

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université 8 Mai 1945 – Guelma
Faculté des sciences et de la Technologie
Département d'Electronique et Télécommunications



Mémoire de fin d'étude
Pour l'obtention du diplôme de Master Académique

Domaine : **Sciences et Technologie**
Filière : **Télécommunications**
Spécialité : **Réseaux et Télécommunications**

**Conception de nouveau système d'antennes MIMO pour le
standard 5G**

Présenté par :

ALLEL MONCEF
AMRAOUI ZAKARIA

Sous la direction de :

M^{em}. GUEBGOUB NASSIMA

2021

Remerciements

C'est avec humilité et gratitude que nous reconnaissons ce que nous devons :

Nous commençons par remercier et rendre grâce à Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage et la volonté de mener à bon terme ce travail.

*Nos remerciements vont en particulier à **M^{me}. GUEBGOUB**, notre promoteur, qui nous a dirigé et beaucoup aidé afin de mener à bien ce travail.*

Nous remercions aussi les membres de jury qui nous ont fait l'honneur d'accepter le jugement de notre travail.

Que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, trouvent ici nos sincères reconnaissances.

Dédicace

JE DÉDIE CE TRAVAIL

À mes parents,

À ma famille,

À mes amis.

A .ZAKARIA

JE DÉDIE CE TRAVAIL

À mes parents,

À ma famille,

À mes amis.

A.MONCEF

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : EVOLUTION DES RESEAUX DE TELEPHONIE MOBILE	
I.1 INTRODUCTION	3
I.2 ÉVOLUTION DES RESEAUX MOBILES	3
I.3 GENERATIONS DES RESEAUX MOBILES	5
I.3.1 Première génération des téléphones mobile (1G)	5
I.3.2 Deuxième génération des téléphones mobiles (2G).....	6
I.3.2.1 Réseau GSM (2G)	6
I.3.2.2 Réseau GPRS (2.5G)	6
I.3.2.3 Réseau EDGE (2.75G)	7
I.3.3 Troisième génération des téléphones mobiles 3G.....	7
I.3.3.1 Définition.....	7
I.3.3.2 Présentation de l'infrastructure du réseau UMTS	8
I.3.3.3 Technologie HSDPA (3.5G).....	8
I.3.3.4 Technologie HSUPA (3.75G).....	8
I.3.4 Quatrième génération des téléphones mobiles 4G	9
I.3.4.1. Présentation de la quatrième génération 4G	9
I.3.4.2 Technologies 4G Réseau LTE (LTE Long Terme Evolution) 3.9G	9
I.3.5 Cinquième génération des téléphones mobiles 5G	10
I.3.5.1 Présentation de la cinquième génération 5G	10
I.3.5.2 Objectifs de la 5G	11
I.3.5.3 Catégories d'usages de la 5G.....	11
I.4 TECHNOLOGIES EN COURS D'ETUDE DE 5G	13
I.4.1 Bandes millimétriques.....	13
I.4.2 MIMO (Multiple Inputs - Multiple Outputs)	13
I.4.3 Multiplexage NOMA (Non Orthogonal Multiple Access)	14
I.4.4 Full Duplex.....	15
I.5 APPLICATIONS VISEES POUR LE RESEAU DE 5G	16

I.6 COMPARAISON ENTRE 4G ET 5G	17
I.7 CONCLUSION	18

CHAPITRE II : LES SYSTEMES MIMO ET MASSIVE MIMO

II.1 INTRODUCTION	19
II.2 SYSTEMES MIMO TRADITIONNEL	19
II.2.1 Principes du MIMO	20
II.2.2 Architectures des systèmes MIMO	20
II.2.2.1 Système SISO	20
II.2.2.2 Système SIMO	21
II.2.2.3 Système MISO	22
II.2.2.4 Système MIMO	22
II.2.3 Avantage de la technologie MIMO	23
II.2.4 Capacité de canal d'un système MIMO	24
II.2.5 Choix de l'antenne MIMO	24
II.3 LE SYSTEME MASSIVE MIMO	25
II.3.1 Beamforming	26
II.3.2 MU-MIMO (Multi-Utilisateur MIMO)	27
II.3.4 Comparaison entre MIMO traditionnel et MIMO massif	28
II.3.4.1 Nombre d'antenne	28
II.3.4.2 Le Full Duplex	29
II.3.4.3 Antennes actives et passives	29
II.3.4.4 Antennes adaptatives massive MIMO	30
II.3.4.5 Le gain	30
II.3.4.6 La taille	30
II.4 AVANTAGES DES ANTENNES MASSIVE MIMO	31
II.5 AVANTAGES DES SYSTEMES MASSIVE MIMO	31
II.6 PERFORMANCES DES ANTENNES MIMO EN DIVERSITE	32

II.6.1 Couplage mutuel	32
II.6.2 Efficacité totale	32
II.6.3 Coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC : Envelope Correlation Coefficient).....	33
II.6.4 Gain de Diversité (DG).....	33
II.7 CONCLUSIONS	34

**CHAPITRE III : CONCEPTION ET ANALYSE D'UNE NOUVELLE STRUCTURE
D'ANTENNE MIMO**

III.1 INTRODUCTION.....	35
III.2 PRESENTATION DU LOGICIEL MICROWAVE STUDIO DE CST	35
III.3 ANTENNE MONOPOLE ULB	35
III.4 BANDES DE FREQUENCES UTILISEES PAR LA 5G	36
III.5 CONCEPTION D'UN SYSTEME MIMO 2x2 ULB A DEUX PORTS.....	37
III.5.1 Etapes de conception	37
III.5.1.1 Antenne de départ et ses performances.....	37
III.5.1.2 MIMO 2 x 2 à deux ports.....	39
III.6 CONCEPTION D'UN SYSTEME MIMO 4 x 4 ULB A QUATRE PORTS	45
III.6.1 MIMO 4x4 : 1 ^{ère} configuration	45
III.6.2 MIMO 4x4 : 2 ^{ème} configuration	49
III.7 COMPARAISON ENTRE LES TROIS MIMO	53
III.8 REALISATION	54
III.8.1 Analyseur de réseau vectoriel (Vector Network Analyzer VNA).....	54
III.8.2. Structure de l'antenne réalisée	55
III.8.3. Présentation et analyse des résultats	56
III.9 CONCLUSION	57
CONCLUSION GENERALE.....	58
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	59

Chapitre I Evolution des réseaux de téléphonie mobile

Figure I.1 Cycles des générations de téléphonie mobile.....	4
Figure I.2 Présentation générale sur le système LTE.....	10
Figure I.3 Les trois cas d'utilisation de la 5G	12
Figure I.4 Spectre électromagnétique	13
Figure I.5 Architecture de système MIMO	14
Figure I.6 Illustration de multiplexage <i>power Domain</i> NOMA.....	15
Figure I.7 Illustration du full-duplex, comparé au FDD et TDD	16
Figure I.8 Applications de la 5G	17

Chapitre II Les systèmes MIMO et Massive MIMO

Figure II.1 SISO - Single Input Single Output	21
Figure II.2 SIMO - Single Input Multiple Output.....	21
Figure II.3 MISO - Multiple Input Single Output.....	22
Figure II.4 MIMO- Multiple Input Multiple Output.....	22
Figure II.5 Vue d'une antenne 2G – 3G ouverte et principe de rayonnement.....	25
Figure II.6 vue d'une antenne 5G massive MIMO 3400 – 3600 MHz partiellement ouverte et principe de rayonnement	26
Figure II.7 Système Massive MIMO avec N antennes pour desservir K utilisateurs	27
Figure II.8 Antenne MIMO (4G) et Massive MIMO (5G).....	28
Figure II.9 Antenne 4G et Antenne 5G.....	29
Figure II.10 illustration de la formation du faisceau par association des champs de chaque élément rayonnant	31

Chapitre III Conception et analyse d'une nouvelle structure d'antenne MIMO

Figure III.1 Quelques structures d'un monopôle planaire ULB.....	36
Figure III.2 Géométrie de l'antenne ULB	38
Figure III.3 Le coefficient de réflexion S11	38
Figure III.4 Diagramme de rayonnement (3D) en directivité aux fréquences :.....	39

Figure III.5 Géométrie de l'antenne proposée MIMO à 2 ports : 1 ^{ère} structure	40
Figure III.6 Coefficient de réflexion S11 et l'isolation S12	40
Figure III.7 Distribution de courant à la fréquence (a) 12Ghz et (b) 6GHZ :	41
Figure III.8 Géométrie de l'antenne proposée MIMO à 2 ports : 2 ^{ème} structure	41
Figure III.9 Coefficient de réflexion S11 et l'isolation S12	42
Figure III.10 Géométrie de l'antenne proposée MIMO 2 x 2 ULB.....	42
Figure III.11 Coefficient de réflexion S11 et l'isolation S12	43
Figure III.12 Distribution de courant à la fréquence 3.17 GHZ :	43
Figure III.13 ECC et DG de l'antenne MIMO à deux ports en fonction de la fréquence	44
Figure III.14 Efficacité de rayonnement de l'antenne MIMO à deux ports	44
Figure III.15 Gain en [dB] de l'antenne MIMO à deux ports en fonction de la fréquence	45
Figure III.16 Géométrie de l'antenne proposée MIMO 4x4 à 4 ports : 1 ^{ère} configuration.....	45
Figure III.17 Coefficients de réflexion S11, S22, S33 et S44	46
Figure III.18 L'isolation entre le port 1 et les autres ports : S12, S13 et S14	46
Figure III.19 Distribution de courant aux fréquences 3.47 et 7.6GHZ : Port1 excité	47
Figure III.20 ECC de l'antenne MIMO à 4 ports en fonction de la fréquence.....	47
Figure III.21 DG de l'antenne MIMO à 4 ports en fonction de la fréquence.....	48
Figure III.22 Efficacité de rayonnement de l'antenne MIMO à 4 ports	48
Figure III.23 Gain en [dB] de l'antenne MIMO à 4 ports en fonction de la fréquence.....	49
Figure III.24 Géométrie de l'antenne proposée MIMO à 4 ports : 2 ^{ème} configuration.....	49
Figure III.25 Coefficients de réflexion S11, S22, S33 et S44	50
Figure III.26 L'isolation entre le port 1 et les autres ports : S12, S13 et S14	50
Figure III.27 Distribution de courant aux fréquences 3.47 et 7.6GHZ : Port1 excité	51
Figure III.28 ECC de l'antenne MIMO à 4 ports en fonction de la fréquence.....	51
Figure III.29 DG de l'antenne MIMO à 4 ports en fonction de la fréquence.....	52
Figure III.30 Efficacité de rayonnement de l'antenne MIMO à 4 ports.....	52
Figure III.31 Gain en [dB] de l'antenne MIMO à 4 ports en fonction de la fréquence.....	53
Figure III.32 Analyseur de réseau vectoriel (photo et schéma de principe).....	54

Figure III.33 Prototype de l'antenne réalisée (a) vu de dessus, (b) vu de dessous55

Figure III.34 Mesure des paramètres de l'antenne réalisée par le VNA55

Figure III.35 Paramètres simulés et mesurés de l'antenne proposée.56

Liste des tableaux

Tableau III.1. Paramètres de l'antenne..... 38

Tableaux III.2 Comparaison entre les trois antennes : MIMO2x2 et MIMO4x4 53

1G : la première génération du réseau mobile.

2G : La deuxième génération du réseau mobile.

3G : La troisième génération de réseaux mobiles.

3GPP: 3rd Génération Partner hip Project.

4G : La quatrième génération des téléphones mobiles.

5G : La Cinquième génération des téléphones mobiles.

AMPS: Advanced Mobile Phone System.

CDMA : Code Division Multiple Access.

DC-HSPA: Dual Cell High Speed Packet Access

DL: Down Link.

EDGE: Enhanced Data Rates for GSM Evolution.

EMBB: Enhanced Mobile Broadband.

ETACS: Extended Total Access Communication System.

E-UTRAN: Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network

FDD: Frequency Division Duplexing.

FDMA: Frequency Division Multiple Access.

JTACS: Japan Total Access Communications System.

HSDPA: High Speed Downlink Packet Access.

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

HSPA: High Speed Packet Access.

HSUPA: High-Speed Uplink Packet Access.

IMT: International Mobile Télécommunications.

IoT: Internet of Things.

IP: Internet Protocol.

IS: Interim Standard.

GMSK: Gaussian minimum-shift keying

GPRS: General Packet Radio Service.

GSM: The Global System for Mobile Communications.

LTE: Long Term Evolution.

LTE-A: Long Term Evolution Advanced.

MIMO : Multiple Inputs - Multiple Outputs.

MISO : Multi Input Single Output

MMTC : Massive Machine-Type Communications.

MU-MIMO : Multi-Utilisateur Multiple Inputs - Multiple Outputs.

NB: Narrow Band.

NMT: Nordic Mobile Telephone.

NMT-F : Nordic Mobile Téléphone « Français ».

NOMA: Non-Orthogonal Multiple Access.

NR: New Radio.

OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OFDMA: Orthogonal Frequency Division Multiple Access.

SCMA : Sparse Code Multiple Access.

SIMO: Single Input Multi Output

SISO: Single Input Single Output

SNR: Signal-to-Noise Ratio

TACS: Total Access Communications System.

TDD: Time Division Duplex.

TDMA: Time Division Multiple Access. Time Division Multiple Access

UIT : Union Internationale des Télécommunications.

UL: Up Link.

UMTS: Universal Mobile Télécommunications System.

URLLC: Ultra-reliable and Low Latency Communications.

VoIP: Voice over IP.

WiMAX: Worldwide Interoperability for Microwave Access.

WLAN: Wireless Local Area Network

INTRODUCTION GENERALE

Le développement rapide de la technologie de communication sans fil a entraîné une augmentation explosive du nombre d'utilisateurs mobiles. La prévalence des appareils intelligents conduit à la croissance explosive des exigences en matière de communication numérique sans fil. Bien que les nouvelles technologies telles que la modulation à petite cellule et à ordre élevé puissent améliorer l'efficacité de la fréquence dans une certaine mesure, elles ne peuvent toujours pas satisfaire aux exigences. La technologie massive entrée multiples et sorties multiples (MIMO) est un sujet important et d'actualité, largement motivé par les exigences des communications sans fil de cinquième génération (5G) ou futures. Il existe trois techniques clés pour les communications 5G du point de vue de la capacité du système : la technique massive MIMO est d'abord adoptée pour améliorer le SE de système ; les ressources spectrales en ondes millimétriques sont utilisées pour étendre la bande passante du système ; et des réseaux multicouches et ultra-denses sont déployés pour augmenter la réutilisation spectrale géographique.

L'utilisation de la technologie d'antenne MIMO permet d'augmenter la capacité des systèmes sans fil en proportion du nombre d'antennes. Elle a été également utilisée dans la 4G pour augmenter les débits et la portée.

La radio Ultra Large Bande (ULB) est un bon candidat pour les transmissions sans fil car elle nécessite de faibles puissances en transmission et utilise des dispositifs à faible coût. Cependant en raison du faible niveau des signaux transmis, les systèmes ULB sont limités à des applications sur courtes distances ou alors à des débits modérés. Par conséquent pour envisager la faisabilité et le futur succès commercial de ces systèmes, il est crucial de déterminer une solution permettant la meilleure utilisation possible de la puissance rayonnée et reçue. Dans ce contexte, l'utilisation des techniques MIMO (Multiple Input Multiple Output) semble être une réponse très intéressante. Il a été montré que les techniques MIMO utilisées dans les systèmes UWB permettront d'améliorer la robustesse du lien de communication et le débit des données. Mais ceci impose quelques défis liés à la conception de ces systèmes d'antennes. Ainsi pour pouvoir intégrer un nombre important d'antennes émettrices / réceptrices fonctionnant sur une large plage de fréquences, dans un équipement compact, un effort important, prenant en compte les limites fondamentales des performances des antennes, doit être consacré à leur conception.

L'objectif de ce travail consiste donc à concevoir un nouveau système MIMO d'antenne miniature ou compacte ULB fonctionnant dans les bandes 5G en dessous de 6GHz pour les services existés et les futures applications visées par le standard 5G. Une solution possible est proposée en utilisant des configurations d'antenne MIMO 2x2 et 4x4, composée par des monopôles identiques, imprimées et alimentées par des lignes micro ruban avec un plan de masse réduit et modifié par des stubs, afin d'améliorer le découplage ou l'isolation entre les différents ports .

Pour cela, nous avons divisé ce mémoire en trois chapitres principaux.

Le premier chapitre présente l'évolution des réseaux de communication mobile et la nécessité de passer à la cinquième génération.

Après avoir montré la modification apportée par la (5G) aux systèmes de télécommunication ; nous consacrons le deuxième chapitre à l'étude de la technologie MIMO et massive MIMO.

Nous proposons dans le troisième chapitre, des nouvelles structures d'antenne MIMO 2x2 et MIMO 4x4 fonctionnant sur une très ultra large bande de fréquences correspondant aux ondes millimétriques utilisées par la 5G. Un prototype de ces antenne était fabriqué et caractérisé.

Enfin, avec une conclusion générale et perspective on termine notre travail.

Chapitre I : Evolution des réseaux de téléphonie mobile

I.1 INTRODUCTION

Le succès accompli par les réseaux filaires d'un côté et la volonté des usagers de s'affranchir des limites du filaire ainsi que leurs désirs de plus de liberté de l'autre ont considérablement encouragés le développement d'un autre type de réseaux. Les réseaux mobiles sont des réseaux qui offrent des avantages remarquables évitant les contraintes du câblage en premier lieu et assurant aux utilisateurs un environnement plus souple. En effet, les usagers restent connectés au réseau tout en se déplaçant dans la zone géographique impartie. Le développement des réseaux mobiles n'a pas cessé de croître. Plusieurs générations ont vu le jour 1G, 2G, 3G, 4G et 5G.[1]

Dans ce contexte, la première partie de ce chapitre est consacré à une présentation générale, en ordre chronologique, des cinq générations des réseaux mobiles. Une deuxième partie porte sur les technologies en cours d'étude et les applications visées pour le réseau de la 5^{ème} génération. Enfin, une dernière partie s'intéressera à une étude comparative entre la 4G et la 5G.

I.2 ÉVOLUTION DES RESEAUX MOBILES

Les réseaux mobiles sont des réseaux sans fil dans lesquels au moins deux terminaux peuvent communiquer sans liaisons filaires. Grace à ce type de réseau, un utilisateur (abonné) a la possibilité de rester connecté au réseau tout en se déplaçant dans un périmètre géographique plus ou moins étendu, c'est la raison pour laquelle on parle de mobilité. Ces réseaux sont basés sur une liaison utilisant des ondes radioélectriques et utilisent l'interface radio comme support de transmission.[2]

Le développement des réseaux mobiles s'est déroulé en plusieurs étapes :

Le réseau 1G s'agit de la toute première génération du réseau mobile. Déployé en France dès 1986 sous le nom de Radiocom 2000. La 1G était accessible par le biais de téléphones analogiques transportables, essentiellement intégrés aux voitures.

Le réseau 2G, déployé en 1990 est toujours actif. Il représente le symbole du passage de l'analogique au numérique. En termes d'usages, la 2G est suffisante pour appeler et envoyer des SMS, voire des MMS. Les débits généralement observés en 2G sont de 9.6Kbits/s. Ce réseau a connu trois améliorations successives avec le réseau GPRS aussi appelé 2,5G et le réseau EDGE (évolution du GPRS) appelé aussi 2,75G.

Le réseau 3G, qui fonctionne exclusivement sur les bandes de fréquences 900 MHz et 2100 MHz, et avec un débit de 1,9Mbits/s. Il a connu trois améliorations successives avec la 3G+ (aussi appelée HSPA), le H+ (HSPA+) et le H+ Dual Carrier (DC-HSPA+). Il s'agit d'évolutions

de l'UMTS visant à bénéficier de meilleurs débits : 3,6Mbits/s pour la 3G+, 5Mbits/s pour le H+ et 10Mbits/s pour le H+ Dual Carrier. Ces avancées ont permis d'aller plus loin dans l'usage d'Internet, avec notamment la possibilité de visionner des vidéos instantanément et sans attendre le temps du chargement.

La 4G ou LTE (Long Term Evolution) donne aux usagers l'opportunité de surfer à une très grande vitesse. Avec un débit élevé, la 4G permet de transférer des fichiers lourds, de visionner des vidéos en HD, de "live-streamer", etc. [3]

La 5G est la dernière-née des générations de téléphonie mobile. Son déploiement s'inscrit dans une évolution continue depuis les années 1980 de technologies (GSM, UMT, LTE...) visant, au cours des générations successives, à transmettre la voix, les données, puis les données mobiles, avec un accroissement concomitant du débit d'information.

Le concept de 5G regroupe à la fois une évolution des réseaux mobiles existants pour satisfaire les futures demandes en transfert de données, mais aussi une révolution avec la création d'une nouvelle technologie de communication plus compétitive, c'est-à-dire un réseau qui sera plus efficace et moins cher. [4]

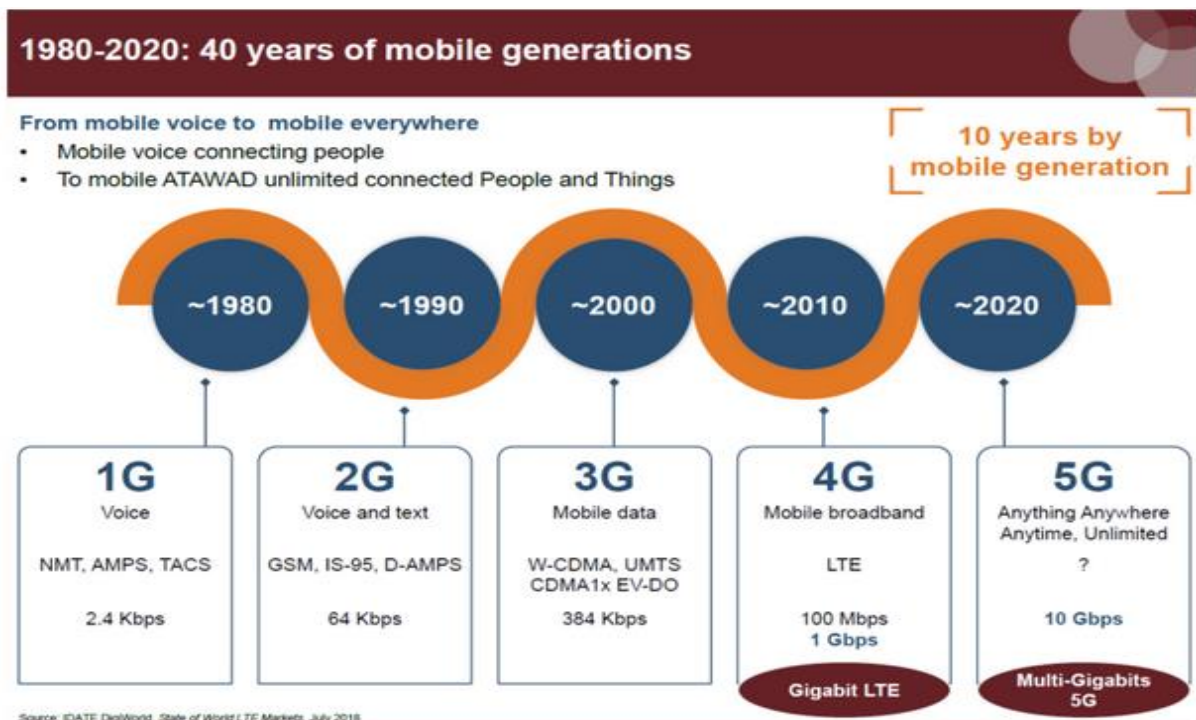


Figure I.1 Cycles des générations de téléphonie mobile

I.3 GENERATIONS DES RESEAUX MOBILES

Pour une bonne explication de la technologie utilisée aujourd'hui, il faut d'abord connaître l'évolution de ces techniques, cela va nous aider à savoir de quoi nous sommes partis pour mieux se positionner à l'heure actuelle.

I.3.1 Première génération des téléphones mobile (1G)

Apparue dans les années 70, La première génération de systèmes cellulaires de réseaux mobiles (1G) est uniquement dédiée aux appels vocaux. Elle reposait sur un système de communications mobiles analogiques. Cette génération bénéficia de deux inventions techniques majeures des années 1970 : le microprocesseur et le transport numérique des données entre les téléphones mobiles et la station de base. Les appareils utilisés étaient particulièrement volumineux.

De nombreux standards du réseau 1G ont eu cours à travers le monde depuis son apparition en 1976, parmi lesquels :

- La norme AMPS (Advanced Mobile Phone System) lancé aux États-Unis à partir de 1976, en Russie, en Australie et dans plusieurs pays asiatiques. Elle est un réseau analogique reposant sur la technologie FDMA (Frequency Division Multiple Access).
- La norme NMT (Nordic Mobile Téléphone), exploitée au début des années 80 dans les pays nordiques et dans de nombreux pays européens, en Russie, au Moyen-Orient et en Asie.
- La norme TACS (Total Access Communications System), qui la version européenne de la technologie AMPS, largement utilisée au Royaume-Uni, à Hong-Kong et au Japon.
- La norme ETACS (Extended Total Access Communication System) est une version améliorée du standard TACS, il a été développé au Royaume-Uni et permet l'utilisation d'un nombre plus important de canaux de communications.
- **Les normes** TZ-801, TZ-802, TZ-803 et JTACS (Japan Total Access Communications System) utilisées au Japon à partir de 1979.
- **La norme Radiocom 2000** déployée en France par France Telecom à partir de 1986, ainsi que **la NMT-F** (Nordic Mobile Téléphone « Français ») lancée en 1988.

I.3.2 Deuxième génération des téléphones mobiles (2G)

La deuxième génération (notée 2G) a marqué une rupture avec la 1G grâce au passage de l'analogique au numérique. La norme permet la transmission de la parole et des données simultanément. Elle offre la possibilité aux utilisateurs de partager un même canal de transmission, ceci est possible grâce à l'utilisation du mécanisme de division de fréquence FDMA (Frequency Division Multiple Access) et mécanisme de division de temps TDMA (Time Division Multiple Access).

Les standards 2G les plus utilisés sont le GSM, l'IS-95 (Interim Standard-95) qui est basé sur le codage CDMA (Code Division Multiple Access) et l'IS-136 (Interim Standard-136) qui se base sur le codage TDMA (Time Division Multiple Access).

C'est d'ailleurs sur ce standard que se basent les réseaux GPRS (General Packet Radio Service : 2.5G) et EDGE (Enhanced Data for GSM Evolution : 2.75G) qui sont venus corriger les faibles débits du GSM (environ 9,6 kbps). Le GPRS propose un débit théorique de 114 kbps permettant ainsi la transmission simultanée de la voix et de données. L'utilisation des applications multimédias est rendue possible par EDGE qui offre des débits allant jusqu'à 384 kbps.

I.3.2.1 Réseau GSM (2G)

The Global System for Mobile Communications, ou GSM, est le système de téléphonie mobile cellulaire de deuxième génération (2G). Ses prédécesseurs, les systèmes de téléphonie mobile de première génération (1G), étaient des systèmes analogiques tels que le système Nordic Mobile Téléphone (NMT) et le système Advanced Mobile Phone System (AMPS). Le GSM est une norme numérique qui utilise la modulation numérique GMSK et le multiplexage temporel (TDMA) comme technologie d'accès multiple.

I.3.2.2 Réseau GPRS (2.5G)

La norme GPRS (General Packet Radio Service) est une évolution de la norme GSM. Etant donné qu'il s'agit d'une norme de téléphonie de seconde génération permettant de faire la transition vers la troisième génération 3G, on parle généralement de 2.5G pour classer la norme GPRS.

Le GPRS permet d'étendre l'architecture de la norme GSM, afin d'autoriser le transfert de données par paquets, avec des débits théoriques maximums. Grâce au mode de transfert par paquets, les transmissions de données n'utilisent le réseau que lorsque c'est nécessaire. La norme

GPRS permet donc de facturer l'utilisateur au volume échangé plutôt qu'à la durée de connexion, ce qui signifie notamment qu'il peut rester connecté sans surcoût [5].

I.3.2.3 Réseau EDGE (2.75G)

La norme EDGE (*Enhanced Data Rates for GSM Evolution*) est tout comme la norme GPRS, une évolution de la norme GSM, modifiant le type de modulation pour permettre l'utilisation de la modulation 8-PSK, ce qui implique une modification des stations de base et des terminaux mobiles. Elle est considérée comme la transition vers la troisième génération de téléphonie mobile (3G), on parle ainsi de 2.75G.

L'EDGE permet ainsi de multiplier par un facteur 3 le débit des données avec une couverture plus réduite. Dans la théorie EDGE permet d'atteindre des débits allant **jusqu'à 384 kbit/s** pour les stations fixes (piétons et véhicules lents) et jusqu'à 144 kbit/s pour les stations mobiles (véhicules rapides).

I.3.3 Troisième génération des téléphones mobiles 3G

I.3.3.1 Définition

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

La 3G est caractérisée par la volonté des industriels de télécommunications de définir une norme au niveau mondial. Les enjeux étaient d'offrir une itinérance globale aux utilisateurs, mais également de réduire les coûts unitaires des terminaux mobiles et des équipements de réseau grâce aux économies d'échelle. Dans cette perspective, ces entreprises, en particulier celles issues du monde GSM, se sont regroupées au sein du consortium 3GPP. Cette démarche aboutit à l'élaboration de la norme UMTS à la fin des années 1990. Cette première version de la norme est appelée Release 99. Les innovations associées au système UMTS ont principalement trait au réseau d'accès, celui-ci s'interfaçant avec le réseau cœur GPRS. Les objectifs de l'UMTS étaient d'accroître la capacité du système pour le service voix mais surtout d'améliorer le support des services de données [6].

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

I.3.3.2 Présentation de l'infrastructure du réseau UMTS

L'idée fondatrice du système 3G est d'intégrer tous les réseaux de deuxième génération du monde entier en un seul réseau et de lui adjoindre des capacités multimédia (haut débit pour les données).

La norme *UMTS* est une évolution de la deuxième génération à la troisième génération (*3G*). Elle constitue une voie royale pour le développement de produits et de services multimédias. Les technologies développées autour de cette norme conduisent à une amélioration significative des services et des vitesses de transfert avec des débits supérieurs à 144 *Kbps* et pouvant aller jusqu'à 2 *Mbps*. Cette amélioration des débits est rendue possible grâce à l'évolution des technologies radio qui autorisent une meilleure efficacité spectrale et l'exploitation de bandes de spectre de fréquences supérieures à celles utilisées par la technologie *GSM* [7].

I.3.3.3 Technologie HSDPA (3.5G)

La troisième génération (*UMTS*) impose des investissements énormes pour des débits qui ne sont pas éloignés de ceux du *GPRS* et se voit rapidement remplacée par la nouvelle génération (*3.5G*), appelée *HSDPA*. Cette nouvelle technologie offre des débits pouvant aller au-delà de 10 *Mbps* sur le lien descendant [8]. Le *HSDPA* peut être installé et déployé sans changer radicalement l'architecture de l'*UMTS*. Il permet du coup aux opérateurs de réaliser cette évolution à moindre coût.

I.3.3.4 Technologie HSUPA (3.75G)

La *3.75G* est une variante de *HSDPA* sur la voie montante. *HSUPA* peut être considéré comme le successeur de *HSDPA*, il porte un débit montant (Up Link) à 5,8 *Mbps* théorique, le flux descendant (*Down Link*) étant de 14 *Mbps* comme en *HSDPA* [9]. L'intérêt de cette technologie sera d'offrir la possibilité d'émettre vers d'autres mobiles toutes sortes des documents électroniques (images, vidéos...) favorisant ainsi le développement de l'Internet haut débit mobile.

I.3.4 Quatrième génération des téléphones mobiles 4G

I.3.4.1. Présentation de la quatrième génération 4G

La définition de la 4G a évolué comme une nouvelle vague d'efforts de données de commercialisation des mobiles qui se déplace le terme dans l'œil du public à différencier les marques. L'union internationale des télécommunications (UIT), qui supervise le développement de la plupart des normes de données cellulaires, a récemment publié une déclaration soulignant que la 4G terme n'est pas défini. En réponse, les opérateurs mobiles avec des architectures 3G avancés a commencé la commercialisation des services 4G [10].

I.3.4.2 Technologies 4G Réseau LTE (LTE Long Terme Evolution) 3.9G

L'évolution à long l'équivalent français du terme est terme anglais LTE. Elle désigne un projet réalise par l'organisme de standardisation 3GPP œuvrant à rédiger des techniques qui permettront d'améliorer la norme UMTS des réseaux cellulaires 3G, vers la quatrième génération, pour faire face aux futures évolutions technologiques. Les buts poursuivis pour la LTE consistent en une amélioration de l'efficacité spectrale qui permettra le transfert des données à très haut débit, de l'ordre de 50 Mbps, avec une portée plus importante, un nombre d'appels par cellule plus élevé que dans l'UMTS et une latence plus faible ; La quatrième génération présente, pour l'amélioration des services, des plateformes multi-technologiques capables de supporter de nouvelles applications innovatrices. De même que ces précédentes, la 4G présente une architecture qui comporte un réseau d'accès : l'E-UTRAN et un réseau cœur véhiculant que des paquets de données. Elle est dite pour cela tout-IP. [11]

La technologie LTE (Long Terme Evolution) ou la 4G s'appuie sur un réseau de transport à commutation de paquet IP. Elle n'a pas prévu de mode d'acheminement pour la voix, autre que la VoIP, contrairement à la 3G qui transporte la voix en mode circuit.

Le LTE utilise des bandes de fréquences hertziennes d'une largeur pouvant varier de 1,4 MHz à 20 MHz, permettant ainsi d'obtenir (pour une bande 20 MHz) un débit binaire théorique de 300 Mbit/s en « downlink », alors que la "vraie 4G" offre un débit descendant atteignant 1 Gbit/s.

Comme technique de modulation, le multiplexage OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) apporte une optimisation dans l'utilisation des fréquences en minimisant les interférences. Le recours à des techniques d'antennes multiples (déjà utilisés pour le Wi-Fi ou le WiMax) permet de multiplier les canaux de communication parallèles, ce qui augmente le débit total et la portée [12].

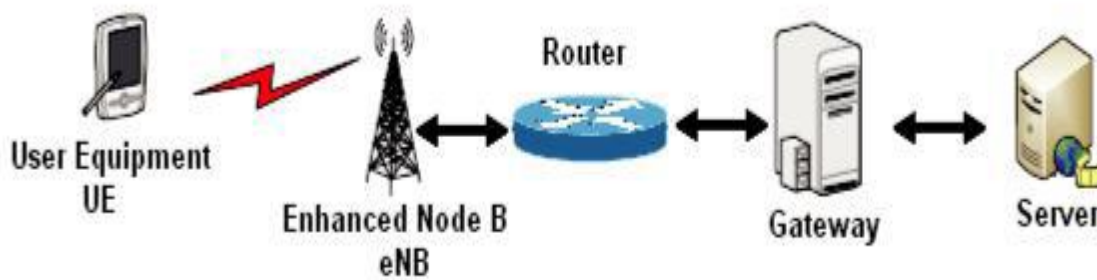


Figure I.2 Présentation générale sur le système LTE

I.3.5 Cinquième génération des téléphones mobiles 5G

Bien que, le réseau 4G actuel reposant sur la norme LTE (Long Term Evolution) a apporté de nombreuses solutions comme l'augmentation du débit et de la bande passante comparé aux anciennes générations de réseaux mobiles. En utilisant la technologie IP, la 4G permet une navigation internet confortable avec les Smartphones, les tablettes ou les ordinateurs portables. Cependant, ce réseau dont le spectre de fréquence est assez surchargé ne pourra plus bien assurer les diverses exigences dues à l'essor des objets connectés avec leurs différentes catégories d'usages. Face à ces problèmes, le nouveau standard des systèmes de télécommunications mobiles 5G, ouvre des perspectives pour répondre aux besoins actuels, mais également ceux du futur.

I.3.5.1 Présentation de la cinquième génération 5G

La cinquième génération (5G) de la téléphonie mobile sans fil est l'une des technologies les plus récentes dans le domaine des communications sans fil [13]. Cette avancée devrait fournir un très grand service en termes de rapidité, de diversité et de facilité.

La 5G (réseaux mobiles ou systèmes sans fil de 5eme génération) englobe un ensemble de technologies qui constituent la prochaine grande phase des normes de télécommunications mobiles à partir de l'évolution des normes actuelles 4G LTE (évolution à long terme). Le réseau 5G est validé par l'ITU (International Télécommunication Union) et le consortium 3GPP (3rd Génération Partner hip Project) [14]. Il n'y a pas de définition unique de 5G. Cependant, dans la définition la plus simple possible, 5G est la cinquième génération de réseaux cellulaires. C'est la prochaine étape dans la technologie mobile, ce que les téléphones et les tablettes du futur seront utilisés pour les données.

I.3.5.2 Objectifs de la 5G

Les principaux industriels et opérateurs du secteur des communications sans fil élaborent actuellement les objectifs et standards de la cinquième génération de réseau mobile (la 5G). L'étape de standardisation démarrée au sein de différents consortiums d'opérateurs et industriels (3GPP, NGMN...). Le premier objectif à atteindre concerne le débit montant et descendant alloué à chaque utilisateur afin d'assurer un accès internet haut débit depuis un smart phone ou tablette. Dans un contexte d'utilisation en mobilité faible ou nulle, le débit visé en bord de cellule par utilisateur est supérieur à 100 Mbit/s et le débit maximum par utilisateur devra dépasser les 10 Gbit/s. Dans un cas d'utilisation en forte mobilité (par exemple, dans le cas de communications entre véhicules), l'amélioration de l'architecture du réseau devra notamment permettre de réduire la latence de la communication. L'objectif est d'obtenir un délai de transmission inférieur à 10 ms. Pour d'autres applications de l'IoT (télémédecine, sécurité...), un haut niveau de fiabilité sera également requis. Des modifications majeures dans l'architecture du réseau et l'apport de nouvelles technologies sans fil seront requises dans les réseaux 2G/3G/4G actuels pour atteindre ces objectifs. Le coût et la consommation énergétique des éléments constituant ce nouveau réseau et les terminaux mobiles associés seront des points décisifs pour parvenir à une solution viable du point de vue économique.[15]

5G vise à fournir un débit de données très élevé pour un grand nombre d'utilisateurs et prendre en charge plusieurs communications simultanément pour déployer un grand nombre de capteurs, et également améliorer l'efficacité spectrale du réseau.

I.3.5.3 Catégories d'usages de la 5G

A moyen terme (c'est-à-dire jusqu'en 2020 environ) et au-delà, le développement futur des IMT-2020 va sans doute évoluer en fonction des exigences du marché. En étudiant les différents cas d'utilisation et les besoins des usagers, trois grandes catégories d'usages ont été regroupés [16] (Figure I.3).

➤ **Communications massives de type machine (MMTC : Massive Machine-Type Communications)**

Ce scénario fournit des connexions à très faible latence, nécessitant environ une milliseconde ou moins, avec des temps de transmission plus courts pour les services réseau avec des exigences extrêmes de disponibilité, de latence et de fiabilité maximale, par exemple. Le terme V2X pour les applications de communications et de fabrication industrielle. Ce terme

comprend (V2V) pour l'échange d'informations entre les participants de la circulation en utilisant un véhicule à véhicule, (V2P) de véhicule à piéton ou de véhicule à l'infrastructure (V2I) des communications qui fournissent la sécurité du trafic, l'efficacité, la santé en ligne et la gestion des villes intelligentes (Smart City)[17].

➤ **Large bande mobile améliorée (EMBB : Enhanced Mobile Broadband)**

Le haut débit (EMBB) est dédié à toutes les applications et à tous les services, ainsi que la connectivité haut débit en extérieur et en intérieur avec uniformité de qualité de service, même en bordure de cellule. Il peut fournir des capacités haut débit entre 100 et 1000 fois la capacité des systèmes mobiles pour les téléphones mobiles, la réalité virtuelle et l'optimiseur, la vidéo 3D et la vidéo HD [18].

➤ **URLLC – Ultra-Reliable and Low Latency Communications**

Les communications ultra-fiables à très faible latence (URLLC) regroupent toutes les applications nécessitant une réactivité extrêmement importante ainsi qu'une garantie très forte de transmission du message. Ces besoins se retrouvent principalement dans les transports (temps de réaction en cas de risque d'accident, par exemple), dans la médecine (télé chirurgie) et, de manière générale, pour la numérisation de l'industrie.

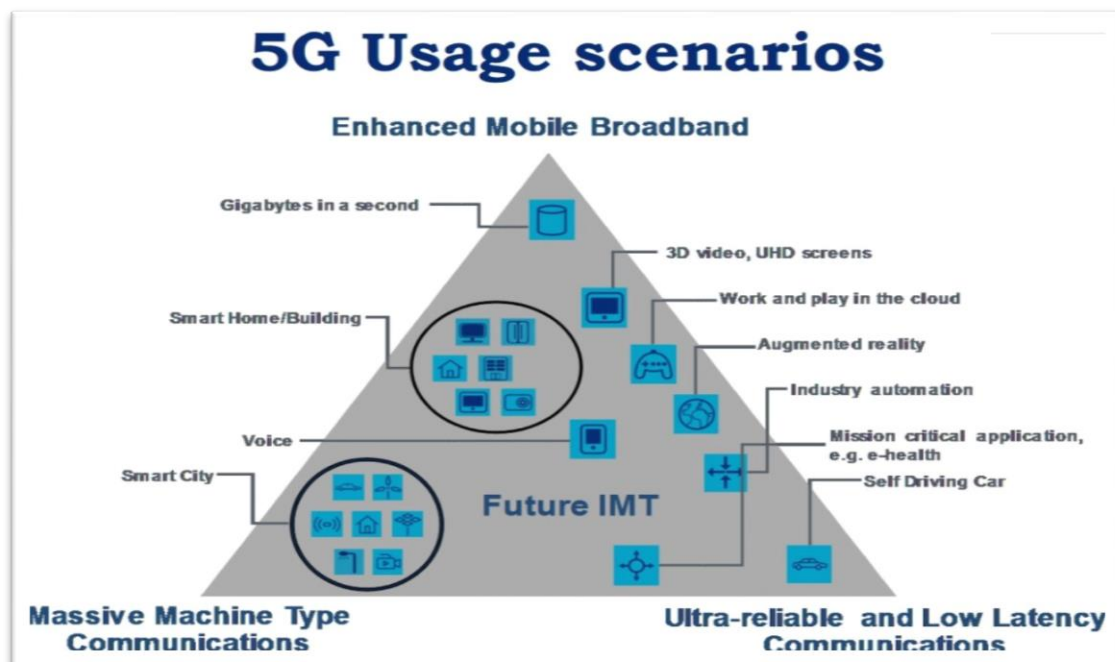


Figure I.3 Les trois cas d'utilisation de la 5G

I.4 TECHNOLOGIES EN COURS D'ETUDE DE 5G

I.4.1 Bandes millimétriques

On parle des fréquences supérieures à 6GHz qui n'ont encore jamais été pris pour l'implémentation des réseaux mobiles pour des raisons technologique et de qualité de propagation. Pour répondre à l'augmentation des débits de transmission et des volumes de données à transmettre, il faut offrir de telles réserves de spectre, et leur utilisation nécessite le développement de toutes les technologies nécessaires comme la miniaturisation à faible coût et avec une faible consommation d'énergie pour être compatible avec les terminaux portables (Amplificateur, codeur, traitement de signal, antenne...). En particulier, la communication par onde millimétrique peut être utilisée pour une couverture extérieure pour des réseaux à haute densité telle que la portée allant jusqu'à 200 à 300 mètres (micro cellules). Chacune des cellules aura une couverture réduite, ce qui nécessitera l'implémentation de la technique de 'beamforming'[19].

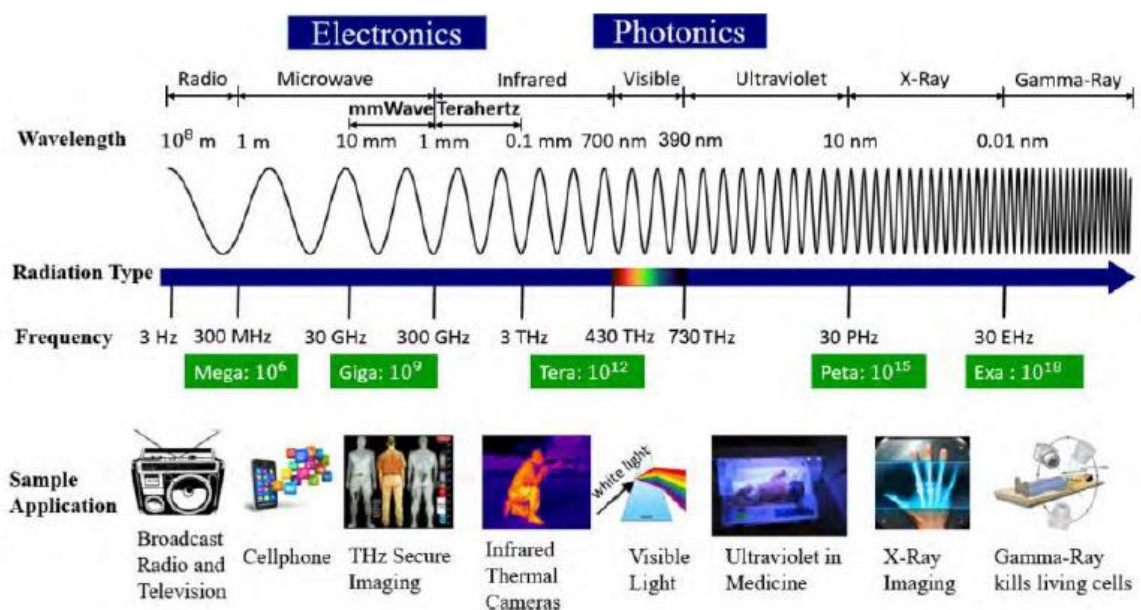


Figure I.4 Spectre électromagnétique

I.4.2 MIMO (Multiple Inputs - Multiple Outputs)

Les besoins des hauts débits pour les communications mobiles de dernière génération ont augmenté, la meilleure solution pour atteindre ce but est d'augmenter le nombre d'antennes pour l'émission et la réception de la liaison sans fil, donc on parle de la technique MIMO. Aussi, pour réduire les évanouissements de signal provoqués par l'environnement de propagation des trajets multiples et le bruit de canal, la technique de diversité peut être utilisée, cette dernière consiste à

placer une antenne en émission et plusieurs antennes en réception. Alors que l'intégration de plusieurs antennes sur le plan de masse d'un téléphone mobile est un grand défi pour les chercheurs. En effet, à cause du volume limité des terminaux mobiles, une forte isolation entre les antennes doit être réalisée afin de maximiser le gain de diversité et aussi augmenter la capacité de transmission de l'ensemble du système total [20].

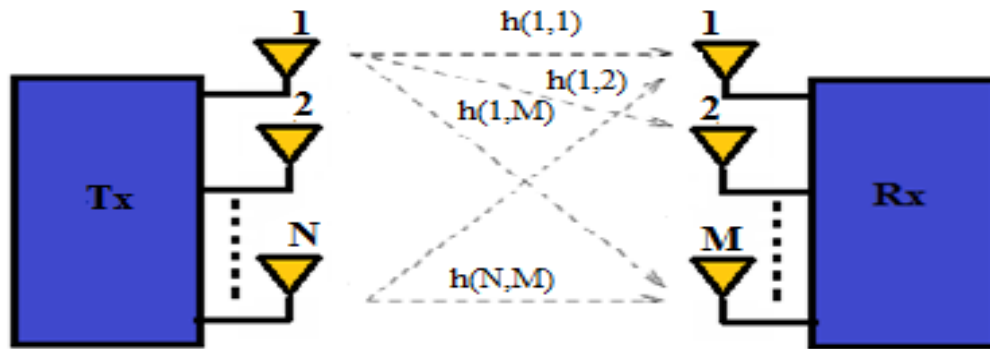


Figure I.5 Architecture de système MIMO

I.4.3 Multiplexage NOMA (Non Orthogonal Multiple Access)

Le LTE utilise un multiplexage dit orthogonal, chaque terminal utilisant, de manière unique, une partie des fréquences à un instant donné (*resource blocks*). Pour améliorer l'efficacité spectrale de la 5G, par rapport à la 4G, des méthodes de multiplexage non orthogonales, c'est-à-dire que plusieurs utilisateurs peuvent recourir aux mêmes fréquences au même moment, sont envisagées. La discrimination entre plusieurs utilisateurs peut se faire en attribuant des codes différents à chaque utilisateur (SCMA, *sparse code multiple Access*, combinaison du CDMA, *code division multiple Access*, de la 3G et de l'OFDMA, *orthogonal fréquence division multiple Access*, de la 4G) ou en jouant sur la différence des niveaux du rapport signal à bruit des différents utilisateurs (*power Domain NOMA*18, illustré ci-dessous). Ce sont les deux modes privilégiés pour NR.

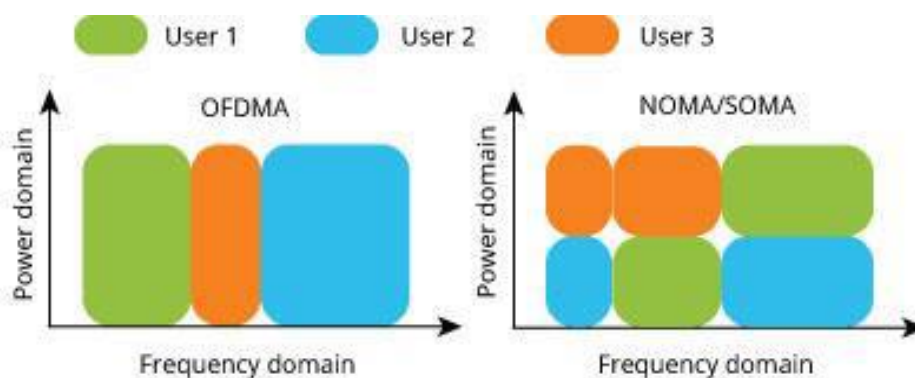


Figure I.6 Illustration de multiplexage *power Domain* NOMA

QAM256 : La 4G, comme de nombreux systèmes de communication modernes, utilise la modulation d'amplitude en quadrature, ou *quadrature amplitude modulation* (QAM). Cette modulation, en 4G peut atteindre QAM64, c'est-à-dire qu'à chaque instant, 6 bits d'information sont transmis ($2^6 = 64$). Dans les systèmes sans-fil, la principale limitation sur l'ordre de la QAM est le rapport signal-bruit : quand on envoie beaucoup d'informations d'un coup, la transmission est très sensible aux perturbations (un peu comme quand, dans un environnement bruyant, on essaie de parler : il est facile de comprendre un « oui » ou un « non », mais plus difficile de comprendre une phrase complexe). Grâce à l'amélioration du bilan de liaison de la 5G, *via* des technologies antennaires ou de traitement de signal, la modulation pourra atteindre l'ordre QAM256, c'est-à-dire que 8 bits d'information seront transmis à chaque instant, soit une augmentation de la capacité maximale de 33% (dans des conditions idéales). Cette modulation améliorée sera également déployée sur les réseaux 4G évolués.

Formes d'ondes IoT : de nouvelles formes d'ondes sont à l'étude pour le futur déploiement de l'IoT 5G dans les bandes mobiles. Néanmoins, bien que l'IoT de masse soit un des enjeux principaux de la 5G, aucun résultat concret n'a été rendu public. De nouveaux standards (EC-GSM ou *Extended Coverage GSM*, LTE-(e)MTC ou *enhancements for Machine-Type Communications*, NB-IoT ou *NarrowBandIoT*), qui ont été définis par le 3GPP.,

mais, dans la mesure où ils s'appuient sur la 2G et la 4G, ils n'apportent pas les niveaux de performance, notamment en autonomie, en couverture ou en densité, que ciblent les futurs réseaux 5G.

I.4.4 Full Duplex

Dans les communications mobiles, il est important de pouvoir communiquer simultanément dans les deux sens, c.-à-d. de l'émetteur vers le récepteur et l'inverse à la fois. Pour les systèmes de téléphonie mobile précédents, ils ont utilisé des systèmes FDD ou TDD, nommée semi-duplex, nécessitant l'utilisation de deux canaux différents, un pour la liaison montante (UL) et un autre pour la liaison descendante (DL), ce système est basé sur l'utilisation de la largeur de bande totale du canal dans les deux zones du spectre. Alors la propagation entre les bandes d'émission et de réception sera également dans des instants différents (pas de communication simultanée). Alors, l'utilisation des filtres devient plus difficile et plus complexe surtout dans le cas où plusieurs bandes sont utilisées parce que ces derniers sont importants pour augmenter la taille et le coût, ceci introduit des pertes supplémentaires dans la liaison.

Deuxièmement les systèmes TDD, qui consiste à allouer des canaux temporels en fonction de l'émission et de réception dans laquelle la liaison montante et la liaison descendante sont effectuées sur le même canal avec la même fréquence. Les canaux sont pratiquement un peu courts, Donc on sent que la transmission dans les deux directions est instantanée.

Le concept du full duplex 5G est de donner la possibilité d'émettre et de recevoir simultanément les informations, en utilisant les mêmes fréquences, en même moment et au même point. Ce duplex intégral 5G offre plusieurs avantages comme [19]:

- Efficacité spectrale.
- Caractéristique d'évanouissement.
- Filtrage.
- Nouvelles solutions de relais.
- Coordination améliorée des interférences.

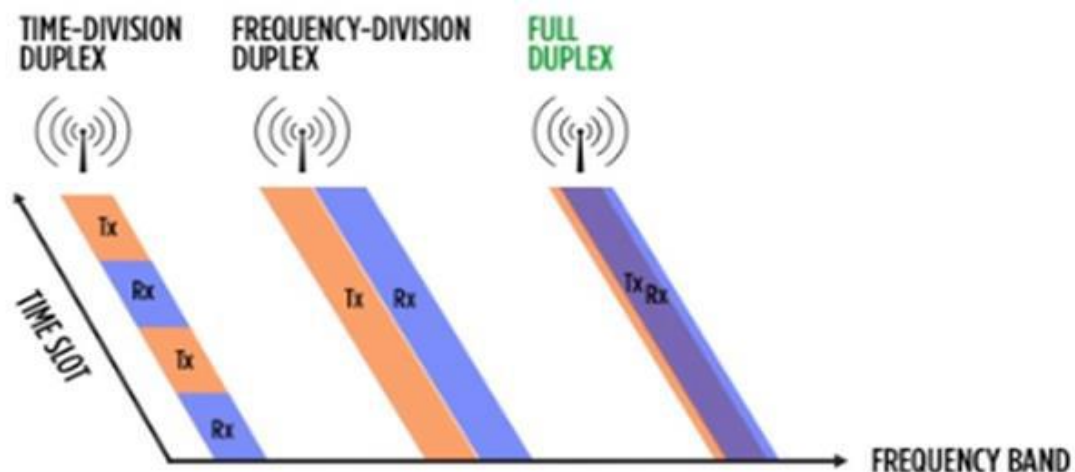


Figure I.7 Illustration du full-duplex, comparé au FDD et TDD

I.5 APPLICATIONS VISEES POUR LE RESEAU DE 5G

La 5G fournira la connectivité sans fil pour un large éventail de nouvelles applications présentées sur la Figure I.8. La 5G va pénétrer dans chacun des éléments de notre société future et créer un écosystème d'information multidimensionnel centré sur l'utilisateur. Elle va briser la limitation de temps et d'espace pour permettre une expérience utilisateur immersive et interactive. La 5G raccourcira également la distance entre l'homme et les choses, et mettre en œuvre une intégration transparente pour réaliser une interconnexion facile et intelligente entre les personnes et toutes les choses. 5G nous permet de réaliser la vision : « L'information est à portée de main, et tout sera resté en contact ».

Un grand nombre de cas d'utilisation ont été proposés par différentes organisations. L'internet mobile et l'Internet des objets (IoT) sont les deux principaux moteurs du marché de développement futur des communications mobiles, et ils déclencheront une grande gamme de cas d'utilisation [21].

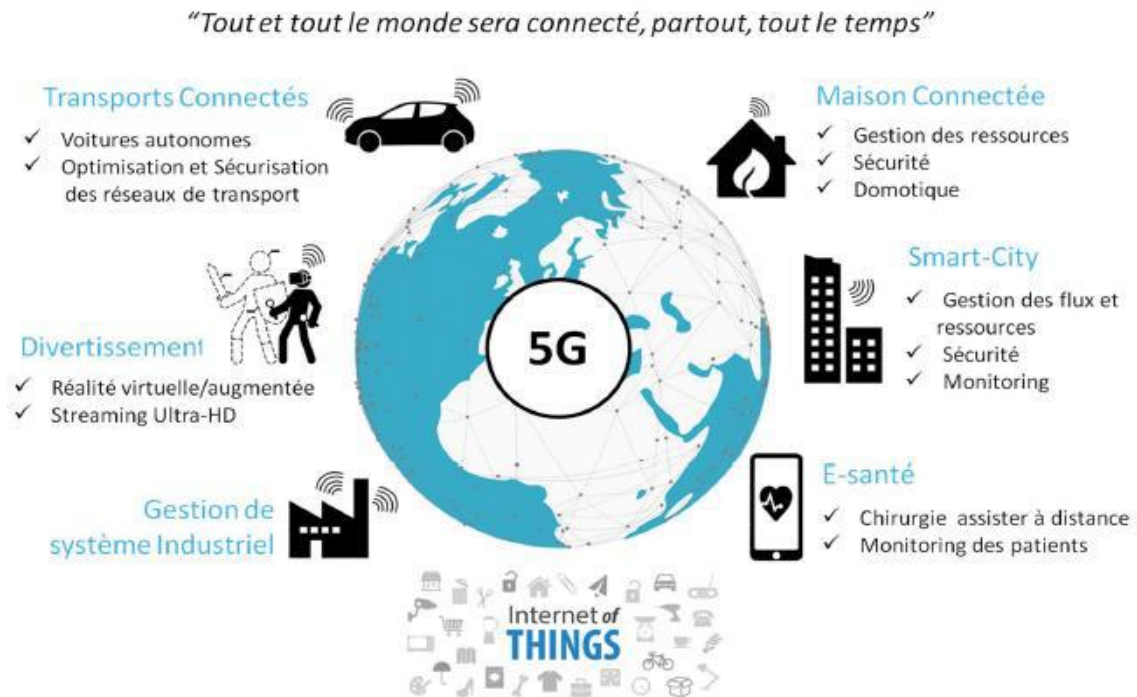


Figure I.8 Applications de la 5G

I.6 COMPARAISON ENTRE 4G ET 5G

La nouvelle norme 5G apporte des débits plus importants encore que la 4G, et qui peuvent être garantis (la 4G n'assure qu'un débit maximal possible), mais aussi un temps de latence bien plus faible qu'aujourd'hui. La 5G offre également d'autres gains de performance. Huit indicateurs de performance listés dans l'IMT-2020100 [22], ont été établis par l'Union internationale des télécommunications (UIT) pour préciser, quantifier et mesurer les caractéristiques d'un réseau 5G. Le débit maximal s'élève à 1Gbit/s pour la 4G et à 20 Gbit/s pour la 5G. Les communications sont assurées pour un déplacement allant jusqu'à 350km/h pour la 4G à un déplacement allant jusqu'à 500km/h pour la 5G. De plus la 5G permet de connecter jusqu'à 10 fois plus d'objets que la 4G.

La 5G consomme dix fois moins d'énergie que la 4G, à montant égal de données transportées. Plus globalement, le réseau 5G répond à un enjeu environnemental, avec un potentiel fort d'économie d'énergie et une meilleure maîtrise de la diffusion des ondes. Les différentes technologies radio 5G permettent de diminuer la consommation en énergie du réseau

et des terminaux. Le fait que la 5G soit focalisant, et non diffusante, évite d'arroser l'espace environnant d'ondes électromagnétiques permettant ainsi de mieux maîtriser leurs effets sur les individus.

I.7 CONCLUSION

D'après ce chapitre, on constate que le développement des réseaux mobiles a été fait premièrement par le passage de l'analogique au numérique, puis ils ont amélioré l'efficacité des réseaux soit en ajoutant des nouveaux modules comme le cas de GSM vers GPRS. Malgré le succès de ces réseaux cellulaires, un problème important apparaissait lorsque le nombre d'utilisateurs augmentait. En plus de ce problème, des cas de fraude importants ont commencé à faire surface, ce qui a nécessité des améliorations urgentes de ces technologies.

On constate que la 5G ne consiste pas en une amélioration des normes précédentes de télécommunications. Il s'agit plutôt d'une innovation de rupture qui va révolutionner les télécommunications et qui est susceptible d'apporter des changements radicaux dans les modèles commerciaux ayant cours chez les opérateurs

Chapitre II :
Les systèmes MIMO
et Massive MIMO

II.1 INTRODUCTION

Les techniques MIMO sont apparues dans les années 90 grâce à Gerard. J.Foschini. Le but étant d'augmenter le débit et la portée des réseaux sans fil, elles se basent sur l'utilisation de plusieurs antennes aussi bien du côté de l'émetteur que celui du récepteur. La mise en place d'une telle structure permet au système utilisé d'atteindre des débits importants et cela sans changer la largeur de la bande allouée au signal ni sa puissance d'émission.

La technologie Massive MIMO 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. [23]

L'objectif du chapitre actuel est de présenter le système MIMO et (Multiple Input Multiple Output) et Massive MIMO.

II.2 SYSTEMES MIMO TRADITIONNEL

La technologie MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) est une technologie sans fil qui utilise plusieurs émetteurs et récepteurs pour transférer plus de données en même temps. La technologie MIMO tire parti d'un phénomène d'ondes radioélectriques appelé trajets multiples, où les informations transmises rebondissent sur les murs, les plafonds et d'autres objets, atteignant l'antenne de réception plusieurs fois sous différents angles et à des moments légèrement différents. Elle exploite le comportement par trajets multiples en utilisant plusieurs émetteurs et récepteurs « intelligents » avec une dimension « spatiale » supplémentaire pour augmenter considérablement les performances et la portée. MIMO permet à plusieurs antennes d'envoyer et de recevoir plusieurs flux spatiaux en même temps

Grâce à MIMO, les antennes fonctionnent plus intelligemment en leur permettant de combiner des flux de données provenant de différents chemins et à différents moments pour augmenter efficacement la puissance de capture du signal du récepteur. Les antennes intelligentes utilisent la technologie de la diversité spatiale, qui permet de tirer le meilleur parti des antennes excédentaires. S'il y a plus d'antennes que de flux spatiaux, les antennes supplémentaires peuvent ajouter de la diversité aux récepteurs et augmenter la portée. [24]

II.2.1 Principes du MIMO

Comme cela a été expliqué précédemment, la principale source des perturbations, que subit un signal lors de sa propagation, est le canal. En effet, à cause des phénomènes de propagation multi-trajets, le signal subit des évanouissements, des décalages fréquentiels ou même temporels. Contrairement aux systèmes classiques, les systèmes à diversité prennent avantage de ces types de propagation pour améliorer les performances du système. Pour mettre en place ces améliorations, les systèmes MIMO exploitent les techniques de :

- **Diversité d'espace** : Aussi connue sous le nom de diversité d'antenne
- **Diversité fréquentielle** : Cette technique demande l'envoi du même signal sur des fréquences différentes. Il faut toutefois faire attention à la largeur de bande cohérente et à l'étendue fréquentielle due aux multi-trajets et aux distances à franchir par la transmission.
- **Diversité temporelle** : Lorsque l'on sépare l'envoi du même signal par le temps cohérence du canal, il est possible de profiter de la diversité temporelle. Tout dépend également de la vitesse de déplacement du mobile et de la fréquence porteuse.[25]

II.2.2 Architectures des systèmes MIMO

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

- ✓ SISO - Single Input Single Output
- ✓ SIMO - Entrée unique Sortie multiple
- ✓ MISO - Sortie unique à entrées multiples
- ✓ MIMO - Entrée multiple Sortie multiple

II.2.2.1 Système SISO

C'est l'architecture la plus simple qui utilise une seule antenne en émission et une autre en réception. Comme présentée dans la Figure II.1



Figure II.1 SISO - Single Input Single Output

L'avantage d'un système SISO est sa simplicité. SISO n'exige aucun traitement en termes des diverses formes de diversité pouvant être utilisées. Toutefois, les performances du canal SISO sont limitées. Les interférences et les évanouissements auront plus d'impact sur le système qu'un système MIMO utilisant une certaine forme de diversité, et la capacité du canal est limitée par la loi de Shannon - le débit dépend de la largeur de bande du canal et du rapport signal sur bruit

$$C = B \log_2(1+SNR) \text{ [bit/s]} \quad (\text{II.1})$$

Où C 'est la capacité du canal, B la largeur de bande du canal et SNR est le rapport signal sur bruit.

II.2.2.2 Système SIMO

C'est une technique qui utilise plusieurs antennes en réception pour lutter contre l'évanouissement dû au canal. Comme présentée dans la Figure II.2

Le signal reçu est additionné et le rapport signal sur bruit total est la somme des rapports signaux sur bruits de chacun des antennes de la réception.

Il est utilisé depuis de nombreuses années avec les stations d'écoute / réception à ondes courtes pour lutter contre les effets des évanouissements et des interférences ionosphériques.



Figure II.2 SIMO - Single Input Multiple Output

SIMO peut être utilisé sous deux formes :

II.2.2.3 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 émettrices (Figure II.3). Le récepteur est alors capable de recevoir le signal optimal qu'il peut ensuite utiliser pour extraire les données requises.



Figure II.3 MISO - Multiple Input Single Output

L'avantage d'utiliser MISO est que les multiples antennes et le traitement de redondance sont déplacés du récepteur vers l'émetteur. Dans des cas tels que les équipements utilisateur de téléphone cellulaire, cela peut constituer un avantage significatif en termes d'espace pour les antennes et de réduction du niveau de traitement requis par le récepteur pour le codage de redondance. Ceci a un impact positif sur la taille, le coût et la durée de vie de la batterie car le niveau de traitement plus bas nécessite moins de consommation de la batterie.[24]

II.2.2.4 Système MIMO

Comme nous l'avons vu précédemment, le MIMO est un système utilisant plusieurs antennes pour la transmission comme pour la réception (Figure II.4).

Le MIMO envoie des paquets différents aux antennes qui émettent à la même fréquence, en choisissant des chemins séparés pour chaque antenne afin de permettre l'utilisation de plusieurs chemins de signaux.

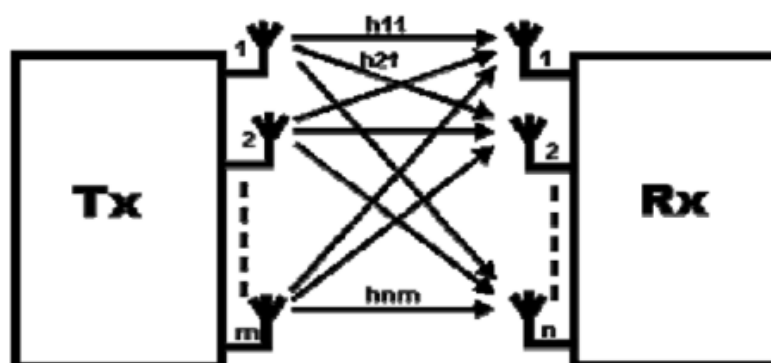


Figure II.4 MIMO- Multiple Input Multiple Output

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

Les deux principaux formats de MIMO sont donnés ci-dessous :

- **Diversité spatiale** : La diversité spatiale est souvent utilisée dans ce sens étroit se réfère à transmettre et recevoir la diversité. Ces deux méthodologies sont utilisées pour apporter des améliorations au rapport signal sur bruit et sont caractérisé par l'amélioration de la fiabilité du système vis-à-vis des différentes formes d'évanouissement
- **Multiplexage spatial** : cette forme de MIMO est utilisée pour fournir une capacité de données supplémentaire en utilisant les différents chemins pour acheminer du trafic supplémentaire, c'est-à-dire en augmentant la capacité de débit de données.

II.2.3 Avantage de la technologie MIMO

La technologie MIMO est une technique de télécommunication basée sur une émission et/ou une réception multi-antennes pour exploiter la diversité spatiale et améliorer la qualité de service, le débit et la portée. La technologie MIMO est aujourd'hui pleinement employée dans les réseaux sans fil haut débit (WLAN – IEEE 802.11a, g, n) déployés dans des environnements présentant de nombreux obstacles (donc prompts à de la propagation multi trajet et permettant d'exploiter la diversité spatiale). Contrairement aux techniques précédentes, il ne s'agit plus simplement de sélectionner une antenne de réception en fonction du rapport signal à bruit. Dans un système MIMO, des signaux différents sont envoyés sur les différentes antennes d'émission. Prenons l'exemple d'une liaison entre un émetteur et un récepteur MIMO composés de 2 antennes. Appelons E1 et E2 les signaux émis par 2 antennes de l'émetteur MIMO. Ces 2 signaux correspondent à 2 trames différentes. Les 2 antennes du récepteur vont capter des signaux R1 et R2, composés des signaux E1 et E2, multipliés par des coefficients liés au canal de propagation notés H_{ij} .

$$\begin{bmatrix} R1 \\ R2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H11 & H12 \\ H21 & H22 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E1 \\ E2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

Pour reconstituer les 2 trames, il faut résoudre le système d'équations précédent. Cela est possible car le système MIMO utilise une modulation de type OFDM (Orthogonal Frequency

Division Multiplexing). Le signal à transmettre est modulé par un grand nombre de sous-porteuses orthogonales entre elles et placées sur des fréquences proches. La propagation multi-trajet étant très sélective en fréquence, certaines fréquences seront mieux transmises que d'autres. Connaissant le signal initialement transmis, il est possible de déterminer la fonction de transfert du canal H_{ij} . Ainsi, dans un système OFDM, les trames présentent des entêtes connus permettant de la déterminer. Ainsi, grâce à l'utilisation de plusieurs antennes et l'exploitation de la diversité spatiale, il est possible d'accroître le débit de transmission. La technologie MIMO fera son apparition dans la téléphonie mobile avec les réseaux 4G.

II.2.4 Capacité de canal d'un système MIMO

La capacité maximale de canal d'un système MIMO peut être estimée en fonction de N flux spatiaux. L'utilisation de la technologie d'antenne MIMO (Multiple Input-Multiple Output) permet d'augmenter la capacité des systèmes sans fil en proportion du nombre d'antennes. En effet, dans une situation idéale, la capacité de canal d'un système MIMO est donnée par [26]:

$$C = B \cdot \log_2(1 + M \cdot N \cdot |SNR|) \quad (\text{II.3})$$

où C représente la capacité du canal en [bits/s], B est la largeur de bande en [Hz], M et N sont le nombre des antennes de l'émetteur et du récepteur, et SNR est le rapport signal sur bruit.

Compte tenu de l'équation de la capacité de canal MIMO, il est possible d'étudier la relation entre le nombre de flux spatiaux et le débit de différentes implémentations de configurations SISO et MIMO. [24]

II.2.5 Choix de l'antenne MIMO

Les antennes couramment utilisées pour les réseaux 2G, 3G et 4G sont des empilements verticaux de dipôles élémentaires (Figure II.5). La taille d'un étage est conditionnée par la taille des dipôles élémentaires qui est de l'ordre de la moitié d'une longueur d'onde. A titre d'exemple, à 900 MHz (longueur d'onde de 33 cm), la taille d'un étage est ainsi d'environ 15 cm. En empilant typiquement une petite dizaine d'étages, le rayonnement de ces antennes couvre une zone d'environ 65° d'ouverture horizontale et d'environ 10° d'ouverture verticale. La capacité de focalisation de ce type d'antenne, c'est-à-dire son gain, est typiquement de 17 dBi.

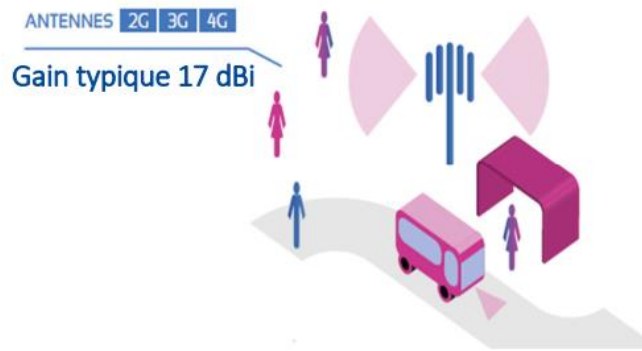


Figure II.5 Vue d'une antenne 2G – 3G ouverte et principe de rayonnement

II.3 LE SYSTEME MASSIVE MIMO

Le concept des antennes intelligentes massive MIMO relativement nouveau dans la communication 5G est destiné à relever les défis en matière de capacité et d'énergie posés par les systèmes de communication de prochaine génération.

Le concept du “massive MIMO” implique le déploiement de stations de base équipées de réseaux d'antennes à grande échelle, contenant peut-être des centaines d'éléments émetteurs/récepteurs, pour accroître la capacité des réseaux, améliorer la fiabilité et réduire la puissance totale émise dans une voie. En théorie, la puissance totale émise depuis un grand réseau d'antennes devrait être inférieure à celle émise depuis une seule et même antenne desservant une cellule ou une région donnée, tout en garantissant des débits similaires de données voire plus élevés [27].

Les antennes intelligentes « massive MIMO » (Multiple Input Multiple Output) sont composées d'émetteurs multiples, intégrés ensemble dans un équipement unique, et qui, pilotés par un logiciel, permettent de focaliser le faisceau d'onde radio sur une zone donnée (Figure II.6).

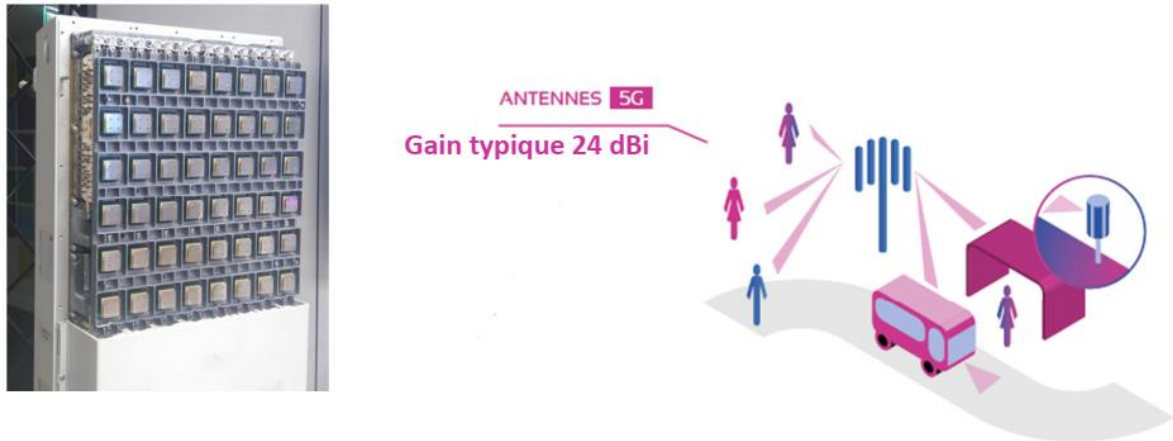


Figure II.6 vue d'une antenne 5G massive MIMO 3400 – 3600 MHz partiellement ouverte et principe de rayonnement

Massive MIMO propose deux innovations majeures :

- ✓ **Beamforming**
- ✓ **MU-MIMO**

II.3.1 Beamforming

Le beamforming fonctionne selon le même principe que la barre de son de votre home cinéma dans votre salon : pour que le signal soit reçu à l'endroit où il est utile à l'utilisateur et ne crée pas de bruit pour les autres ailleurs, un logiciel pilote un ensemble de petits émetteurs de sorte que leurs signaux se rassemblent à l'endroit où il y en a besoin, et s'annulent ailleurs. C'est le principe du faisceau.

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

L'avantage de ce ciblage du réseau 5G par utilisateur est le gain d'énergie. En effet, grâce aux antennes adaptatives massive MIMO et au beamforming, l'énergie ne se perd pas !

L'avantage du beamforming, c'est qu'il permet aux antennes relais de ne pas émettre en permanence mais seulement quand cela est nécessaire. Cela représente donc un gain d'énergie considérable

Il s'agit donc d'un procédé bénéfique sur le plan de l'environnement, puisque cela évite un gaspillage de signaux, donc moins énergivore (Figure II.7).

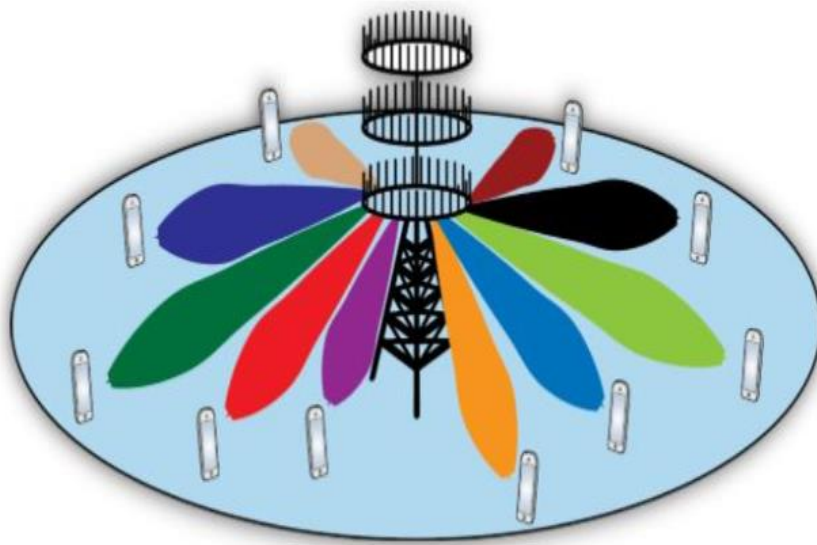


Figure II.7 Système Massive MIMO avec N antennes pour desservir K utilisateurs

Deux techniques de beamforming existent : le GoB (« Grid of Beams ») pour lequel l'ensemble des faisceaux possibles est pré-codé dans un « codebook » et l'EBB (« eigen-value based beamforming ») pour lequel les faisceaux se définissent dynamiquement dans le temps.

Grâce à la technologie du beamforming (groupage de faisceaux), le traitement du signal par les antennes 5G est différent. Le beamforming permet en effet de faire converger les ondes émises par une antenne vers un smartphone en particulier. Et non plus d'arroser sans distinction tout l'environnement. Les antennes macro de la 5G sont donc des antennes directives qui agissent tel un phare directionnel. Le signal est dirigé dans une direction précise plutôt que d'être dirigé dans toutes les directions, comme c'est le cas aujourd'hui avec les antennes 4G. Encore mieux, les antennes 5G fonctionnent ainsi même quand les utilisateurs en mouvement.

II.3.2 MU-MIMO (Multi-Utilisateur MIMO)

le système multi-utilisateur MIMO (multi-user MIMO) augmente encore la capacité totale par station de base en permettant la communication avec plusieurs périphériques utilisant les mêmes ressources, créant ainsi un côté périphérique pratiquement unifié. L'utilisation simultanée des antennes de plusieurs périphériques permet de créer des canaux virtuels MIMO à grande échelle. La combinaison de ces deux innovations permet d'augmenter la vitesse de

transmission sans fil en augmentant le nombre d'antennes de la station de base sans consommer plus de bande passante ni augmenter les valeurs de modulation.[28]

II.3.4 Comparaison entre MIMO traditionnel et MIMO massif

II.3.4.1 Nombre d'antenne

Avec la 4G+, nous avons découvert les antennes MIMO (Multiple Input Multiple Output), synonyme de débits et de portée plus élevés qu'en 4G. Avec le réseau 5G, nous découvrons les antennes Massive MIMO, synonyme des mêmes effets, mais démultipliés.

La différence entre les deux ? Le nombre de connecteurs (antennes miniatures). Il y en a 128 sur les antennes Massive MIMO de la 5G contre une douzaine seulement sur les antennes MIMO de la 4G+. À terme, les antennes Massive MIMO pourront compter jusqu'à 256 connecteurs (Figure II.8). Ces nouvelles antennes, plus efficaces, vont, à terme, agréger toutes les bandes de fréquences et remplacer les antennes 4G existantes (Figure II.9).

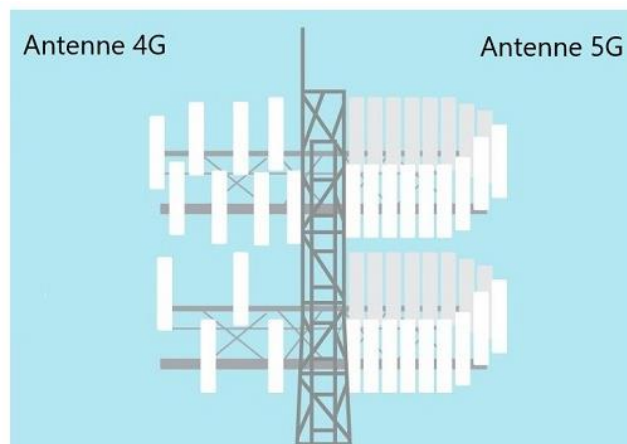


Figure II.8 Antenne MIMO (4G) et Massive MIMO (5G)



Figure II.9 Antenne 4G et Antenne 5G

II.3.4.2 Le Full Duplex

L'autre différence entre les antennes MIMO et les antennes Massive MIMO, c'est le Full Duplex. Sur les antennes MIMO, il y a non seulement moins de connecteurs (huit en émission et quatre en réception). Mais, en plus, sur une même fréquence, les antennes MIMO alternent entre émission et réception. Elles ne sont pas capables de faire les deux simultanément. De leur côté, les antennes Massive MIMO comptent bien plus de connecteurs qui sont capables, eux, d'envoyer et de recevoir des données en même temps.

II.3.4.3 Antennes actives et passives

La différence fondamentale est le rayonnement des antennes. Une antenne passive émet de façon homogène et constante sur les azimuts en minimisant les rayonnements vers le ciel ou vers le sol à l'aplomb de l'antenne, la couverture, comme vu précédemment pourrait être schématisée comme une portion de disque, plus ou moins large, inclinée vers le sol. On peut donc considérer que la puissance globale rayonnée par l'antenne est distribuée sur les azimuts. Par ce biais, tous les utilisateurs qui sont dans cette couverture azimutale peuvent communiquer avec la station de base, mais la puissance reçue par chacun d'entre eux est limitée.

Dans le cas des antennes actives, ce n'est plus le cas, seule la direction où se situe l'utilisateur est visée, il n'y a plus d'émission constante dans le temps sur tous les azimuts, mais uniquement sur l'azimut où se situe le bénéficiaire. Si les antennes actives et passives présentaient les mêmes caractéristiques, on pourrait imaginer que l'énergie reçue par l'utilisateur d'une station équipée d'une antenne active recevrait l'ensemble de l'énergie que l'ensemble des utilisateurs de l'antenne passive pourrait recevoir.

Les antennes déployées pour le réseau mobile 5G sont différentes de celles utilisées par la 4G. Les antennes 5G sont plus intelligentes (actives) car il s'agit d'antennes qui dirigent un signal dans une direction précise plutôt que dans toutes les directions. En outre, elles émettent un signal adapté aux besoins de chaque utilisateur. Équipées d'un très grand nombre de connecteurs, elles vont aussi permettre de prendre en charge un très grand nombre d'appareils.

II.3.4.4 Antennes adaptatives massive MIMO

Les antennes intelligentes « massive MIMO » sont composées d'émetteurs multiples, intégrés ensemble dans un équipement unique, et qui, pilotés par un logiciel, permettent de focaliser le faisceau d'onde radio sur une zone donnée

Autrement dit, ces dernières vont diriger le signal du réseau mobile vers les seules personnes qui en ont besoin, à un instant T. Le signal radio n'est donc pas dirigé partout et tout le temps en continu, mais, comme le font les antennes des générations précédentes, se concentre uniquement sur les équipements qui le demandent, au moment où ils ont besoin d'y accéder.

Cette technique, dite de focalisation (aussi connue sous le nom de beamforming), permet d'augmenter la capacité du réseau mobile grâce à une allocation plus efficace des ondes aux communications de chaque utilisateur connecté sur la cellule.

I.3.4.5 Le gain

Les antennes massive MIMO permettent également de focaliser le rayonnement de façon beaucoup plus efficace dans une direction donnée. Le gain des antennes 5G dans la bande 3 400 MHz - 3 800 MHz est de l'ordre de 24 dBi, c'est-à-dire environ 5 fois plus que pour une antenne 2G-3G-4G classique. Le rayonnement est concentré dans un faisceau beaucoup plus fin qu'actuellement. L'antenne pourra gérer indépendamment plusieurs faisceaux et les orienter dans la direction des utilisateurs (antennes intelligentes).

II.3.4.6 La taille

Le réseau d'antennes ne doit pas être physiquement grand, par exemple, imaginez un réseau cylindrique de 128 antennes, comprenant quatre cercles de 16 éléments d'antenne bipolarisés. Selon à 2,6 GHz, la distance entre les antennes adjacentes est d'environ 6 cm, ce qui correspond à la moitié de la longueur d'onde, et par conséquent, ce réseau occupe uniquement une dimension physique de 28 cm sur 29 cm.

II.4 AVANTAGES DES ANTENNES MASSIVE MIMO

On peut dénombrer trois avantages:

1. leur faible épaisseur, rendant ces antennes planaires (elles peuvent être conçues sur n'importe quel type de surface).
2. un rayonnement variable dans chaque direction (au cours du temps) du fait de la rapidité de balayage (électronique) du faisceau.
3. leur grande directivité (directement proportionnelle au nombre d'éléments qui compose le panneau d'antennes) dans des directions d'intérêt. Cette directivité est une autre façon de décrire leur capacité à concentrer l'intensité de leur rayonnement dans une direction privilégiée. Par exemple, si le panneau d'antennes est composé de 16 colonnes et de 16 lignes d'éléments rayonnants, alors, il sera possible d'augmenter la puissance rayonnée par le faisceau de l'antenne, de 256 fois dans la direction choisie (par rapport au rayonnement d'un élément). (Figure II.10).

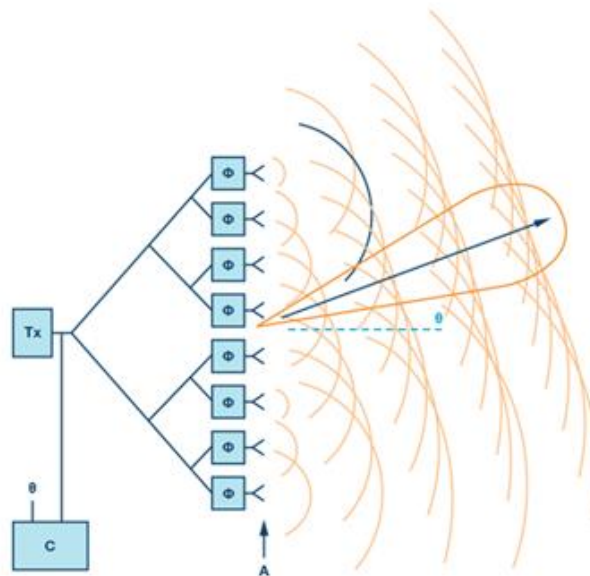


Figure II.10 illustration de la formation du faisceau par association des champs de chaque élément rayonnant

II.5 AVANTAGES DES SYSTEMES MASSIVE MIMO

Les principaux avantages des systèmes Massive MIMO peuvent être résumés comme suit[29] :

- ✓ Gain d'efficacité spectrale élevé.
- ✓ Gain d'efficacité énergétique élevé.
- ✓ Traitement simple.
- ✓ Augmentation du débit de données.
- ✓ Augmentation du rapport signal sur bruit de liaison de base.
- ✓ Renforcement des canaux.

II.6 PERFORMANCES DES ANTENNES MIMO EN DIVERSITE

II.6.1 Couplage mutuel

Quand deux antennes sont près l'une de l'autre, et que l'une ou les deux sont excitées, une partie de l'énergie a tendance à se dissiper dans l'autre antenne et plus particulièrement dans son impédance de charge. Cet échange d'énergie est une conséquence du couplage mutuel. Il dépend des caractéristiques de rayonnement des antennes, de la distance entre les antennes, de leur orientation et de leur nature.

II.6.2 Efficacité totale

Dans les systèmes de communication entre mobiles, le diagramme de rayonnement de l'antenne joue très souvent un rôle mineur, c'est surtout l'efficacité totale de l'antenne (ou gain moyen (MG) de l'antenne) qui est le paramètre le plus important. Elle nous renseigne sur les performances de la liaison sans fil. Ceci est aussi valable pour les systèmes SIMO (diversité) et MIMO. L'efficacité totale d'une antenne est définie comme étant le rapport entre la puissance rayonnée et la puissance incidente sur son port d'alimentation. Elle prend en compte aussi bien les pertes de réflexion dues à la désadaptation entre le câble coaxial et le port d'alimentation de l'antenne que les pertes ohmiques et diélectriques de l'antenne. Elle peut être calculée à partir de l'intégration des diagrammes de rayonnement dans tout l'espace (Eq. II.4) ou bien à partir des paramètres S et de l'efficacité rayonnée η_{ray} de l'antenne (Eq.II.5).

$$\eta_{tot} = MG = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} (G_{\theta}(\theta, \varphi) + G_{\varphi}(\theta, \varphi)) \sin\theta d\theta d\varphi}{4\pi} \quad (\text{II.4})$$

Où $G_{\theta}(\theta, \varphi)$ et $G_{\varphi}(\theta, \varphi)$ sont les gains des antennes dans les directions θ et φ .

$$\eta_{tot} = \eta_{ray}(1 - |S_{11}|^2) \quad (\text{II.5})$$

II.6.3 Coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC : Enveloppe Corrélation Coefficient)

Le coefficient de corrélation d'enveloppe (Enveloppe Corrélation Coefficient (ECC)) est considéré comme un indicateur clé de la performance. Une valeur faible de ECC entre deux ports signifie une diaphonie faible lors d'une opération simultanée. Cela signifie également une meilleure performance en termes de diversité dans le cas d'une utilisation en MIMO. Le ECC peut être calculé à partir des diagrammes de rayonnement de l'antenne par la formule (II.6) [30].

$$\rho_{ij} = \frac{|\iint F_i^* \cdot F_j \cdot d\Omega|^2}{\iint |F_i|^2 d\Omega \cdot \iint |F_j|^2 d\Omega} \quad (\text{II.6})$$

où $d\Omega = \sin(\theta) d\theta d\phi$ et F_i est le champ lointain rayonné par le port numéro i . Dans le cas d'antennes sans perte, et en supposant que les ondes entrantes soient uniformément réparties, le ECC peut être calculé à partir des paramètres S de l'antenne à l'aide de la formule (II.7), qui se simplifie dans le cas d'une antenne à deux ports, à la formule (II.8).

$$\rho_{ij} = \frac{|\sum_{m=i,j} S_{in}^* S_{nj}|^2}{\prod_{m=i,j} (1 - \sum |S_{nm}|^2)} \quad (\text{II.7})$$

$$\rho_{ij} = \frac{|S_{11}^* S_{12} + S_{21}^* S_{22}|^2}{(1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2)(1 - |S_{22}|^2 - |S_{12}|^2)} \quad (\text{II.8})$$

II.6.4 Gain de Diversité (DG)

Une approximation du gain de diversité par sélection dans le cas d'une antenne à 2 ports i, j , à un niveau de probabilité d'interruption de 1% peut être calculé à partir du ECC par la formule (II.9) [31] :

$$G_{ij} = 10\sqrt{(1 - |\rho_{ij}|^2)} \quad (\text{II.9})$$

Où, l'hypothèse des ondes entrantes uniformément réparties n'est pas toujours garantie, ni l'hypothèse que les antennes sont sans perte

Ce gain de diversité n'est vraiment significatif que si toutes les antennes du système ont une efficacité totale égale à 100% ce qui est loin d'être évident en pratique. Ainsi le gain en diversité réaliste d'un système (DSG : Gain de Diversité du système) doit également prendre en compte l'efficacité totale de chaque antenne. En supposant que toutes les antennes du système sont identiques, le DSG sera alors:

$$\text{DSG} = \eta_{\text{tot}} \cdot \text{DG} \quad (\text{II.10})$$

II.7 CONCLUSIONS

Dans ce chapitre, nous avons fait une étude générale sur les antennes MIMO et massive MIMO; utilisées dans la 5^{ème} génération des réseaux mobile. Dans cette même partie, nous avons présenté une étude comparative entre les antennes utilisées pour les deux systèmes (MIMO et Massive MIMO). La performance en diversité des antennes a été également présenté dans la dernière partie.

Chapitre III :

**Conception et analyse d'une
nouvelle structure d'antenne
MIMO**

III.1 INTRODUCTION

La technologie de la cinquième génération (5G) a des exigences spéciales parmi lesquelles ses antennes doivent avoir une largeur de bande supérieure à 1GHz et atteindre un gain élevé allant jusqu'à 12dB pour une productivité élevée. L'utilisation de la bande millimétrique dans la 5G est une solution appropriée pour répondre aux exigences de cette technologie de future.

Dans ce chapitre, on a commencé par la conception de l'antenne de départ, dont le type est un monopôle circulaire imprimé sur le substrat FR4 ($\epsilon_r=4.3$, $\tan(\delta)=0.025$) de faible profile ; fonctionnant sur une large bande de fréquences. Ensuite, on a proposé une nouvelle antenne MIMO ULB 2x2 à deux ports couvrant les bandes 5G. Enfin on a conçu deux configurations MIMO ULB 4x4 à quatre ports plus performantes couvrant une très ultra large bande de fréquences correspondant aux ondes millimétriques. Les caractéristiques des antennes sont obtenues par le logiciel CST Microwave Studio.

III.2 PRESENTATION DU LOGICIEL MICROWAVE STUDIO DE CST

Fondé en 1992, le logiciel de simulation électromagnétique CST STUDIO SUITE est l'aboutissement de nombreuses années de recherche et de développement dans les solutions les plus efficaces et précises de calcul pour la conception électromagnétique. CST Microwave Studio est un logiciel de simulation électromagnétique de structure passives en 3 Dimensions basé sur la résolution des équations de Maxwell suivant la technique des équations intégrales (FIT : Finite Integration Technic). Cette méthode numérique offre une discrétisation de l'espace permettant la description directement en 3D de tous les composants des systèmes décrits, ce qui lui permet d'être appliqué à de nombreux problèmes électromagnétiques allant de la statique aux hyperfréquences en analyses temporelle et fréquentielle. De plus, contrairement à la plupart des logiciels de simulation électromagnétique, CST discrétise la forme intégrale des équations de Maxwell plutôt que leurs formes différentielles, et ce qui est l'une de ses caractéristiques clé de ce simulateur. CST Microwave Studio fait partie de CST DESIGN STUDIO suite, et offre un certain nombre de solveurs différents selon le type d'application et du problème rencontré [32].

III.3 ANTENNE MONOPOLE ULB

Avec l'évolution de la technologie ULB, Les antennes monopôles imprimées à plan de masse réduit, a fait l'objet de beaucoup de recherches. Grâce à leurs encombrements, les recherches ont été poussées dans l'objectif d'intégrer ces antennes dans des circuits RF ainsi que

des dispositifs ULB et les systèmes commerciaux. Elle a été conçue sous différentes formes: rectangulaire, circulaire, elliptique, triangulaire,... [33 - 37] avec un plan de masse parallèle est imprimé au même niveau que l'élément rayonnant comme dans le cas d'une alimentation coplanaire ou coplanaire sur plan de masse (ground coplanaire), soit sur un niveau inférieur comme dans le cas d'une alimentation par une ligne micro ruban (figure III.1).

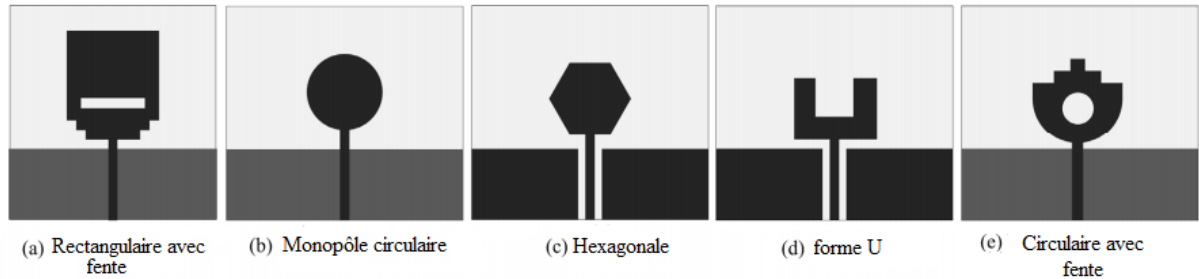


Figure III.1 Quelques structures d'un monopôle planaire ULB [33-37]

Ce type d'antenne imprimée ; étaient conçues et étudiées en deux dimensions ; devient compacte, légère, faible coût et beaucoup plus facile à manipuler. C'est sur ce type d'antenne que seront basés les principaux travaux de ce mémoire.

III.4 BANDES DE FREQUENCES UTILISEES PAR LA 5G

La 5G demande une quantité importante de nouvelles fréquences mobiles harmonisées. Les régulateurs devraient envisager de mettre à disposition 80 à 100 MHz de fréquences contiguës par opérateur dans les bandes intermédiaires préférentielles pour la 5G (ex. 3,5 GHz) et environ 1 GHz par opérateur dans les bandes millimétriques (c.-à-d. au-dessus de 24 GHz).

La 5G a besoin de fréquences dans trois bandes de fréquences clés pour proposer une couverture large et permettre tous les cas d'utilisation. Ces trois bandes de fréquences sont :

- En-dessous de 1 GHz ;
- 1 à 6 GHz ;
- au-dessus de 6 GHz.

Les fréquences en-dessous de 1 GHz permettront une couverture large dans les zones urbaines, périurbaines et rurales, et la mise en place de services d'Internet des Objets (IoT).

Les fréquences de 1 à 6 GHz proposent un bon compromis entre la couverture et la capacité. Ceci inclut les fréquences dans la plage 3,3-3,8 GHz qui est visée pour accueillir nombre des premiers services 5G.

Les fréquences au-dessus de 6 GHz sont nécessaires pour atteindre les grandes vitesses ; le très haut débit ; envisagées pour la 5G. Actuellement les bandes 26 GHz et/ou 28 GHz obtiennent le plus de soutien international dans cette plage de fréquences. Un point clé de la Conférence Mondiale des Radiocommunications de l'UIT en 2019 (CMR-2019) sera la mise en place d'un accord international sur les bandes 5G au-dessus de 24 GHz.

III.5 CONCEPTION D'UN SYSTEME MIMO 2x2 ULB A DEUX PORTS

Nous proposons une nouvelle antenne MIMO 2x2 à deux ports avec deux antennes rayonnantes ; dans le but de produire une configuration plus performante en termes de gain ; adaptation et isolation entre les ports, fonctionnant dans les bandes inclut les fréquences dans la plage 3.3 – 3.8GHz et les fréquences au-dessus de 6 GHz jusqu'à 30Ghz, c'est à dire sur une ultra large bande, pour accueillir un grand nombre des premiers services existants de la 5G et les futures services envisagés pour l'accès sans fil à très haut débit.

D'autre part, l'utilisation de la technologie d'antenne MIMO (Multiple Input-Multiple-Output) permet d'augmenter la capacité des systèmes sans fil en proportion du nombre d'antennes (voir chapitre II : équation II.3).

Ainsi pour pouvoir intégrer un nombre important d'antennes émettrices / réceptrices fonctionnant sur une large plage de fréquences, dans un équipement compact, un effort important, prenant en compte les limites fondamentales des performances des antennes, doit être consacré à leur conception.

III.5.1 Etapes de conception

III.5.1.1 Antenne de départ et ses performances

Nous proposons comme solution, une antenne monopôle large bande composée d'un disque circulaire alimenté par une ligne micro-ruban imprimée sur un substrat FR4 ($\epsilon_r=4.3$, $\tan(\delta)=0.025$) de dimension 18 x18 x1.6 mm³ (figure III.2). Les dimensions de l'antenne sont illustrées par le tableau III.1.

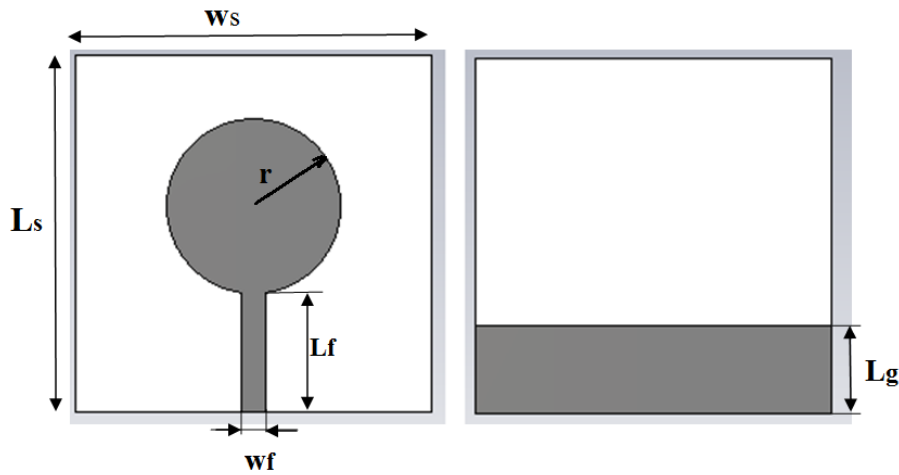


Figure III.2 Géométrie de l'antenne ULB

Paramètre	Dimension en (mm)
Ws	18
Ls	18
r	4.4
wf	1.2
Lf	6
Lg	4.5

Tableau III.1. Paramètres de l'antenne

Coefficient de réflexion S11

La structure a été optimisée et simulée par le logiciel CST. La figure III.2 représente le coefficient de réflexion S11, On observe à partir de cette figure que l'antenne proposée a une double large bande passante : la première allant de 7,08 à 12,82 GHz, de largeur BP1=5.74GHz ou 57.6% et la deuxième allant de 21.43 à 27,54 GHz, de largeur BP2=6.11GHz ou 25%.

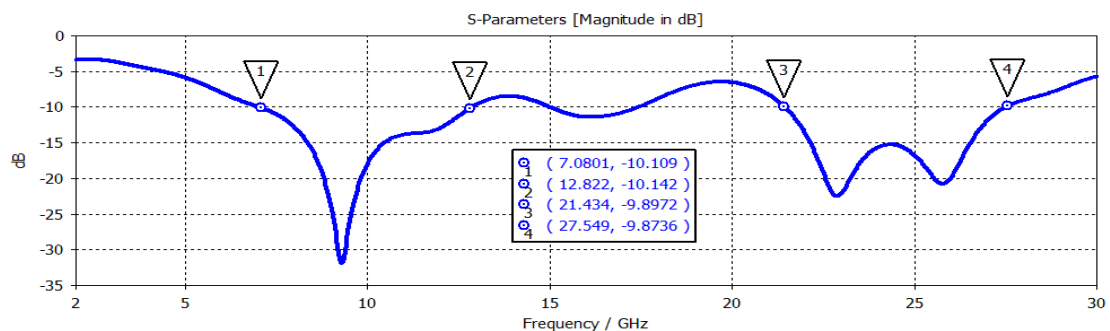


Figure III.3 Le coefficient de réflexion S11

Diagramme de rayonnement

La figure III.3 présente le diagramme de rayonnement 3D en directivité aux fréquences 9.26GHz, 16.12GHz et 22.87GHz. La valeur maximale est égale à 6.32dBi, notant que ce diagramme est directionnel dans le plan vertical H ($\varphi = \text{constante}$) et omnidirectionnel dans le plan horizontal E ($\varphi = 0$).

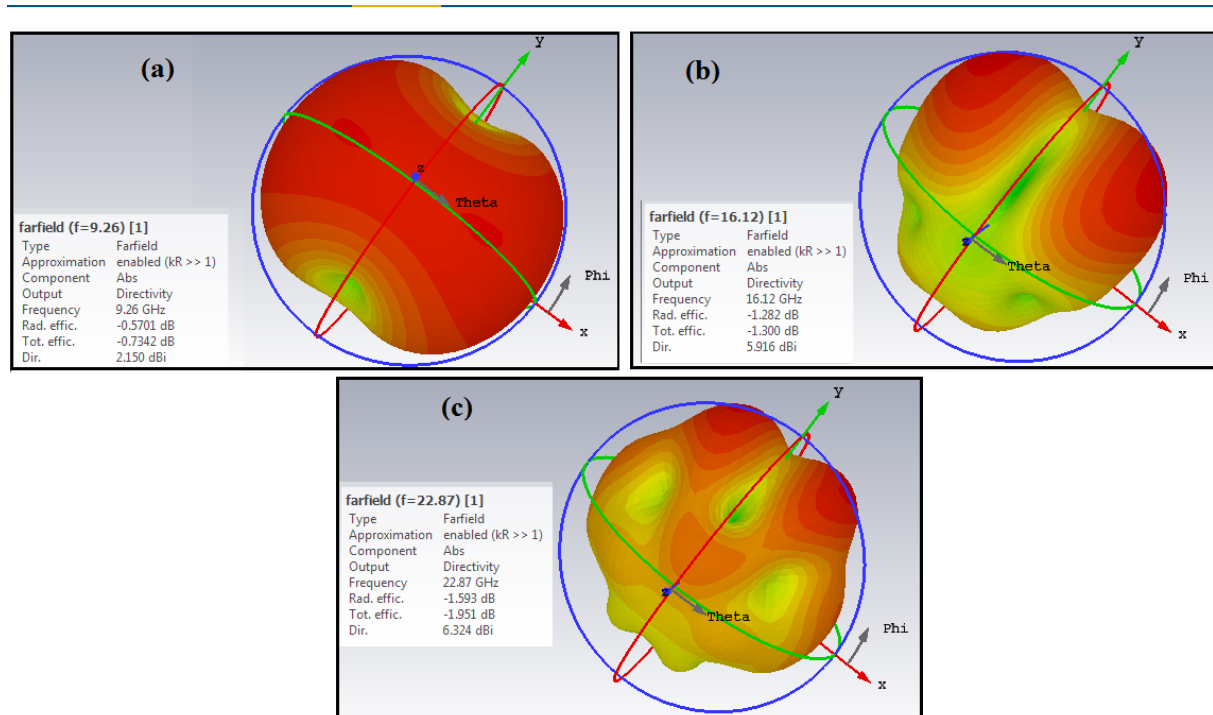


Figure III.4 Diagramme de rayonnement (3D) en directivité aux fréquences :
(a) 9.26GHz, (b) 16.12GHz, (c) 22.87GHz.

III.5.1.2 MIMO 2 x 2 à deux ports

a/ 1^{ère} structure

A partir de l'antenne de départ, nous avons conçues une configuration MIMO à deux antennes avec deux ports, imprimées sur le même substrat FR4 de dimensions : $2W_s \times L_s$, comme elle est montrée par la figure III.14

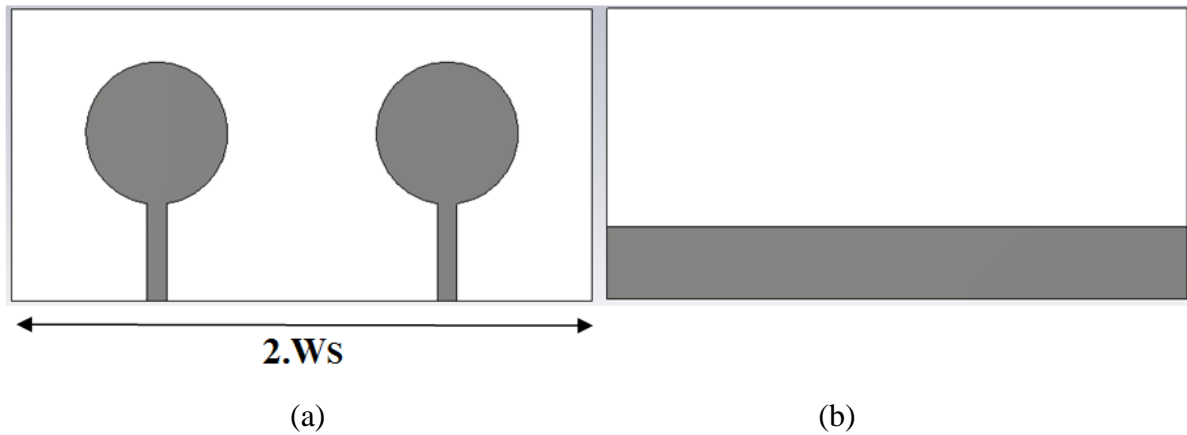


Figure III.5 Géométrie de l'antenne proposée MIMO à 2 ports : 1^{ère} structure

(a) vu de dessus (b) vu de dessous

Remarque

Tous les résultats de simulations ont été obtenus lorsque le port1 est excité. Comme toutes la antennes et les ports sont identiques, les résultats obtenus par rapport à un port seront les mêmes par rapport aux autres ports.

Coefficients de réflexion S11 et de couplage S12

Les résultats de simulation de cette 1^{ère} structure, donnés dans la Figure III.6, montrent une adaptation moyenne. En effet, le S11 ne dépasse pas -26dB sur une ultra large bande de fréquence allant de 5 - 28 GHz. Ces résultats montrent aussi un couplage mutuel très élevé dans presque toutes la bandes où le S12 ou S21 ne dépasse pas -20dB ($-11\text{dB} \leq S12 \leq -20\text{dB}$), sauf pour les hautes fréquences (à partir de 24GHz), une bonne isolation entre les antennes MIMO est obtenue ($S12 = -30\text{dB}$).

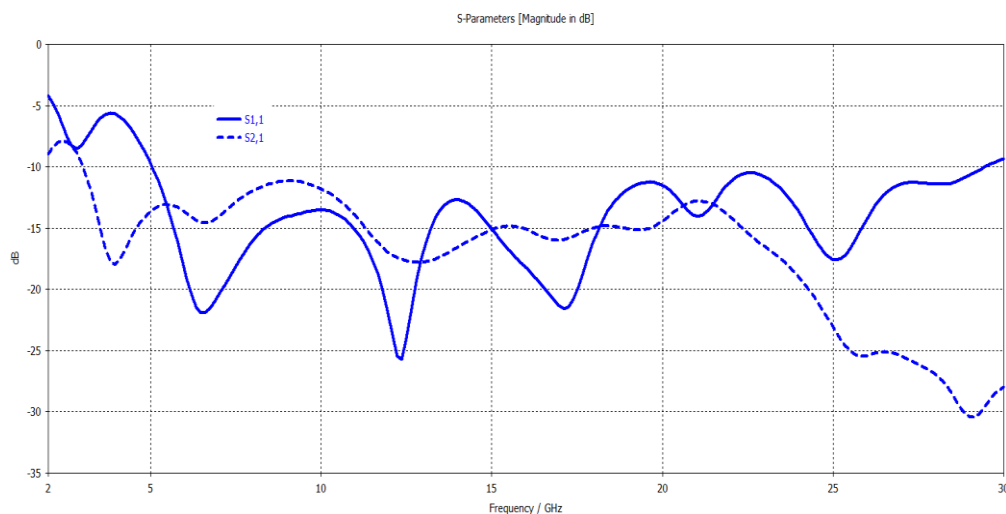


Figure III.6 Coefficient de réflexion S11 et l'isolation S12

Distribution de courant

La figure III.7 de la distribution de courant surfacique sur le cuivre aux fréquences 6 et 8GHz où le port1 est excité, montre et confirme l'existence de ce couplage entre les deux ports, ce qui réduit l'efficacité totale de l'antenne MIMO.

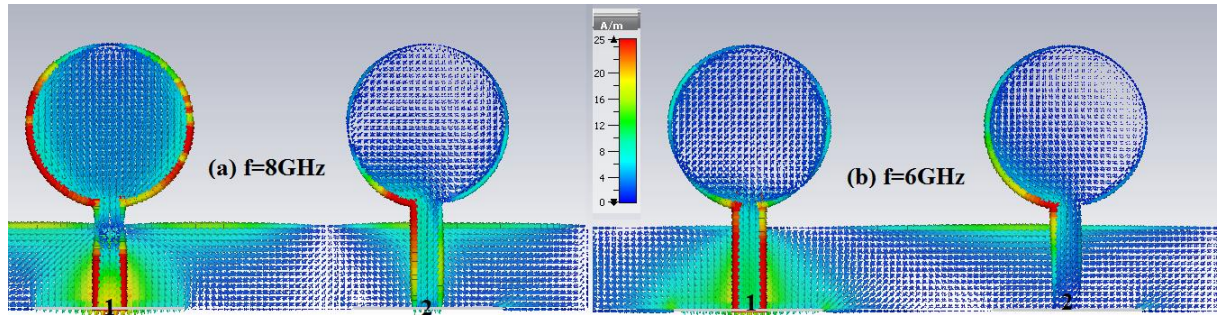


Figure III.7 Distribution de courant à la fréquence (a) 12Ghz et (b) 6GHZ :

Port1 excité ;

b/ 2^{ème} structure :

Pour améliorer l'isolation entre les deux antennes, en réduisant le couplage mutuel, on a ajouté un stub d'épaisseur $W1=7\text{mm}$ perpendiculaire au plan de masse, comme illustré sur la figure III.8.

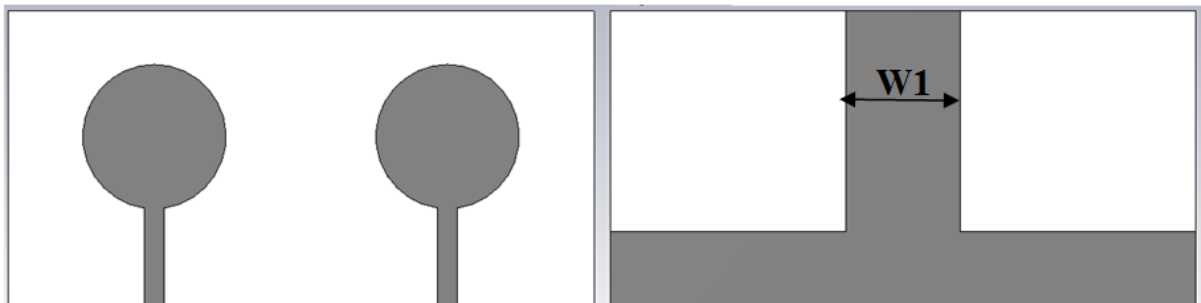


Figure III.8 Géométrie de l'antenne proposée MIMO à 2 ports : 2^{ème} structure

Coefficients de réflexion S11 et de couplage S12

Les résultats de simulation, présentés dans la Figure III.9, montrent une réduction de couplage mutuel entre les deux ports où le $S12 \leq -20\text{dB}$ sur presque toute la bande de fréquence.

Ces résultats montrent aussi une dégradation de la bande passante de l'antenne MIMO. En effet, le $S11 > -10\text{dB}$ dans la bande 7.5-9GHz.

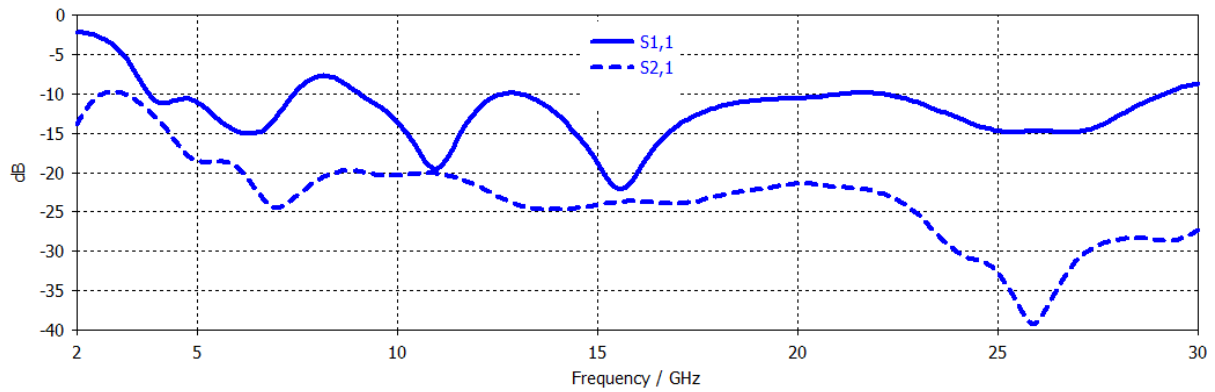


Figure III.9 Coefficient de réflexion S11 et l'isolation S12

c/ Structure finale : MIMO 2 x 2 à deux port

Pour l'adaptation de l'antenne sur toute la BP de la 5G, on a ajouté un autre stub perpendiculaire au premier, de longueur $W_2=21\text{mm}$ et d'épaisseur $L_1=1\text{mm}$, comme montré par la figure III.10.

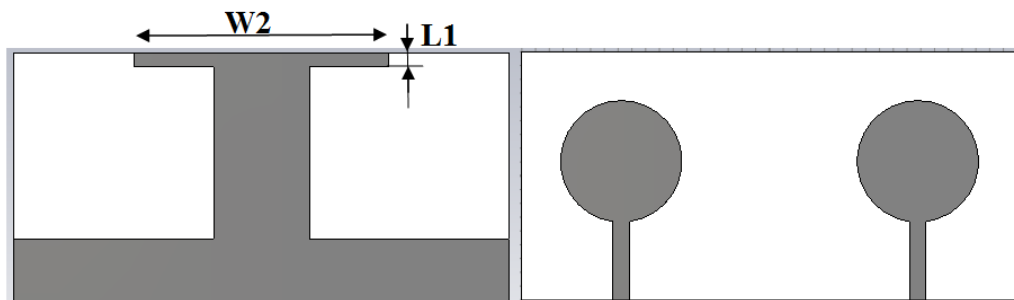


Figure III.10 Géométrie de l'antenne proposée MIMO 2 x 2 ULB

Coefficients de réflexion S11 et de couplage S12

Les résultats de simulation présentés dans la figure III.11, montrent une bonne adaptation de la bande passante de l'antenne MIMO proposée sur une ultra large bande de fréquences, fonctionnant à partir de $f_0=2.84\text{GHz}$, c'est à dire les bandes : 3.3-3.8GHz : premiers services de la 5G, et 26-28GHz : futur service de la 5G sont inclus.

Ces résultats montrent aussi une bonne isolation des deux antennes MIMO, sauf pour les basses fréquences et la bande allant de 11.34 à 14.16GHz où le S21 est entre -16.5 et -20dB.

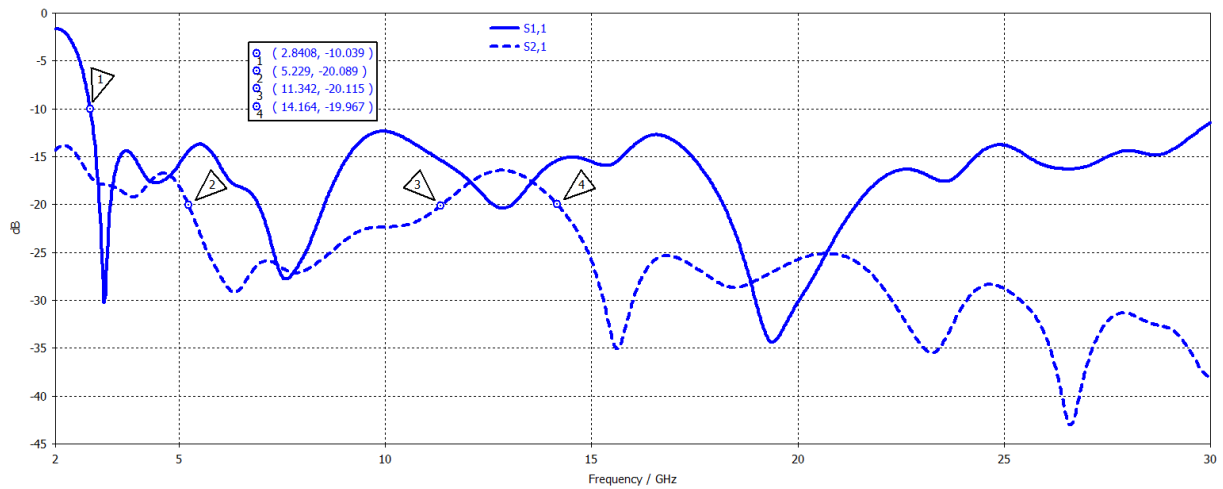


Figure III.11 Coefficient de réflexion S11 et l'isolation S12 de l'antenne MIMO à deux ports

Distribution de courant

La figure III.12 (a) de la distribution de courant surfacique sur le cuivre à la fréquence 3.17GHz (a) montre, si on excite le port 1, on observe une faible densité de courant surfacique sur les deux stubs de plan de masse, donc on peut les considérer comme des composants de découplage ou d'isolation entre les deux ports. Nous retrouvons le même phénomène si l'on excite le port2 (figure III.12 (b)).

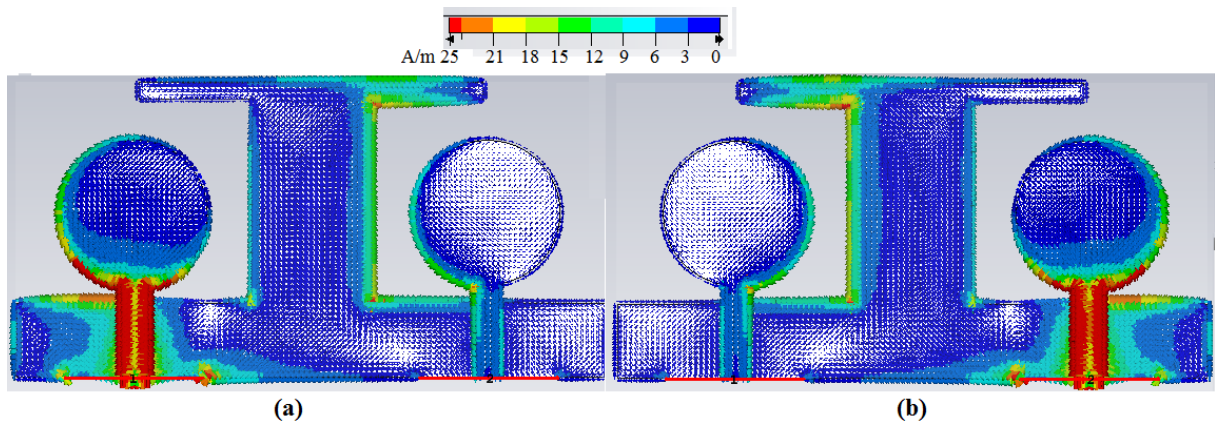


Figure III.12 Distribution de courant à la fréquence 3.17 GHz :
(a) Port1 excité ; (b) Port2 excité

Le coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC : Enveloppe Corrélation Coefficient) et gain de diversité (DG : Diversity Gain)

Dans les antennes multiports, le coefficient de corrélation d'enveloppe (Enveloppe Corrélation Coefficient (ECC)) est considéré comme un indicateur clé de la performance. Une valeur faible de ECC entre deux ports signifie une diaphonie faible lors d'une opération

simultanée. Cela signifie également une meilleure performance en termes de diversité dans le cas d'une utilisation en MIMO. Le ECC égale à zéro dans le cas idéal. Elle doit être inférieure à 0.5. Une approximation du gain de diversité (diversity gain (DG)) par sélection dans le cas d'une antenne à 2 ports i, j , à un niveau de probabilité d'interruption de 1% (0.01). La valeur idéale de DG égale à 10. Le ECC et le DG peuvent être calculés à partir des paramètres S par le logiciel CST Microwave studio.

La figure III.13 montre des valeurs typiques de ECC (= 0) et de DG (=10) sur toute la bande de fréquences, ce qui montre la performance de l'antenne proposée.

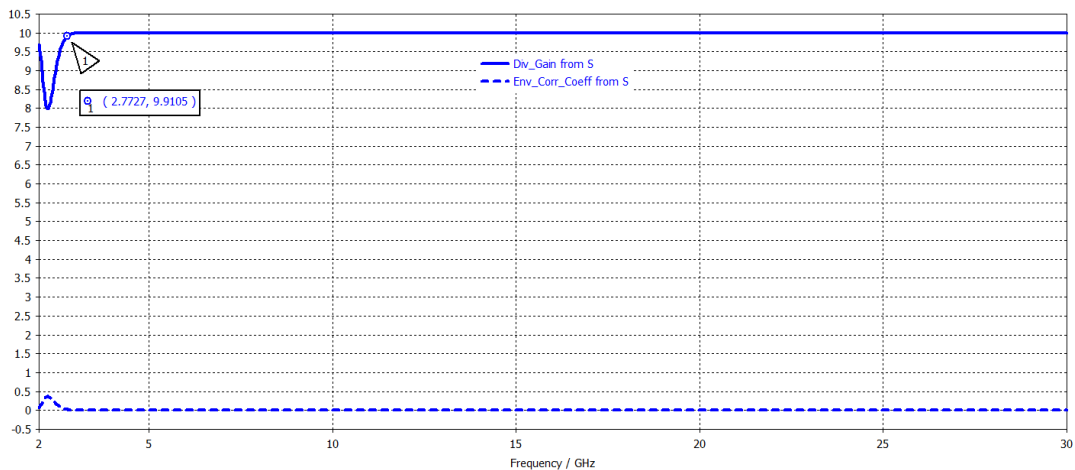


Figure III.13 ECC et DG de l'antenne MIMO à deux ports en fonction de la fréquence

Efficacité de rayonnement

La figure III.14 montre une efficacité de rayonnement entre 60% et 90% sur presque toute la bande.

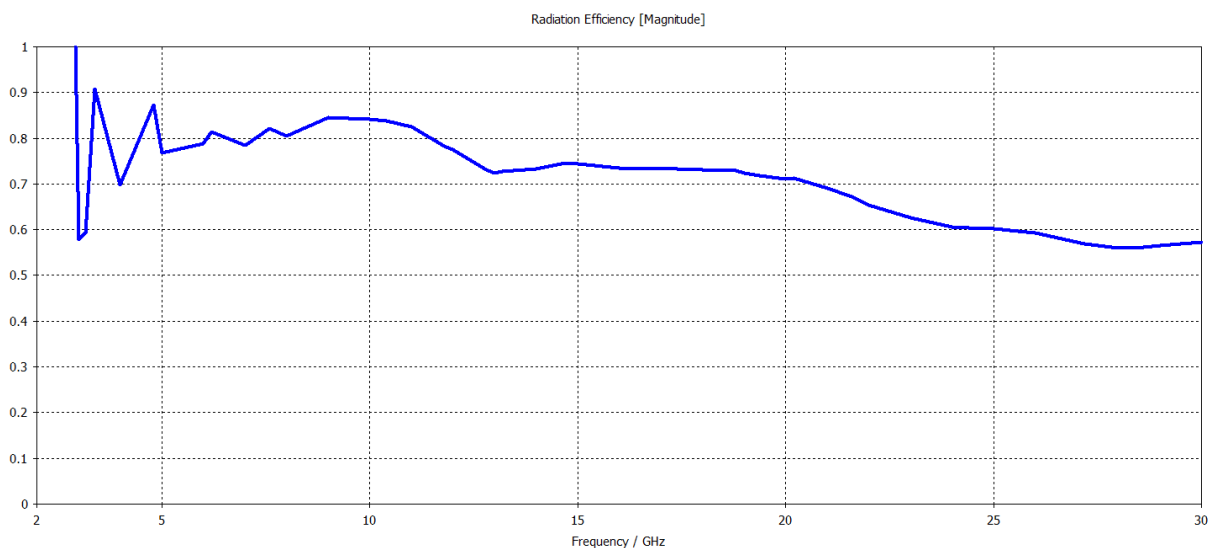


Figure III.14 Efficacité de rayonnement de l'antenne MIMO à deux ports

Le gain en fonction de la fréquence

Le gain de l'antenne en fonction de la fréquence est représenté par la figure III.15. On observe un gain varie entre 1.5dB et une valeur maximale égale à 5.6dB sur toute la bande de fréquence.

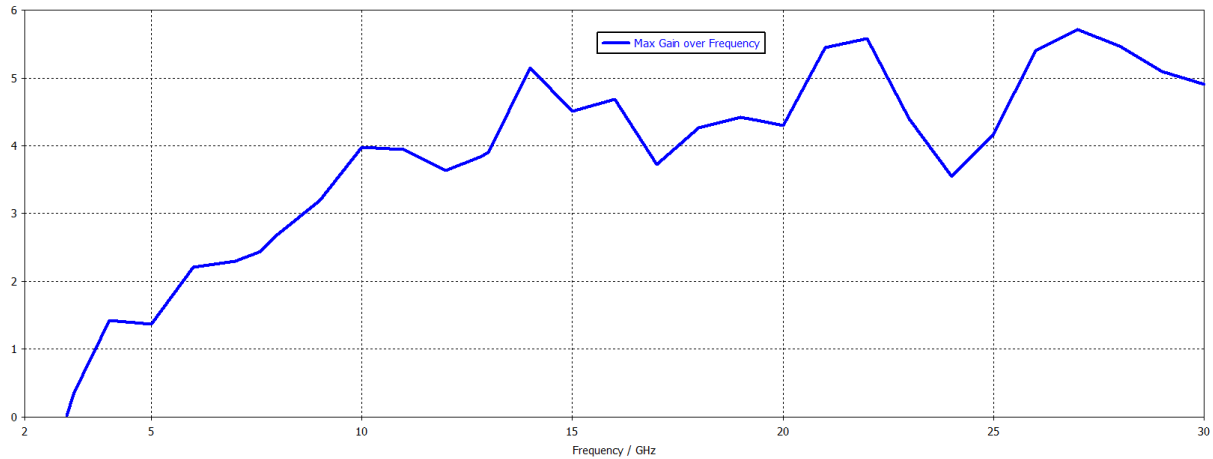


Figure III.15 Gain en [dB] de l'antenne MIMO à deux ports en fonction de la fréquence

III.6 CONCEPTION D'UN SYSTEME MIMO 4 x 4 ULB A QUATRE PORTS

III.6.1 MIMO 4x4 : 1^{ère} configuration

A partir de la structure précédente on a conçues une configuration MIMO 4x4 à quatre antennes avec quatre ports, imprimées sur le même substrat FR4 de dimensions $2L_s \times 2W_s$, comme indiqué sur la figure III.16.

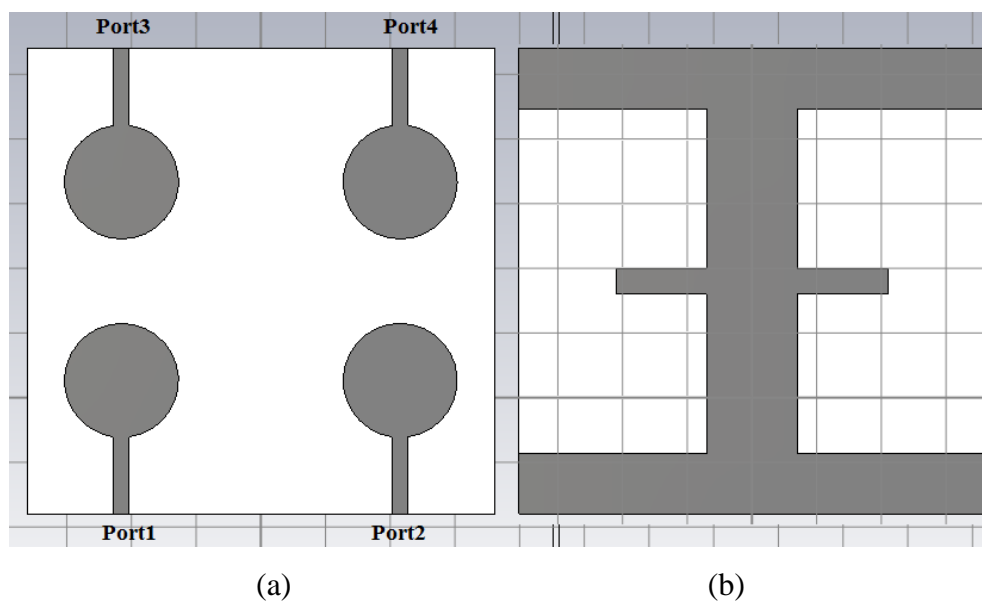


Figure III.16 Géométrie de l'antenne proposée MIMO 4x4 à 4 ports : 1^{ère} configuration

(a) vu de dessus (b) vu de dessous

Amplitude de coefficient de réflexion S11, S22, S33 et S44

Les résultats de simulation présentés dans la figure III.17, montrent une bonne adaptation de la bande passante de l'antenne MIMO 4ports sur une ultra large bande de fréquences, fonctionnant à partir de $f_0=2.87\text{GHz}$, adapté à 5G.

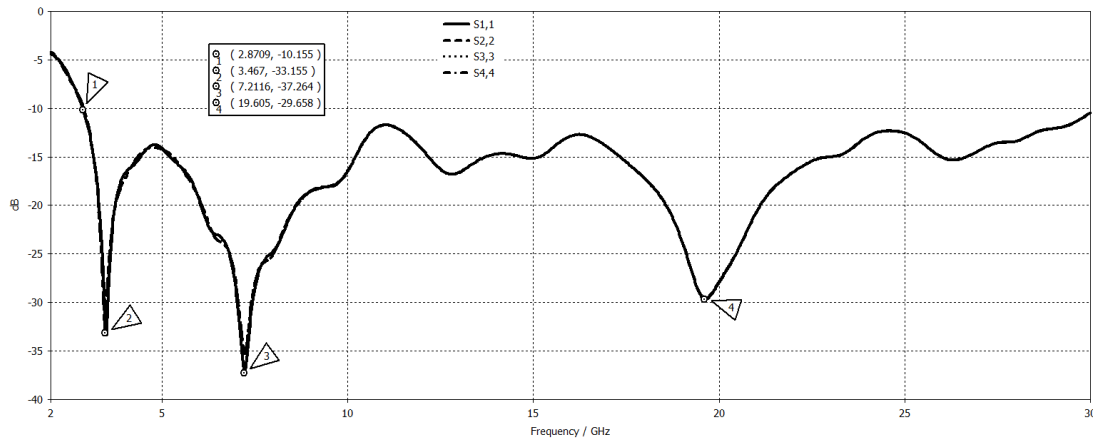


Figure III.17 Coefficients de réflexion S11, S22, S33 et S44

Amplitude de couplage S12, S13 et S14

Les résultats de simulation présentés dans la figure III.18, montrent une bonne isolation des ports 1-2 et 1-4. On observe aussi, un couplage considérable entre les ports 1-3 ; le S13 est entre -11.5 et -20dB pour les fréquences $\leq 13\text{GHz}$. En regardant la figure III.16, l'antenne 1 est plus proche de l'antenne 3 par rapport aux antennes 2 et 4. En effet, quand une de ces antennes ou les deux sont excitées, une partie de l'énergie a tendance à se dissiper dans l'autre antenne, d'où l'apparition de ce couplage mutuelle entre les ports 1-3.

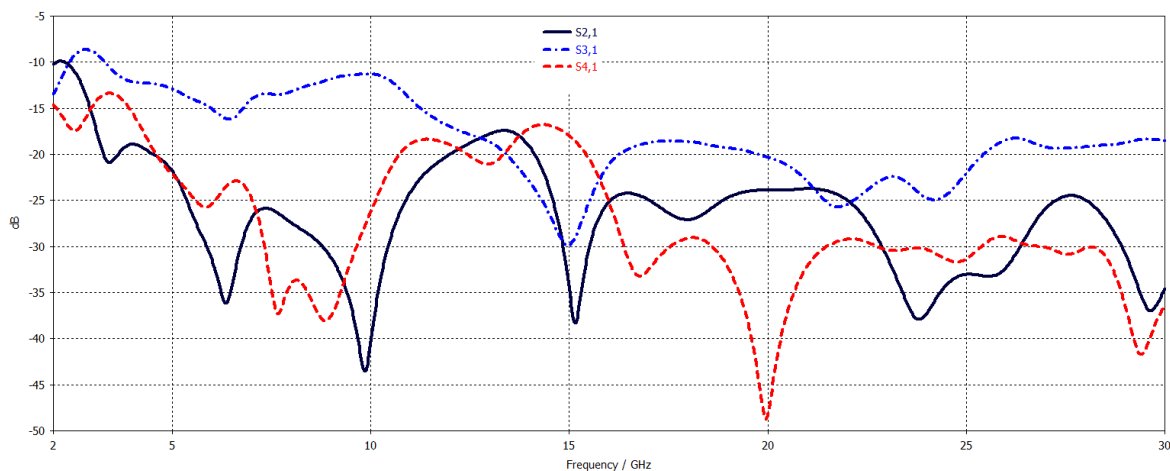


Figure III.18 L'isolation entre le port 1 et les autres ports : S12, S13 et S14

Distribution de courant

Les résultats de la figure III.19 de courant surfaciques aux fréquences 3.47 -7.6GHz montrent un faible courant sur le port3, quand le port1 est excité.

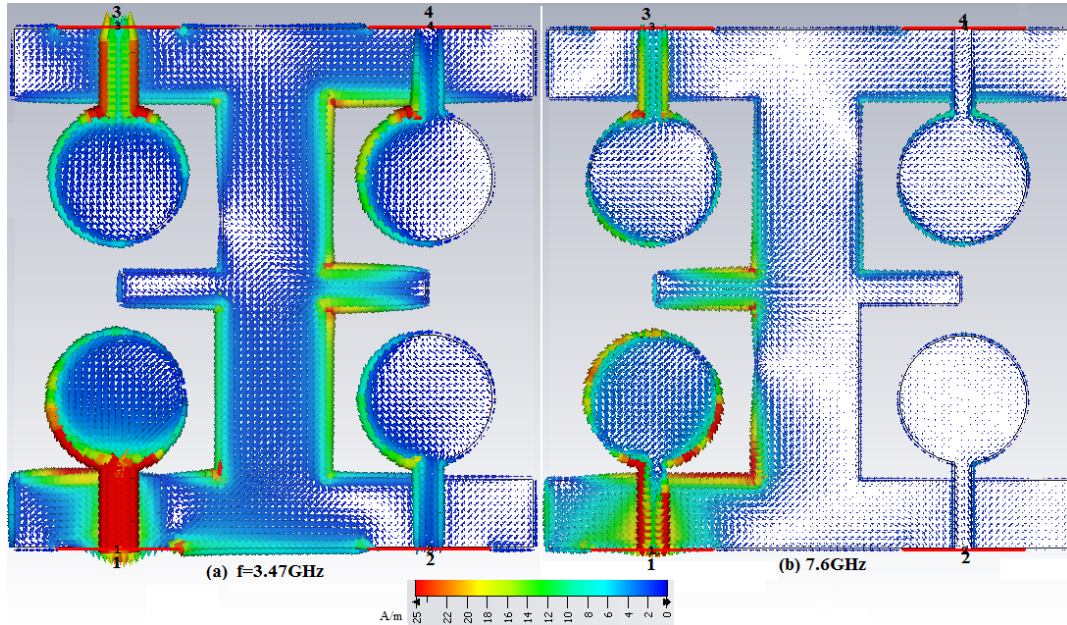


Figure III.19 Distribution de courant aux fréquences 3.47 et 7.6GHz : Port1 excité

Le coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC : Enveloppe Corrélation Coefficient)

Les figures III.20 et III.21 montre que $ECC = 0$, $DG = 10$ entre les ports 1-2 et 1-4 sur toute la bande d'intêt, et des valeurs acceptables pour le couplage entre les ports 1-3, ce qui montre la performance en terme d'isolation de l'antenne MIMO ULB à 4ports proposée.

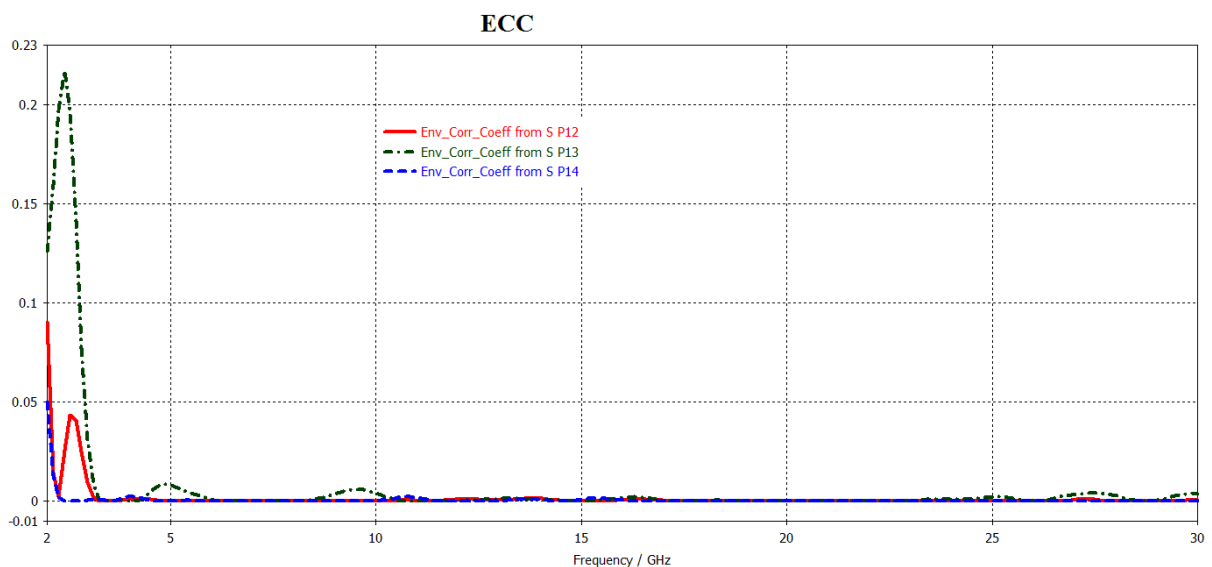


Figure III.20 ECC de l'antenne MIMO à 4 ports en fonction de la fréquence

Gain de diversité (DG : Diversity Gain)

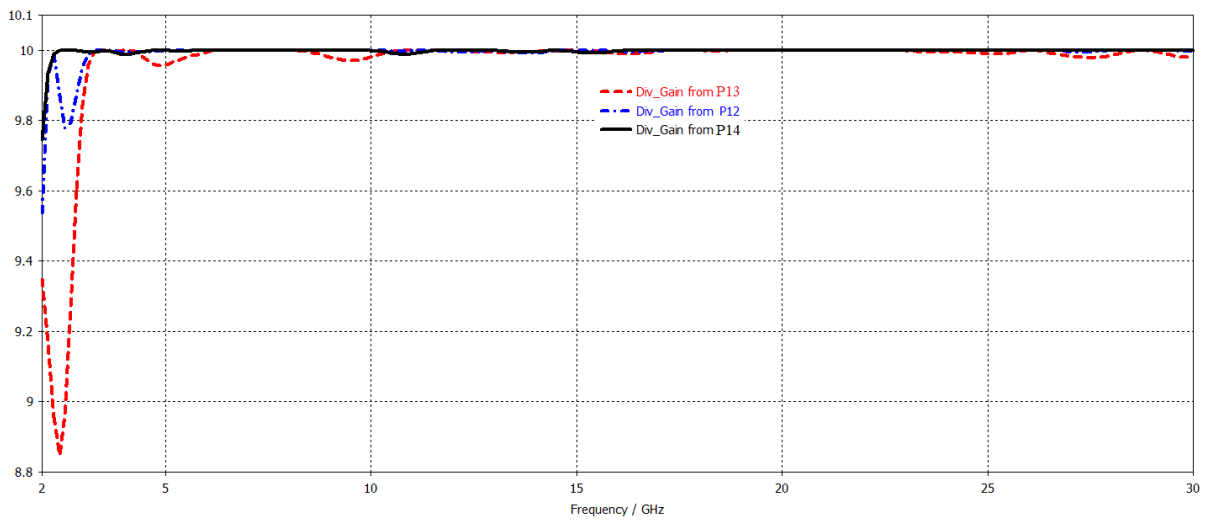


Figure III.21 DG de l'antenne MIMO à 4 ports en fonction de la fréquence

Efficacité de rayonnement

Les résultats des figures III.22 et III.13 montrent que l'efficacité de rayonnement de notre antenne est de 85% et 60% dans la bande 3.27-22.3GHz ; et le gain est proportionnel avec la fréquence et varie entre 1dB et une valeur max. 5,7dB (à la fréquence 11GHz) sur toute la bande.

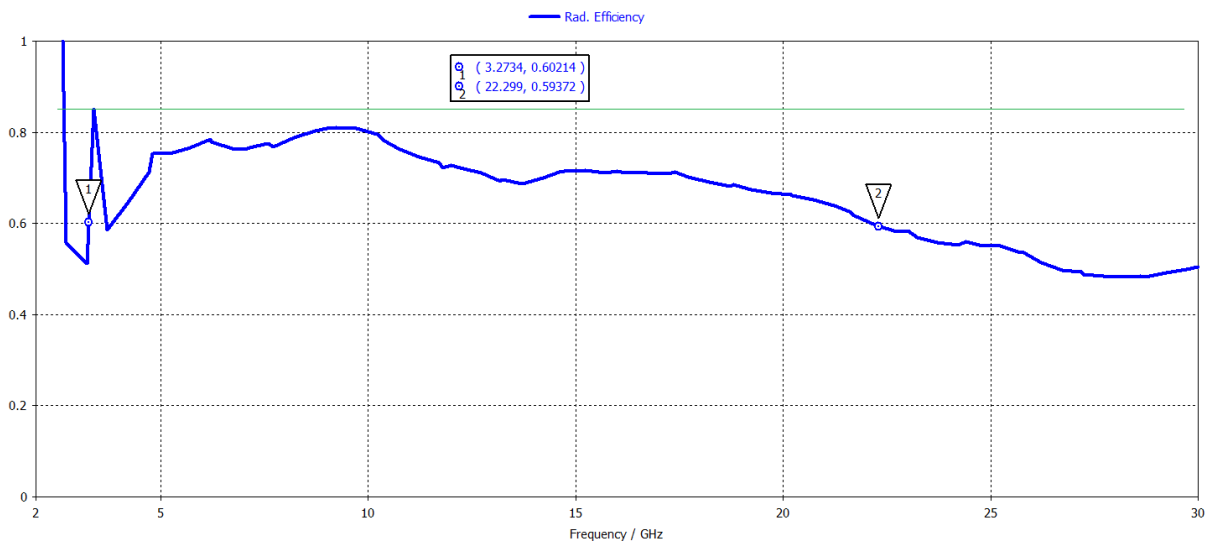


Figure III.22 Efficacité de rayonnement de l'antenne MIMO à 4 ports

Le gain en fonction de la fréquence

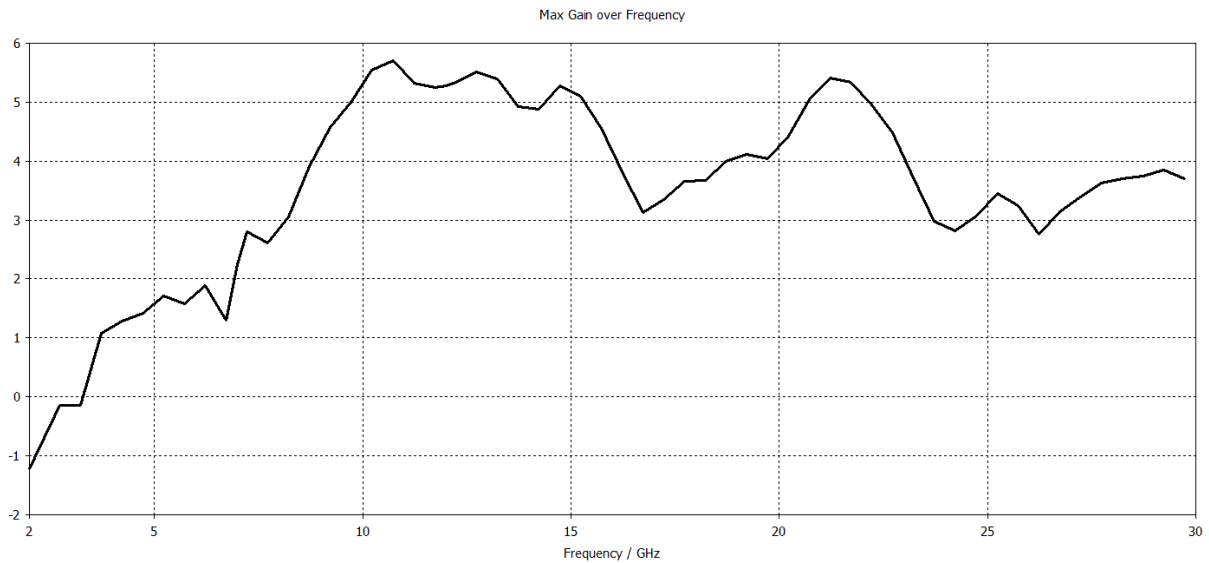


Figure III.23 Gain en [dB] de l'antenne MIMO à 4 ports en fonction de la fréquence

III.6.2 MIMO 4x4 : 2^{ème} configuration

La deuxième configuration MIMO 4x4 à quatre antennes (quatre ports) inspirée de la première configuration est représentée par la figure III.24, où on a inversé les deux antennes ; dont les deux ports sont opposés ; sur l'autre face du substrat. Toujours dans le cadre de ce travail, on a ajouté aussi une fente circulaire de rayon $r_1=2\text{mm}$ sur le patch circulaire, on a modifié la longueur du deuxième stub $W_2=9.25\text{mm}$, comme illustré sur la figure III.24.

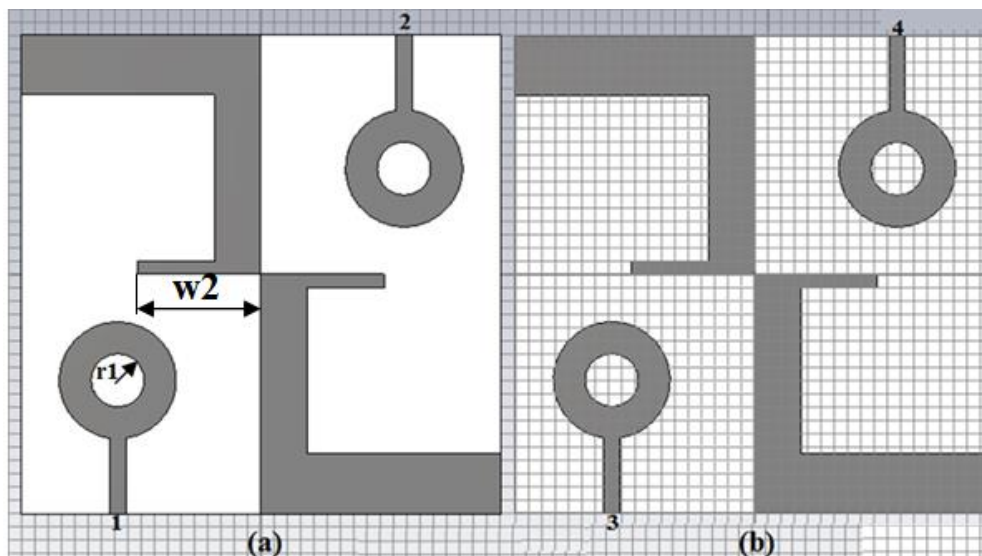


Figure III.24 Géométrie de l'antenne proposée MIMO à 4 ports : 2^{ème} configuration

(a) vu de dessus (b) vu de dessous

Amplitude de coefficient de réflexion S11, S22, S33 et S44

Les résultats de simulation présentés dans la figure III.25, montrent une bonne adaptation de la bande passante ultra large de l'antenne MIMO 4ports (configuration2) adaptée aux applications de la 5G à partir de $f_0=3.46\text{GHz}$.

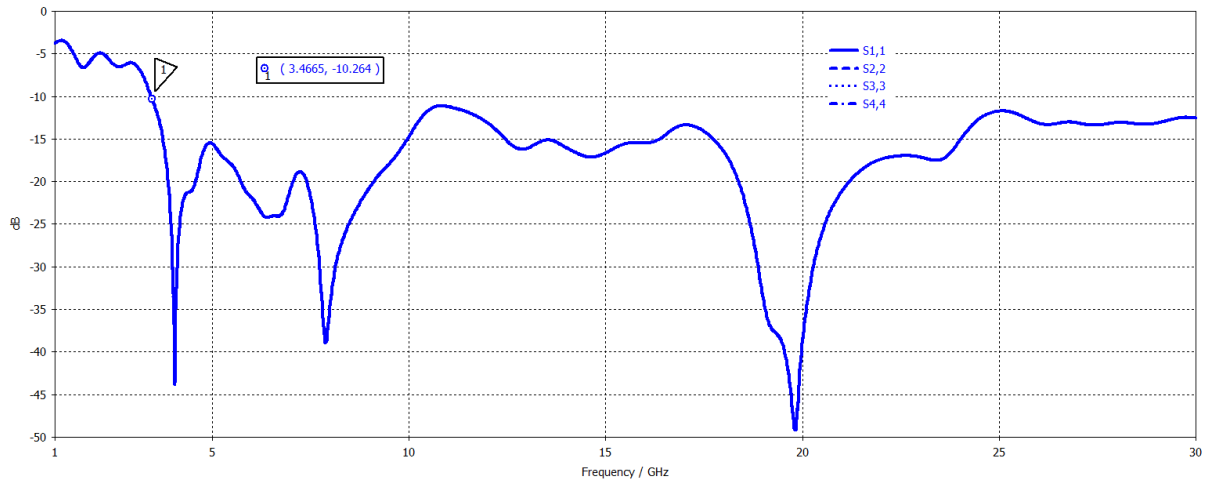


Figure III.25 Coefficients de réflexion S11, S22, S33 et S44

L'isolation S12, S13 et S14

Les résultats de simulation présentés dans la figure III.26, montrent une bonne isolation des ports 1-2 et 1-3. On observe aussi une petite amélioration de découplage entre les ports 1-4 par rapport à la 1^{ère} configuration, le S14 (correspond au S13 de la 1^{ère} configuration) est au-dessous de -15dB dans la bande 5-7.5GHz et à partir de 11.3GHz et atteint la valeur minimale -32dB à la fréquence 22.2GHz.

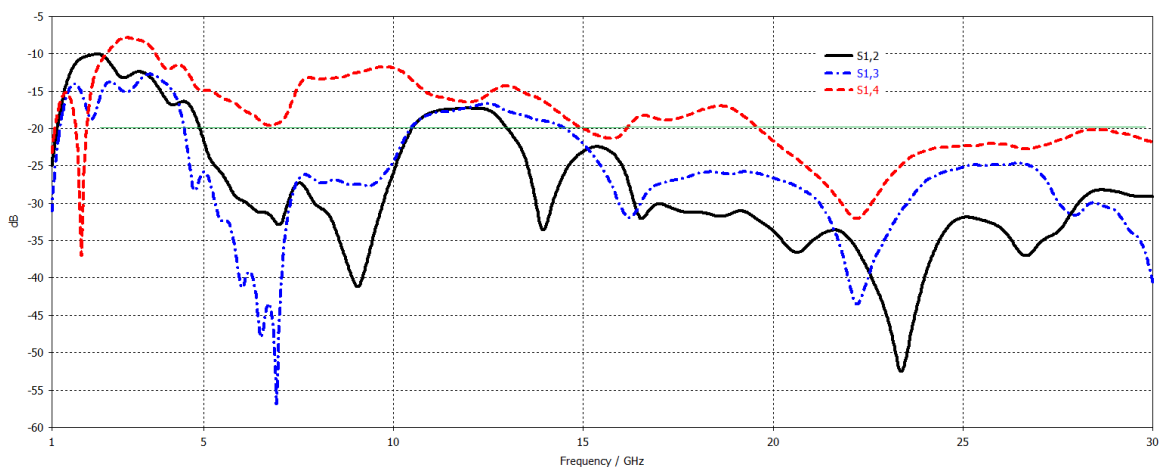


Figure III.26 L'isolation entre le port 1 et les autres ports : S12, S13 et S14

Distribution de courant

Les résultats de la figure III.27 de courant surfaciques aux fréquences 4-8GHz montrent un faible courant sur l'antenne 4, quand le port1 est excité.

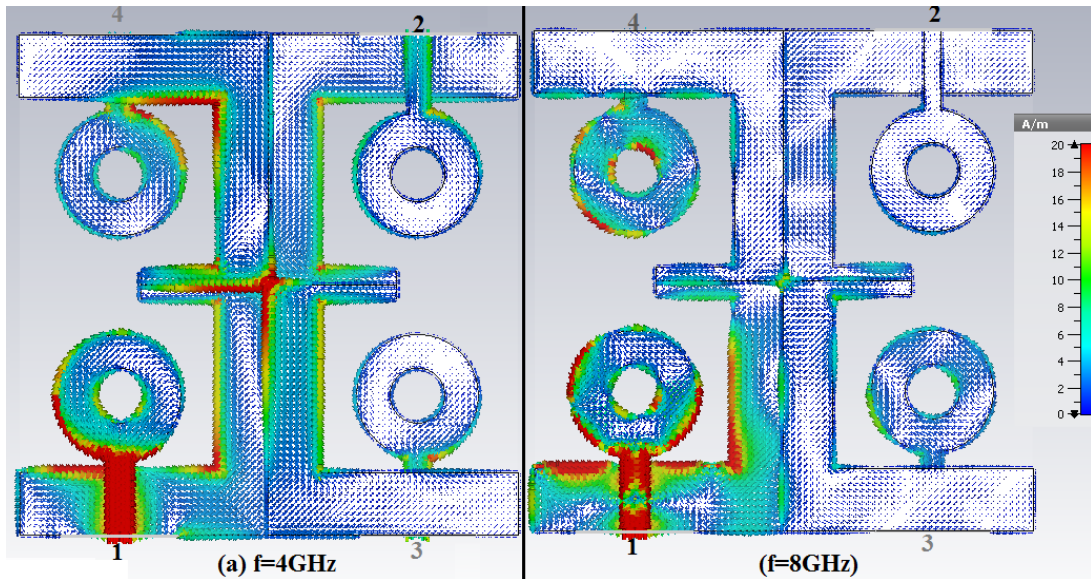


Figure III.27 Distribution de courant aux fréquences 3.47 et 7.6GHz : Port1 excité

Le coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC : Enveloppe Corrélation Coefficient)

Les figures III.28 et III.29 montre que $ECC = 0$, $DG = 10$ entre les ports 1-2, 1-3 et 1-4 sur toute la bande d'intérêt, ce qui montre la performance en terme d'isolation de l'antenne MIMO de la 2^{ème} configuration.

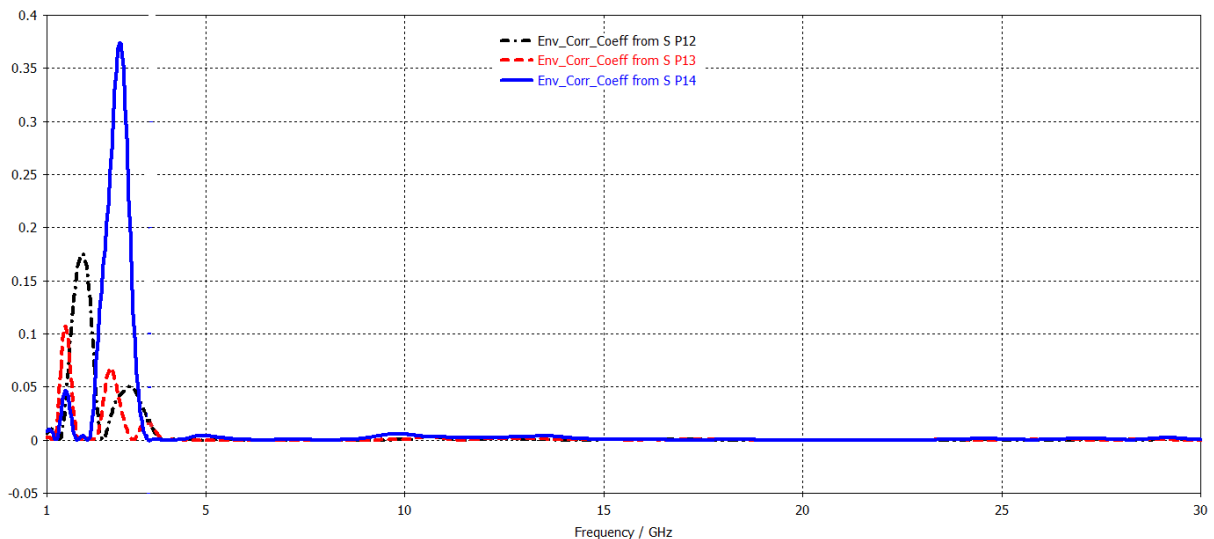


Figure III.28 ECC de l'antenne MIMO à 4 ports en fonction de la fréquence

Gain de diversité (DG : Diversity Gain)

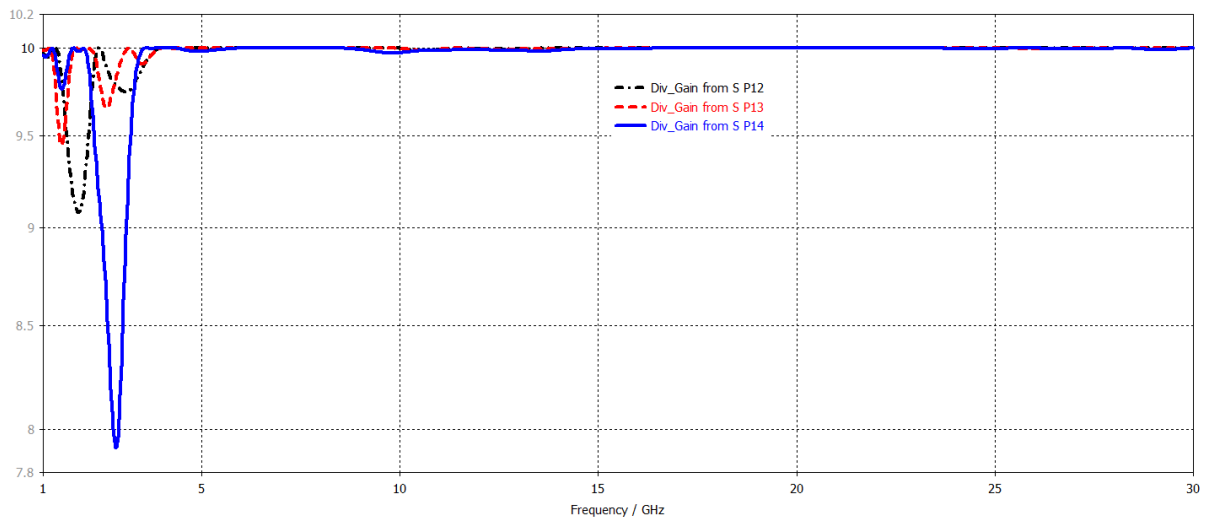


Figure III.29 DG de l'antenne MIMO à 4 ports en fonction de la fréquence

Efficacité de rayonnement

Les résultats des figures III.30 et III.31 montrent que l'efficacité de rayonnement de notre antenne est de 81% et 50% dans toute la bande, et le gain est proportionnel avec la fréquence et varie entre 1.5dB et une valeur max. 5,7dB (à la fréquence 15GHz) sur toute la bande de fréquence.

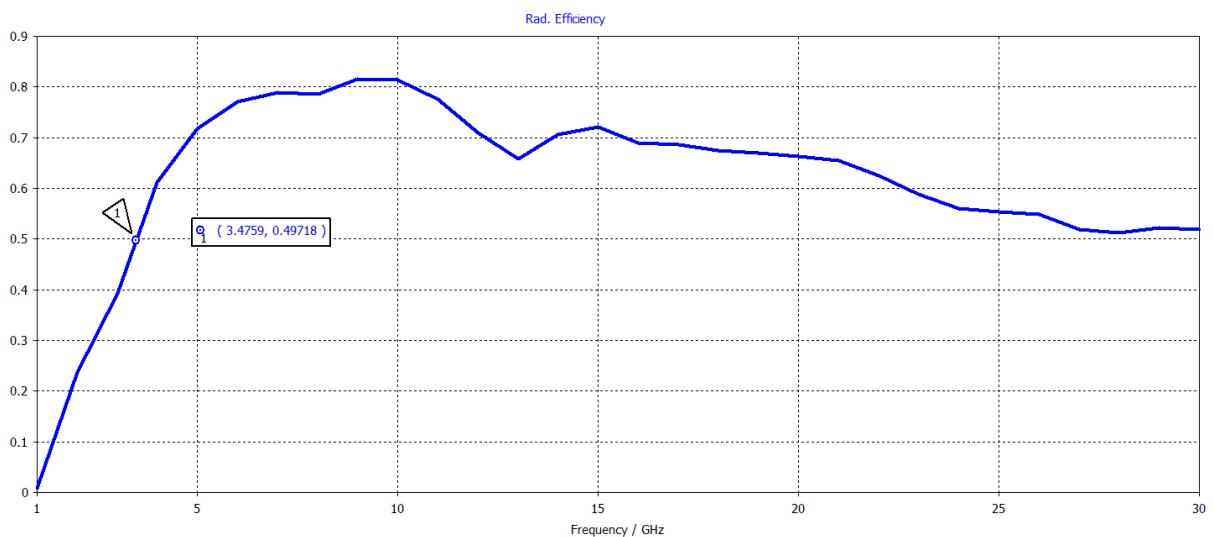


Figure III.30 Efficacité de rayonnement de l'antenne MIMO à 4 ports

Le gain en fonction de la fréquence

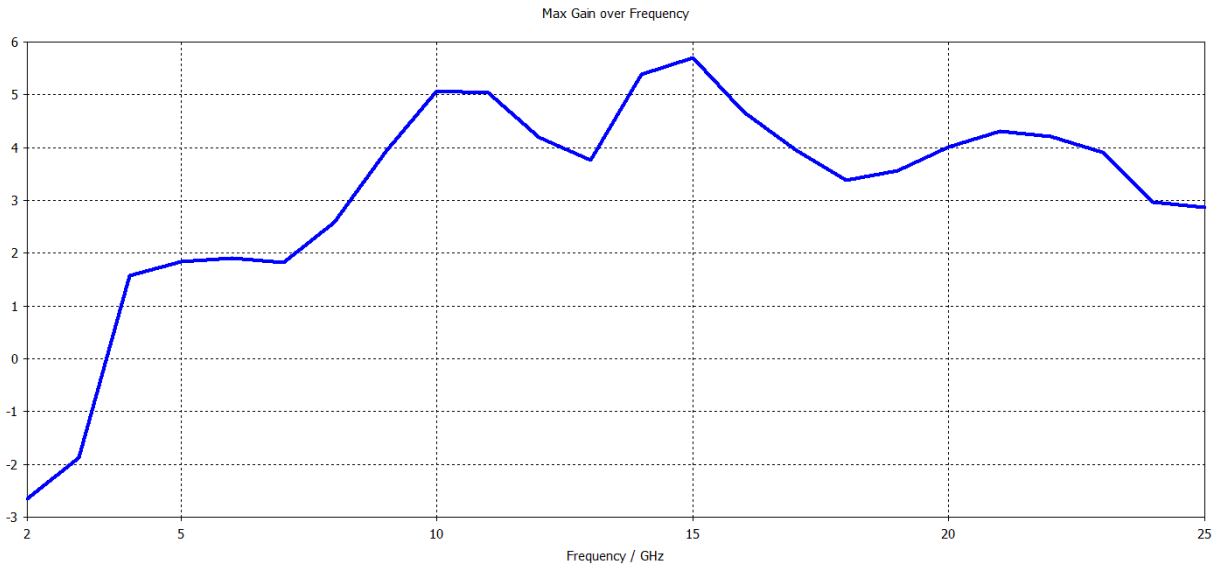


Figure III.31 Gain en [dB] de l’antenne MIMO à 4 ports en fonction de la fréquence

III.7 COMPARAISON ENTRE LES TROIS MIMO

paramètres	MIMO 2x2	MIMO 4 x 4 1 ^{ère} configuration	MIMO 4 x 4 2 ^{ème} configuration
BP (Sii<-10dB)	2.84-30 GHz	2.87-30 GHz	3.46-30 GHz
Le couplage (Sij)	<-16.5dB	S13<-11.5 S14<-13dB S12<-17dB	S13<-12 S14<-13.5 S12<-12.5
ECC	0	~0 (0<ECC P13<0.05)	0
DG	10	~10	10
Efficacité	60% - 80%	60% - 85%	50% - 81%
gain	1.5dB - 5.6dB	1dB - 5.7dB	1.5dB -5.7dB

Tableaux III.2 Comparaison entre les trois antennes : MIMO2x2 et MIMO4x4 1ère et 2^{ème} configuration

III.8 REALISATION

Parmi les structures proposées on a choisi la structure MIMO 2x2 comme une antenne réalisée par la gravure mécanique, afin de la caractériser, en terme de bande passante (coefficient de réflexion S11) et d'isolation entre les deux ports (coefficient de transmission S12), Le S11 et le S12 ont été mesurés par l'analyseur de réseaux vectoriel (ZNB 20 Vector network analyzer .100KHz - 20GHz. La machine de la gravure mécanique et les instruments de mesure sont disponibles au niveau de notre laboratoire de département d'électronique et de télécommunication.

III.8.1 Analyseur de réseau vectoriel (Vector Network Analyzer VNA)

Un analyseur de réseau vectoriel est l'appareil de mesure de référence pour caractériser un quadripôle sous la forme d'une matrice de paramètres S. Il constitue l'équipement de base pour la caractérisation des équipements haute fréquence. Cet appareil présente deux terminaux de sortie qui sont connectés aux deux ports du quadripôle. Chacun des terminaux du VNA transmet successivement un signal harmonique, sépare l'onde incidente de l'onde réfléchie et en mesure l'amplitude et la phase. Ainsi, selon l'endroit où l'excitation est appliquée et le rapport entre ondes effectué, les 4 paramètres S peuvent être calculés à une fréquence donnée. Ce processus est répété pour plusieurs fréquences sur une bande de fréquence donnée.

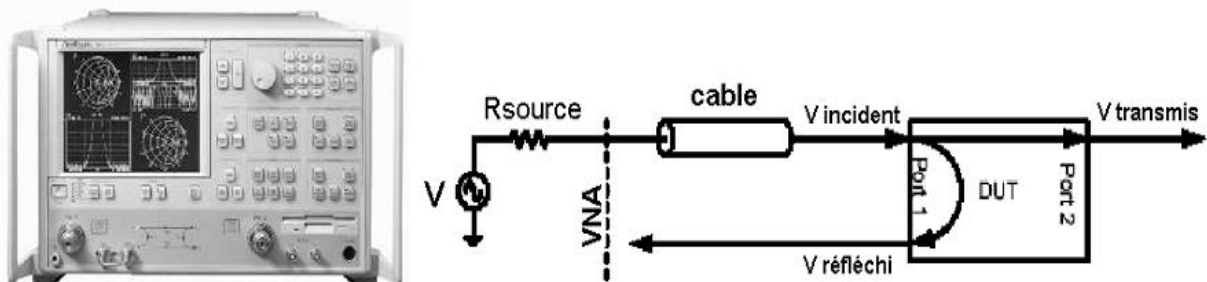


Figure III.32 Analyseur de réseau vectoriel (photo et schéma de principe)

Les mesures de paramètres S nécessitent la définition d'une impédance caractéristique. Il est indispensable de la connaître pour relier paramètres S et impédance. En outre, il est préférable que les équipements utilisés aient la même impédance caractéristique (VNA, câbles, dispositifs RF ...) (50Ω en général) afin d'éviter des réflexions parasites liées aux désadaptations d'impédance.

III.8.2. Structure de l'antenne réalisée

Un prototype de l'antenne proposée a été fabriqué (Figure III.33) et mesuré (Figure III.34). Les paramètres S de l'antenne ont été mesurés à l'aide d'un VNA à deux ports. Le substrat utilisé est FR4 de permittivité diélectrique $\epsilon_r=4.4$ et d'épaisseur $h=1.5$ mm.

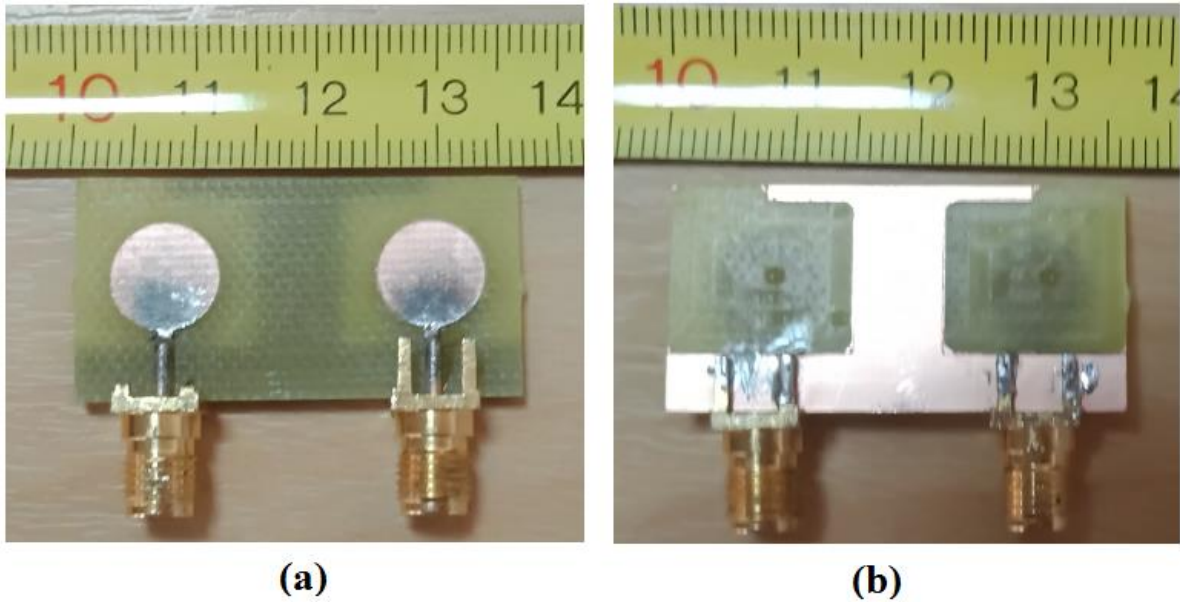


Figure III.33 Prototype de l'antenne réalisée (a) vu de dessus, (b) vu de dessous

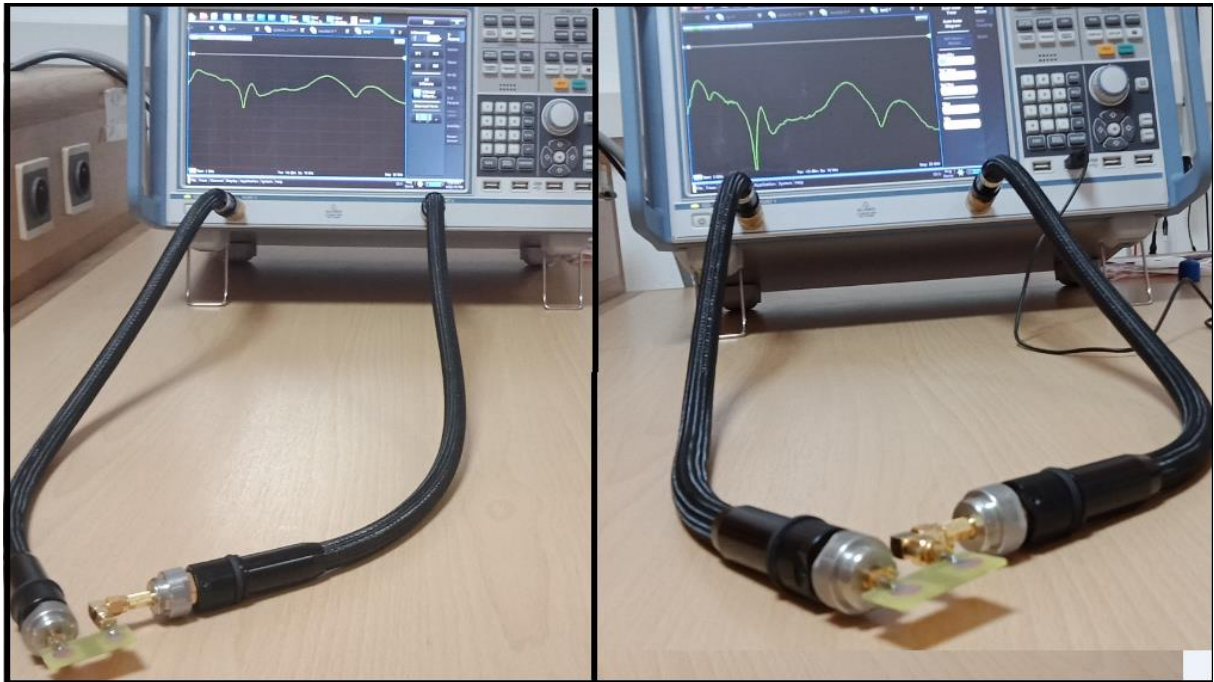
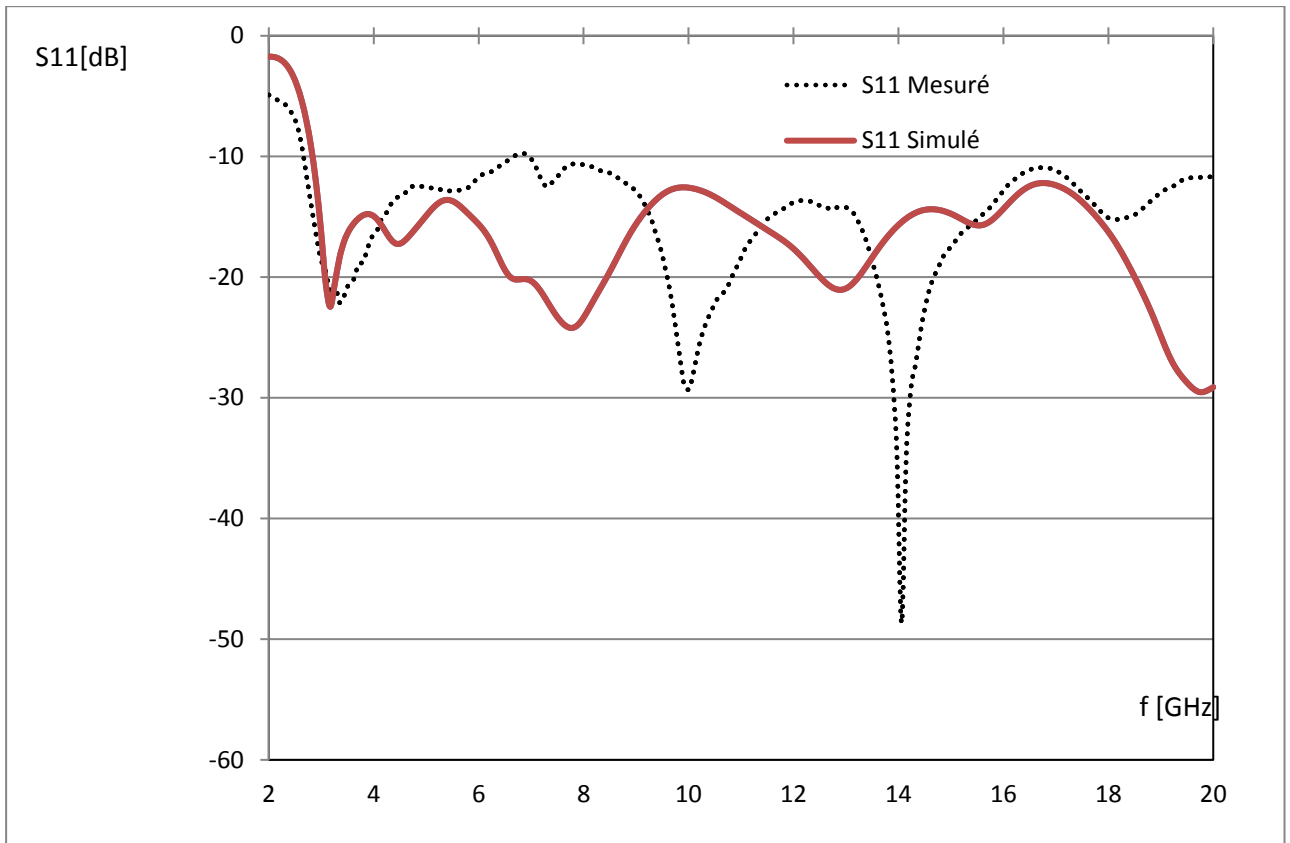
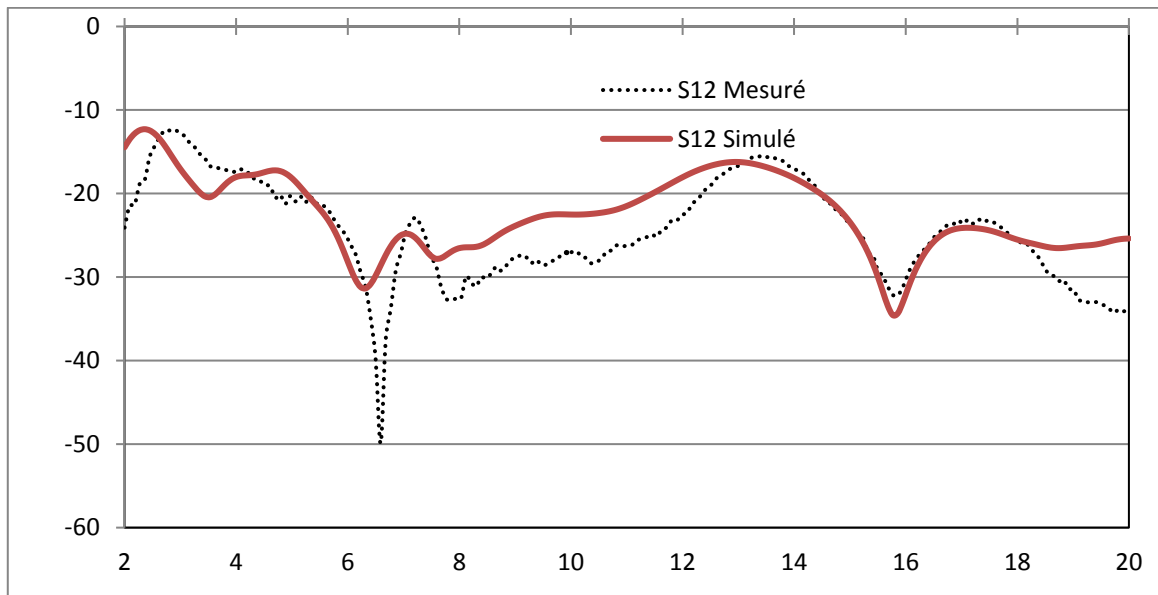


Figure III.34 Mesure des paramètres de l'antenne réalisée par le VNA

III.8.3. Présentation et analyse des résultats



(a)



(b)

Figure III.35 Paramètres simulés et mesurés de l'antenne proposée.

(a) L'amplitude du coefficient de réflexion en entrée S11 en dB,

(b) amplitude de couplage S12 en dB, en fonction de la fréquence en GHz

La figure III.35 (a) montre que le S_{11} mesuré est inférieur à -10dB dans toute la bande de 5G à l'exception d'un décalage fréquentiel est obtenu autour de 8 et 13GHz, la mesure du coefficient de réflexion présente globalement une bonne adéquation avec les simulations vis-à-vis la largeur de la bande passante où $f_0=2.86$ GHz.

La Figure III.35 (b) montre que le couplage en dB mesuré entre les deux ports de l'antenne MIMO 2x2 est en bon accord avec les simulations.

III.9 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons conçu trois structures d'antennes MIMO ULB compactes et adaptées aux applications de la nouvelle génération des réseaux mobiles 5G. La première structure d'un système MIMO à deux ports, de taille 18×36 mm², fonctionne à partir de 2.84GHz à 30GHz, bien adapté dans les bandes 5G comprises entre 3.2GHz et 6GHz et en dessus de 6GHz jusqu'à 30GHz. Nous avons démontré que l'ajout des deux stubs au plan de masse améliore l'isolation des deux ports et l'adaptation de la bande passante de l'antenne MIMO.

Deux configurations MIMO à quatre ports ULB, de taille $36 \times 36 \times 1.6$ mm³, ont été présentées et inspirées de la première structure. Dans la première configuration, les quatre antennes étaient placées sur la même face du substrat FR4 et le plan de masse sur l'autre face, tandis que dans la deuxième configuration, les deux antennes ; dont les ports sont opposés ; ont été inversées sur l'autre face du substrat, dans le but d'améliorer le découplage entre les ports opposés. Les deux configurations de système MIMO à quatre ports, fonctionnent sur une très ultra large bande passante, de 2.87-30GHz et de 3.46-30GHz pour la première et la deuxième configuration MIMO, respectivement, avec un affaiblissement d'adaptation supérieur à 10dB et un isolement acceptable entre les quatre ports pour MIMO1 et un isolement pratiquement parfait pour MIMO2. Les gains des antennes restent acceptables sur presque toute la bande de fréquence, avec une efficacité entre 60% - 90% pour MIMO à 2ports et 50% - 80% pour MIMO à 4port. Un prototype de l'antenne proposée MIMO 2x2 a été fabriqué et complètement caractérisé. les résultats de mesure sont en bon accord avec ceux de la simulation

CONCLUSION GENERALE ET PESPECTIVES

L'objectif de ce mémoire était de concevoir un nouveau système MIMO d'antenne compact ULB fonctionnant dans les bandes 5G.

Pour commencer, nous avons présenté l'évolution des réseaux mobiles partant de la 1^{ère} G jusqu'au 5^{ème} G, et nous avons constaté que la 5G ne consiste pas en une amélioration des normes précédentes de télécommunications, mais il s'agit d'une innovation de rupture qui va révolutionner le monde de télécommunications et de téléphones mobiles.

Par la suite, nous avons fait une étude générale sur les antennes MIMO et massive MIMO ; utilisées dans la 5G. Nous avons présenté l'intérêt de ces antennes par une étude comparative entre les deux systèmes (MIMO et Massive MIMO).

Enfin, dans la dernière partie de simulation, et dans le but de concevoir un MIMO compact et performant, nous avons commencé par la conception de l'antenne de départ, c'était un monopôle circulaire alimenté par une ligne micro-ruban imprimé sur un substrat FR4 ($\epsilon_r=4.3$, $\tan(\delta)=0.025$) avec un plan de masse réduit. Nous avons montré par la simulation que l'ajout des stubs au plan de masse améliore l'isolation ou le découplage entre les ports, améliore aussi, l'adaptation de première structure proposée MIMO 2x2. Ensuite, nous avons conçue deux configurations d'un MIMO 4x4. En outre, nous avons présenté les performances des antennes en fonction de ECC (Enveloppe Corrélation Coefficient), de DG (Diversity Gain), efficacité de rayonnement et gain total en dB. Les résultats de simulations montrent bien une meilleure isolation, une bonne efficacité de rayonnement et un gain acceptable sur toute la bande pour presque les trois structures. Les structures compactes proposées fonctionnant sur un spectre Ultra Large bande de fréquence, commençant par les fréquences de 2.84 - 2.87 et 3.46 GHz jusqu'à 30GHz pour MIMO 1, 2 et 3 respectivement. Les résultats de mesures de coefficient de réflexion et de couplage du prototype de MIMO 1 réalisé (2x2), montrent la validation des performances obtenues par la simulation de cette structure.

Plusieurs perspectives peuvent être envisagées à partir de ce travail, pour le but d'améliorer les performances, on cite par exemple :

- Modification de la disposition des monopôles, de sorte que les ports seront orthogonaux.
- Insertion des éléments actifs pour obtenir des antennes MIMO reconfigurables en diagramme de rayonnement

- [1] N. Docomo «DOCOMO 5G White Paper» Juillet 2014.
- [2] Samuel Pierre, Max Maurice « introduction aux réseaux mobiles » Geninov Inc, 2008
- [3] www.generation-nt.com/dossier-telephonie-mobile-bibop-gsm-gprs-edge-article-465192.html
- [4] Moret, Boris. Amplificateur de puissance autonome pour applications OFDM et beamforming de la 5G aux fréquences millimétriques en technologie CMOS avancée. Bordeaux, 2017
- [5] Introduction to Wireless Links for Digital Communications: Radio Link Budget”. Ajouter 29 Novembre, 2007, de la part Enigmatic Consulté le 17/10/14.
- [6] X. Lagrange, Principes et évolutions de l’UMTS, Lavoisier, 2005
- [7] U. HORN, R. KELLER et N. NIEBERT, « Services mobiles interactifs – La convergence De la radiodiffusion et des communications mobiles », UER – Revue Technique, N° 281, pp. 1–10, Automne 1999. http://www.ebu.ch/en/technical/trev/trev_281---umts_f.pdf
- [8] G. PUJOLLE, « Les réseaux », Édition EYROLLES, Paris, France, 2008. ISBN: 978---2---212---11757---8.
- http://www.friendlyduck.com/AF_TA/rel/index.cfm?RST=UNF&TAD=420036.
- [9] K. IBRAHIMI, « Gestion des ressources des réseaux mobiles de nouvelle génération par Rapport à la mobilité des utilisateurs », Thèse de doctorat en Informatique, Sciences de L’Université d’Avignon et des Pays de Vaucluse France & Université Mohammed V---Agdal Rabat --- Maroc, Laboratoire LIA, Avignon, France, Laboratoire LIMIARF, Rabat, Maroc, 20 Novembre 2009. http://tel.archives---ouvertes.fr/docs/00/45/36/44/PDF/2009AVIG0169_0_0.pdf
- [10] George Lawton, “4G: Engineering versus Marketing”, <http://ComputingNow.computer.org>, MARCH 2011.
- [11] Mobility Management Entity (MME) and Visitor Location Register (VLR) SGs interface specification, 9.4.0 édition, 2010.
- [12] M. Mustapha, "Application de la technologie mimo a la 4g du mobile, " Projet fin d’études, la Faculté de Technologie, Setif, 2014

- [13] P. Latina « Comienza China pruebas de tecnología 5G » número 7, La Habana, Cuba, 5 Janvier 2016.
- [14] A. Gohil, H. Modi, S. K. Patel « 5g Technology Of Mobile Communication : A Survey » Conférence Internationale Sur Les Systèmes Intelligents Et Le Traitement Du Signal 2013.
- [15] Bisognin, Aimeric. Évaluation de technologies organiques faibles pertes et d'impression plastique 3D afin de contribuer au développement de solutions antennaires innovantes dans la bande 60 GHz–140GHz. Université Nice Sophia Antipolis, 2015.
- [16] Lamine Sane, Assane N'gom, Ibra Doum, Idy Diop, Khaly Tall; M. Mansour Khouma; Kadidiatou Diallo; Sidi Mouhamed Farssi “Dual-band pattern reconfigurable 5G antenna using dual-band blc” Conference on antenna measurement and applications (CAMA2018), 03/09/2018, Vasteras.
- [17] A. Osseiran, J. F. Monserrat, P. Marsch « 5g Mobile and Wireless communications Technology » Livre, Juin 2016.
- [18] E. Hossain, M. Rasti, H. Tabassum, A. Abdel Nasser « Evolution towards 5g Multi-Tier Cellular Wireless Networks: An Interference Management Perspective » IEEE Wireless Communications Conférence 17 Feb 2014.
- [19] S. Sébastien, ‘les Enjeux De la 5G’ ARCEP, 2017
- [20] Maha, BenZid and Raouf Kosai.”Multi User MIMO Communication: Basie Aspects, Benefits and Challenges,” Proceedings of Recent Trends in Multi-user MIMO Communication. Algérie 2013.
- [21] Xiang, Wei, Kan Zheng, and Xuemin Sherman Shen, eds. 5G mobile communications. Springer, 2016.
- [22] L’IMT-2020 sont les exigences publiées par le secteur des radiocommunications de l’UIT pour les réseaux, dispositifs et services 5G.
- [23] 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
- [24] Study Paper on: Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) Technology
- [25] NASRI Amel; BENFETIMA Amel. Study and Simulation of the Transmit

- Diversity Technique in LTE Systems. 2017.<http://dlibrary.univ-boumerdes.dz:8080/handle/123456789/3904>
- [26] L. Song, and J. Shen, “Evolved Cellular Network Planning and Optimization for UMTS and LTE”, London, CRC Press, 2011.
- [27] S. Blanch, J. Romeu and I. Corbella, “Exact Representation of Antenna System Diversity Performance from Input Parameter Description”, Electronics Letters, vol. 39, no. 9, 1 May 2003.
- [28] The Role of Massive MIMO in 5G. Michael Wang. Oct 23, 2018 [Enligne]. <https://medium.com/@miccowang/the-role-of-massive-mimo-in-5g-c362e790ef61>[consulté le 03 Avril 2019].
- [29] HAJRI, Salah Eddine. (Thèse de doctorat 2018). L’amélioration des performances des systèmes sans fil 5G par groupements adaptatifs des utilisateurs. Université ParisSaclay
- [30] S. Blanch, J. Romeu and I. Corbella, “Exact Representation of Antenna System Diversity Performance from Input Parameter Description”, Electronics Letters, vol. 39, no. 9, 1 May 2003.
- [31] K. Rosengren, P-S. Kildal, “Radiation Efficiency, Correlation, Diversity Gain and Capacity of a Six Monopole Antenna Array for a MIMO System: Theory, Simulation and Measurement in Reverberation Chamber”, in IEE Proceedings, Microwaves, Antennas and Propagation, pp. 7-16, vol. 152, no. 1, February 2005.
- [32] www.cst.studio.com
- [33] Choi SH, Park JK, Kim SK and Park JY. A new ultra-wideband antenna for UWB applications. Microwave and Optical Technology Letters 2004; 40(5): 399 - 401.
- [34] Liang JX, Chiau CC, Chen, XD and Parini CG. Study of a printed circular disc monopole antenna for UWB systems. IEEE Transactions on Antennas and Propagation 2005; 53(11): 3500-3504.
- [35] Ooi BL, Zhao G, Leong MS, Chua KM and Lu Albert CW. Wideband LTCC CPW-fed two layered monopole antennae. IEE Electronics Letters 2005; 41(16): 889-890.
- [36] Kim JP, Yoon TO, *et al.* Design of an ultra-wide-band printed monopole antenna using FDTD and genetic algorithm. IEEE Microwave and Wireless Components Letters 2005; 15(6): 395-397.
- [37] Osama A, Sebak AR. A printed monopole antenna with two steps and a circular slot for UWB applications. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters 2008 ; 7: 411-413.

Résumé

L'objectif de ce travail est la conception d'un nouveau système MIMO d'antenne compact ULB fonctionnant dans les bandes 5G. Dans un premier temps, nous concevons une antenne MIMO 2x2 constituée par deux monopôles circulaires identiques de faibles dimensions imprimées et alimentées par deux lignes micro ruban fonctionnant sur une ultra large bande de fréquences adaptés au standard 5G dont le plan de masse est modifié par des stubs, pour le but d'améliorer l'isolation entre les ports d'alimentation. Ensuite, nous doublons le nombre des antennes pour concevoir deux configurations MIMO 4x4 compactes et ultra large bande. En utilisant le logiciel CST Microwave Studio, les résultats de simulation montrent les performances des structures. Les résultats de la mesure de coefficient de réflexion et de couplage de prototype MIMO 2x2, montrent un bon accord entre la simulation et la réalisation.

Mots-clés : MIMO, ULB, 5G, antenne, miniaturisation.

Abstract

The objective of this work is the study and design of a new compact ULB MIMO antenna system for 5G applications. First, the proposed MIMO 2x2 antenna design consist of two identical circular printed monopoles radiating elements, with low profile, microstrip line-fed and ultra wide band adapted to the 5G which the ground plane is modified by stubs, for the purpose of improving the insulation between the power ports. Next, four-port compact UWB MIMO antenna with two configurations are designed. Using the CST Microwave Studio, the simulation results show the performance of the structures. The results of the reflection coefficient and coupling measurement of MIMO 2x2 prototype, show a good agreement between the simulation and the realization.

Keywords : MIMO, ULB, 5G, antenna, miniaturization.