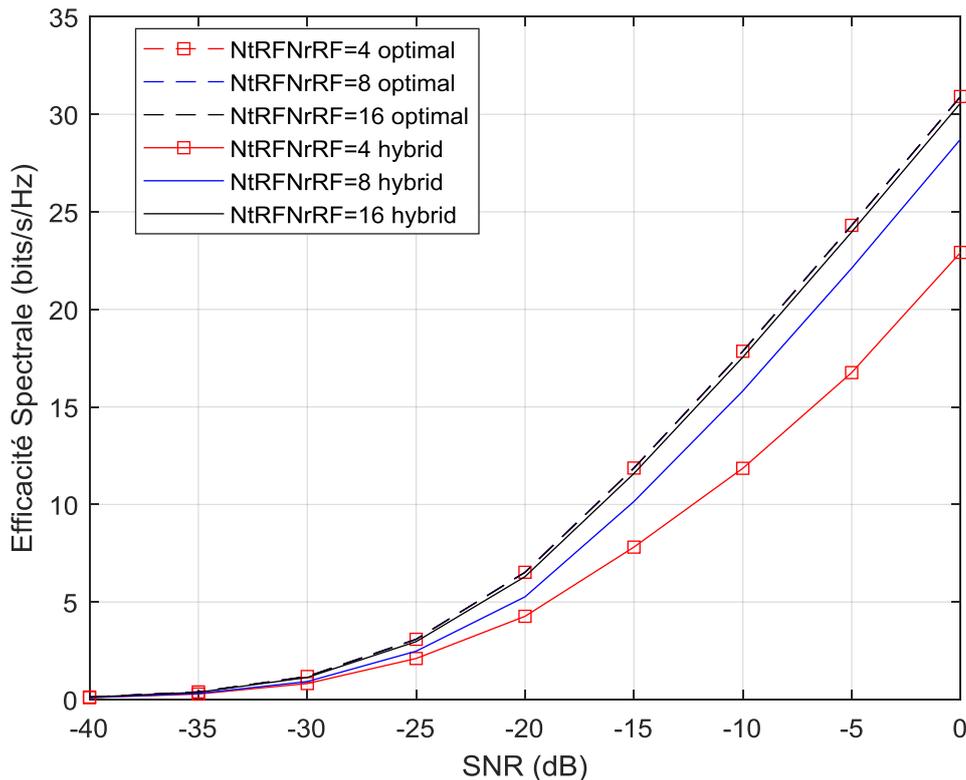
Nous remarquons d'après les résultats de la figure (III.11) que :

- ❖ L'efficacité spectrale augmente en augmentant le rapport signal sur bruit SNR.
- ❖ L'efficacité spectrale augmente aussi si le nombre d'antennes à l'émission et à la réception augmente. Par exemple le gain s'améliore de 5 dB pour un système MIMO (400x25) par rapport au système MIMO (100x25) et une efficacité spectrale de 15 bites/s/Hz.
- ❖ La technique MIMO beamforming optimale présente de meilleur résultat par rapport à la technique MIMO hybride beamforming.

### III. 4. 2. Impact de la variation du nombre de chaines RF à l'émission et à la réception :

Nous évaluons, dans cette partie de simulation l'efficacité spectrale des approches de précodage hybride et optimale en fonction du SNR d'un système MIMO beamforming 100x25 avec  $N_s=4$  flux de données. Nous variant pour chaque cas le nombre de chaines RF à l'émission et à la réception.

➤ **L'efficacité spectrale en fonction de rapport signal sur bruit SNR:**



**Figure III. 12 :** Comparaison entre la technique optimale et la technique hybride avec la variation de  $N_t$ RF et  $N_r$ RF.

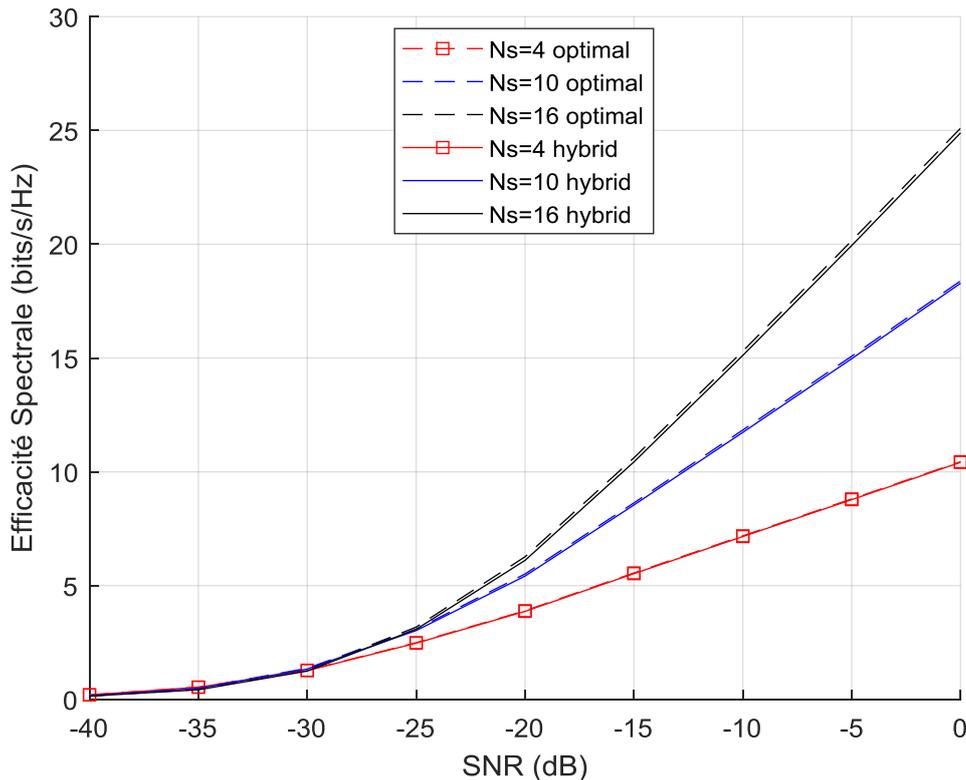
Nous remarquons d'après les résultats de la figure (III.12) que :

- ❖ L'efficacité spectrale augmente en augmentant le rapport signal sur bruit SNR.
- ❖ L'efficacité spectrale augmente aussi si le nombre de chaines RF à l'émission et à la réception augmente. Par exemple le gain s'améliore de 2 dB pour un système MIMO à 16 chaines RF par rapport un système MIMO à 8 chaines RF et une efficacité spectrale de 10 bites/s/Hz.
- ❖ Les deux approches beamforming optimal et hybride beamforming présentent des performances identiques en termes d'efficacité spectrale.

### III. 4. 3. Impact de la variation du nombre des signaux :

Nous étudions dans cette section la variation de l'efficacité spectrale en fonction du rapport signal sur bruit d'un système MIMO beamforming  $100 \times 25$  avec  $N_{t,RF} = N_{r,RF} = 16$ . Nous comparons l'efficacité spectrale de la technique de précodage hybride avec la technique de précodage optimal en variant chaque fois le nombre de flux de données à l'entrée.

➤ L'efficacité spectrale en fonction de rapport signal sur bruit SNR:



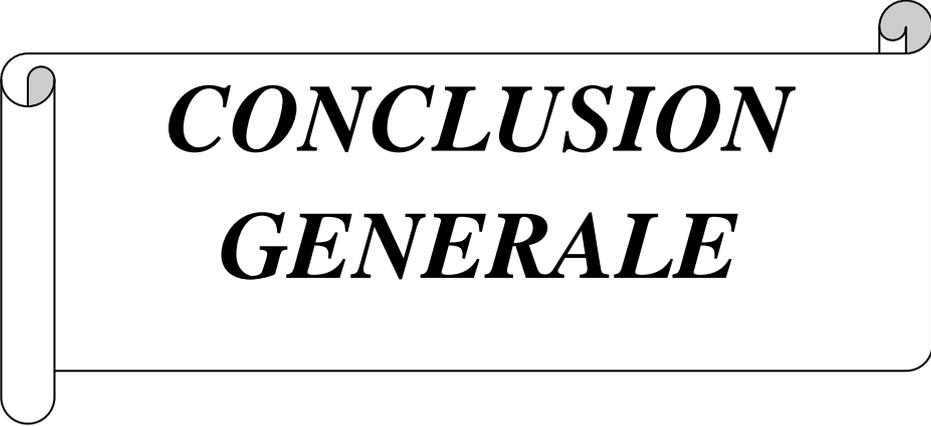
**Figure III. 13 :** Comparaison entre la technique optimale et la technique hybride avec la variation de  $N_s$ .

Nous remarquons d'après les résultats de la figure (III.13) que :

- ❖ L'efficacité spectrale augmente en augmentant le rapport signal sur bruit SNR.
- ❖ L'efficacité spectrale augmente aussi si le nombre de flux de données à l'entrée du système augmente. Par exemple le gain s'améliore de 5 dB pour un système MIMO beamforming avec  $N_s=16$  par rapport un système MIMO beamforming avec  $N_s=10$  et une efficacité spectrale de 15 bites/s/Hz.
- ❖ Les techniques MIMO beamforming optimal et hybride beamforming présentent les mêmes performances.

### III. 5. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié le système MIMO massive hybride beamforming qui comprend deux vecteurs de pondération à l'émission et deux vecteurs de pondération à la réception dans le but de simplifier et minimiser le cout de réalisation du système en diminuant le nombre du canaux RF. Pour comparer les performances du système en termes d'efficacité spectrale par rapport au système MIMO beamforming optimal, nous avons étudié dans un premier temps l'impact du nombre d'antennes à l'émission et à la réception sur les performances du système. Ensuite nous avons examiné l'effet de la variation du nombre de chaines RF à l'émission et à la réception sur l'efficacité spectrale du système et finalement nous avons étudié l'impact du nombre de flux de données sur ces performances. Nous avons constaté que la diminution du nombre de chaines RF a un impact mineur sur la qualité et la capacité du système MIMO massive hybride beamforming.



***CONCLUSION  
GENERALE***

## **Conclusion générale :**

La demande vertigineuse de débit de transfert de données pour les futurs réseaux cellulaires a imposé la nécessité de faire évoluer les réseaux actuels vers des niveaux de performances plus importants.

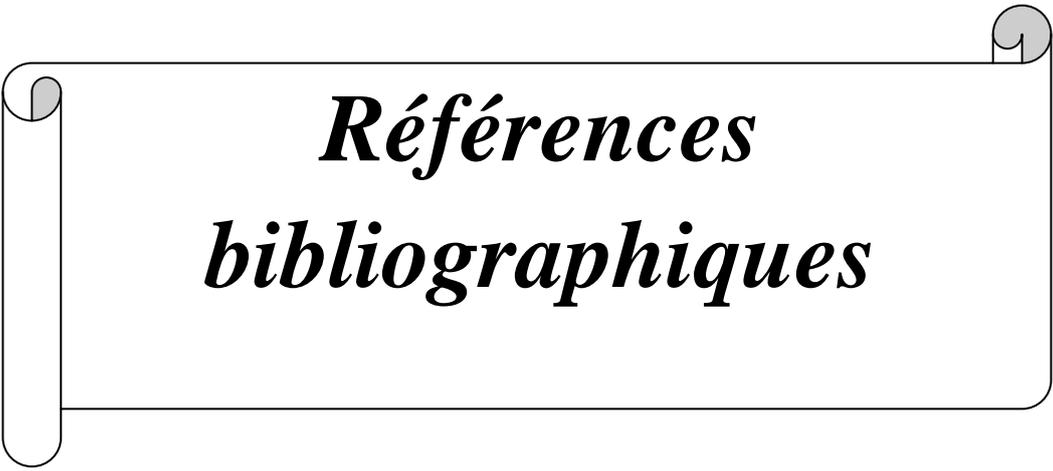
Cet objectif peut être atteint sans avoir besoin de plus de bande passante ou de stations de base supplémentaires si l'efficacité spectrale est augmentée.

Le but du travail présenté dans ce mémoire, est l'étude et la simulation des systèmes MIMO massives beamforming avec l'objectif d'obtenir une efficacité spectrale plus fiable pour la 5G.

Dans un premier temps, 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 recherches traditionnels, Il reste encore des défis à relever pour concrétiser tout le potentiel de la technologie.

En second lieu, nous avons présenté brièvement les antennes réseaux. Et nous avons aussi détaillé la structure, la définition, les avantages et le principe de fonctionnement des antennes intelligentes. Nous avons également détaillé les types des systèmes à antennes intelligentes (les systèmes à faisceaux commutés SBA et les systèmes de réseaux adaptatifs). D'autre part, nous avons présenté des algorithmes adaptatifs et plus en détail les antennes MIMO beamforming et les antennes MIMO massives beamforming.

La troisième partie du travail était consacrée à l'analyse des résultats de simulation à l'aide de logiciel MATLAB, un environnement interactif pour le développement des plateformes. Nous avons simulé les diagrammes de rayonnements pour les techniques hybride et optimale avec variation du nombre d'antennes à l'émission et à la réception. Ensuite, une analyse comparative entre les techniques hybride beamforming et optimale en terme d'efficacité spectrale en fonction du SNR en variant le nombre d'antennes, le nombre de chaines RF et le nombre de flux de données. On peut conclure que la diminution du nombre de chaines RF a un impact mineur sur la qualité et la capacité du système MIMO massive hybride beamforming.



***Références  
bibliographiques***

## Références bibliographiques :

- [1] : Challita, Frédéric, Martinez-Ingles, Maria-Teresa, Liénard, Martine, et al. Line-of-Sight "Massive MIMO Channel Characteristics in an Indoor Scenario at 94 GHz". IEEE Access, 2018, vol. 6, p. 62361-62370.
- [2] : G. J. Foschini and M. J. Gans, " On limits of wireless communications in a fading environmentwhenusing multiple antennas". Wireless Personal Communications, vol. 6, no. 3, pp. 311–335, 1998.
- [3] : Benosman. Radia. Sidhoum. Amel. " Etudes et simulation des performances des systèmes MIMO en configurations STBC et V-BLAST ". Diss. 2013.
- [4] : Bendimerad. FT, Hadj.AL, Debbat. F, Djennas. SA, Benamar .A, Bahri. SM. "MIMO et Accès Multiples Avancés pour Réseaux Sans Fil". Laboratoire de Télécommunications de Tlemcen (LTT), Université Abou-BekrBelkaid – Tlemcen. Nov 2013.
- [5] : Daci. Kaoutar. Dou. Warda. " Etude de massive MIMO pour 5G " .Diss.2019.
- [6] : Nasri Amel; BENFETIMA Amel. "Study and Simulation of the Transmit Diversity Technique in LTE Systems" .2017.
- [7] : StudyPaperon: Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) Technology.
- [8] : Pujolle, G. Software "Networks:Virtualization, SDN, 5G, and Security.JohnWiley& Sons". (2020).
- [9] : Dehemchi .Marwa. Bouhafer. Asma. "Etude et Analyse de Méthodes de Beamforming pour des Systèmes Multi-utilisateurs Pour la 5G "Diss. 2019.
- [10] : Liu, L., Peng, G., & Wei, S. "Massive MIMO Detection Algorithm and VLSI Architecture. Springer". (2019).
- [11] : Mazri Amma , " Etude d'un modèle de canal MIMO". 2020.
- [12]: Abboud, Ahmad. "Interference mitigation in 5G mobile networks:Uplink pilot contamination in TDD massive MIMO scheme". Diss. Limoges, 2017.
- [13] : HAJRI, Salah Eddine. "L'amélioration des performances des systèmes sans fil 5G par groupements adaptatifs des utilisateurs. Université ParisSaclay". (Thèse de doctorat 2018).
- [14] : Antoine Roze "Massive MIMO, une approche angulaire pour les futurs systèmes multi-utilisateurs aux longueurs d'onde millimétriques "Diss 2017.
- [15] : Sun, Diwei."Spectral Efficiency and Energy Efficiency in Massive MIMO Systems". (Thèse doctorat 2017).
- [16]: [https://resources.altium.com/fr/p/advantages-of-massive-mimo-for-5g-cellular-infrastructure?fbclid=IwAR3Ba0l4dpbHa3HBabiCWe\\_C9IAa1wuDbLoJb9E0BKGeHDcGj182F9v75K8](https://resources.altium.com/fr/p/advantages-of-massive-mimo-for-5g-cellular-infrastructure?fbclid=IwAR3Ba0l4dpbHa3HBabiCWe_C9IAa1wuDbLoJb9E0BKGeHDcGj182F9v75K8).

- [17] : Zhao, Long, et al. Massive MIMO in 5G Networks: Selected Applications. Springer International Publishing, 2018.
- [18] : Haddouche Khaled, "contamination des pilotes en MIMO massive".Diss 2018
- [19] : H. Q. Ngo and E. G. Larsson, "Blind estimation of effective downlink channel gains in Massive MIMO," in Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Brisbane, Australia, , submitted April 2015.
- [20] : Ibra Dioum, "Conception de systèmes multi diversité et MIMO: application aux petits objets nomades communicants." Université Nice Sophia Antipolis.
- [21] : Oussoukine .Amal . Rayeh .Narimane." MIMO Beamforming Multi-utilisateurs ". Diss 2016.
- [22] : M. EL Hadi Kenane. "Contribution a l'optimisation d'un réseaux d'antennes intelligentes au système UMTS".Diss.2017.
- [23] : Ahmed. Benomar. "Etude des Antennes à Résonateurs Diélectriques. : Application aux Réseaux de Télécommunications".Diss.2015.
- [24] : S. Tabbane - réseaux mobile - édition Hermes - Paris 1997.
- [25] : Khelifa.H & Gilles.Y.D, « Conception et réalisation d'antennes intelligentes, Laboratoire de Radiocommunications et de Traitement du Signal ». IEEE 1998-1999, p.77.
- [26] : Bouanane .Mohammed .Mehdi .Hadj .Slimane .Riyadh. "Antennes MIMO Adaptatives Large Bande Bases sur l'Algorithme Itératif ".Diss 2015.
- [27] : Habott .Abdoullah .Yahgouba .Houda "Les Antennes Intelligentes ".Diss 2020.
- [28] : Détection Multi-Utilisateurs par réseau d'antennes appliquées à un signal MCCDMA 2008.
- [29] : Moez .Ben Kilani. "Conception et implémentations de nouvelles configurations de matrice de Butler en technologies planaire et conforme".Diss Novembre 2012.
- [30] : Ridha .Ghayoula. « Contribution à l'Optimisation de la Synthèse des Antennes Intelligentes par les Réseaux de Neurones », Université de Tunis El Manar. Thèse de doctorat 27 décembre 2008.
- [31] : Nowicki D. et Rouleliotis J., "Smart antenna Strategies," Mobile Communications International, April 1995, p.53-56.
- [32] : Najib Fadlallah "Contribution à l'optimisation de la synthèse du lobe de rayonnement pour une antenne intelligente, Application à la conception de réseaux à déphasage"-Mai 2005.
- [33] : Mokhefi .Akila .Metahri .Imene . " Etude et simulation de méthode de Beamforming pour systèmes de modulation multi-porteuse pour la 5G ".Diss.2018.
- [34] : J. Bach Andersen, "Array gain and capacity for known random channels with multiple element arrays at both ends," IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 18, no. 11, pp. 2172-2178, November 2000.

- [35] : Sohail .Payami. "Hybrid Beamforming for Massive MIMO Systems".Diss.2017.
- [36] F. Rusek, D. Persson, B. K. Lau, E. Larsson, T. Marzetta, O. " Edfors, and F. Tufvesson, Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays," IEEE Signal Processing Magazine, vol. 30, no. 1, pp. 40-60, January 2013.
- [37] : R. W. Heath, N. Gonzalez-Prelcic, S. Rangan, W. Roh, and A. M. Sayeed, "An overview of signal processing techniques for millimeter wave MIMO systems, " IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, vol. 10, no. 3, pp. 436-453, April 2016.
- [38] : E. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson, and T. Marzetta, " Massive MIMO for next generation wireless systems, " IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 2, pp. 186-195, February 2014.
- [39] : O. E. Ayach, S. Rajagopal, S. Abu-Surra, Z. Pi, and R. W. Heath, " Spatially sparse precoding in millimeter wave mimo systems," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 13, no. 3, pp. 1499-1513, March 2014.
- [40] : J. Singh, S. Ponnuru, and U. Madhow, " Multi-gigabit communication: the ADC bottleneck, " 2009 IEEE International Conference on Ultra-Wideband, pp. 22-27, Sept 2009.
- [41] : X. Zhang, A. Molisch, and S.-Y. Kung, " Variable-phase-shift-based RF-baseband codesign for MIMO antenna selection, " IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 53, no. 11, pp. 4091-4103, November 2005.
- [42] : X. Gao, O. Edfors, F. Tufvesson, and E. G. Larsson, c Massive mimo in real propagation environments: Do all antennas contribute equally? " IEEE Transactions on Communications, vol. 63, no. 11, pp. 3917-3928, November 2015.
- [43] : R. L. Haupt, " Phase-only adaptive nulling with a genetic algorithm, " IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 45, no. 6, pp. 1009-1015, Jun 1997.
- [44] : P. Xia, H. Niu, J. Oh, and C. Ngo, " Practical antenna training for millimeter wave mimo communication, " Vehicular Technology Conference, 2008. VTC 2008-Fall. IEEE 68th, pp. 1-5, September 2008.
- [45] : Z. Xiao, L. Bai, and J. Choi, " Iterative joint beamforming training with constantamplitude phased arrays in millimeter-wave communications," IEEE Communications Letters, vol. 18, no. 5, pp. 829-832, May 2014.
- [46] : Y. M. Tsang, A. S. Y. Poon, and S. Addepalli, " Coding the beams: Improving beamforming training in mmwave communication system, " Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011), 2011 IEEE, pp. 1-6, Dec 2011.
- [47] : J. Wang, Z. Lan, C. W. Pyo, T. Baykas, C. S. Sum, M. A. Rahman, R. Funada, F. Kojima, I. Lakkis, H. Harada, and S. Kato, " Beam codebook based beamforming protocol for multi-gbps millimeter-wave wpan systems, " Global Telecommunications Conference, 2009. GLOBECOM 2009. IEEE, pp. 1-6, November 2009.
- [48] : S. Hur, T. Kim, D. J. Love, J. V. Krogmeier, T. A. Thomas, and A. Ghosh, " Multilevel millimeter wave beamforming for wireless backhaul, " 2011 IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps), pp. 253-257, December 2011.

- [49] : " Millimeter wave beamforming for wireless backhaul and access in small cell networks, " IEEE Transactions on Communications, vol. 61, no. 10, pp. 4391-4403, October 2013.
- [50] : X. Gao, L. Dai, S. Han, C. L. I, and R. W. Heath, " Energy-efficient hybrid analog and digital precoding for mmwave MIMO systems with large antenna arrays, " IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 34, no. 4, pp. 998-1009, April 2016.
- [51] : S. Han, C.-L. I, Z. Xu, and C. Rowell, " Large-scale antenna systems with hybrid Bibliography 101 analog and digital beamforming for millimeter wave 5G, " IEEE Communications Magazine, vol. 53, no. 1, pp. 186-194, January 2015.
- [52] : Djelad Sarra, "Optimisation du Handover dans le réseau 4G avec la logique flou". 2017.
- [53] : Omar El Ayach, "Spatially Sparse Precoding in Millimeter Wave MIMO Systems". 2014.