



**UNIVERSITE HASSIBA BENBOUALI DE CHLEF**

**Faculté de Technologie**

Département d'Electronique

## **MEMOIRE DE MASTER**

Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Filière : Télécommunications

Spécialité : Systèmes des Télécommunications

### **MODÉLISATION ET ANALYSE D'UNE ANTENNE MIMO 28/38 GHZ À QUATRE PORTS POUR LES MOBILES 5G**

Par

**Nadjib ABD AIAD**

**Ahmed HADIBI**

Encadreur :

M. DEBAB Mohamed

Maître de Conférences « A » à l'UHBC

Chlef, Juin 2024

## Dédicaces

A mes chers parents,

A mon père, pilier de notre famille et source d'inspiration,

A ma mère adorée, aujourd'hui disparue,

Ton amour, ta tendresse et ton éducation ont façonné mon être. ton souvenir me guide et me pousse à réaliser mes rêves. Sache que tu es et resteras à jamais dans mon cœur.

A mes frères et sœurs,

A mes amis encourageants,

A tous ceux qui ont contribué à mon succès,

Je vous exprime ma profonde gratitude pour votre soutien, vos conseils et vos encouragements. Je vous remercie et vous dédie ce travail en signe de reconnaissance. Merci du fond du cœur.

### **A. A. Nadjib**

Je dédie ce mémoire

A celle qui a attendu avec patience les fruits de sa bonne

Education et de ses dévouements

A ma chère mère A celui qui s'est changé la nuit en jour pour assurer les bonnes conditions

A mon cher père

Pour sa patience, son amour, leur soutien et son encouragement.

A mes frères.

A mes amies et mes camarades.

Sans oublier tous les professeurs que ce soit du primaire, du moyen, du secondaire ou de

L'enseignement supérieur.

### **H. Ahmed**

## **Remerciements**

Avant tout, nous exprimons notre profonde gratitude à Allah le Tout-Puissant qui nous a donné la force, la patience et la détermination nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous tenons ensuite à adresser nos sincères remerciements à notre directeur de mémoire, Monsieur DEBAB Mohamed, Maître de Conférences au département d'Electronique à la faculté des sciences et technologies de l'Université Hassiba Benbouali de Chlef. Nous le remercions d'avoir accepté de nous encadrer et de nous guider dans la réalisation de ce modeste travail. Sa précieuse aide, ses conseils avisés, ses encouragements, sa disponibilité, son soutien moral et sa sympathie ont été d'une importance capitale pour nous. Nous sommes particulièrement reconnaissants pour la confiance qu'il nous a témoignée tout au long de ce projet.

Nous remercions également nos collègues et amis pour les moments agréables et enrichissants que nous avons partagés ensemble durant nos années d'études à l'université. Leur soutien moral et leur aide nous ont été précieux.

Nous n'oublions pas nos très chers parents et nos enseignants qui, chacun à leur manière, ont contribué à faire de nous ce que nous sommes aujourd'hui.

Enfin, nous adressons nos remerciements à toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin, directement ou indirectement, à la réalisation de ce travail.

## Résumé

L'évolution rapide de la téléphonie mobile entraîne une demande croissante en technologies d'antennes performantes. Pour répondre à ces besoins, les antennes doivent offrir un gain plus important, une bande passante plus large et des solutions aux problèmes de coût et d'encombrement. La technologie MIMO apparaît comme une solution prometteuse. Dans ce mémoire, nous proposons une antenne MIMO à quatre ports pour les applications 5G, composée de patches triangulaires. Cette antenne fonctionne sur les fréquences 28 et 38 GHz de la bande des ondes millimétriques. Les simulations réalisées avec les logiciels HFSS et CST confirment la performance de l'antenne.

**Mots clés :** 5G, ondes millimétriques, antenne MIMO, formation de faisceau, adaptation d'impédance, couplage mutuel.

## ملخص

التطور السريع للاتصالات المتنقلة يدفع إلى ازدياد الطلب على تقنيات الهوائيات عالية الأداء. لتلبية هذه الاحتياجات، يجب أن توفر الهوائيات مكسبًا أعلى ونطاقًا تردديًا أوسع وحلولًا لمشكلات التكلفة والحجم. تقنية MIMO تقدم نفسها كحل واعد. في هذا البحث، نقترح هوائي MIMO رباعي المنافذ لتطبيقات الجيل الخامس، يتكون من رقع مثلثية الشكل. تعمل هذه الهوائيات في ترددي 28 و 38 جيجاهرتز في نطاق موجات المليمتر. تؤكد المحاكاة التي أجريت باستخدام برامج HFSS و CST على أداء الهوائي.

**كلمات مفتاحية:** الجيل الخامس 5G ، موجات المليمتر، هوائي MIMO، تكوين شعاع، مطابقة المعاوقة، الاقتران المتبادل.

## Abstract

The rapid evolution of mobile communications is driving an increasing demand for high-performance antenna technologies. To meet these needs, antennas must offer higher gain, wider bandwidth, and solutions to cost and size problems. MIMO technology emerges as a promising solution. In this paper, we propose a four-port MIMO antenna for 5G applications, composed of triangular patches. This antenna operates at 28 and 38 GHz frequencies in the millimeter wave band. Simulations performed with HFSS and CST software confirm the antenna's performance.

**Keywords:** 5G, millimeter waves, MIMO antenna, beamforming, impedance matching, mutual coupling.

# Table des matières

Remerciements.....	ii
Résumé.....	iii
Liste d'abréviations.....	vii
Liste des figures.....	ix
Liste des tableaux.....	xi
Introduction Générale.....	1

## Chapitre I: La Technologie 5G

I.1. Introduction.....	2
I.2. Historique des réseaux mobiles.....	2
I.2.1. L'apparition de la 1G.....	2
I.2.2. La deuxième génération 2G.....	2
I.2.3. La troisième génération 3G.....	3
I.2.4. La quatrième génération 4G.....	3
I.2.5. La cinquième génération 5G.....	3
I.3. L'architecture de la 5G.....	4
I.4. Les caractéristiques clés de la 5G.....	6
I.4.1. Interface radio NR.....	6
I.4.2. Ondes millimétriques (mmWave).....	6
I.4.3. MIMO massif.....	7
I.4.4. Formation de faisceaux (Beamforming).....	8
I.5. Conclusion.....	8

## Chapitre II: L'Art des Antennes 5G

II.1. Introduction.....	9
II.2. Paramètres caractéristiques d'antennes.....	9
II.2.1. Le diagramme de rayonnement.....	9

II.2.2.	Le coefficient de réflexion .....	10
II.2.3.	Le gain .....	10
II.2.4.	La directivité .....	11
II.2.5.	Le rendement .....	12
II.2.6.	L'impédance d'entrée .....	12
II.2.7.	La bande passante .....	13
II.3.	Différents types d'antennes .....	13
II.3.1.	Antenne dipolaire.....	14
II.3.2.	Boucle magnétique.....	14
II.3.3.	Antenne cornet .....	15
II.3.4.	Antenne fente .....	16
II.3.5.	Antenne à réflecteur parabolique .....	16
II.3.6.	Antenne imprimée ou micro-ruban.....	17
II.3.7.	Antenne à résonateur diélectrique.....	17
II.3.8.	Antenne MIMO.....	18
II.3.9.	Antenne intelligente .....	19
II.4.	La technologie MIMO.....	20
II.4.1.	MIMO .....	20
II.4.2.	Modèle du canal MIMO.....	20
II.4.3.	Capacité d'un canal MIMO .....	21
II.4.4.	Technologie de MIMO massive.....	22
II.4.5.	Les différents types de MIMO massive .....	23
II.4.6.	Caractéristiques générales des systèmes MIMO Massive .....	24
II.5.	Conclusion.....	25

## **Chapitre III: Simulation**

III.1.	Introduction .....	26
III.2.	Présentation d'outils de simulation.....	26

III.2.1.	Logiciel Ansoft HFSS .....	26
III.2.2.	Logiciel CST STUDIO SUITE .....	27
III.3.	Conception de l'antenne .....	27
III.3.1.	Structure et géométrie de l'antenne conçue .....	28
III.4.	Résultats et discussions .....	30
III.4.1.	Performance de l'antenne patch triangulaire.....	30
III.4.2	Performance du système d'antenne MIMO.....	35
III.4.3	Comparaison des résultats.....	46
III.5.	Conclusion .....	49
Conclusion Générale.....		50
Références.....		51

## Liste d'abréviations

1G	Première génération de téléphonie mobile
2G	Deuxième génération de téléphonie mobile
3G	Troisième génération de téléphonie mobile
4G	Quatrième génération de téléphonie mobile
5G	Cinquième génération de téléphonie mobile
AMPS	Advanced Mobile Phone System
AN	Access Network
CDMA	Code Division Multiple Access
CU	Central Unit
DU	Distributed Unit
EDGE	Enhanced Data for GSM Evolution
EF	Evolved NodeB
eCPRI	Enhanced Common Public Radio Interface
ETACS	Enhanced TACS
F1	Fronthaul
FTTA	Fiber-To-The-Antenna
GPRS	General Packet Radio Service
gNB	Next Generation Base Station
gNB-CU	gNB Central Unit
gNB-CU-CP	gNB Central Unit - Control Plane
gNB-CU-UP	gNB Central Unit - User Plane
gNB-DU	gNB Distributed Unit
GSM	Global System for Mobile Communications
IMT	International Mobile Telecommunications
LTE	Long Term Evolution
MEC	Multi-edge Computing
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MISO	Multiple-Input Single-Output
MU-MIMO	Multi-User MIMO
NG-RAN	Next Generation Radio Access Network
PDU	Protocol Data Unit
QoS	Quality of Service

RF	Radio Frequency
RRH	Remote Radio Head
SISO	Single-Input Single-Output
SIMO	Single-Input Multiple-Output
SU-MIMO	Single-User MIMO
TACS	Total Access Communication System
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
TDMA	Time Division Multiple Access
UE	User Equipment
UIT	Union Internationale des Télécommunications
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
W-CDMA	Wideband Code Division Multiple Access

# Liste des figures

## Chapitre I

Figure I.1: Architecture de la 5G .....	4
Figure I.2: Schéma du Réseau d'Accès Radio de Nouvelle Génération (NG-RAN) .....	5
Figure I.3: Segments de liaisons du réseau d'accès radio .....	6
Figure I.4: Onde millimétrique dans la bande de fréquences .....	7
Figure I.5: Le MIMO massif illustré .....	8

## Chapitre II

Figure II.1: La bande passante à -10 dB d'une antenne .....	13
Figure II.2: Antenne dipolaire .....	14
Figure II.3: Boucle magnétique .....	15
Figure II.4: Antenne cornet .....	15
Figure II.5: Antenne fente .....	16
Figure II.6: Antenne à réflecteur parabolique .....	16
Figure II.7: Antenne microruban .....	17
Figure II.8 : Antenne à résonateur diélectrique .....	18
Figure II.9: Systèmes de transmission MIMO .....	18
Figure II.10: Schéma représentatif d'une antenne adaptative .....	19
Figure II.11: Schémas représentatifs du SISO, MISO, SIMO et MIMO .....	20
Figure II.12: Système MIMO .....	21
Figure II.13: Le MIMO massive .....	22
Figure II.14: Système MU-MIMO massive dans la 5G NR .....	24

## Chapitre III

Figure III.1: Organigramme des différentes étapes d'un design sous HFSS .....	27
Figure III.2: Géométrie de l'antenne patch triangulaire, (a) vue de dessus (b) vue de profil .....	29
Figure III.3: Le coefficient de réflexion d'antenne patch triangulaire .....	30
Figure III.4: Les diagrammes de rayonnement en 2D de l'antenne patch triangulaire .....	31
Figure III.5: Les diagrammes de rayonnement en 3D de l'antenne patch triangulaire .....	31
Figure III.6: L'effet de la longueur du substrat $L_S$ .....	32
Figure III.7: L'effet de largeur du substrat $W_S$ .....	32
Figure III.8: L'effet de longueur du patch $L_P$ .....	33
Figure III.9: L'effet de largeur du patch $W_P$ .....	33

Figure III.10: L'effet de largeur de la ligne d'alimentation $W_f$ .....	34
Figure III.11: L'effet de l'écart $g$ .....	34
Figure III.12: L'antenne MIMO 2x2 (1) .....	36
Figure III.13: L'antenne MIMO 2x2 (2) .....	36
Figure III.14: L'antenne MIMO 2x2 (3) .....	37
Figure III.15: Les paramètres S de l'antenne MIMO 2x2 (1) .....	38
Figure III.16: Les paramètres S de l'antenne MIMO 2x2 (2) .....	38
Figure III.17: Les paramètres S de l'antenne MIMO 2x2 (3) .....	38
Figure III.18: Facteur ECC12 des antennes MIMO 2x2 (1), (2) et (3) .....	39
Figure III.19: Facteur DG12 des antennes MIMO 2x2 (1), (2) et (3) .....	39
Figure III.20: L'antenne MIMO 4x4 (1) .....	40
Figure III.21: L'antenne MIMO 4x4 (2) .....	41
Figure III.22: L'antenne MIMO 4x4 (3) .....	42
Figure III.22: Paramètres S de l'antenne MIMO 4x4 (1) .....	43
Figure III.23: Paramètres S de l'antenne MIMO 4x4 (2) .....	43
Figure III.24: Paramètres S de l'antenne MIMO 4x4 (3) .....	43
Figure III.25: Facteur ECC12 des antennes MIMO 4x4 (1), (2) et (3) .....	44
Figure III.26: Facteur ECC13 des antennes MIMO 4x4 (1), (2) et (3) .....	44
Figure III.27: Facteur ECC14 des antennes MIMO (1), (2) et (3) .....	45
Figure III.28: Facteur DG12 des antenne MIMO 4x4 (1), (2) et (3) .....	45
Figure III.29: Facteur DG13 des antennes MIMO 4x4 (1), (2) et (3) .....	46
Figure III.30: Facteur DG14 des antennes MIMO 4x4 (1), (2), et (3) .....	46
Figure III.31: L'antenne MIMO 4x4 (2) sous logiciel CST .....	47
Figure III.32: Paramètres S avec les logiciels HFSS et CST .....	47
Figure III.33: Le facteur ECC avec les logiciels HFSS et CST .....	48
Figure III.34: Le facteur DG avec les logiciels HFSS et CST .....	48

# Liste des tableaux

## Chapitre III

Tableau III.1 : Paramètres géométriques de l'antenne conçue .....	29
Tableau III.2: Paramètres géométriques de l'antenne MIMO 2x2 de différentes configurations .....	37
Tableau III.3: Paramètres géométriques de l'antenne MIMO 4x4 (1) .....	40
Tableau III.4: Paramètres géométriques de l'antenne MIMO 4x4 (2) .....	41
Tableau III.5: Paramètres géométriques de l'antenne MIMO 4x4 (3) .....	42

# Introduction Générale

## **Introduction Générale**

Le monde des télécommunications est en pleine mutation avec l'arrivée de la technologie 5G. Cette nouvelle génération de réseaux mobiles promet de révolutionner notre façon de vivre, de travailler et d'interagir avec le monde qui nous entoure. La 5G offre des vitesses de transmission de données sans précédent, une latence ultra-faible et une capacité réseau accrue, ouvrant la porte à une multitude d'applications innovantes.

Pour concrétiser les promesses de la 5G, il est essentiel de disposer d'antennes performantes et adaptées aux nouvelles exigences. Les antennes jouent un rôle crucial dans la transmission et la réception des signaux sans fil, et leur conception est un défi majeur pour les ingénieurs.

Ce mémoire s'inscrit dans ce contexte et vise à explorer les défis et les opportunités liés à la conception d'antennes performantes pour la 5G. En particulier, nous nous concentrons sur la conception et la simulation d'une antenne microruban pour les applications 5G dans la bande de fréquences des 28/38 GHz.

Le mémoire commence par une présentation de la technologie 5G, en abordant l'historique des réseaux mobiles, L'architecture et les caractéristiques clés de la 5G.

Ensuite, le mémoire explore le domaine des antennes pour les applications 5G. Il présente les caractéristiques et les différents types d'antennes.

Le cœur du mémoire présente le processus de conception et de simulation d'une antenne microruban pour la 5G dans la bande de fréquences des 28/38 GHz. Le logiciel HFSS est utilisé pour simuler les performances de l'antenne proposée en termes de gain, de diagramme de rayonnement, de bande passante et le couplage mutuel.

Les résultats obtenus de la simulation de l'antenne microruban sont ensuite présentés et analysés. Les performances de l'antenne en termes de gain, de diagramme de rayonnement, de bande passante et le couplage mutuel sont discutés et évalués par rapport aux exigences des applications 5G.

# Chapitre I

## *La Technologie 5G*

# Chapitre I : La Technologie 5G

## I.1. Introduction

Le succès des réseaux filaires d'une part, et le désir des utilisateurs de s'affranchir des limites du filaire pour gagner en liberté d'autre part, ont fortement encouragé le développement d'un nouveau type de réseaux : les réseaux mobiles. Ceux-ci offrent des avantages remarquables, évitant les contraintes du câblage et permettant aux utilisateurs de rester connectés tout en se déplaçant dans une zone géographique donnée, offrant ainsi un environnement plus flexible. Le développement des réseaux mobiles n'a cessé de croître, avec l'avènement successif de plusieurs générations : 1G, 2G, 3G, 4G et 5G. Dans ce contexte, la première partie de ce chapitre présente de manière générale et chronologique ces cinq générations. La seconde partie porte sur les technologies à l'étude et les applications visées pour le réseau de 5ème génération.[1, p. 3]

## I.2. Historique des réseaux mobiles

### I.2.1. L'apparition de la 1G

La première génération de téléphonie mobile (1G) fonctionnait sur un système analogique et comprenait des appareils relativement encombrants. Les principaux standards de cette génération étaient [2]:

- AMPS (Advanced Mobile Phone System)
- TACS (Total Access Communication System)
- ETACS (Extended Total Access Communication System)

Malgré leur introduction en 1982, les réseaux cellulaires 1G n'ont pas connu le succès escompté en raison de problèmes de communication et de la qualité médiocre des premiers téléphones portables. Ces systèmes analogiques ont finalement été abandonnés au profit de la deuxième génération (2G) quelques années plus tard, au début des années 1990.

### I.2.2. La deuxième génération 2G

La 2ème génération (2G) a marqué une rupture en passant de l'analogique au numérique pour la voix et les données. Les principaux standards 2G sont [2]:

Le GSM, très utilisé en Europe fin 20ème siècle, opérant sur les bandes 900/1800 MHz, plus élevées que les 850/1900 MHz de la 1G aux États-Unis. Le GSM permettait les communications mobiles et avec le réseau fixe.

- Le CDMA utilisant l'étalement de spectre pour transmettre sur une large bande.
- Le TDMA découpant les canaux dans le temps pour augmenter le débit simultané.

Des extensions du GSM ont été développées pour accroître les débits:

- Le GPRS (2.5G) permettait théoriquement 114 kbps mais environ 40 kbps en pratique.
- L'EDGE (2.75G) quadruplait les débits du GPRS jusqu'à 384 kbps théoriques, ouvrant la voie aux applications multimédias.

### **I.2.3. La troisième génération 3G**

Les spécifications IMT-2000 (International Mobile Telecommunications for the year 2000) de l'UIT définissent les caractéristiques clés de la 3ème génération (3G) de téléphonie mobile [2]:

- Hauts débits de transmission : 144 kbps en mobilité totale, 384 kbps pour une utilisation piétonne, jusqu'à 2 Mbps en zone réduite fixe.
- Compatibilité mondiale des réseaux et services 3G.
- Rétrocompatibilité avec les fonctionnalités 2G comme les messages et le multimédia.

La principale norme 3G en Europe est l'UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), utilisant le codage W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access). L'UMTS opère sur une bande de 5 MHz pour transférer voix et données avec des débits allant de 384 kbps à 2 Mbps.

### **I.2.4. La quatrième génération 4G**

La 4G est la nouvelle génération de normes pour les réseaux mobiles [2]. Elle repose sur la norme LTE (Long Term Evolution) qui se déploie progressivement à travers le monde. Contrairement à la 3G où les données internet et les conversations téléphoniques étaient séparées avec un débit partagé entre utilisateurs, la 4G unifie toutes ces données pour garantir un meilleur transfert. Les débits théoriques de la 4G vont de 100 Mbit/s jusqu'à 1 Gbit/s, bien supérieurs à la fibre optique actuelle. Cependant, en pratique, les débits réels sont pour l'instant de quelques dizaines de Mbit/s seulement, la bande passante étant partagée entre les différents utilisateurs d'une même zone. L'avantage clé de la 4G est donc d'offrir des débits mobiles nettement plus élevés que les générations précédentes, même si les performances maximales théoriques ne sont pas encore atteintes sur le terrain.

### **I.2.5. La cinquième génération 5G**

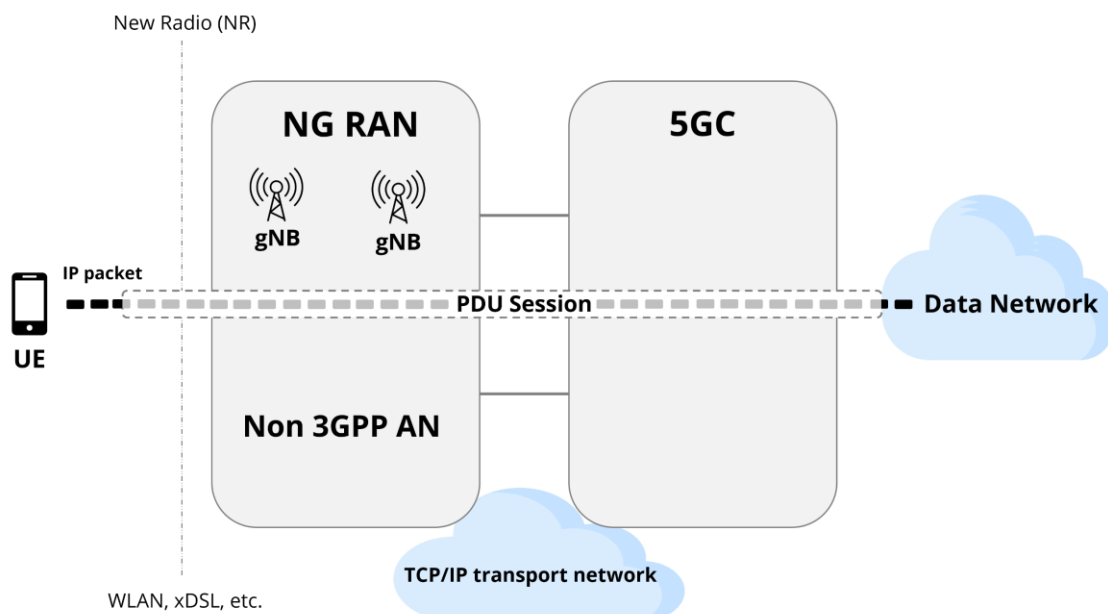
La 5ème génération (5G) de téléphonie mobile, qui succède à la 4G [2], est entrée sur le marché fin 2019 pour une commercialisation au début 2021. Elle offre une capacité de données extraordinaire et la possibilité de connecter un nombre illimité d'appels simultanément.

Par rapport aux générations précédentes, la technologie 5G apportera des débits encore plus élevés, avec un temps de latence (délai) nettement réduit. Elle permettra également une diffusion quasi-infinie des données sur les tout derniers systèmes d'exploitation mobiles.

Les avancées clés de la 5G sont donc des vitesses de transfert accrues, une latence minimale et un réseau capable de gérer un très grand nombre de connexions mobiles en parallèle pour répondre aux besoins exponentiels en bande passante.

### I.3. L'architecture de la 5G

Un réseau 5G est principalement composé de deux éléments clés [3]: le réseau d'accès 5G (AN) et le réseau cœur 5G. Le réseau d'accès 5G comprend la nouvelle génération de réseau d'accès radio (NG-RAN) qui utilise l'interface 5G NR, et/ou des réseaux d'accès non-3GPP connectés au réseau cœur 5G. Ces différents composants sont interconnectés via un réseau de transport sous-jacent basé sur le protocole TCP/IP, qui prend en charge les exigences requises en termes de qualité de service (QoS). En substance, le cœur de réseau 5G est relié au réseau d'accès radio NG-RAN 5G ainsi qu'aux éventuels réseaux non-3GPP par l'intermédiaire d'un réseau de transport IP, assurant ainsi la qualité de service nécessaire.



**Figure I.1: Architecture de la 5G**

Le réseau 5G connecte les équipements utilisateurs (UE) aux réseaux de données externes, comme illustré sur la Figure I.1. La session PDU représente le service de connectivité 5G, constitué d'une séquence de tunnels NG dans le cœur 5G (5GC) et d'un ou plusieurs porteuses radio à l'interface radio. Cet ensemble de "tubes" connecte étroitement l'UE à ses fonctions de contrôle et au réseau de données externe pour l'échange du trafic utilisateur. En

d'autres termes, pour permettre l'échange de données entre un terminal utilisateur et un réseau externe, le réseau 5G établit une session PDU. Celle-ci est composée de tunnels au sein du cœur 5G ainsi que de porteuses radio, formant un chemin dédié et sécurisé pour acheminer le trafic de données de l'utilisateur de bout en bout. Le réseau d'accès radio nouvelle génération (NG-RAN).

Le NG-RAN (Next Generation Radio Access Network) est la composante radio du réseau 5G, constitué d'un ensemble de stations de base appelées gNB (gNodeB), comme l'illustre la Figure I.2. Les gNB sont connectées au cœur de réseau 5G (5G Core) au moyen d'interfaces logiques. Afin d'optimiser la gestion de la mobilité des terminaux et la coordination pour limiter les interférences, les gNB peuvent également être interconnectées entre elles via l'interface  $X_n$ . D'un point de vue architectural, un gNB peut être décomposé en différents éléments fonctionnels, selon une structure centralisée. Celle-ci comprend une unité centrale (gNB-CU) ainsi qu'une ou plusieurs unités distribuées (gNB-DU) reliées à des têtes radio distantes (RRH). L'unité centrale se subdivise elle-même en deux parties distinctes : une unité de plan de contrôle (gNB-CU-CP) et une unité de plan utilisateur (gNB-CU-UP).

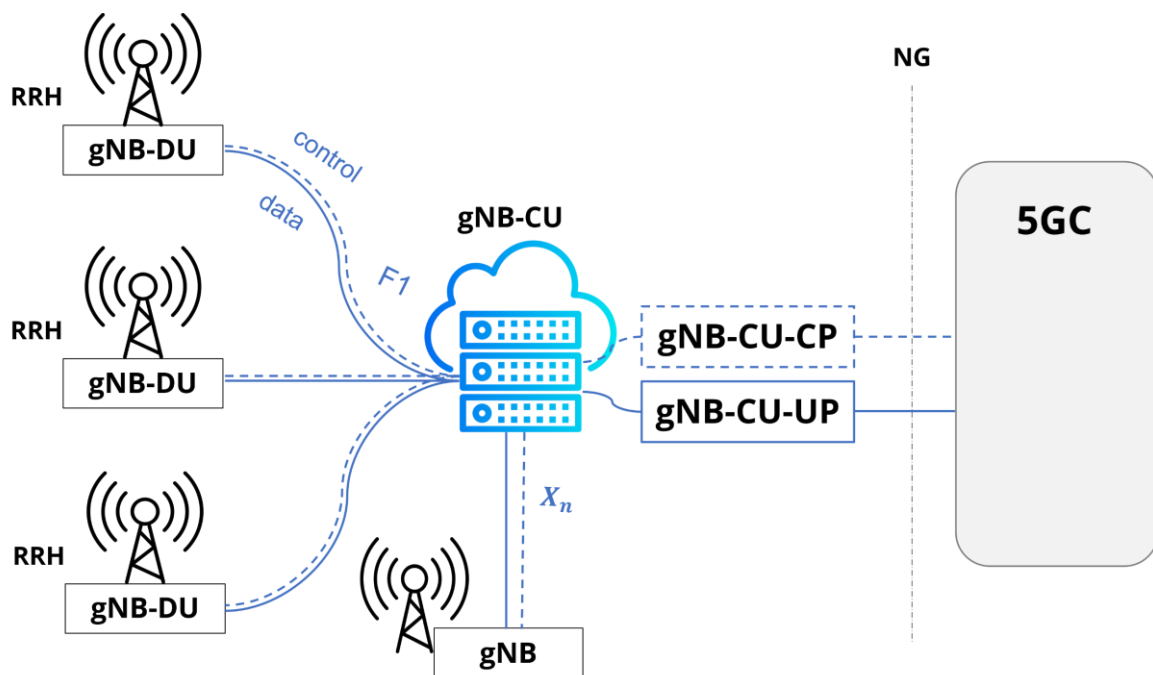
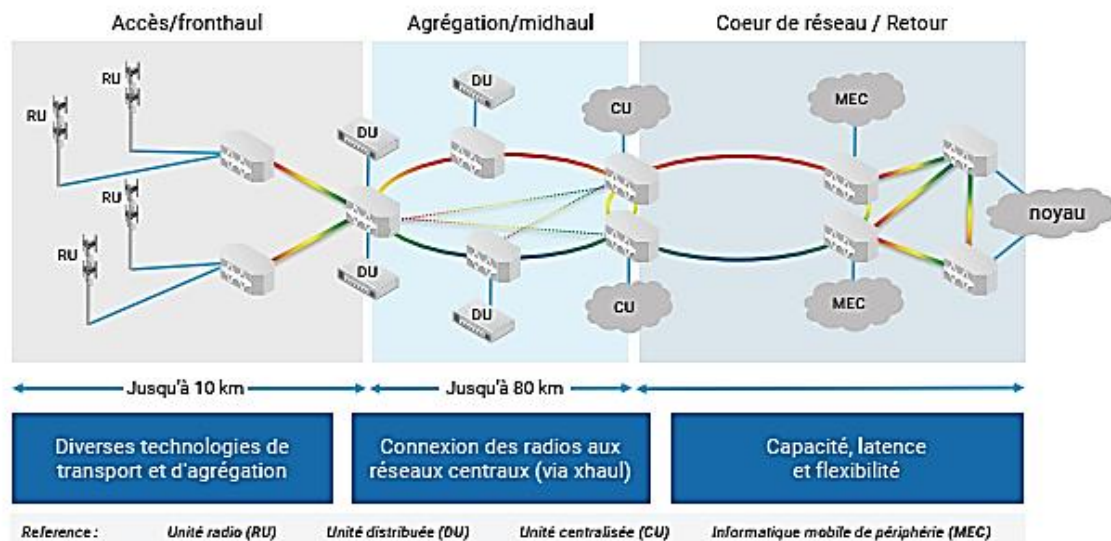


Figure I.2: Schéma du Réseau d'Accès Radio de Nouvelle Génération (NG-RAN)

## I.4. Les caractéristiques clés de la 5G

### I.4.1. Interface radio NR

La 5G introduit l'eCPRI [4], un nouveau protocole qui améliore le débit de la connexion fronthaul reliant l'unité d'antenne (UA) à l'unité de bande de base (EF). L'eCPRI utilise Ethernet comme couche physique et fonctionne sur une connexion fibre jusqu'à l'antenne (FTTA), permettant d'atteindre des vitesses de liaison rapides de 10 Gbit/s et 25 Gbit/s, et d'utiliser la bande passante fronthaul plus efficacement. La communication entre l'unité centralisée (CU) et l'unité distribuée (DU) est gérée par une autre pile de protocoles Ethernet appelée interface F1. Étant donné que les fonctions d'unité radio, d'unité distribuée et même d'unité centralisée peuvent être regroupées dans un seul équipement, les sites cellulaires peuvent être connectés au reste de l'infrastructure réseau par l'eCPRI ou l'interface F1, selon l'architecture choisie par l'opérateur.



**Figure I.3: Segments de liaisons du réseau d'accès radio**

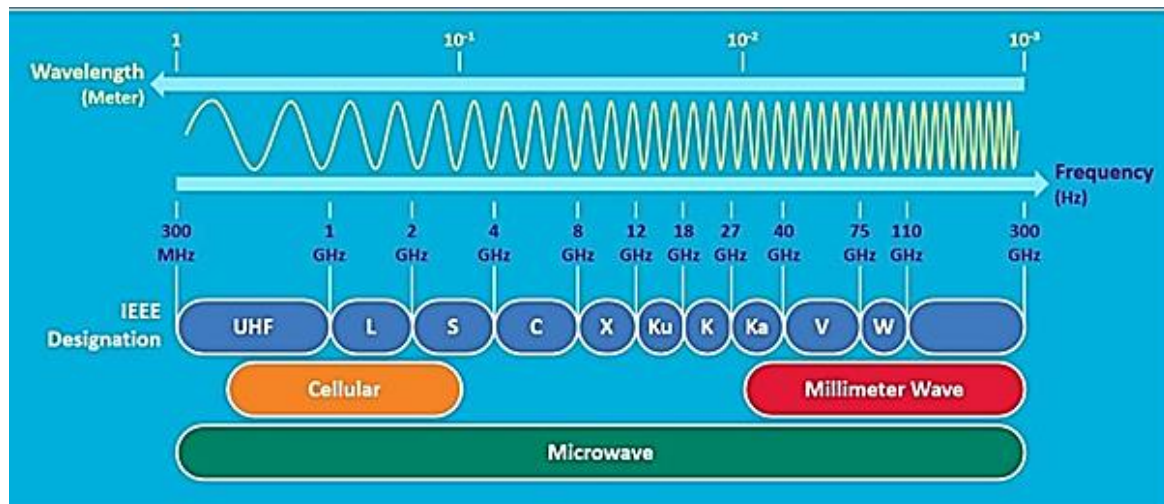
Une autre amélioration architecturale introduite par la 5G est l'informatique mobile en périphérie (MEC). Le MEC permet aux opérateurs de déployer des ressources informatiques plus proches de la périphérie du réseau, offrant deux avantages clés. Premièrement, cela réduit la latence et permet des temps de réponse plus rapides pour les applications. Deuxièmement, en réduisant le nombre de paquets transitant par le cœur de réseau, cela permet de diminuer l'encombrement dans cette partie centrale.

### I.4.2. Ondes millimétriques (mmWave)

Les ondes millimétriques, dont les fréquences se situent entre 30 GHz et 300 GHz [5], correspondant à des longueurs d'onde de 1 mm à 1 cm, sont considérées comme une solution

prometteuse et pratique pour les futurs réseaux cellulaires 5G. Cependant, à mesure que le nombre d'appareils électroniques communiquant sur une même bande de fréquences augmente, cette bande devient de plus en plus encombrée, entraînant une dégradation de la qualité de service. La Figure I.7 illustre ce phénomène d'encombrement spectral croissant.

Exploiter des fréquences plus élevées et une plus large bande spectrale est essentiel pour réduire la congestion des réseaux. Les hautes fréquences permettent de transmettre un plus grand débit d'informations par seconde. Et un spectre élargi offre la possibilité d'augmenter le nombre de canaux de transmission disponibles. Cependant, les ondes millimétriques présentent quelques inconvénients. Elles traversent difficilement les obstacles, ont une portée plus limitée, et ont tendance à être absorbées par des éléments comme les murs, les arbres ou la pluie. Pour surmonter ces défis, le déploiement de nouvelles technologies s'impose, l'antenne étant l'élément clé à optimiser.

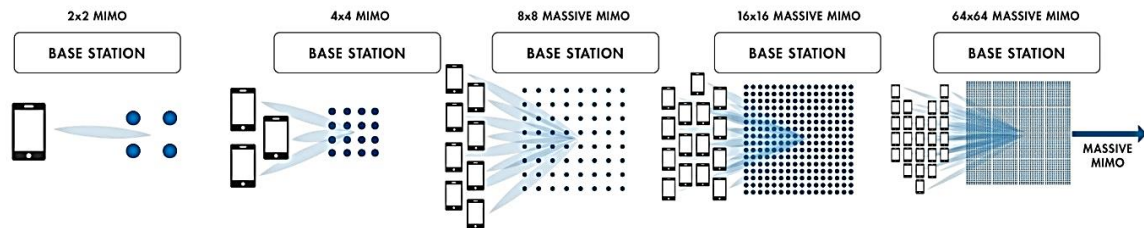


**Figure I.4: Onde millimétrique dans la bande de fréquences**

#### I.4.3. MIMO massif

La technologie MIMO (multiplexage d'entrées multiples et sorties multiples) n'est pas nouvelle [6], étant déjà utilisée dans les réseaux 4G LTE. Cependant, son intégration dans la 5G permettra de remédier aux problèmes de propagation rencontrés aux fréquences plus élevées (bande 3,5 GHz et ondes millimétriques). Le MIMO consiste à équiper une station de base d'un grand nombre de minuscules antennes. En 4G, on compte une dizaine de micro-antennes par station environ. Mais pour la 5G et la nécessité de desservir davantage de petites cellules et de terminaux, le MIMO massif franchit une nouvelle étape en concentrant plus de 128 micro-antennes par station (et probablement encore plus à l'avenir). Cette technique permet

d'augmenter le débit de données en exploitant diverses techniques de multiplexage. Mais elle offre également une fonctionnalité intéressante : la formation de faisceaux ou "beamforming".



**Figure I.5: Le MIMO massif illustré**

#### **I.4.4. Formation de faisceaux (Beamforming)**

Le beamforming, ou formation de faisceaux, est une technique utilisée dans les réseaux 5G qui permet de concentrer le signal dans une direction spécifique, vers l'utilisateur qui en a besoin, plutôt que de diffuser le signal dans toutes les directions. Ce principe est similaire à celui d'une barre de son home cinéma qui dirige le son vers la zone d'écoute désirée. Un logiciel contrôle un ensemble d'antennes émettrices pour que leurs signaux se combinent de manière constructive à l'endroit ciblé par l'utilisateur, et se neutralisent ailleurs. Les faisceaux ne sont émis que lorsqu'un appareil (smartphone, tablette, ordinateur) doit se connecter au réseau. Ainsi, le signal est personnalisé et optimisé pour chaque utilisateur. L'avantage majeur du beamforming est un gain d'énergie considérable. Grâce à cette technique et aux antennes MIMO adaptatives, l'énergie n'est pas gaspillée en émissions inutiles. Les antennes relais n'émettent que lorsque c'est nécessaire, réduisant ainsi la consommation énergétique et l'impact environnemental. [1, p. 41-42]

### **I.5. Conclusion**

Ce chapitre a été consacré à la technologie de 5ème génération de réseaux mobiles. La 1ère partie qui a décrit l'historique et l'évolution des réseaux mobiles, puis la 2ème partie qui a représenté l'architecture de la 5G et ses caractéristiques clés. Chaque génération de réseaux mobiles offre de nouveaux services et toujours développe son fonctionnement et augmente les débits de transmission de données mobiles par l'extension de bande de fréquence utilisée. Donc notre objectif était de savoir tout ce qui concerne la technologie de la 5G de réseaux mobiles et comment se fonctionne.

# Chapitre II

*L'Art des Antennes 5G*

# Chapitre II : L'Art des Antennes 5G

## II.1. Introduction

Les antennes ont pour fonction principale d'émettre des ondes électromagnétiques dans le milieu ambiant, ou au contraire, de capter celles qui s'y propagent. Dans ce chapitre, on va adresser les paramètres caractéristiques d'une antenne, les différents types d'antennes, et la technologie MIMO pour savoir l'art des antennes de la 5G et ce qui effectue-la.

## II.2. Paramètres caractéristiques d'antennes

L'antenne est un transducteur électromagnétique bidirectionnel qui assure l'interface entre les circuits guidés et l'espace libre [7]. En émission, elle convertit le signal électrique guidé en une onde électromagnétique rayonnée, et inversement en réception. Son rôle est primordial pour optimiser le transfert d'énergie entre les deux milieux distincts.

De nombreux paramètres intrinsèques régissent les performances d'une antenne. Au niveau circuit, on considère l'impédance d'entrée  $Z_{in}$  et le coefficient de réflexion  $\Gamma$  qui conditionnent l'adaptation d'impédance. En rayonnement, les grandeurs clés sont la directivité  $D$ , le gain réalisé  $G$  qui tient compte des pertes, l'efficacité de rayonnement  $\eta_{ray}$ , ainsi que les diagrammes de rayonnement 3D.

Les fonctions majeures d'une antenne sont:

- L'adaptation d'impédance avec le front end RF pour un transfert d'énergie maximal
- La formation de faisceaux dans les directions désirées par une directivité adéquate
- La transmission/réception du signal modulé avec un minimum de distorsions

On distingue deux classes de paramètres. Ceux liés à l'aspect circuit ( $Z_{in}$ ,  $\Gamma$ ) et ceux caractérisant le rayonnement ( $D, G, \eta_{ray}, diagrammes$ ). Le bilan de puissance rayonnée/absorbée est aussi un critère déterminant à prendre en compte lors de la conception.

### II.2.1. Le diagramme de rayonnement

La caractérisation du rayonnement de l'antenne se fait par la représentation graphique du diagramme de rayonnement [7]. Celui-ci décrit la répartition spatiale de la densité de puissance, de gain ou de champ rayonné sous forme normalisée par rapport au rayonnement maximal:

$$r(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_{max}} \quad (\text{II.1})$$

Où :

$P(\theta, \varphi)$  représente la puissance rayonnée par l'antenne dans une direction angulaire quelconque définie par les angles  $\theta$  (élévation) et  $\varphi$  (azimut).

$P_{max}$  désigne la puissance rayonnée maximale.

On trace généralement les diagrammes de rayonnement dans les plans E ( $\varphi=cste$ ) où le champ électrique est maximal, et H ( $\theta=cste$ ) pour le champ magnétique maximal. Un diagramme représente la directivité de l'antenne, définie comme la répartition de la puissance rayonnée par unité d'angle solide  $d\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi$ . L'énergie n'est pas rayonnée de manière isotrope mais forme des lobes de rayonnement principaux et secondaires dans les directions privilégiées par la géométrie de l'antenne. On utilise différents types de représentations selon la grandeur (champ, puissance, gain), le mode (linéaire, log) et la dimension (2D, 3D). Le choix se fait en fonction des caractéristiques à mettre en évidence (lobes principaux, secondaires, niveaux, polarisation, etc.). Les diagrammes de rayonnement condensent donc l'ensemble des propriétés de directivité de l'antenne dans les différentes directions de l'espace. [7]

### II.2.2. Le coefficient de réflexion

Lorsqu'une onde électromagnétique se propage d'un milieu à un autre, une partie de l'énergie est réfléchi à l'interface en raison de la différence d'impédances caractéristiques [7]. Ce phénomène intervient notamment à la transition entre la ligne d'alimentation et l'antenne.

Le coefficient de réflexion  $\Gamma$  (ou  $S_{11}$  en notation d'ondes) quantifie ce rapport entre les amplitudes des ondes incidente et réfléchi. Pour une antenne d'impédance d'entrée  $Z_e(f)$  connectée à une ligne de transmission d'impédance caractéristique  $Z_0$  (typiquement  $50\Omega$ ), on a :

$$\Gamma = S_{11} = \frac{Z_e(f) - Z_0}{Z_e(f) + Z_0} \quad (\text{II.2})$$

On exprime généralement  $|\Gamma|$  ou  $|S_{11}|$  en décibels ( $dB$ ) :

$$|S_{11}|_{dB} = 20 \log|\Gamma| \quad (\text{II.3})$$

Le coefficient de réflexion permet ainsi d'évaluer le niveau d'adaptation d'impédance de l'antenne. Plus  $|\Gamma|$  est faible (tendant vers 0), meilleure est l'adaptation et la puissance transférée. A l'inverse, une désadaptation se traduit par une réflexion importante ( $|\Gamma| \rightarrow 1$ ).

La fréquence de résonance d'une antenne correspond au minimum de  $|S_{11}(f)|$ , soit l'adaptation optimale. Le suivi fréquentiel du S11 renseigne donc sur la bande passante opérationnelle de l'antenne.

### II.2.3. Le gain

Le gain  $G(\theta, \varphi)$  représente l'aptitude d'une antenne à rayonner de manière directive dans une direction angulaire particulière  $(\theta, \varphi)$  par rapport à une source isotrope théorique rayonnant uniformément dans toutes les directions de l'espace [7].

Il se définit comme le rapport entre la densité de puissance rayonnée  $P(\theta, \varphi)$  dans la direction considérée et la densité de puissance qu'aurait rayonnée une source isotrope théorique de même puissance totale  $P_a$  répartie uniformément sur  $4\pi$  stéradians:

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_a} \quad (\text{II.4})$$

Où :

$P(\theta, \varphi)$  représente la densité de puissance rayonnée par l'antenne dans une direction angulaire spécifique  $(\theta, \varphi)$ , avec  $\theta$  l'angle d'élévation et  $\varphi$  l'angle azimutal.

$P_a$  désigne la puissance totale rayonnée par l'antenne, intégrée sur l'ensemble des directions de l'espace.

Le gain, sans dimension, s'exprime généralement en décibels isotropiques ( $dBi$ ) qui représentent le niveau par rapport à la source isotrope de référence. Cette grandeur, fortement liée à la directivité de l'antenne, permet de quantifier les directions de rayonnement privilégiées et est un paramètre essentiel de la liaison radio. Un gain élevé dans une direction donnée signifie que l'antenne concentre efficacement son énergie dans ce secteur angulaire. Le gain maximal d'une antenne sans pertes correspond à sa directivité maximum. En pratique, des pertes ohmiques et de désadaptation réduisent légèrement le gain réalisé par rapport à la directivité théorique.

#### II.2.4. La directivité

La directivité quantifie la capacité d'une antenne à concentrer son rayonnement de manière préférentielle dans certaines directions angulaires par rapport à une source isotrope théorique [7]. Elle est définie comme le rapport entre la puissance rayonnée par unité d'angle solide dans une direction particulière  $(\theta, \varphi)$  et la puissance qu'aurait rayonnée une source isotrope de même puissance totale  $P_r$  répartie uniformément :

$$D(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_r} \quad (\text{II.5})$$

Où  $P(\theta, \varphi)$  représente la densité de puissance rayonnée dans la direction angulaire  $(\theta, \varphi)$ , tandis que  $P_r$  correspond à la puissance totale rayonnée par l'antenne sur  $4\pi$  stéradians.

Une antenne très directive aura une directivité  $D(\theta, \varphi)$  élevée dans l'axe principal de rayonnement, avec un lobe fin et une concentration importante de l'énergie. À l'inverse, une faible directivité se traduira par un rayonnement plus uniforme dans toutes les directions de l'espace. Ainsi, plus le lobe principal d'une antenne est étroit, meilleure sera sa directivité maximale. Une grande directivité permet d'optimiser le gain dans l'axe visé et d'augmenter la portée de la liaison. La directivité est donc un paramètre primordial qui détermine la répartition

angulaire de la puissance rayonnée et impacte directement les performances en termes de gain réalisé et d'ouverture du faisceau rayonné.

### II.2.5. Le rendement

Le rendement  $\eta$  d'une antenne correspond au rapport entre la puissance effectivement rayonnée  $P_r$  et la puissance d'alimentation  $P_a$  qui lui est fournie [7]. Il quantifie les pertes intrinsèques subies par l'énergie avant d'être rayonnée dans l'espace libre :

$$\eta = \frac{P_r}{P_a} \quad (\text{II.6})$$

Ce rendement peut également s'exprimer en fonction des résistances équivalentes de l'antenne. On considère alors la résistance de rayonnement  $R_r$ , liée à la puissance transférée sous forme d'onde rayonnée, ainsi que la résistance de pertes  $R_p$  modélisant les pertes ohmiques et diélectriques :

$$\eta = \frac{R_r}{R_r + R_p} \quad (\text{II.7})$$

Un rendement unitaire ( $\eta = 1$  ou 100%) correspondrait à une antenne idéale sans perte, transférant toute la puissance d'alimentation sous forme de rayonnement. En pratique, les différentes sources de pertes (métalliques, diélectriques, désadaptation...) réduisent inévitablement ce rendement en-deçà de 1. Le rendement impacte directement le gain réalisé par l'antenne, ce dernier étant le produit du rendement par la directivité théorique sans pertes. C'est donc un paramètre clé à prendre en compte pour dimensionner les performances réelles d'une antenne en situation opérationnelle.

### II.2.6. L'impédance d'entrée

L'impédance d'entrée représente l'impédance vue par le circuit d'alimentation aux bornes de l'antenne [7]. Formellement, l'impédance d'entrée  $Z_e$  est définie comme le rapport complexe entre la tension  $V_e$  et le courant  $I_e$  aux bornes de l'antenne, conformément à l'équation:

$$Z_e = \frac{V_e}{I_e} = R + jX \quad (\text{II.8})$$

Où  $R$  correspond à la partie réelle, soit la résistance de l'antenne aux bornes considérées, et  $X$  la partie imaginaire représentant la réactance de l'antenne à ces mêmes bornes. Une modélisation précise de l'impédance d'entrée est primordiale pour réaliser une adaptation d'impédance optimale entre l'antenne et son circuit d'alimentation, condition nécessaire pour maximiser le transfert de puissance et assurer des performances accrues pour le système de télécommunications.

### II.2.7. La bande passante

La bande passante d'une antenne représente la plage de fréquences dans laquelle l'antenne présente des performances optimales pour émettre ou recevoir l'énergie électromagnétique dans son environnement [7]. Elle est délimitée par une fréquence minimale  $f_{min}$  et une fréquence maximale  $f_{max}$ , définissant ainsi un domaine de fonctionnement fréquentiel. La bande passante absolue est donnée par l'équation II.9:

$$BP = f_{max} - f_{min} \quad (\text{II.9})$$

La bande passante relative, exprimée en pourcentage, peut être calculée selon l'équation II.10 :

$$BP(\%) = \left[ \frac{f_{max} - f_{min}}{f_c} \right] \times 100 \quad (\text{II.10})$$

Où  $f_c$  représente la fréquence centrale ou de résonance de l'antenne. Une méthode couramment utilisée pour mesurer la bande passante d'une antenne est illustrée sur la Figure II.1.

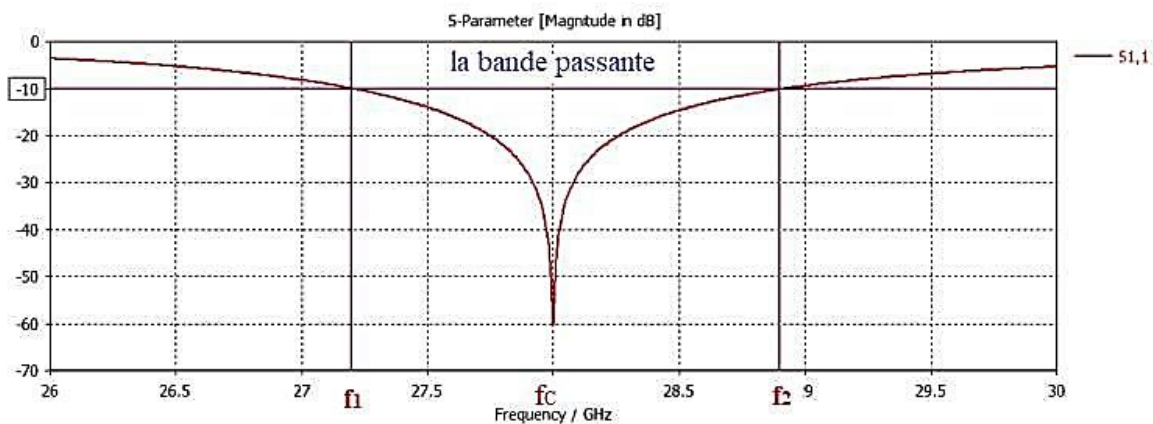


Figure II.1:La bande passante à -10 dB d'une antenne

### II.3. Différents types d'antennes

La grande variété d'antennes existantes peut être classifiée selon différents critères liés à leur géométrie, leurs performances en termes de gain, de directivité et de bande passante [8, p.14]. On distingue ainsi plusieurs catégories principales:

D'un point de vue géométrique, on retrouve les antennes filaires (dipôles, boucles, spirales), les antennes à ouverture rayonnante (cornets, fentes, réflecteurs) et les antennes imprimées ou planaires (patches, dipôles et spirales imprimés).

En ce qui concerne le gain, facteur prépondérant pour les télécommunications, on classe les antennes en gain élevé (cornets), gain moyen (antennes planaires) et gain faible (dipôles, fentes, patches). La forme du diagramme de rayonnement différencie les antennes omnidirectionnelles à couverture azimutale complète (dipôles), celles à faisceau étroit et directif (réseaux

d'antennes) et les antennes large faisceau (planaires). Enfin, du point de vue de la bande passante qui conditionne la capacité de transmission, on oppose les antennes large bande (spirales) aux antennes à bande étroite (patches, fentes).

Les antennes peuvent être classées en deux grandes catégories : les antennes omnidirectionnelles, qui émettent dans toutes les directions, et les antennes directionnelles, qui émettent dans une seule direction définie. Au sein de ces deux catégories, on trouve une multitude de types d'antennes diversifiés, lesquels peuvent être regroupés en familles, où sont illustrées dans la Figure II.1 [7, p. 21]:

### II.3.1. Antenne dipolaire

Elle est constituée de deux fils alignés, alimentés par une ligne bifilaire. Elle est souvent utilisée pour les basses fréquences.

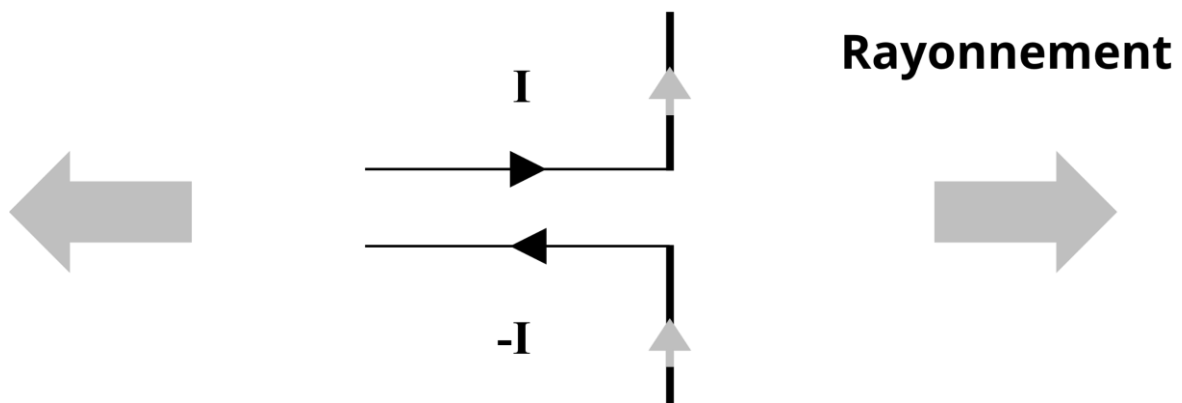
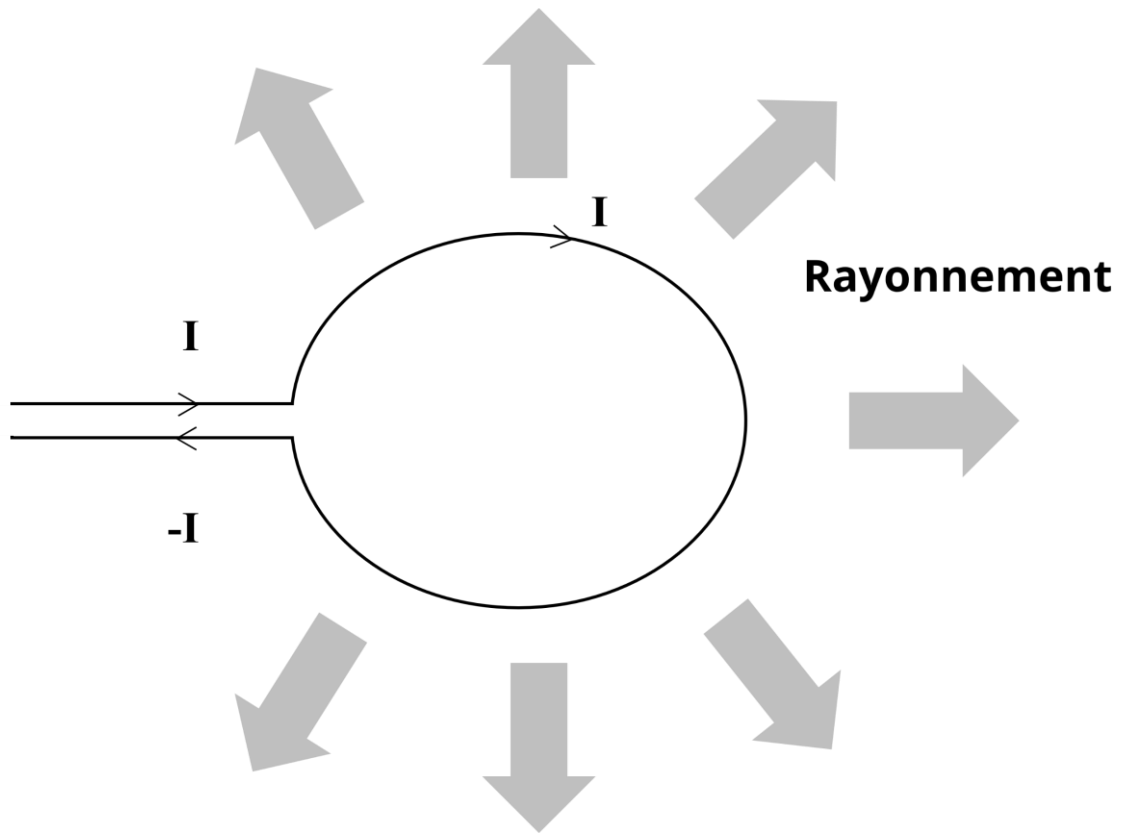


Figure II.2: Antenne dipolaire

### II.3.2. Boucle magnétique

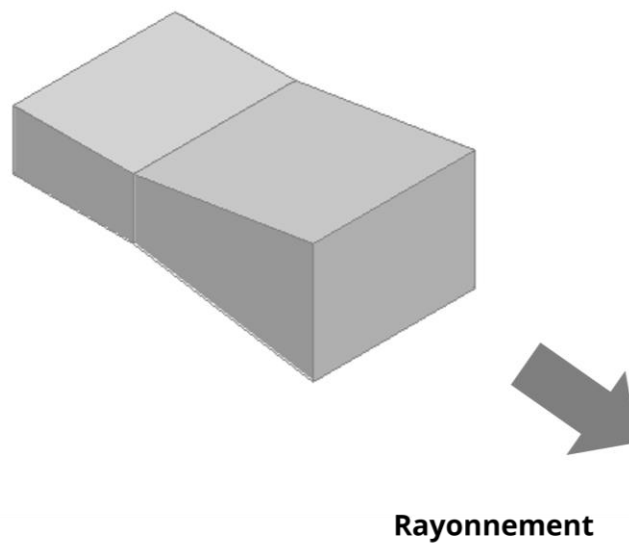
Elle est constituée d'un conducteur circulaire alimenté par un générateur via une ligne bifilaire.



**Figure II.3: Boucle magnétique**

### **II.3.3. Antenne cornet**

C'est un guide d'onde rectangulaire à section variable, permettant de transformer progressivement l'onde guidée en onde rayonnée. Elle est très utilisée en hautes fréquences.



**Figure II.4: Antenne cornet**

### II.3.4. Antenne fente

C'est un guide d'onde rectangulaire percé de fentes sur sa paroi métallique. Le rayonnement est perpendiculaire au plan troué.

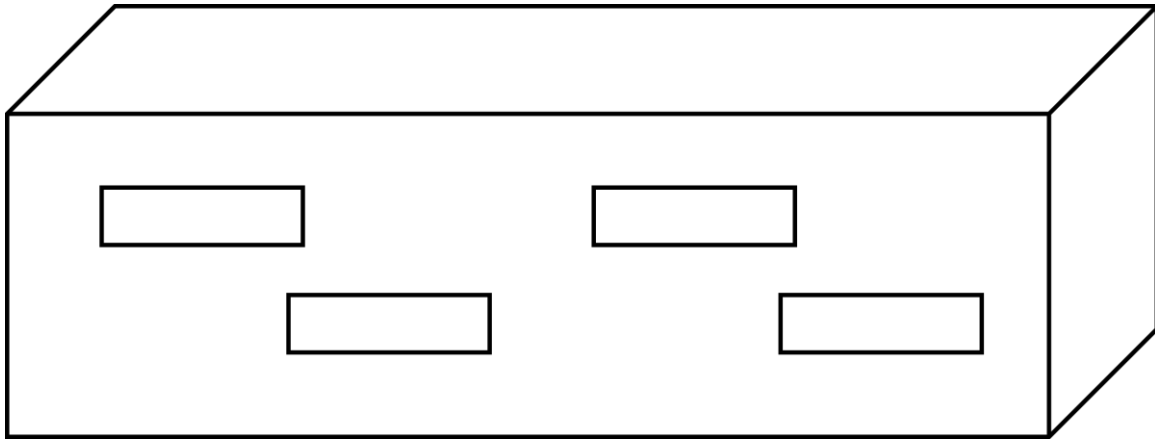


Figure II.5: Antenne fente

### II.3.5. Antenne à réflecteur parabolique

Elle est constituée d'une source d'émission et d'une partie réfléchissante métallique souvent parabolique.

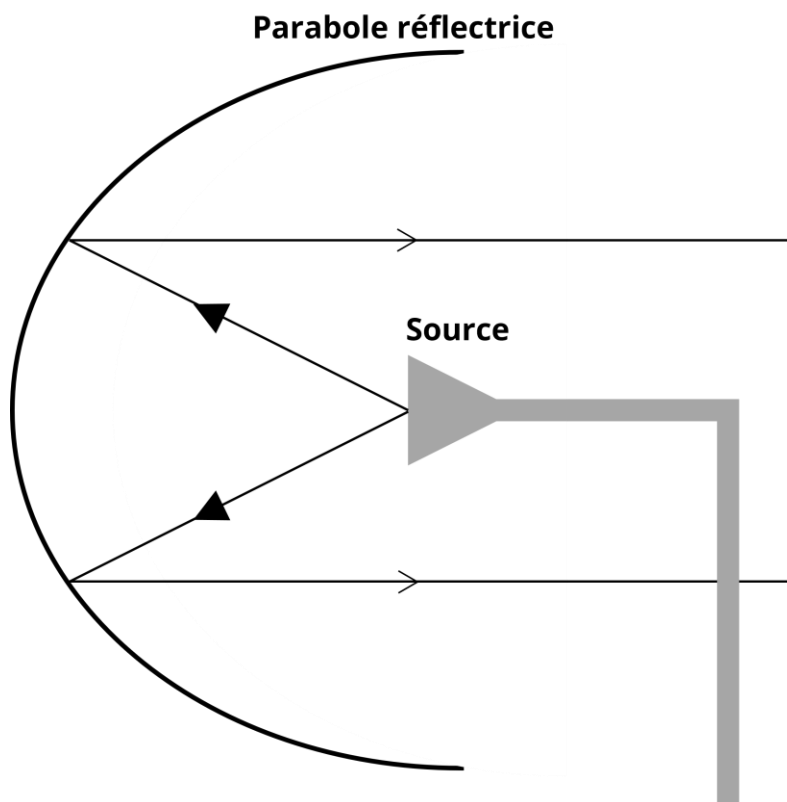
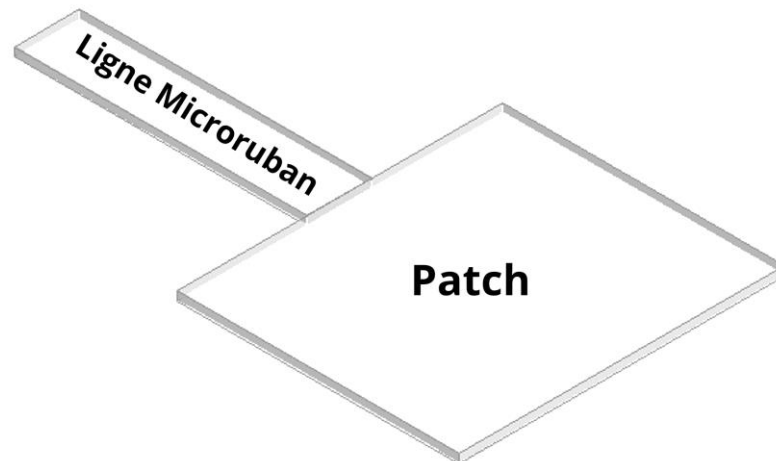


Figure II.6: Antenne à réflecteur parabolique

### **II.3.6. Antenne imprimée ou micro-ruban**

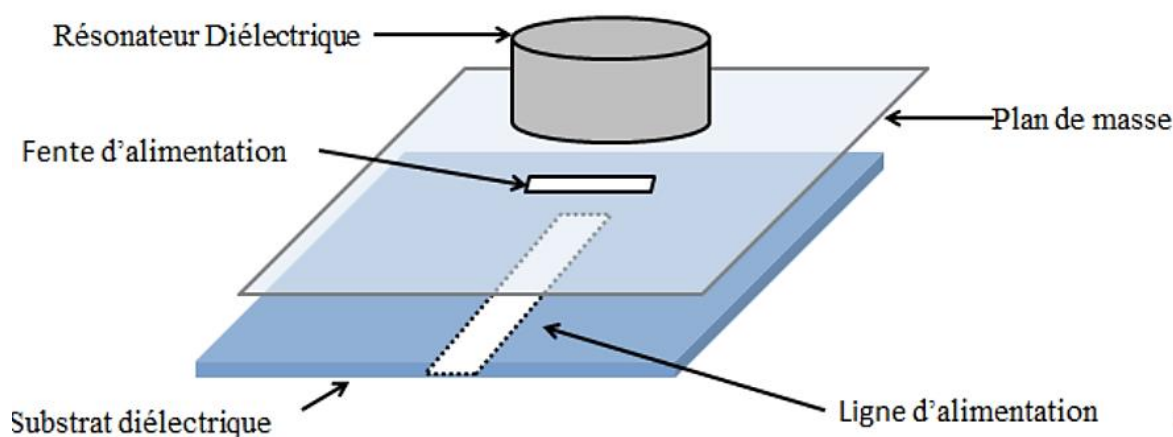
Elles sont un type récent avec un substrat diélectrique, un plan de masse sur une face, et une gravure métallique (patch) rayonnante sur l'autre.



**Figure II.7: Antenne microruban**

### **II.3.7. Antenne à résonateur diélectrique**

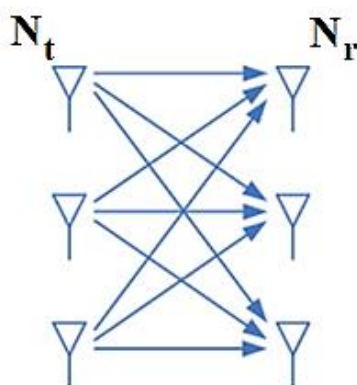
L'antenne à résonateur diélectrique, constituée d'un résonateur diélectrique cylindrique ou annulaire sans partie métallique sur un plan de masse, est excitée par un dispositif d'alimentation comme une ligne micro-ruban couplée à travers une fente rectangulaire découpée dans le plan de masse, ce qui limite les pertes ohmiques [8, p. 23-24]. Initialement utilisées dans les circuits micro-ondes blindés grâce à leur facteur de qualité élevé pour des fonctions de filtrage ou d'oscillation, ces structures voient leur facteur de qualité décroître sensiblement une fois le résonateur laissé en environnement libre, permettant ainsi leur utilisation en tant qu'antennes rayonnantes, la puissance perdue étant alors rayonnée, avec une efficacité d'autant plus grande que le mode est convenablement excité.



**Figure II.8 : Antenne à résonateur diélectrique**

### II.3.8. Antenne MIMO

Contrairement aux systèmes conventionnels SISO à antenne unique, les systèmes MIMO exploitent une pluralité d'antennes à l'émission et à la réception [8, p. 26-27]. Cette architecture permet d'accroître de façon théoriquement linéaire la capacité du lien sans fil avec le minimum entre le nombre d'antennes émettrices  $N_t$  et réceptrices  $N_r$ . Ce gain provient de la combinaison judicieuse des signaux émis et reçus sur les différents trajets indépendants entre les antennes afin de tirer parti de la diversité spatiale pour réduire les effets d'évanouissements ou augmenter le débit. Bien que les premières études sur le sujet ne datent que de quelques années, les systèmes MIMO connaissent un essor rapide avec déjà des applications envisagées pour les réseaux locaux sans fil et les standards mobiles 3G/4G/5G. En plus de repousser la limite de capacité de Shannon, ces systèmes offrent une meilleure robustesse aux évanouissements et interférences comparés aux systèmes SISO, ce qui en fait une technologie prometteuse pour lever les verrous d'encombrement spectral et de débits dans les réseaux sans fil large bande.



**Figure II.9: Systèmes de transmission MIMO**

### II.3.9. Antenne intelligente

Les systèmes à antennes intelligentes ou "smart antennas", un domaine multidisciplinaire en pleine croissance combinant électromagnétisme et traitement du signal [8, p. 27-29]. L'intérêt de ces systèmes réside dans leur capacité à réagir automatiquement et en temps réel aux modifications du canal de propagation, permettant de réduire les niveaux des lobes secondaires dans la direction des interférences tout en maintenant le lobe principal vers l'utilisateur. Deux techniques sont généralement mises en œuvre: les antennes à faisceaux commutés ou les antennes adaptatives. Ces dernières reposent sur un réseau d'antennes couplé à un processeur récepteur adaptatif qui attribue des poids complexes aux éléments du réseau afin d'optimiser le signal de sortie selon des algorithmes de contrôle prédéfinis. L'antenne réseau est ainsi capable de modifier dynamiquement son diagramme de rayonnement, sa réponse fréquentielle et d'autres paramètres pendant son fonctionnement. Contrairement aux systèmes d'antennes classiques émettant largement sans connaissance de la position du récepteur, ce qui pollue l'environnement électromagnétique, les systèmes à antennes intelligentes localisent le mobile pour focaliser l'énergie uniquement dans les directions souhaitées. Cela leur permet de traquer simultanément plusieurs utilisateurs avec un diagramme optimisé dynamiquement de façon plus précise que les faisceaux commutés, mais au prix d'une complexité accrue des algorithmes d'optimisation du rayonnement.

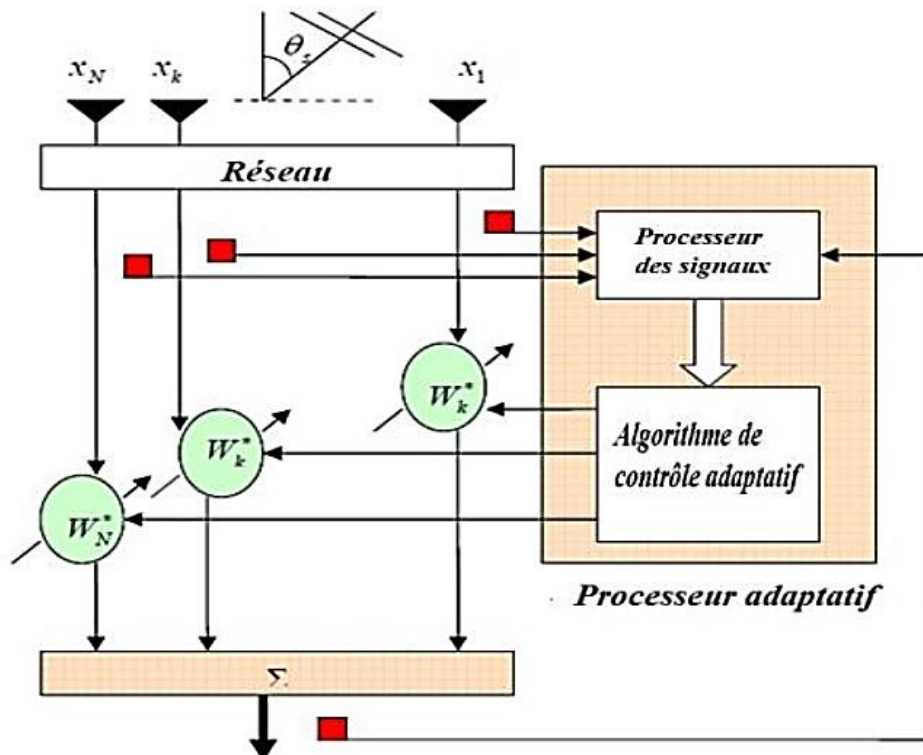


Figure II.10: Schéma représentatif d'une antenne adaptative

## II.4. La technologie MIMO

### II.4.1. MIMO

Les techniques MIMO (Multiple Input Multiple Output) ont vu le jour dans les années 1990 [9, p. 9-10]. Elles visent à augmenter le débit et l'étendue de couverture des réseaux sans fil en tirant parti de l'utilisation simultanée de plusieurs antennes à l'émission et à la réception. Dans ces systèmes multi-antennes, la capacité croît linéairement avec le nombre d'antennes émettrices. Un avantage supplémentaire est leur résistance aux évanouissements et aux interférences. Les systèmes MIMO sont perçus comme une technologie prometteuse pour résoudre les problèmes de congestion et les limites de capacité des réseaux sans fil à large bande.

Les systèmes MIMO peuvent se décliner en différentes configurations. Lorsqu'une seule antenne est utilisée à l'émission et plusieurs à la réception, on parle de configuration SIMO (Single Input Multiple Output). À l'inverse, avec plusieurs antennes à l'émission et une seule à la réception, il s'agit d'une configuration MISO (Multiple Input Single Output). Enfin, si une antenne unique est présente des deux côtés, on a alors affaire à un système SISO (Single Input Single Output).

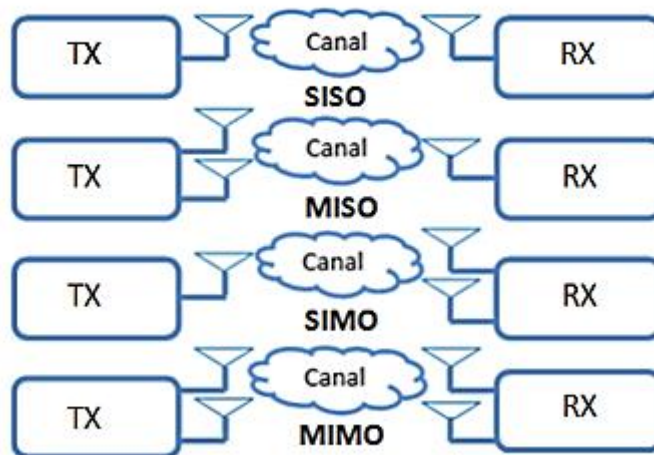


Figure II.11: Schémas représentatifs du SISO, MISO, SIMO et MIMO

### II.4.2. Modèle du canal MIMO

Considérons un système MIMO (illustré par la Figure II.7) constitué de  $N_T$  antennes à l'émission et  $N_R$  antennes à la réception. Les informations sont transmises simultanément par les  $N_T$  antennes émettrices. Durant sa propagation, le signal emprunte plusieurs canaux reliant

chaque antenne d'émission à une antenne de réception. À la réception, on détecte un signal  $y(t) \in \mathbb{C}^{N_R \times 1}$  qui peut s'exprimer comme suit [9]:

$$y(t) = Hx(t) + b(t) \quad (\text{II.11})$$

Où  $H \in \mathbb{C}^{N_R \times N_T}$  présente la matrice du canal,  $x(t) \in \mathbb{C}^{N_T \times 1}$  le signal émis, et  $b(t) \in \mathbb{C}^{N_R \times 1}$  un bruit additif gaussien.

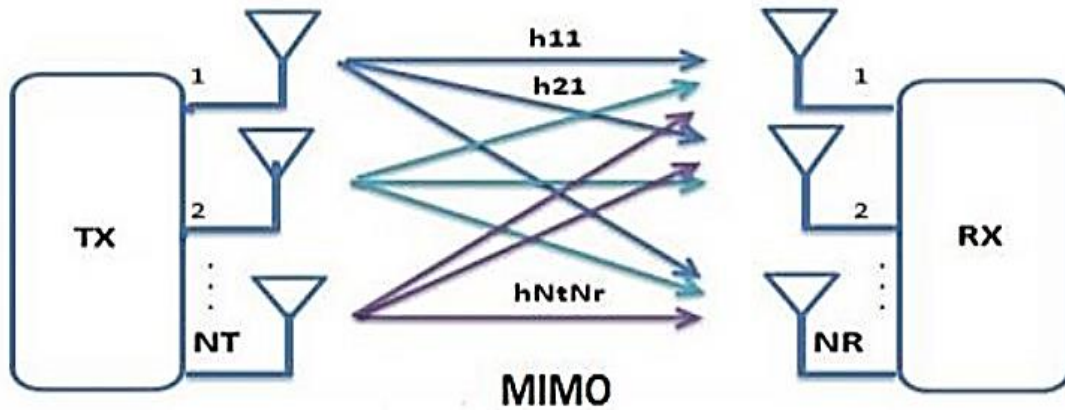


Figure II.12: Système MIMO

$$x(t) = [x_1(t) x_2(t) \dots x_{N_T}(t)] \quad (\text{II.12})$$

$$y(t) = [y_1(t) y_2(t) \dots y_{N_R}(t)] \quad (\text{II.13})$$

Où  $x_i(t)$  représente le signal associé à la  $i^{\text{ème}}$  antenne d'émission, et  $y_j(t)$  le signal correspondant à la  $j^{\text{ème}}$  antenne de réception.

$$H = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \dots & H_{1N_T} \\ H_{21} & H_{22} & \dots & H_{2N_T} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{N_R1} & H_{N_R2} & \dots & H_{N_R N_T} \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

Où  $H_{ij}$  représente le coefficient complexe du canal entre la  $i^{\text{ème}}$  antenne d'émission et la  $j^{\text{ème}}$  antenne de réception. Selon l'environnement de propagation, l'espacement entre les antennes ou même leur polarisation, ces coefficients peuvent présenter un niveau de corrélation plus ou moins élevé entre eux.

### II.4.3. Capacité d'un canal MIMO

La notion de capacité de canal [9], introduite dans les années 1940, mesure la quantité d'information maximale pouvant être transmise par unité de temps et par bande de fréquence à travers un canal particulier. La capacité des systèmes MIMO est un sujet d'actualité dans la littérature. Lorsque le nombre d'antennes varie à l'émetteur, la puissance totale moyenne émise  $P$  reste constante et est répartie de manière uniforme entre les  $N_T$  antennes, chacune émettant

alors une puissance  $\frac{P}{N_T}$ . Cette répartition uniforme est optimale en termes de capacité si aucune connaissance du canal n'est disponible à l'émetteur.

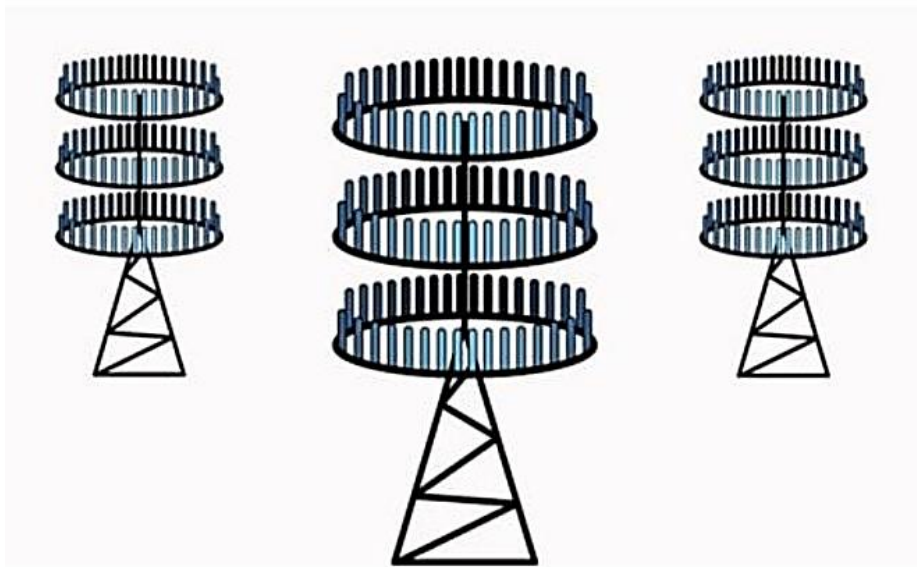
Le calcul de la capacité dépend principalement de deux paramètres, le modèle du canal MIMO et la distribution des puissances entre les antennes émettrices. Elle s'exprime selon la formule suivante :

$$C = \log_2 \left( \det \left[ I_{N_R} + \frac{P}{N_T} \times H \times H^* \right] \right) \text{ b/s/Hz} \quad (\text{II.15})$$

Où  $I_{N_R}$  représente la matrice identité de taille  $N_R$ , et  $H$  la matrice du canal MIMO de dimensions  $N_T \times N_R$ .

#### II.4.4. Technologie de MIMO massive

Le Massive MIMO (Entrées Multiples - Sorties Multiples) [9] est une technologie radio exploitant les communications multi-utilisateurs. Cette approche novatrice a suscité un engouement considérable dans les travaux de recherche ces dernières années. Chaque station de base déploie un réseau d'antennes massives afin de desservir concurremment des dizaines d'équipements utilisateurs au sein d'une cellule donnée. De ce fait, le Massive MIMO est identifié comme l'une des technologies clés pour les futurs réseaux cellulaires de 5ème génération (5G).



**Figure II.13: Le MIMO massive**

Le principe fondamental du Massive MIMO réside dans la multiplication des canaux de transmission entre l'antenne et les objets connectés. Les futures antennes 5G pourront gérer plusieurs centaines de canaux simultanément, permettant ainsi de connecter des milliers d'objets. Cependant, la multiplication de ces signaux multidirectionnels peut engendrer des

interférences perturbatrices que les réseaux 4G peinent à gérer. Cette technologie se caractérise donc par l'utilisation d'un grand nombre de micro-antennes "intelligentes", regroupées sur un même panneau rayonnant (de 8 à 128 actuellement, mais ce nombre devrait croître avec l'utilisation des fréquences millimétriques supérieures à 30 GHz). L'intérêt du déploiement du Massive MIMO est double : d'une part, il permet d'augmenter significativement les débits via le multiplexage spatio-temporel ; d'autre part, il autorise une focalisation de l'énergie sur un terminal donné, améliorant ainsi son bilan de liaison grâce à la formation de faisceaux ou "beamforming". Le Massive MIMO accroît également le nombre d'antennes d'émission (des dizaines voire plus de 100 éléments rayonnants) sur une station de base (Figure II.7).

#### **II.4.5. Les différents types de MIMO massive**

##### **II.4.5.1. SU-MIMO**

La technologie SU-MIMO consiste à accroître les capacités (principalement en débit) entre un émetteur et un récepteur en ajoutant plusieurs antennes de part et d'autre. Ces nombreuses antennes offrent la possibilité, grâce à des algorithmes de décalage temporel. Avec l'utilisation des rebonds naturels des ondes radio sur les obstacles (multipath), on peut générer ce qu'on appelle des flux spatiaux entre l'émetteur et le témoin. Chaque flux spatial offre la possibilité de transférer des données de manière autonome et dans le même temps. Cette méthode, comme son nom l'indique, ne permet que de concentrer la communication des antennes vers un seul récepteur à la fois depuis un seul émetteur.

##### **II.4.5.2. MU-MIMO**

Pour une raison mentionnée plus loin dans ce paragraphe, cette technologie requiert des calculs algorithmiques plus importants. Cela entraîne donc une asymétrie : l'infrastructure peut communiquer avec plusieurs clients en même temps, sans oublier qu'une antenne étend son champ de rayonnement et non seulement vers le client qui l'intéresse. En ce qui concerne ce mode de communication où plusieurs clients doivent recevoir des données dans le même temps, différents protocoles de communication (4G, 802.11ac wave 2, bientôt 5G) ont intégré un mécanisme qui permet à l'infrastructure de déterminer à quelle "position" se trouve le client dans la cellule. Il est possible d'échanger explicitement ces informations avec le client, ou bien le client effectue lui-même une estimation dite « à l'aveugle » en se basant sur les données envoyées par l'infrastructure et de les transmettre ainsi. Effectivement, en décalant légèrement les émissions de données entre les antennes, on peut accroître la puissance de réception du signal dans une zone particulière grâce à l'addition des amplitudes (résonance).

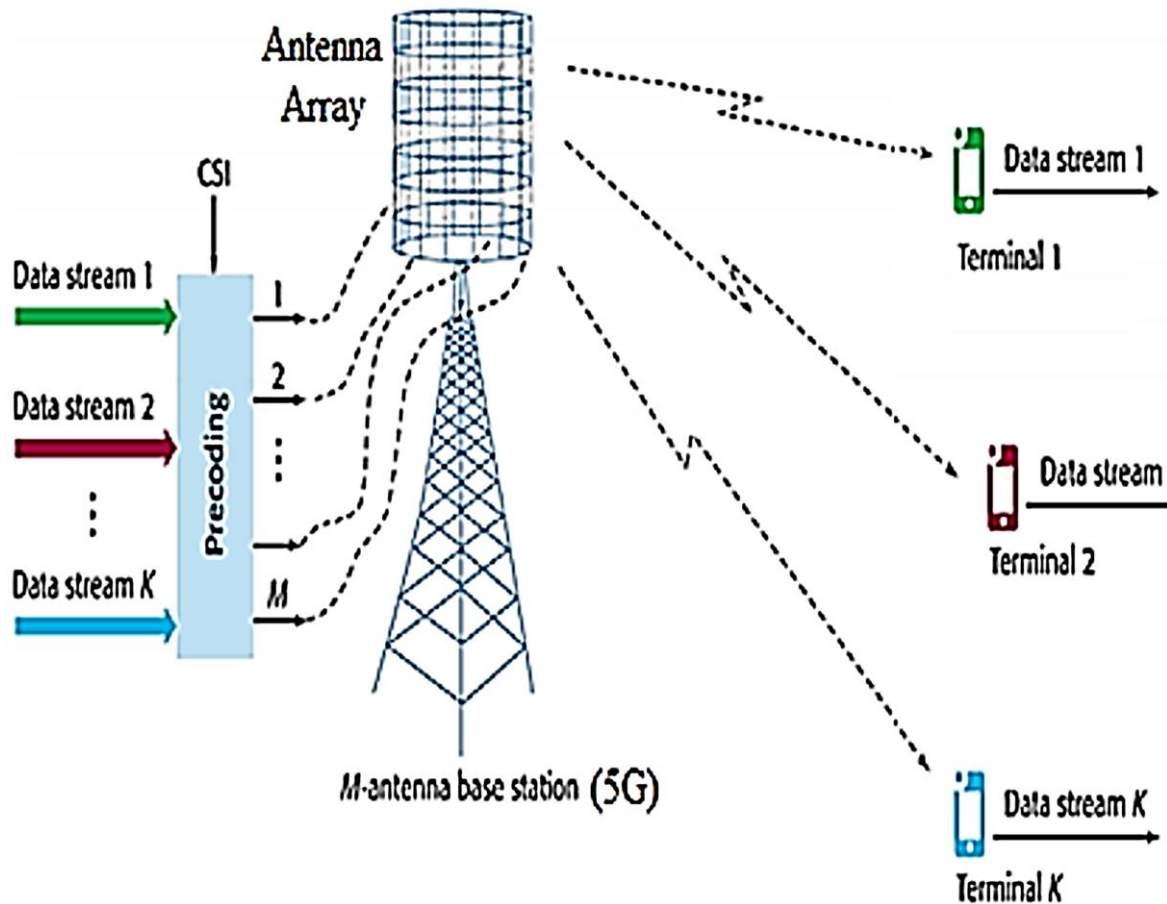


Figure II.14: Système MU-MIMO massive dans la 5G NR

#### II.4.6. Caractéristiques générales des systèmes MIMO Massive

##### II.4.6.1. Diversité

Le principal facteur de perturbation qu'un signal subit lors de sa propagation est le canal de transmission. En effet, à cause des phénomènes de trajets multiples, le signal est soumis à des évanouissements, des décalages fréquentiels ou temporels. Contrairement aux systèmes classiques, les systèmes à diversité tirent avantage de ces types de propagation pour améliorer leurs performances. Les systèmes MIMO Massif exploitent plusieurs techniques de diversité :

**Diversité temporelle :** En espaçant l'émission d'un même signal dans le temps de cohérence du canal, il est possible de bénéficier de la diversité temporelle, dépendant de la vitesse du mobile et de la fréquence porteuse.

**Diversité spatiale :** La diversité spatiale peut être exploitée lorsqu'un signal est émis depuis plusieurs points distincts de l'espace. Cependant, la distance entre chaque antenne d'un réseau doit être d'au moins une demi-longueur d'onde pour une décorrélation suffisante. Le couplage entre antennes dégrade aussi les performances.

$$d > \frac{\lambda}{2} \quad (\text{II.16})$$

**Diversité spatio-temporelle :** Combinaison des deux techniques précédentes, où des versions différées dans le temps du signal sont transmises via plusieurs antennes, atteignant ainsi un niveau de diversité plus élevé.

**Multiplexage spatial :** Le principe consiste à transmettre sans redondance la séquence d'information sur l'axe spatial, permettant au système d'émettre  $N_t$  fois plus de symboles utiles par unité de temps qu'un système SISO. Cette architecture MIMO D-BLAST a été proposée par Foschini en 1996.

## II.5. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'art des antennes 5G. La 1ère partie a décrit les paramètres caractéristiques d'antennes, puis la 2ème partie a représenté les différents types d'antennes, enfin la 3<sup>ème</sup> partie décrit sur la technologie MIMO. La 5G utilise une bande de fréquences différente que les générations précédentes. Elle utilise des technologies plus avancées et donne des performances plus élevées en termes de transmission de données. Donc notre objectif était de savoir les antennes et les types utilisées dans le réseau mobile 5G.

# Chapitre III

## *Simulation*

---

## Chapitre III : Simulation

### III.1. Introduction

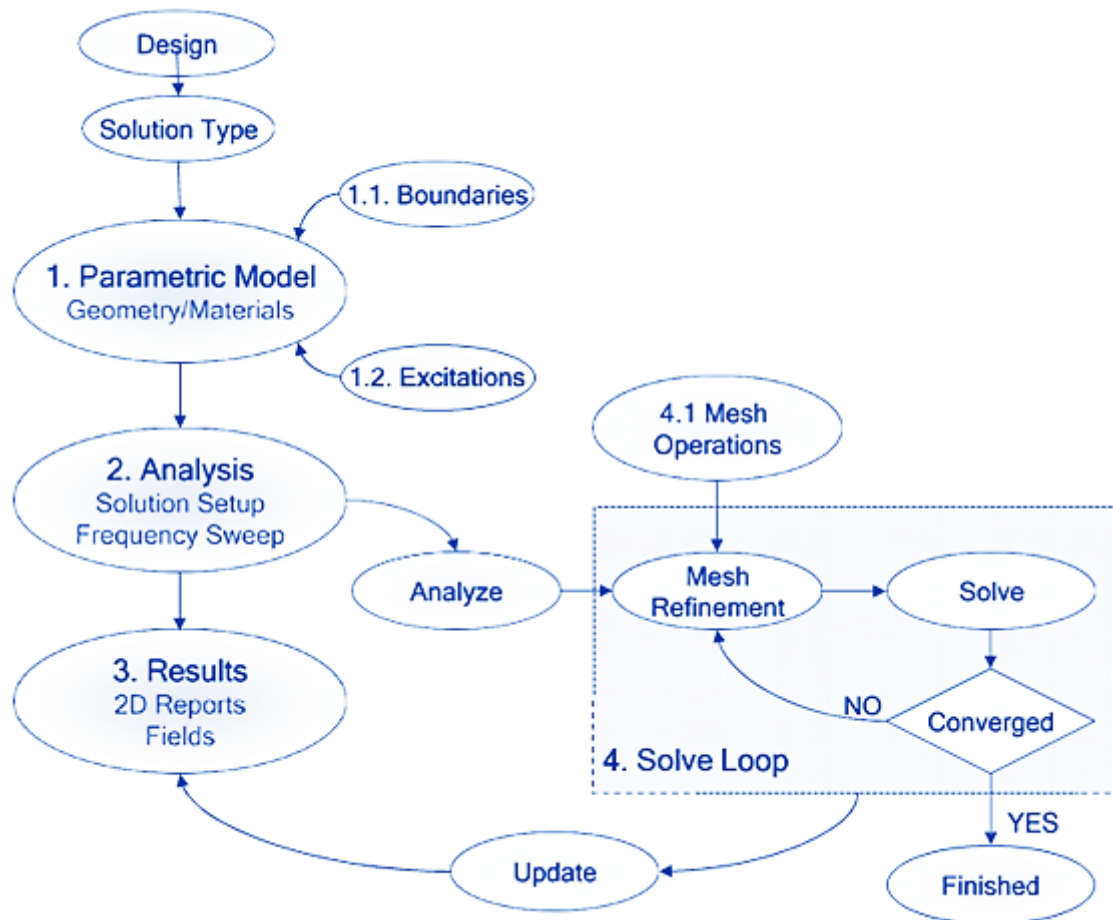
Dans ce chapitre, notre attention est portée sur la conception et la simulation d'une antenne MIMO à quatre ports à 28/38 GHz. Il est crucial d'utiliser des antennes MIMO afin d'atteindre les performances promises par la 5G. Nous exposerons les différentes étapes de la conception, de la modélisation et de la simulation de cette antenne en utilisant des logiciels spécialisés. Le diagramme de rayonnement, l'efficacité et l'isolation entre les ports seront examinés de manière approfondie. Finalement, nous aborderons les conclusions obtenues ainsi que les possibilités d'amélioration afin d'améliorer les performances de cette antenne MIMO.

### III.2. Présentation d'outils de simulation

#### III.2.1. Logiciel Ansoft HFSS

HFSS (High Frequency Structure Simulator) est un puissant simulateur électromagnétique 3D pour la modélisation de dispositifs passifs volumétriques arbitraires [9]. Bénéficiant d'une interface graphique Windows conviviale, il intègre de manière intuitive la simulation, la visualisation, la modélisation solide et l'automatisation pour résoudre rapidement et précisément les problèmes électromagnétiques 3D. Il repose sur la méthode des éléments finis (FEM), un maillage adaptatif et des graphiques de haute qualité pour offrir des performances inégalées et une vision approfondie des problématiques électromagnétiques 3D les plus complexes. Il permet de calculer divers paramètres tels que les paramètres S, les fréquences de résonance et les champs électromagnétiques. Il donne accès à des simulations électromagnétiques 3D d'une grande précision pour une large gamme d'applications de modélisation de dispositifs passifs volumétriques grâce à son approche novatrice.

Les différentes étapes suivies pour faire la simulation de l'antenne sous logiciel HFSS sont présentées en forme d'un organigramme dans la figure III.1.



**Figure III.1: Organigramme des différentes étapes d'un design sous HFSS**

### III.2.2. Logiciel CST STUDIO SUITE

Le CST (Computer Simulation Technology) Microwave Studio est un outil de simulation 3D dédié aux structures haute fréquence [10]. Il permet une analyse rapide et précise de divers dispositifs tels que les antennes, les filtres, etc. Le logiciel CST Microwave Studio est un simulateur électromagnétique basé sur la technique des intégrales finies (FIT). Cette méthode numérique fournit un maillage spatial de discrétisation, applicable à diverses problématiques électromagnétiques, allant du calcul des champs statiques aux applications haute fréquence dans les domaines temporel ou fréquentiel. Contrairement à la plupart des méthodes numériques qui discrétisent spatialement les équations de Maxwell sous forme différentielle, la méthode FIT les discrétise sous leur forme intégrale. Afin de résoudre ces équations numériquement, un domaine fini de calcul doit être défini.

### III.3. Conception de l'antenne

Dans le but de modéliser et d'analyser notre antenne patch microstrip, nous avons sélectionné une antenne triangulaire qui résonne à deux fréquences de 28 et 38 GHz.

La forme d'antenne a été choisie en raison de sa faible occupation de surface sur le substrat, en comparaison avec d'autres formes telles que les patchs rectangulaires et circulaires. L'antenne proposée alimentée par une ligne micro-ruban. La géométrie de cette antenne est donnée dans la figure III.2. L'antenne est composée d'une antenne patch microstrip triangulaire placée sur le dessus de substrat de type Rogers RT/duroid 5880 (tm) de permittivité relative  $\epsilon_r = 2.2$ , de tangente de pertes  $\tan \delta = 0.0009$  avec une épaisseur  $h = 0.8 \text{ mm}$ . Le plan de masse est imprimé sur la surface de dessous du substrat.

Dimensions du patch

La longueur de chaque côté du patch triangulaire équilatéral ( $a$ ) est donnée par [11]:

$$W_p = a = 2 \frac{c}{3\sqrt{\epsilon_r} \cdot f_r} \quad \text{(III.1)}$$

Où :

- $c$  est la vitesse de la lumière ( $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ )
- $\epsilon_r$  est la constante diélectrique relative du substrat
- $f_r$  est la fréquence de résonance souhaitée

La hauteur ( $L_p$ ) du patch triangulaire est déterminée par [11]:

$$L_p = a \sqrt{\frac{3}{4}} \quad \text{(III.2)}$$

Dimensions du plan de masse

Les dimensions du plan de masse sont plus grandes que celles du patch d'environ six fois la hauteur ou l'épaisseur du substrat ( $h$ ) tout autour de la périphérie [11]:

$$L_g = L_p + 6h \quad \text{(III.3)}$$

$$W_g = W_p + 6h \quad \text{(III.4)}$$

Où :

- $L_g$  est la longueur du plan de masse
- $W_g$  est la largeur du plan de masse
- $L_p$  est la longueur du patch
- $W_p$  est la largeur du patch.

### III.3.1. Structure et géométrie de l'antenne conçue

La géométrie de l'antenne patch triangulaire est présentée sous la figure III.2 et les différentes dimensions de l'antenne sont montrées dans le tableau III.1 ci-dessous.

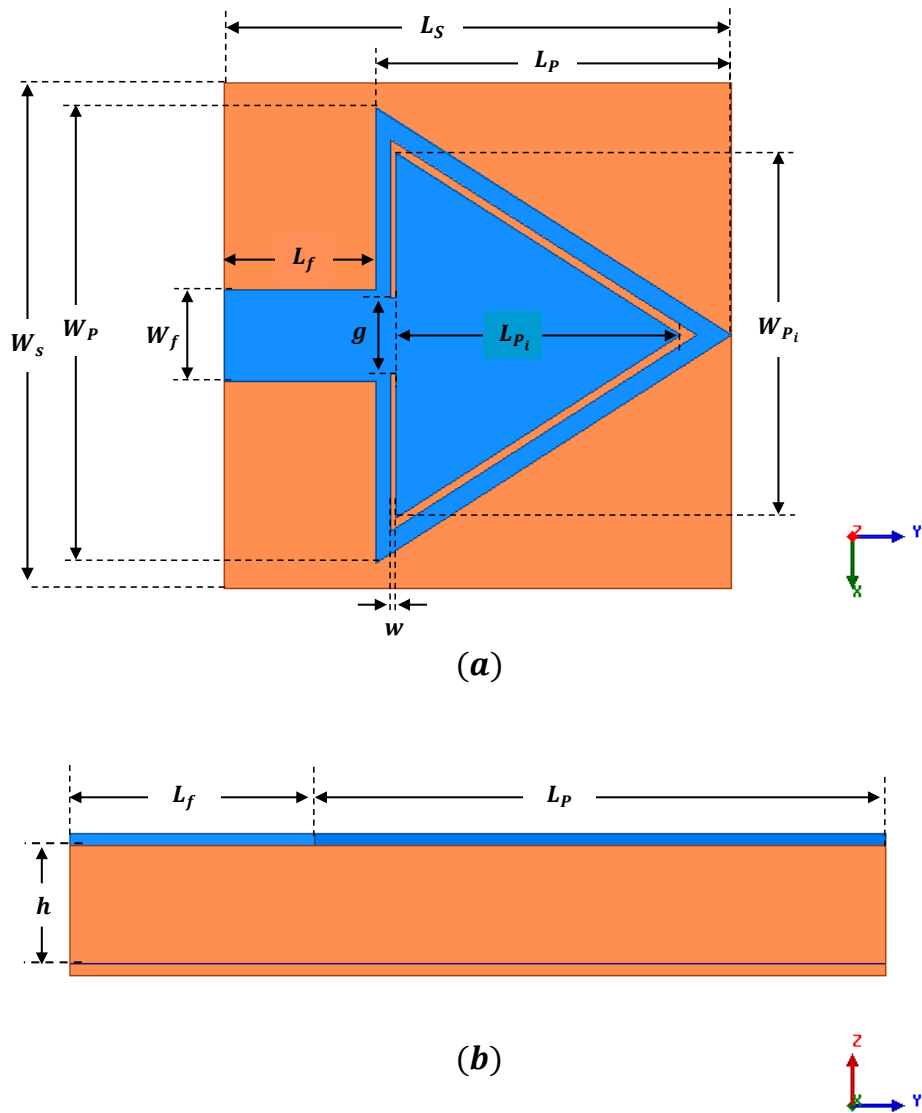


Figure III.2: Géométrie de l'antenne patch triangulaire, (a) vue de dessus (b) vue de profil

Paramètre	Valeur (mm)	Paramètre	Valeur (mm)
$W_S$	5	$L_S$	5
$W_P$	4.5	$L_P$	3.5
$W_f$	0.9	$L_f$	1.5
$g$	0.75	$w$	0.06
$W_{P_i}$	3.6	$L_{P_i}$	2.8
$h$	0.8		

Tableau III.1 : Paramètres géométriques de l'antenne conçue

### III.4. Résultats et discussions

Dans cette section, des simulations électromagnétiques sont réalisées afin d'étudier les performances de l'antenne patch triangulaire ainsi que du système d'antennes MIMO de différentes.

#### III.4.1. Performance de l'antenne patch triangulaire

Ce passage décrit la performance d'antenne patch triangulaire présentée dans la figure III.2, tel que le coefficient de réflexion et les diagrammes de rayonnement en 2D et 3D sur les fréquences étudiées. Les résultats de l'antenne conçue sont présentés dans les figures ci-dessous.

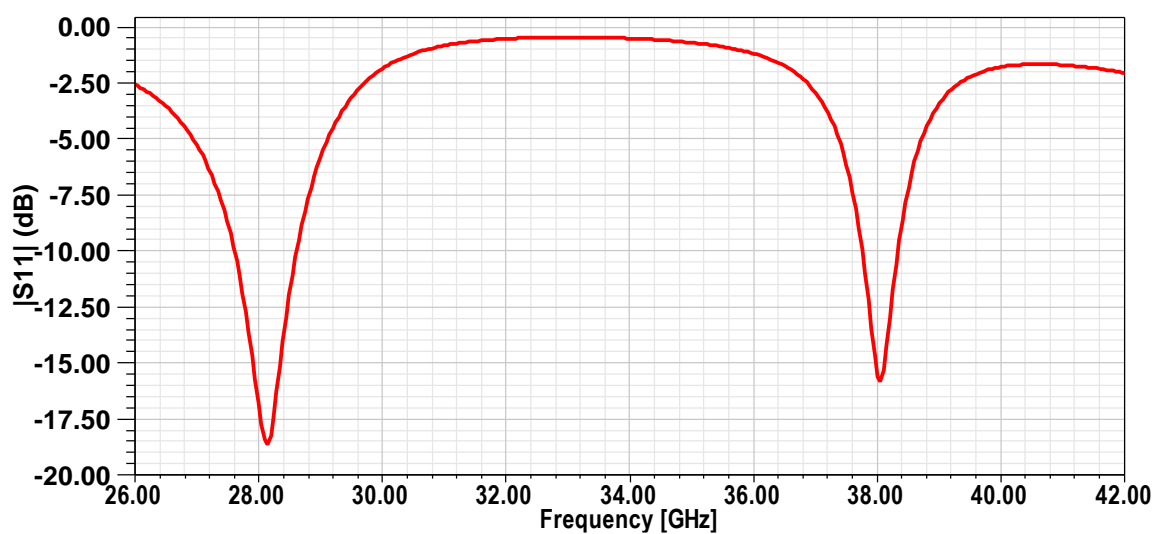


Figure III.3: Le coefficient de réflexion d'antenne patch triangulaire

D'après la figure III.3, on remarque que le  $|S_{11}|$  est inférieur à -10 dB dans les bandes [27.62-28.62] et [37.75-38.33] GHz où on trouve que l'antenne résonne sur les fréquences 28 et 38 GHz et les niveaux de  $|S_{11}|$  sont -16.76 et -15.56 dB respectivement. On constate que l'antenne est bien adaptée sur ces fréquences.

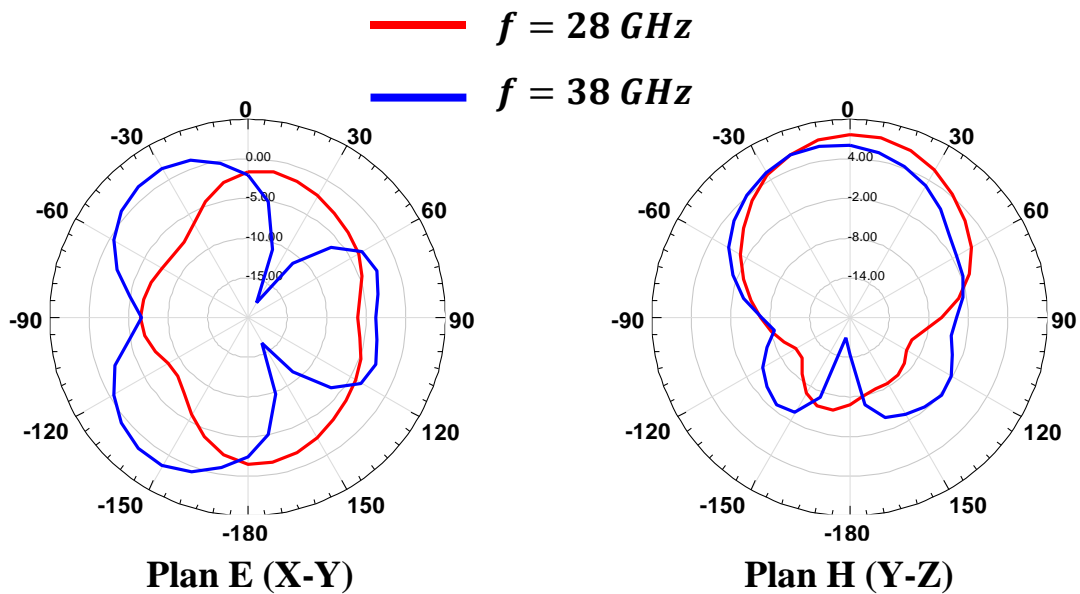


Figure III.4: Les diagrammes de rayonnement en 2D de l'antenne patch triangulaire

D'après la figure III.4, on observe dans le plan E que le diagramme de rayonnement est bidirectionnel et le niveau du gain maximal est  $-1.64$  dBi à  $28$  GHz, et on remarque que le diagramme est bidirectionnel avec deux lobes principaux avec un niveau de gain maximal égale à  $1.63$  dBi à  $38$  GHz et l'apparition d'un lobe secondaire à la fréquence supérieure. Dans le plan H, on observe que les diagrammes sont directionnels avec un lobe principal large et les niveaux des gains maximaux sont de  $7.65$  et  $6.38$  dBi aux  $28$  et  $38$  GHz respectivement, et l'apparition des lobes secondaires à la fréquence supérieure est remarquée.

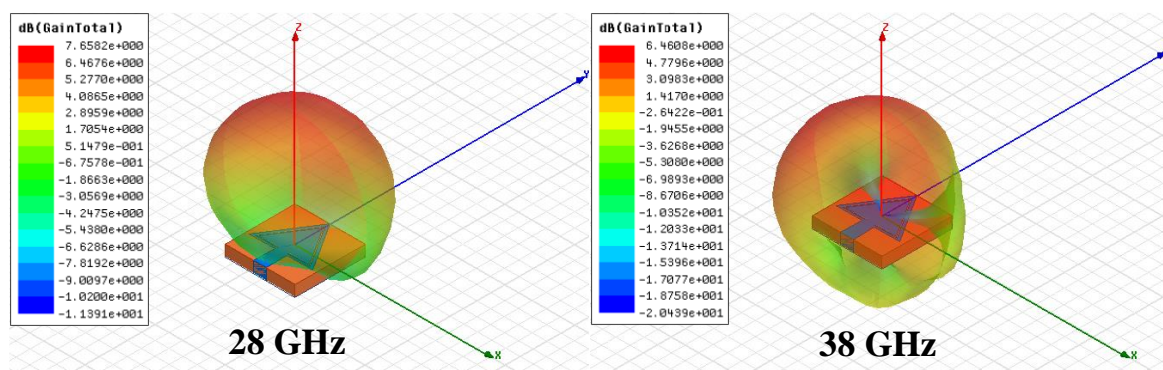
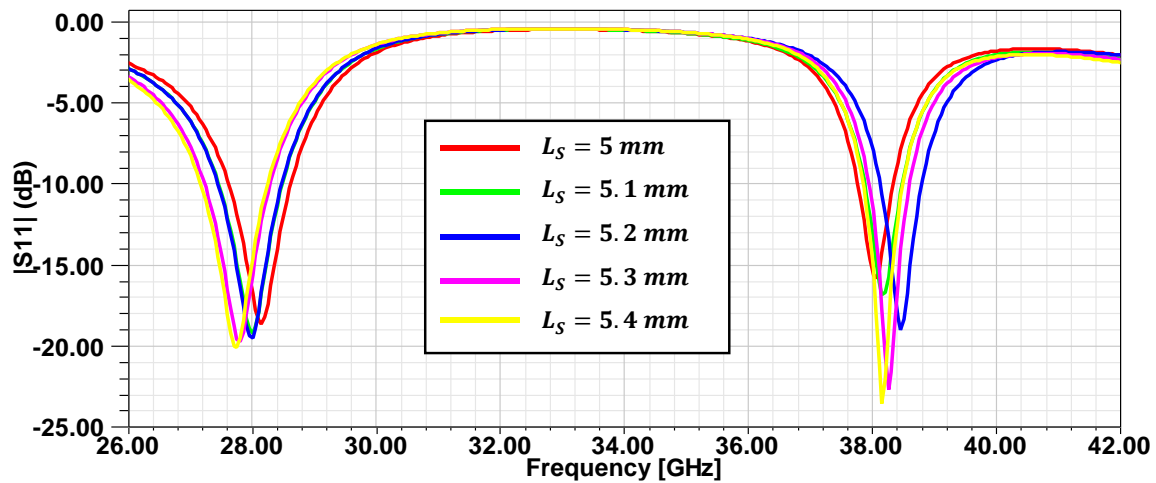
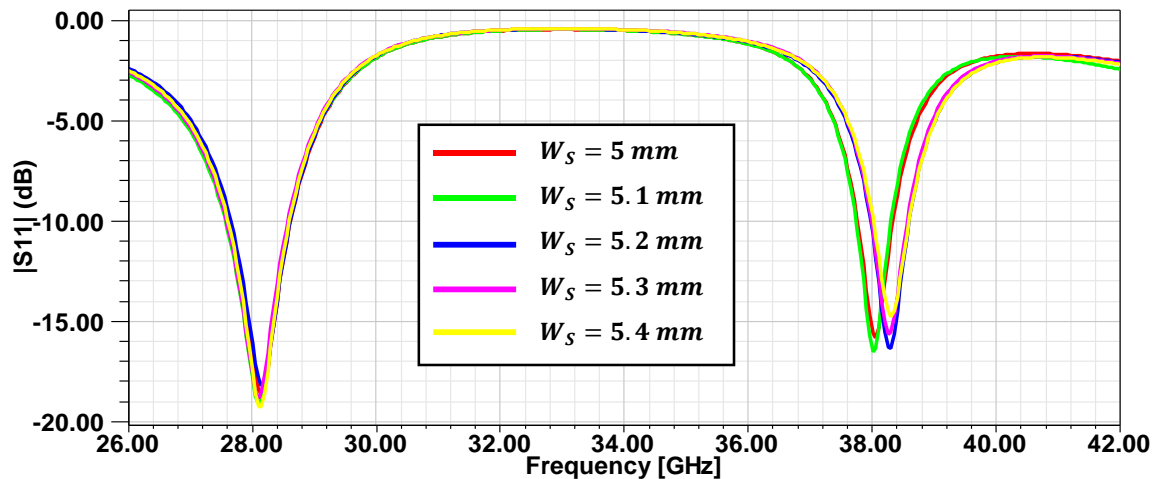


Figure III.5: Les diagrammes de rayonnement en 3D de l'antenne patch triangulaire

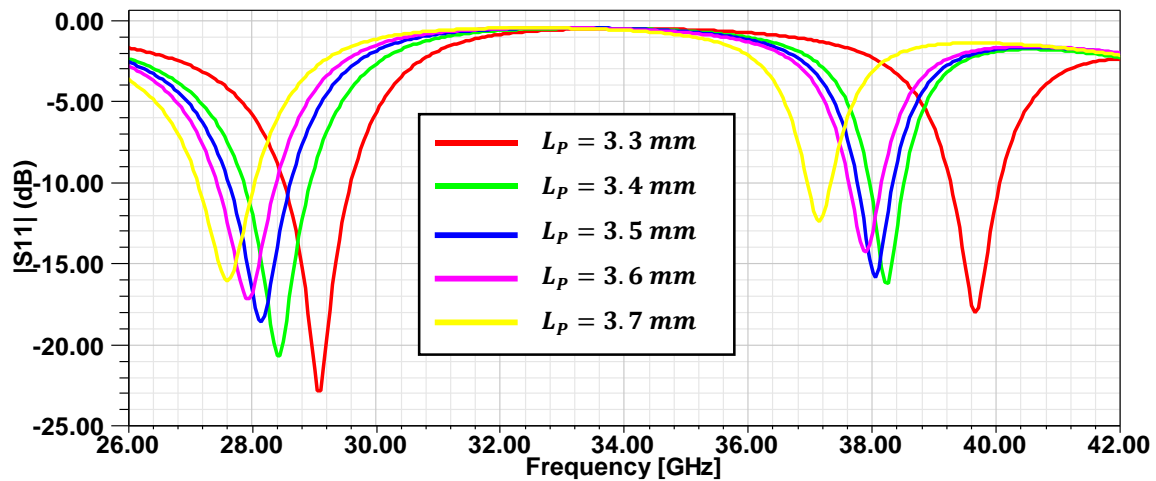
D'après le figure III.5, on remarque les diagrammes de rayonnement en 3D avec les niveaux de gains maximaux sont de  $7.66$  et  $6.46$  dBi aux fréquences  $28$  et  $38$  GHz respectivement.

#### III.4.1.1. Etude paramétrique

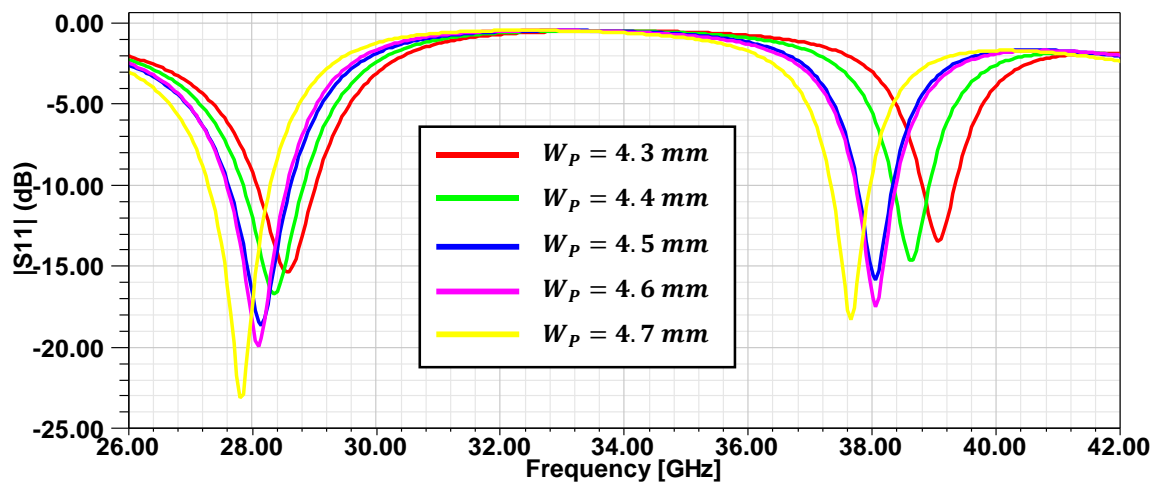
Dans cette section, l'étude paramétrique est faite afin d'étudier l'effet de différentes dimensions de l'antenne conçue tel que  $L_S$ ,  $W_S$ ,  $L_P$ ,  $W_P$ ,  $W_f$  et  $g$  sur la performance.

1) L'effet de  $L_S$  et  $W_S$ Figure III.6: L'effet de la longueur du substrat  $L_S$ Figure III.7: L'effet de largeur du substrat  $W_S$ 

La longueur  $L_S$  et la largeur  $W_S$  du substrat sont variées de 5 à 5.4 mm. L'effet de ces paramètres modifiés sur les performances de l'antenne est illustré dans les figures III.6 et III.7 respectivement. Il est observé que l'augmentation de la longueur  $L_S$  diminue la fréquence inférieure de 28.15 à 27.75 GHz et augmente la fréquence supérieure de 38.05 à 38.15 GHz et diminue les niveaux de  $|S_{11}|$  de -18.6 à -20.09 dB et de -15.81 à -23.53 dB respectivement. Il est remarqué que l'augmentation de  $W_S$  n'a pas un effet sur la fréquence inférieure mais elle diminue le niveau de  $|S_{11}|$  de -18.6 à -19.25 dB, et augmente tous de la fréquence supérieure de 38.05 à 38.3 GHz et le niveau de  $|S_{11}|$  de -15.81 à -14.78 dB.

2) L'effet de  $L_P$ Figure III.8: L'effet de longueur du patch  $L_P$ 

La longueur du patch  $L_P$  est variée de 3.3 à 3.7 mm. L'effet de paramètre modifié sur la performance de l'antenne est illustré dans la figure III.8. D'après ces résultats, il est remarqué que  $L_P$  diminue la fréquence inférieure de 29.1 à 27.6 GHz et la fréquence supérieure de 39.65 à 37.15 GHz, et augmente les niveaux de  $|S_{11}|$  de -22.82 à -16.04 dB et de -18.02 à -12.38 dB respectivement.

3) L'effet de  $W_P$ Figure III.9: L'effet de largeur du patch  $W_P$ 

La largeur du patch  $W_P$  est variée de 4.3 à 4.7 mm. L'effet de ce paramètre modifié sur la performance de l'antenne est illustré dans la figure III.9. On peut observer que son augmentation de  $W_P$  diminue la fréquence inférieure de 28.55 à 27.8 GHz et la fréquence

supérieure de 39.05 à 37.65 GHz et les niveaux de  $|S_{11}|$  de -15.36 à -23.13 dB et de -13.44 à -18.3 dB respectivement.

#### 4) L'effet de $W_f$

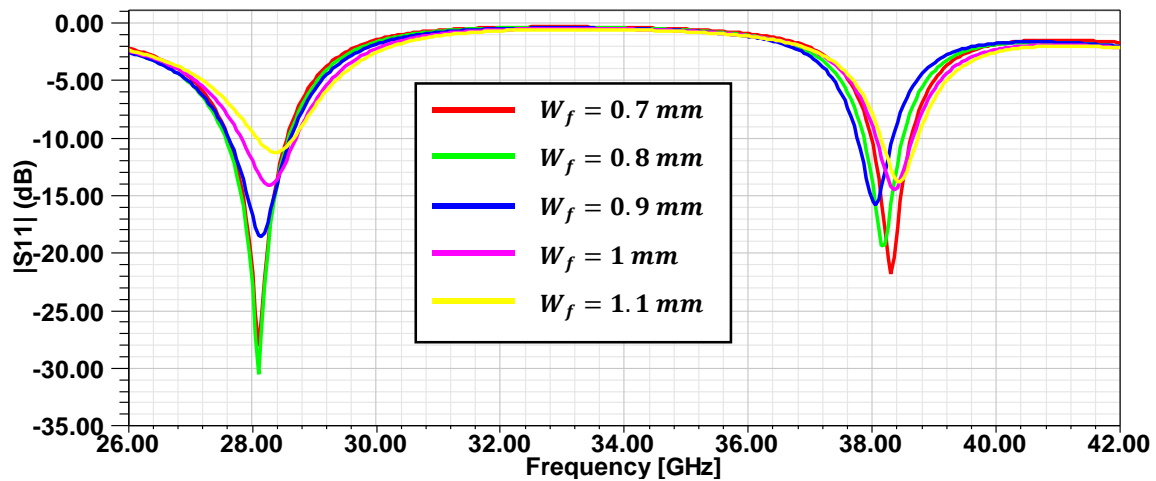


Figure III.10: L'effet de largeur de la ligne d'alimentation  $W_f$

La largeur de la ligne de transmission  $W_f$  est variée de 0.7 à 1.1 mm. L'effet de ce paramètre sur la performance de l'antenne est illustré dans la figure III.10. On peut remarquer d'après les résultats que l'augmentation de  $W_f$  augmente la fréquence inférieure de 28.1 à 28.4 GHz et la fréquence supérieure de 38.3 à 38.45 GHz et les niveaux de  $|S_{11}|$  de -28.07 à -11.22 dB et de -21.8 à -13.8 dB respectivement.

#### 5) L'effet de $g$

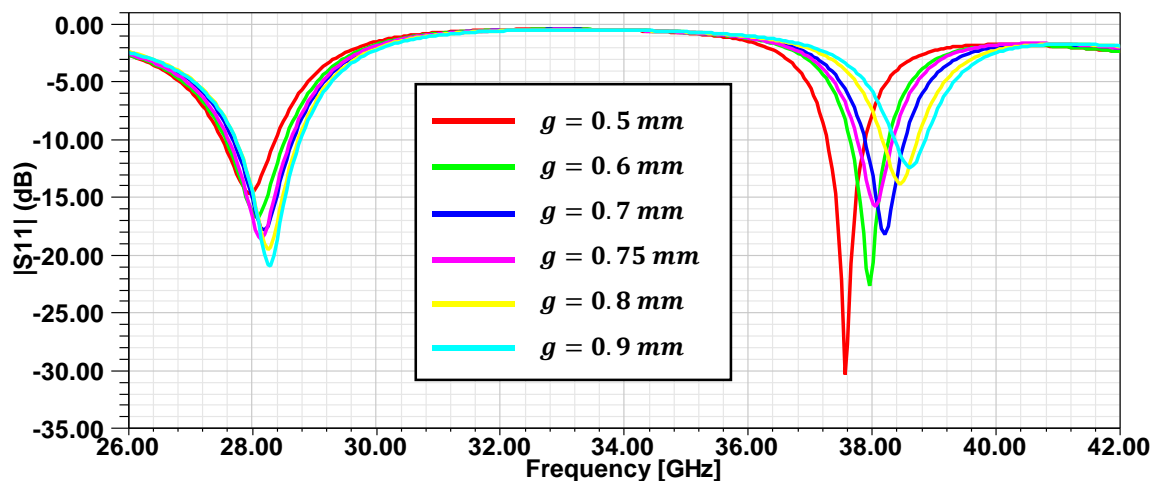


Figure III.11: L'effet de l'écart  $g$

L'écart entre les deux patches  $g$  est varié de 0.5 à 0.9 mm. L'effet de ce paramètre sur la performance de l'antenne est illustré dans la figure III.11. D'après les résultats, on peut

observer que l'augmentation de  $g$  augmente la fréquence inférieure de 27.95 à 28.25 GHz et diminue le niveau de  $|S_{11}|$  de -14.61 à -19.49 dB, et augmente la fréquence supérieure de 37.55 à 38.45 GHz et le niveau de  $|S_{11}|$  de -30.34 à -13.8 dB.

### III.4.2 Performance du système d'antenne MIMO

Les paramètres de performance les plus importants d'un système MIMO incluent le couplage mutuel entre les antennes, le coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC) et le gain de diversité (DG) [12]. Ces mesures sont analysées dans cette section pour le système MIMO 28/38 GHz proposé.

#### 1. Adaptation d'impédance et coefficient de couplage

L'auto-couplage et le couplage mutuel entre les antennes. Le couplage mutuel est uniquement représenté pour la première antenne car les autres antennes auront des résultats similaires étant donné la configuration MIMO.

#### 2. Le coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC)

L'ECC (coefficient de corrélation d'enveloppe) exprime comment les diagrammes de rayonnement de deux antennes quelconques dans le système MIMO sont indépendants. Une valeur d'ECC faible (généralement inférieure à 0,5) indique une meilleure qualité du signal. Cela signifie des canaux indépendants avec une interférence minimale et une capacité élevée pour la transmission de données. En revanche, un ECC élevé signifie des canaux fortement corrélés, ce qui entraîne une dégradation des performances. Il est calculé selon la formule suivante :

$$ECC = \frac{|S_{11}^* S_{12} + S_{21}^* S_{22}|^2}{(1 - |S_{11}|^2 + |S_{21}|^2)(1 - |S_{22}|^2 + |S_{12}|^2)} \quad (\text{III.5})$$

#### 3. Le gain de diversité (DG)

La disposition des antennes joue un rôle primordial dans le rapport signal sur interférence (SIR) d'un système MIMO, et ce en fonction du schéma de diversité employé. Ce paramètre est évalué grâce au calcul du gain de diversité (DG).

Le gain de diversité est un facteur clé pour analyser la performance d'un système MIMO. Une valeur élevée de DG indique que le système MIMO atténue efficacement les effets néfastes de la propagation multitrajet. Cela se traduit par une meilleure qualité du signal, un débit de données plus important, une portée de couverture étendue et une capacité globale du système améliorée. En conséquence, la puissance d'émission peut être réduite sans pour autant affecter les performances. Il est calculé comme suit :

$$DG_{dB} = 10 \times \sqrt{1 - ECC^2} \quad (\text{III.6})$$

**III.4.2.1. Système d'antenne MIMO à deux ports**

L'antenne MIMO à deux ports de différentes configurations est illustrée ci-dessous dans les figures III.12, III.13 et III.14 et ses paramètres géométriques sont présentés dans le tableau III.2.

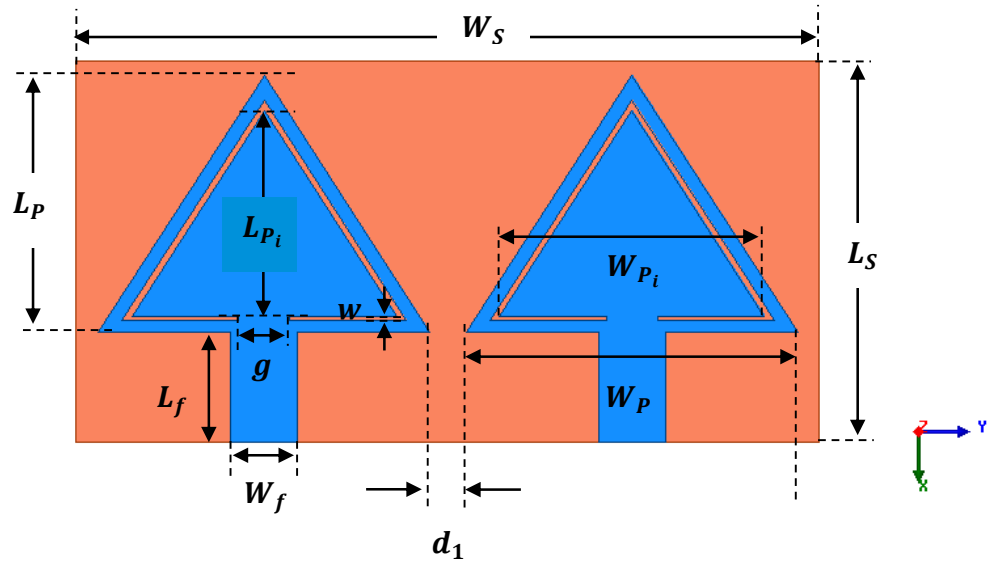


Figure III.12: L'antenne MIMO 2x2 (1)

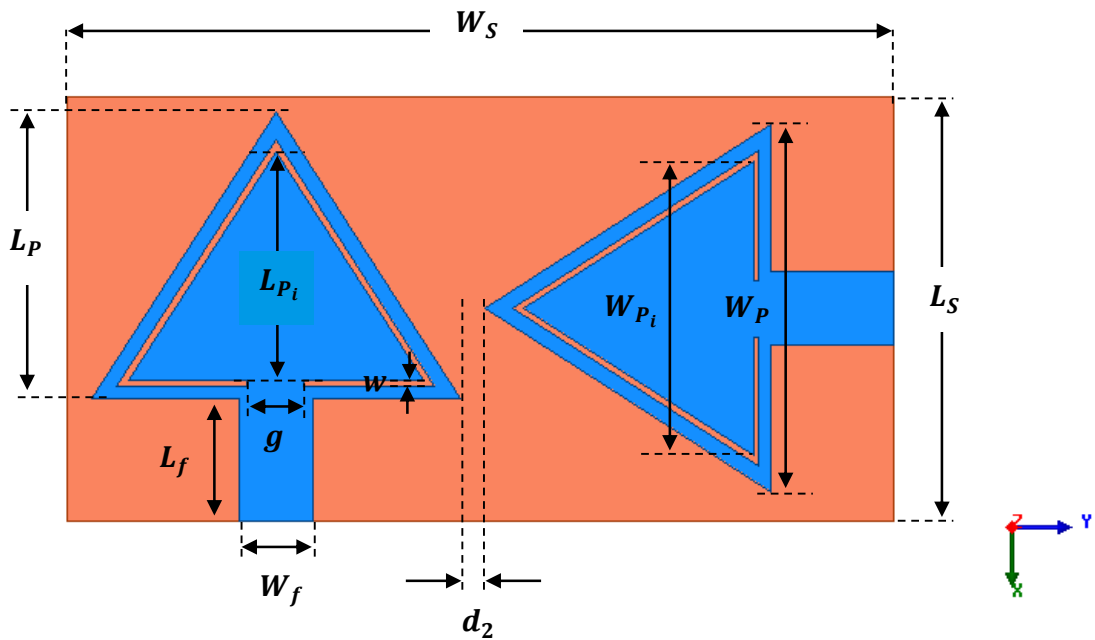


Figure III.13: L'antenne MIMO 2x2 (2)

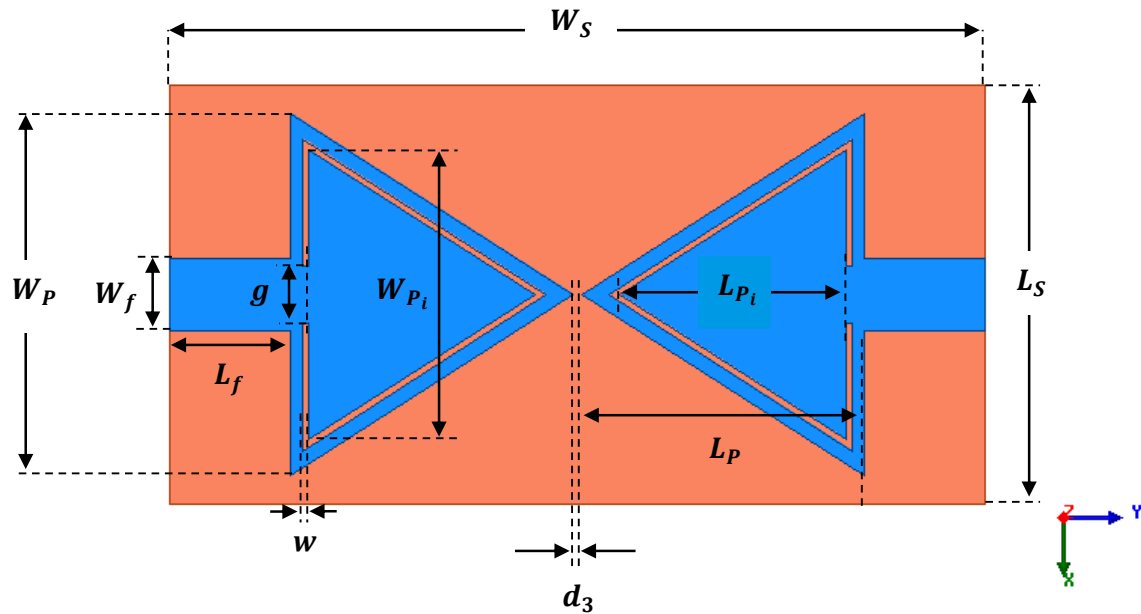


Figure III.14: L'antenne MIMO 2x2 (3)

Paramètre	Valeur (mm)	Paramètre	Valeur (mm)
$W_S$	10.2	$L_S$	5.2
$W_P$	4.5	$L_P$	3.5
$W_{P_i}$	3.6	$L_{P_i}$	2.8
$W_f$	0.9	$L_f$	1.5
$g$	0.7	$w$	0.066
$d_1$	0.5	$d_2$	0.3
$d_3$	0.1		

Tableau III.2: Paramètres géométriques de l'antenne MIMO 2x2 de différentes configurations

Les résultats de performance de différentes configurations de l'antenne tel que les paramètres S et les facteurs ECC et DG sont présentés dans les figures ci-dessous.

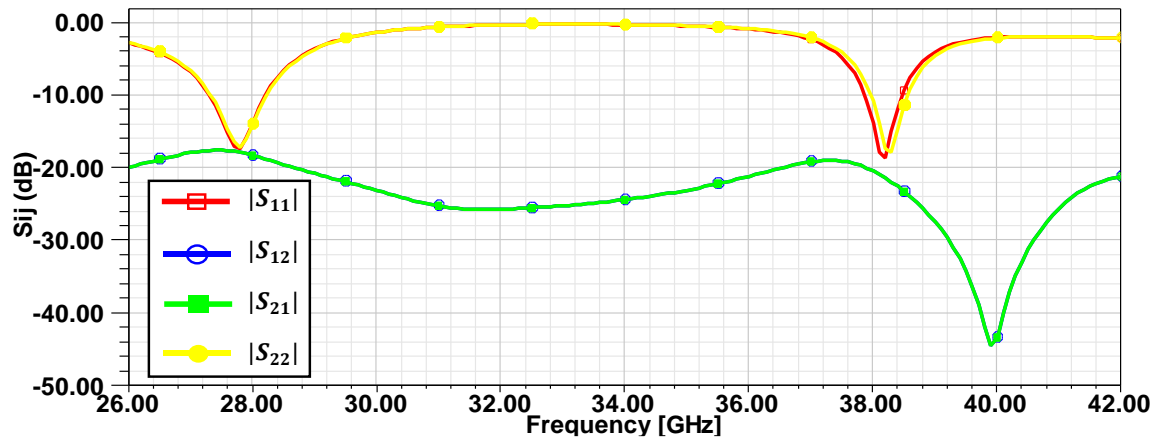


Figure III.15: Les paramètres S de l'antenne MIMO 2x2 (1)

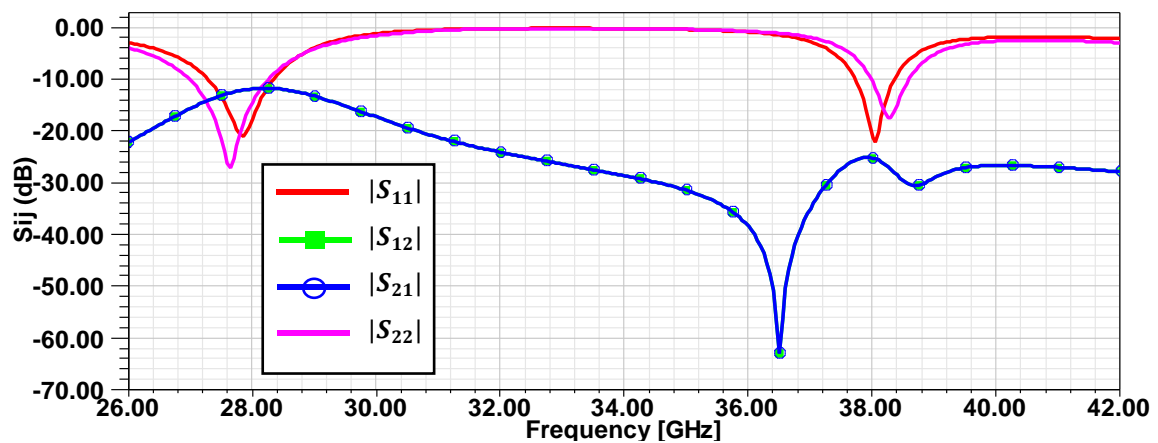


Figure III.16: Les paramètres S de l'antenne MIMO 2x2 (2)

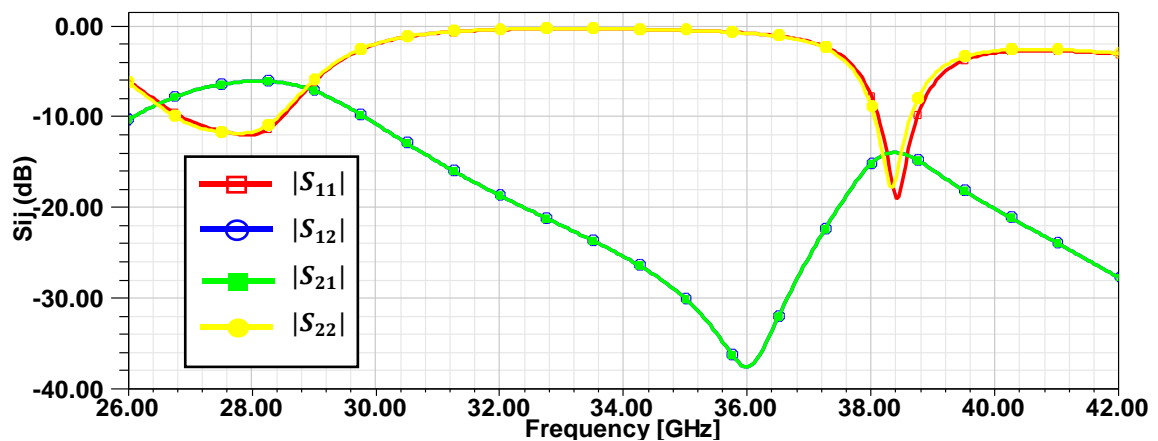
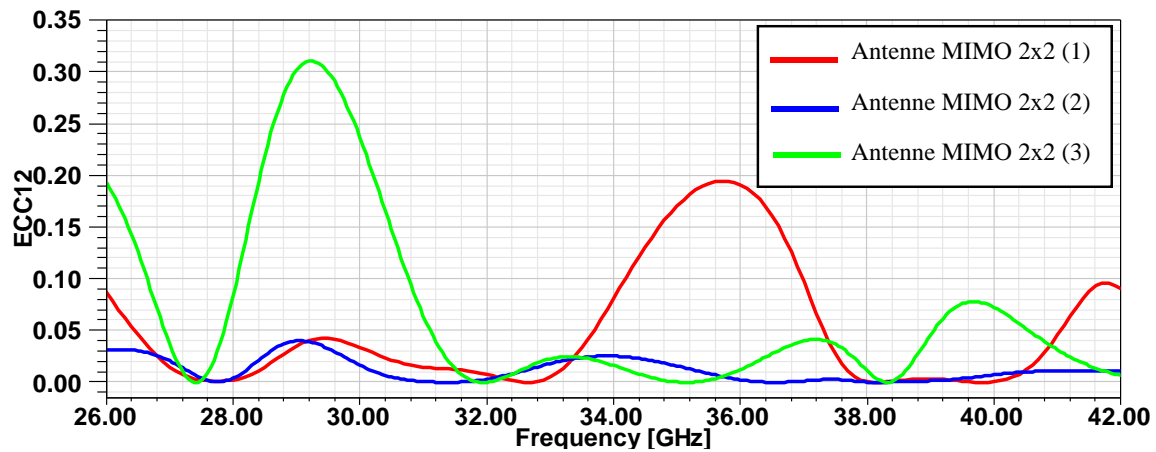


Figure III.17: Les paramètres S de l'antenne MIMO 2x2 (3)

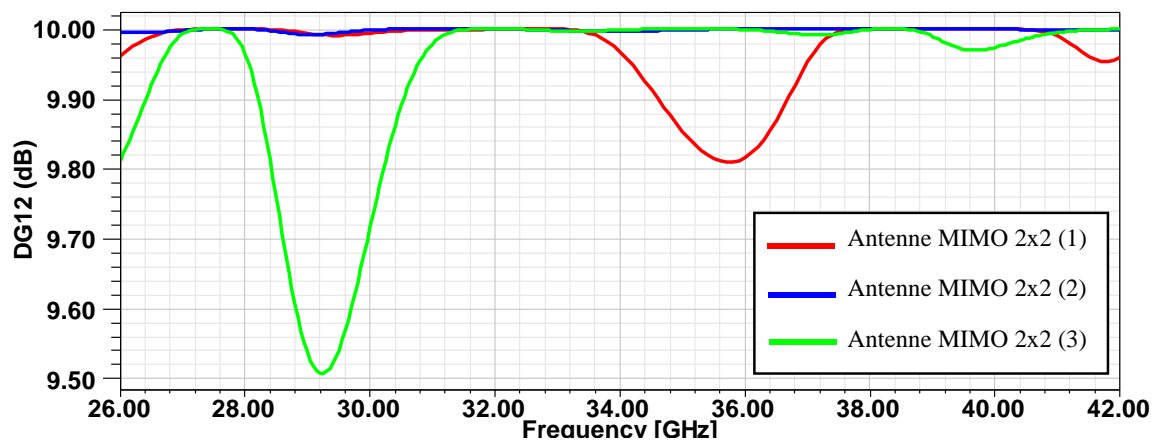
Les paramètres S tel que  $|S_{11}|$ ,  $|S_{12}|$ ,  $|S_{21}|$  et  $|S_{22}|$  de l'antenne MIMO à deux ports sont présentés dans les figures III.15, III.16 et III.17. D'après les résultats de la figure III.15, on observe que les paramètres S égalent à -13.89, -18.35, -18.35 et -14.17 dB, et -13.99, -20.5, -20.5 et -10.97

dB sur les fréquences 28 et 38 GHz respectivement. D'après les résultats de la figure III.16, on observe que les paramètres S égalent à -17.81, -12, -12 et -14.58 dB, et -21.31, -25.3, -25.3 et -10.57 dB sur les fréquences 28 et 38 GHz respectivement. D'après les résultats de la figure III.17, on observe que les paramètres S égalent à -12.06, -6.14, -6.14 et -11.73 dB, et -7.78, -15.2, -15.2 et -9.03 dB sur les fréquences 28 et 38 GHz respectivement.



**Figure III.18: Facteur ECC12 des antennes MIMO 2x2 (1), (2) et (3)**

Le facteur ECC12 des antennes MIMO 2x2 (1), (2) et (3) est présenté dans la figure III.18. D'après les résultats, on remarque que le facteur ECC12 égale à 0.0022, 0.0037 et 0.083, et 0.0008, 0.0002 et 0.011 sur les fréquences 28 et 38 GHz respectivement.



**Figure III.19: Facteur DG12 des antennes MIMO 2x2 (1), (2) et (3)**

Le facteur DG12 des antennes MIMO (1), (2) et (3) est présenté dans la figure III.19. d'après les résultats, on remarque que le facteur DG12 égale à 10, 9.99 et 9.97 dB, et 10, 10 et 9.99 dB sur les fréquences 28 et 38 GHz respectivement.

### III.4.2.2 Système d'antenne MIMO à quatre ports

L'antenne MIMO à quatre ports de différentes configurations est illustrée ci-dessous dans les figures III.20, III.21 et III.22 et les paramètres géométriques de chaque configuration sont présentés dans les tableaux III.3, III.4 et III.5.

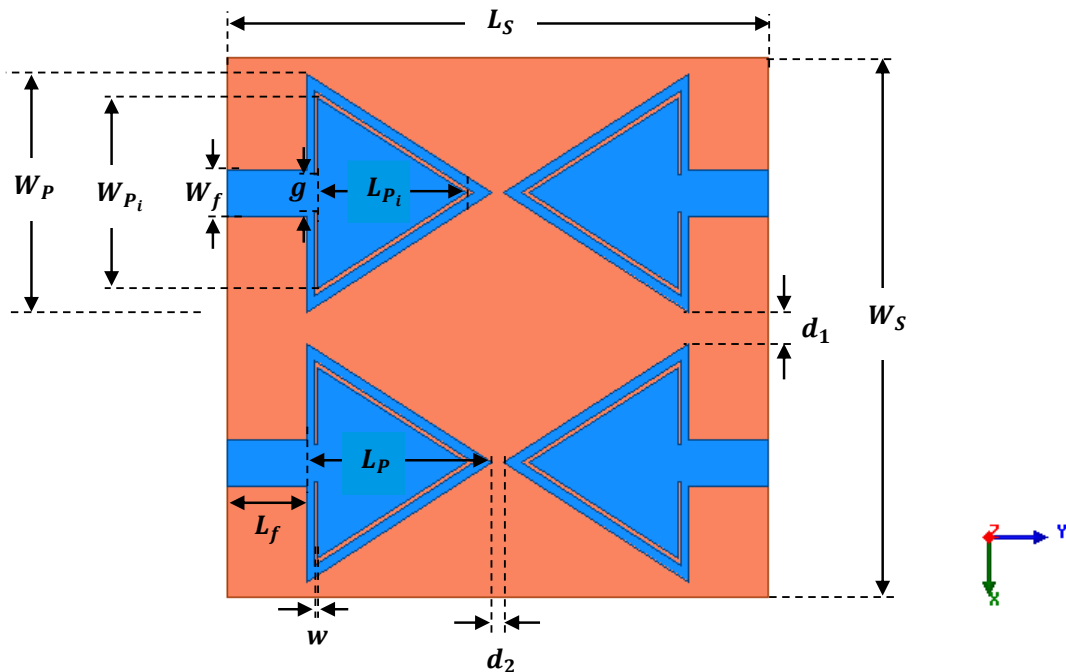


Figure III.20: L'antenne MIMO 4x4 (1)

Paramètre	Valeur (mm)	Paramètre	Valeur (mm)
$W_S$	5.1	$L_S$	5.2
$W_P$	4.5	$L_P$	3.5
$W_{P_i}$	3.6	$L_{P_i}$	2.8
$W_f$	0.9	$L_f$	1.5
$g$	0.7	$w$	0.066
$d_1$	0.5	$d_2$	0.2

Tableau III.3: Paramètres géométriques de l'antenne MIMO 4x4 (1)

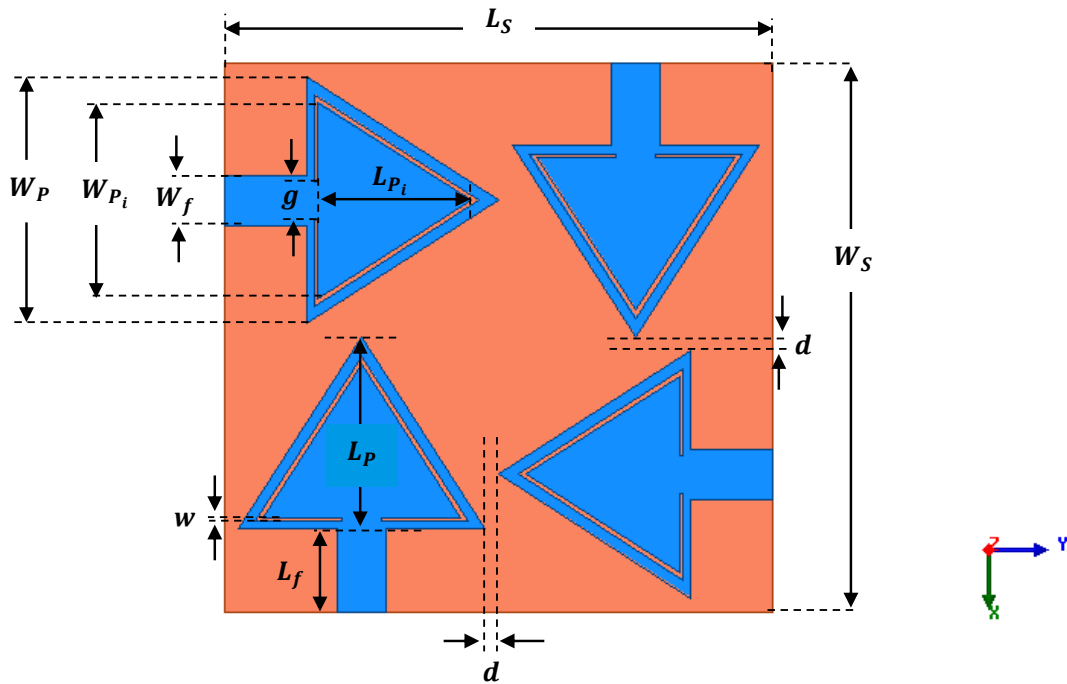


Figure III.21: L'antenne MIMO 4x4 (2)

Paramètre	Valeur (mm)	Paramètre	Valeur (mm)
$W_S$	5	$L_S$	5
$W_P$	4.5	$L_P$	3.5
$W_{P_i}$	3.6	$L_{P_i}$	2.8
$W_f$	0.9	$L_f$	1.5
$g$	0.7	$w$	0.06
$d$	0.25		

Tableau III.4: Paramètres géométriques de l'antenne MIMO 4x4 (2)

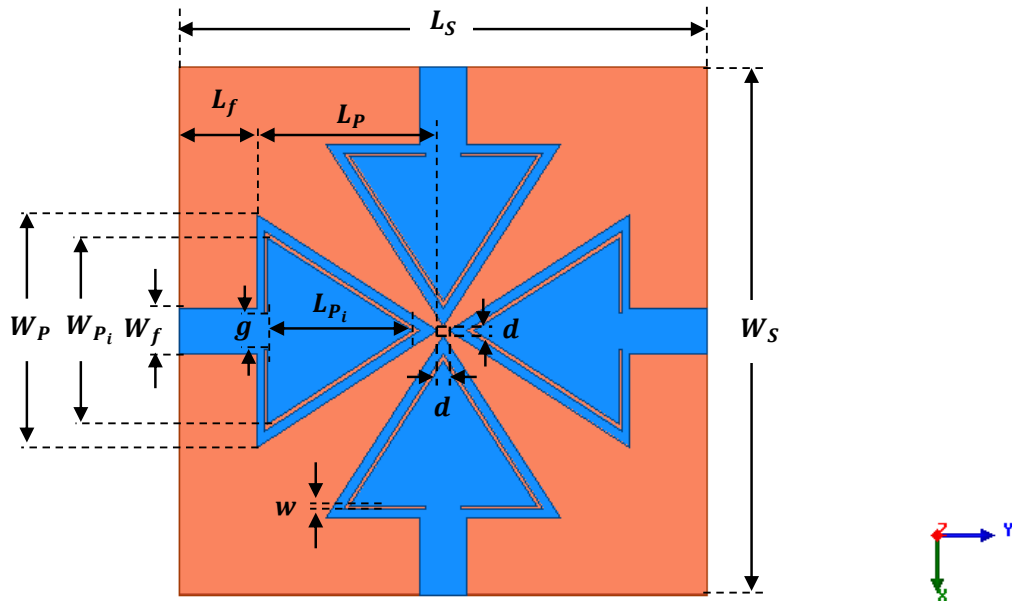


Figure III.22: L'antenne MIMO 4x4 (3)

Paramètre	Valeur (mm)	Paramètre	Valeur (mm)
$W_S$	5.5	$L_S$	5.2
$W_P$	4.5	$L_P$	3.5
$W_{P_i}$	3.6	$L_{P_i}$	2.8
$W_f$	0.9	$L_f$	1.5
$g$	0.7	$w$	0.066
$d$	0.4		

Tableau III.5: Paramètres géométriques de l'antenne MIMO 4x4 (3)

Les résultats de performance tel que les paramètres S et les facteurs ECC et DG de chaque configuration de l'antenne MIMO 4x4 sont présentés dans les figures ci-dessous.

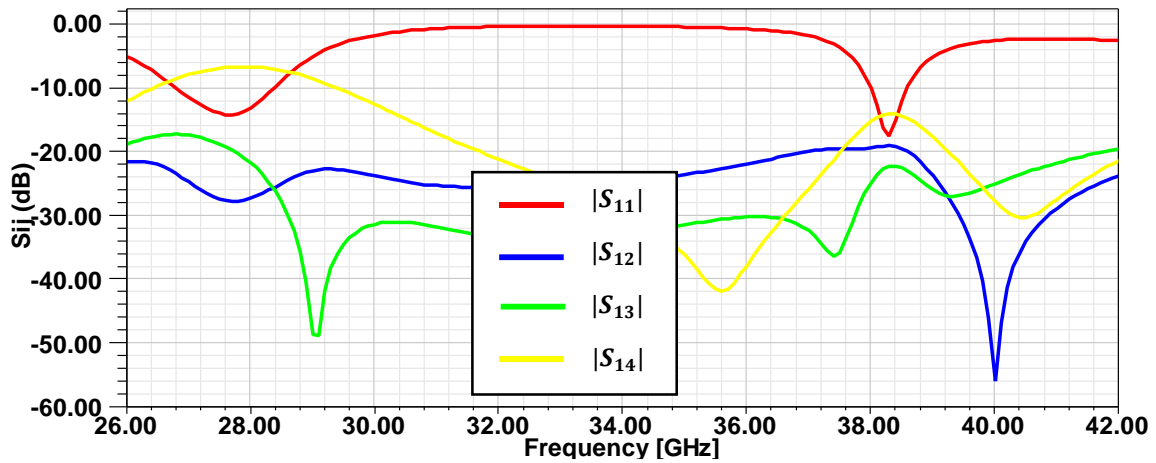


Figure III.22: Paramètres S de l'antenne MIMO 4x4 (1)

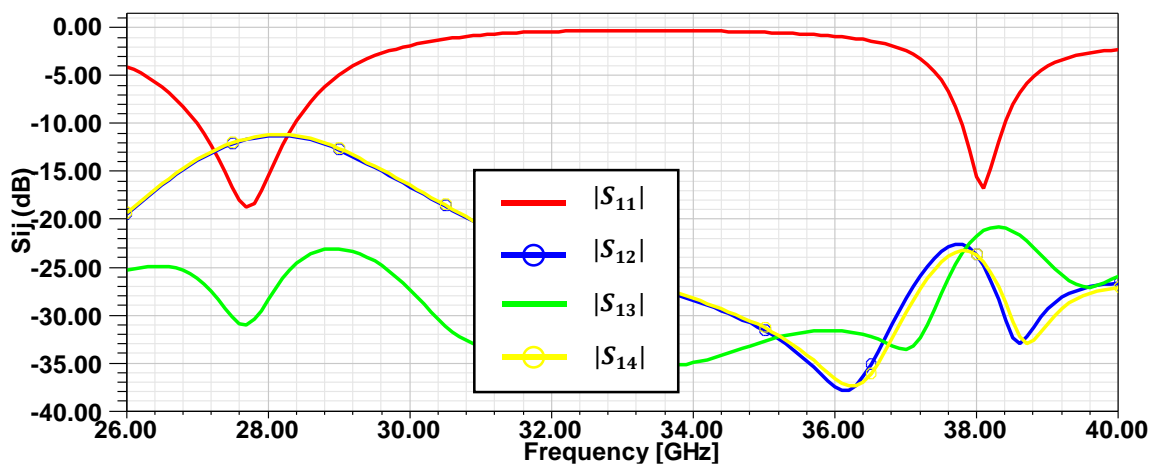


Figure III.23: Paramètres S de l'antenne MIMO 4x4 (2)

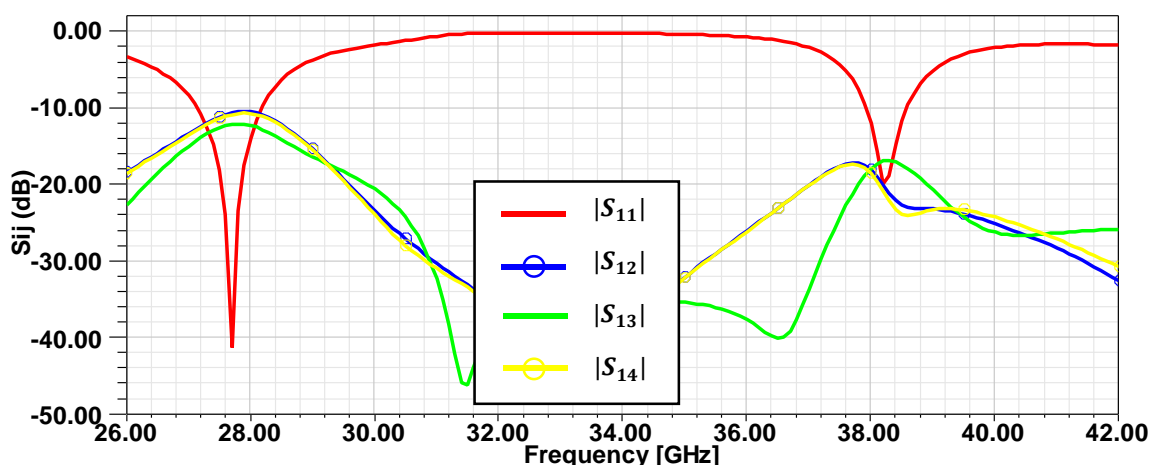


Figure III.24: Paramètres S de l'antenne MIMO 4x4 (3)

Les figures III.22, III.23. et III.24 présentent les paramètres S tel que  $|S_{11}|$ ,  $|S_{12}|$ ,  $|S_{13}|$  et  $|S_{14}|$  de différentes configurations de l'antenne MIMO (1), (2) et (3). D'après les résultats de la figure

III.22, on remarque que les paramètres S égalent à -13.33, -27.37, -21.77 et -6.84 dB, et -10.16, -19.5, -24.85 et -15.35 dB sur les fréquences de 28 et 38 GHz respectivement. De la figure III.23, on remarque d'après les résultats que les paramètres S égalent à -15.45, -14,39, -28.32 et -11.27 dB, et -15.59,-23.67, -21.72 et -23.69 dB sur les fréquences de 28 et 38 GHz respectivement. De la figure III.24, on remarque d'après les résultats que les paramètres S égalent à -14.02, -10.62, -12.37 et -10.81 dB, et -12.1, -18.21, -17.97 et -18.63 dB sur les fréquences de 28 et 38 GHz respectivement.

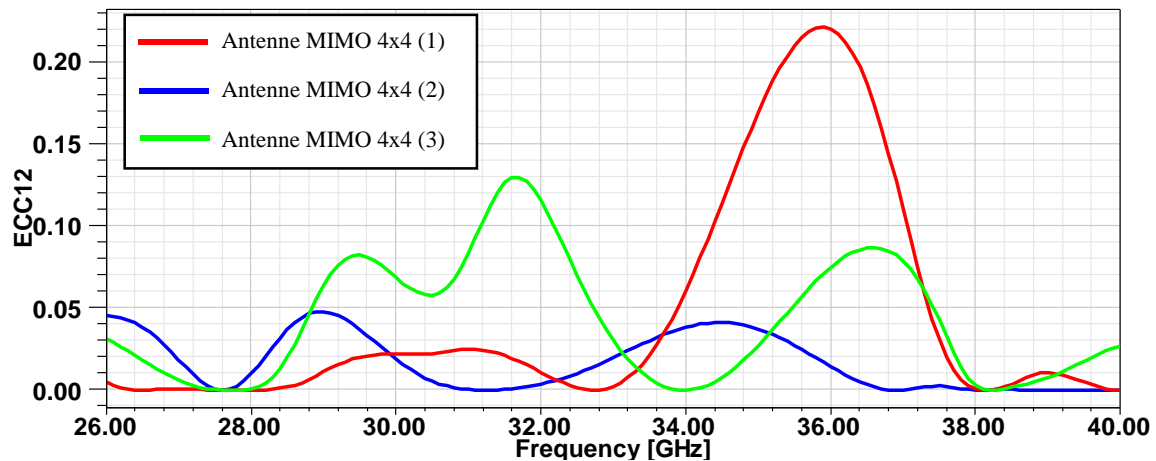


Figure III.25: Facteur ECC12 des antennes MIMO 4x4 (1), (2) et (3)

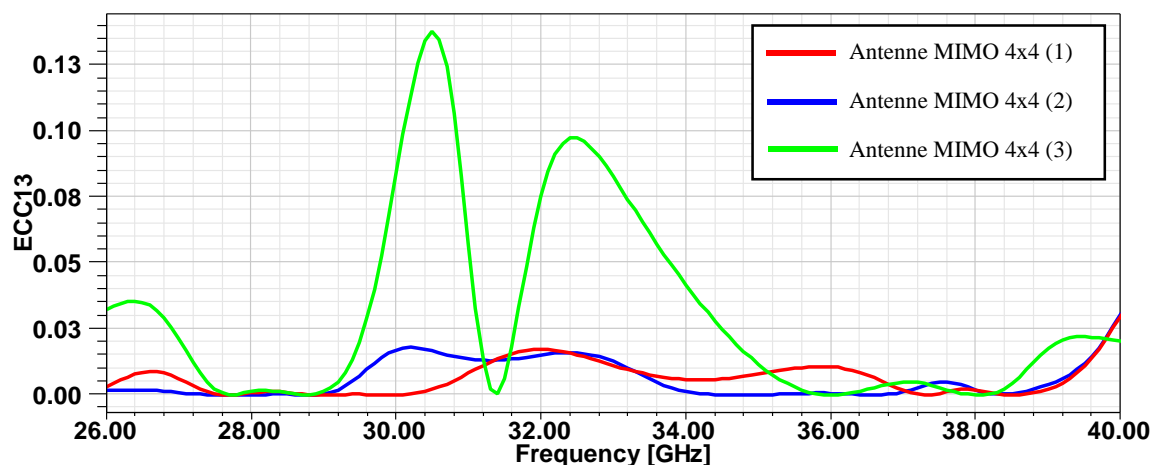
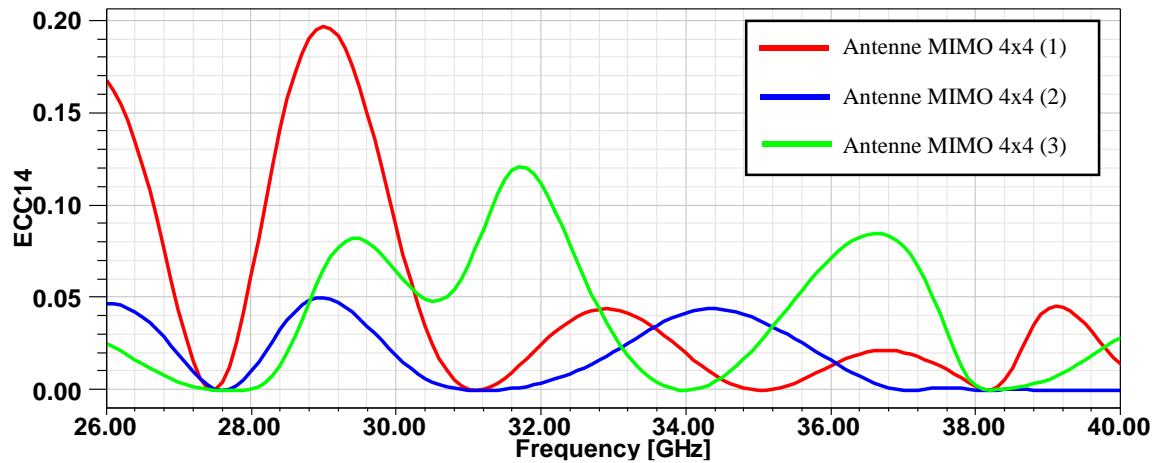
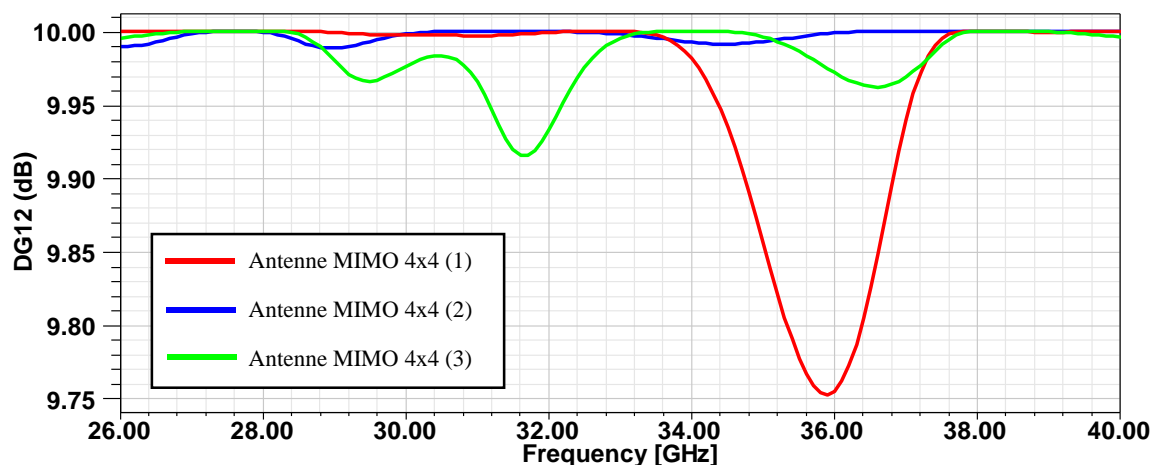


Figure III.26: Facteur ECC13 des antennes MIMO 4x4 (1), (2) et (3)

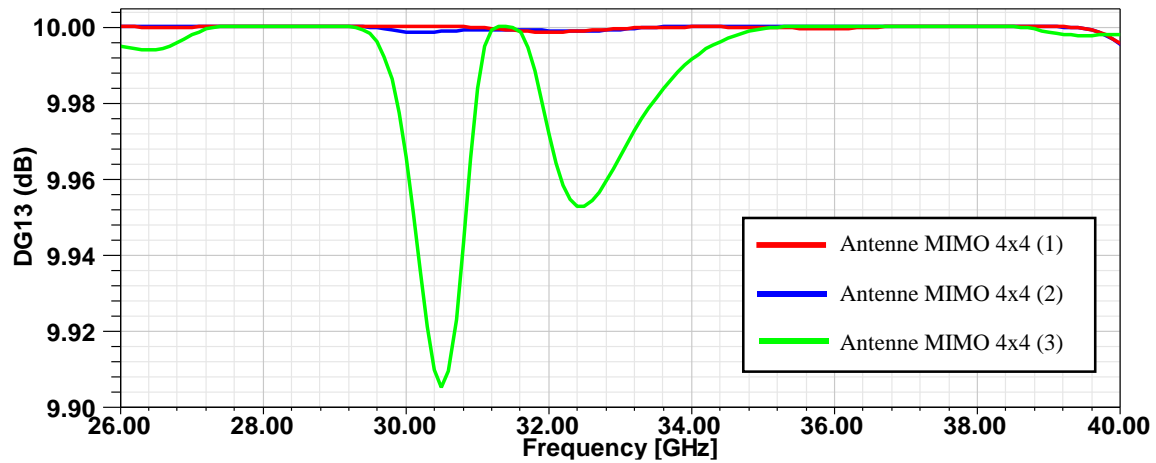


**Figure III.27: Facteur ECC14 des antennes MIMO (1), (2) et (3)**

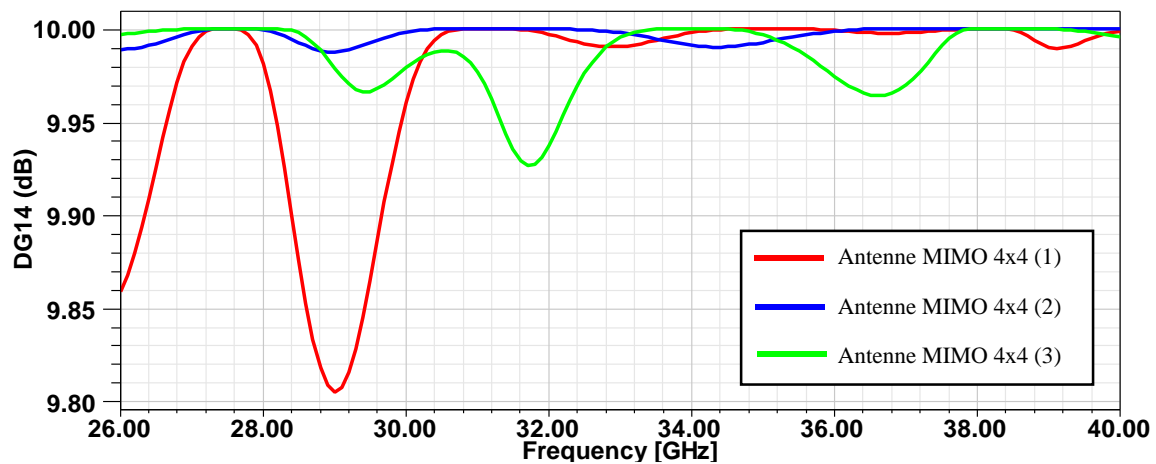
Les figures III.25, III.26 et III.27 présentent les facteurs ECC12, ECC13 et ECC14 des antennes MIMO 4x4 (1), (2) et (3). D'après les résultats de la figure III.25, on observe que le facteur ECC12 égale à 0, 0.0096, et 0.0007, et 0.0009, 0, 0.0027 sur les fréquences de 28 et 38 GHz respectivement. De la figure III.26, on observe d'après les résultats que le facteur ECC13 égale à 0.0008, 0.0001 et 0.0012, et 0.0018, 0.0019 et 0.0002 sur les fréquences de 28 et 38 GHz respectivement. De la figure III.27, on observe que le facteur ECC14 égale à 0.0609, 0.0099 et 0.0007, et 0.002, 0.0002 et 0.0023 sur les fréquences de 28 et 38 GHz respectivement.



**Figure III.28: Facteur DG12 des antenne MIMO 4x4 (1), (2) et (3)**



**Figure III.29: Facteur DG13 des antennes MIMO 4x4 (1), (2) et (3)**



**Figure III.30: Facteur DG14 des antennes MIMO 4x4 (1), (2), et (3)**

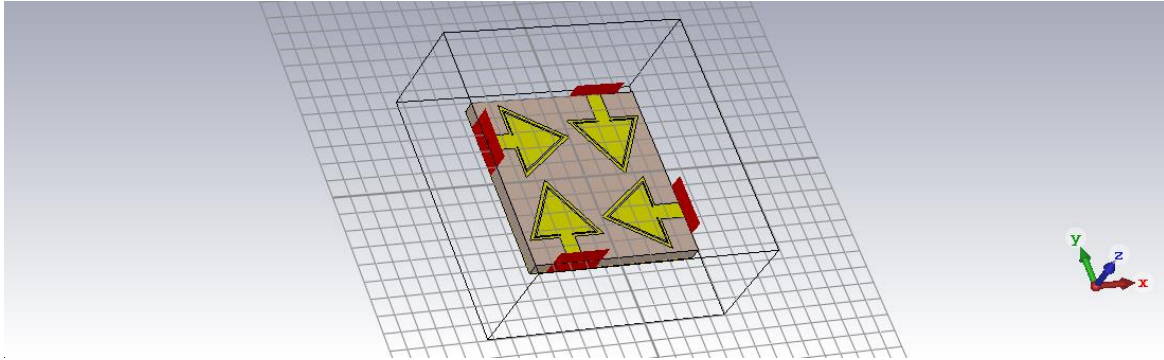
Les figures III.28, III.29 et III.30 illustrent les facteurs DG des antennes MIMO 4x4 (1), (2) et (3). D'après les résultats de la figure III.28, on observe que le facteur DG12 égale à 10, 9.99 et 10 dB sur 28 GHz et 10 dB pour les trois antennes sur 38 GHz. De la figure III.29, on observe d'après les résultats que le facteur DG13 égale à 10 dB pour les trois antennes sur 28 et 38 GHz. De la figure III.30, on remarque d'après les résultats que le facteur DG14 égale à 9.98, 9.99 et 10 dB sur 28 GHz et 10 dB pour les trois antennes sur 38 GHz.

D'après tous les résultats, on constate que l'antenne avec les meilleures performances est l'antenne MIMO 4x4 (2) puisqu'elle est bien adaptée et les couplages mutuels sont suffisamment faibles sur les fréquences étudiées.

### III.4.3 Comparaison des résultats

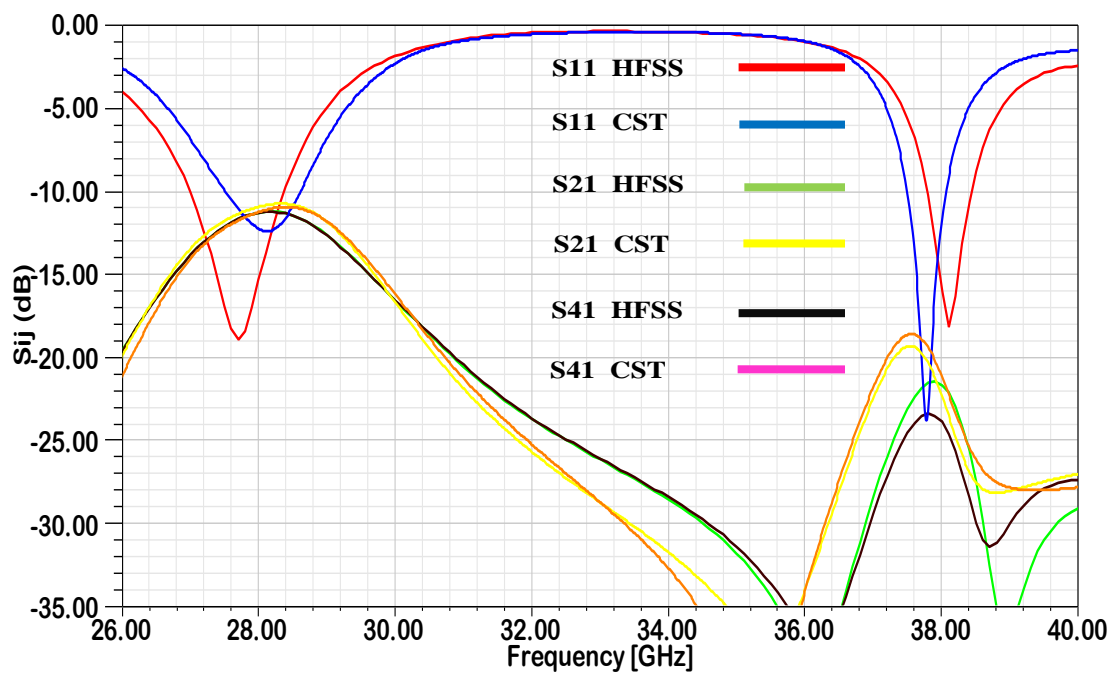
Dans cette section, on a choisi l'antenne MIMO avec les meilleures performances de la section précédente pour faire une comparaison entre les résultats obtenus par les logiciels HFSS et

CST. Les figures ci-dessous présentent les résultats comparés tel que les paramètres S, les facteurs ECC et DG.



**Figure III.31: L'antenne MIMO 4x4 (2) sous logiciel CST**

La figure III.31 présente l'antenne MIMO 4x4 (2) sous logiciel CST. La comparaison de différents résultats sont trouvés dans les figures ci-dessous.



**Figure III.32: Paramètres S avec les logiciels HFSS et CST**

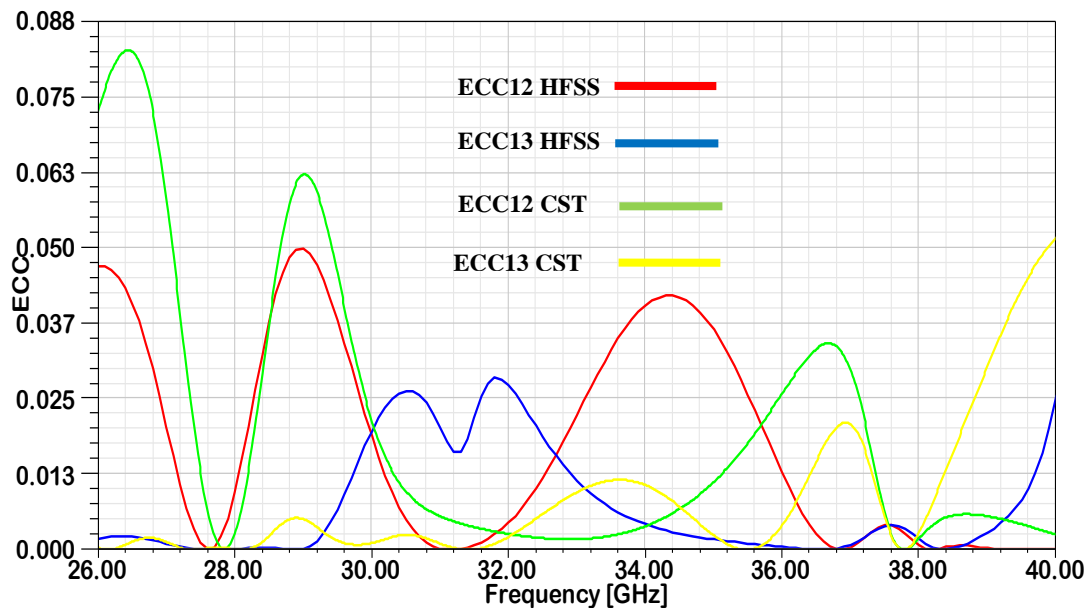


Figure III.33: Le facteur ECC avec les logiciels HFSS et CST

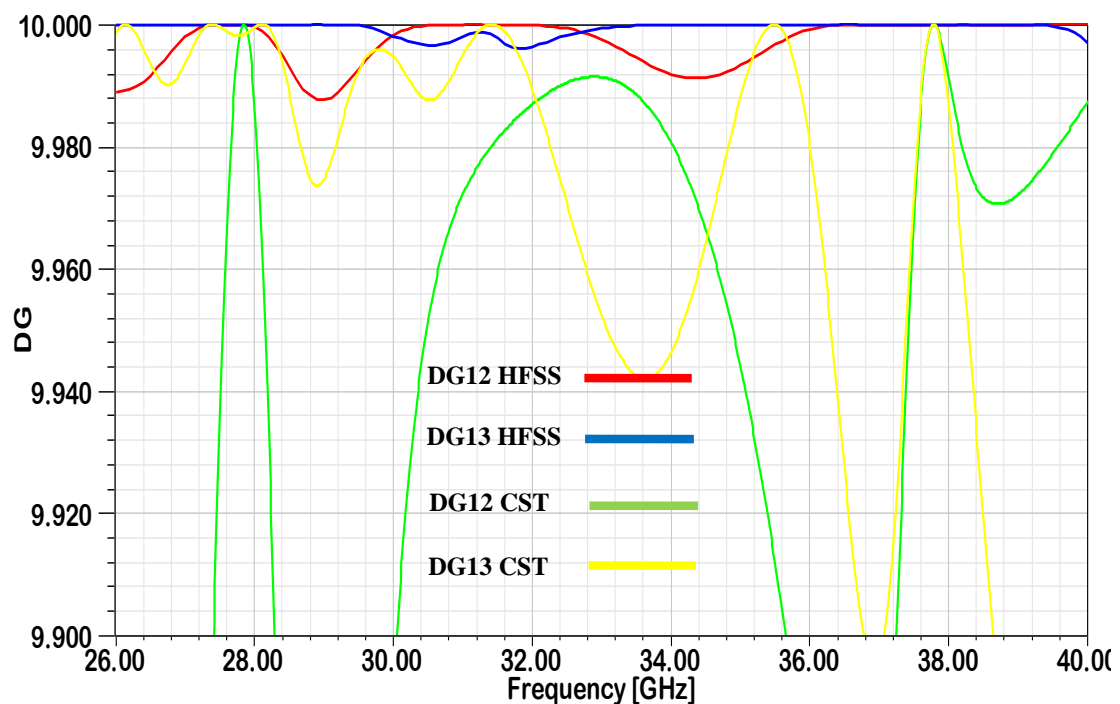


Figure III.34: Le facteur DG avec les logiciels HFSS et CST

Les figures III.32, III.33 et III.34 présentent les résultats comparés tel que les paramètres S et les facteurs ECC et DG des logiciels HFSS et CST.

De la figure III.32, on observe que les coefficients de réflexion et de transmission sont inférieurs de -10 dB sur 28 et 38 GHz, ce qui indique que l'antenne est bien adaptée et que

l'interaction entre les ports est faible. De la figure III.33. on observe que les facteurs ECC sont près de zéro sur 28 et 38 GHz. De la figure III.34, on observe que les facteurs DG sont près de 10 dB sur 28 et 38 GHz.

D'après les figures, on observe que les résultats de paramètres S et les facteurs ECC et DG des deux logiciels sont proches sur les fréquences souhaitées.

### **III.5. Conclusion**

Ce chapitre a été consacré à la simulation, on a analysé les différents résultats de simulation d'antenne MIMO à quatre ports sur les fréquences de 28 et 38 GHz où on a présenté les logiciels de simulation, ensuite on a fait la conception de l'antenne et discuter les résultats de performances et la comparaison des performances entre les logiciels HFSS et CST. On a conclu que la configuration des éléments rayonnants orthogonalement donne les meilleures performances.

# Conclusion Générale

## **Conclusion Générale**

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons mené une étude sur la conception et la simulation d'une antenne microruban pour les applications 5G dans la bande de fréquences des 28/38 GHz. L'objectif principal était d'évaluer une antenne performante et capable de répondre aux exigences des réseaux 5G en termes de débit, de latence et de capacité.

Les résultats obtenus démontrent la possibilité de l'antenne proposée pour répondre aux défis des réseaux 5G. L'antenne présente bande passante et un diagramme de rayonnement favorable, la rendant adaptée à une utilisation dans les terminaux mobiles 5G.

Ce travail s'inscrit dans le contexte d'évolution technologique qui peut transformer le paysage des télécommunications. La 5G ouvre la voie à une multitude d'applications innovantes dans divers domaines, tels que l'Internet des objets, la réalité virtuelle et augmentée, les véhicules autonomes et la télémédecine. Les antennes jouent un rôle crucial dans la réalisation de ces promesses, et ce mémoire apporte une contribution modeste à l'avancement de la recherche dans ce domaine.

En conclusion, l'antenne microruban conçue et simulée dans ce mémoire présente des caractéristiques prometteuses pour les applications 5G. La poursuite de la recherche et du développement dans ce domaine permettra de perfectionner les antennes 5G et de concrétiser le plein potentiel de cette technologie révolutionnaire.

## Références

- [1] M. ALLEL et Z. AMRAOUI, « Conception de nouveau système d'antennes MIMO pour le standard 5G », Mémoire de fin d'étude, Université 8 Mai 1945 de Guelma, 2021, pp. 3, 41-42.
- [2] A. TRARI TANI et A. TAHRI, « L'ESTIMATION DE CANAL POUR LES SYSTEMES MIMO MASSIF », Mémoire de Master, Université Abou Bakr Belkaid de Tlemcen, 2020, pp. 5-9.
- [3] M. DEHEMCHI et A. BOUHAFER, « Etude et Analyse de Méthodes de Beamforming pour des Systèmes Multi-utilisateurs Pour la 5G », Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945 de Guelma, 2019, pp. 5-10.
- [4] « L'évolution des réseaux mobiles 5G : le quoi, le pourquoi et le comment », 2021, pp. 5.
- [5] M. SABEUR et C. BOUABDALLAH, « Conception d'une antenne microruban opérant à 28 GHz pour les réseaux mobiles 5G », Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf de M'sila, 2021, pp. 14-15.
- [6] A. K. BENTOUATI et R. N. BOUBLENZA, « Etude et conception d'antennes MIMO pour les systèmes de communication 5G », Mémoire de Master, Université Abou Bakr Belkaid de Tlemcen, 2022, pp. 25-26.
- [7] A. BOUHAFS et A. ICHOU, « Etude et conception d'un réseau d'antenne pour des applications 5G », Mémoire de Master, Université Abou Bakr Belkaid de Tlemcen, 2020.
- [8] A. BENOMAR, « Etude des antennes à résonateurs diélectriques : application aux réseaux de télécommunications », Thèse en Cotutelle, Electronique, Université de Limoges ; Université Abou Bakr Belkaid de Tlemcen(Algérie), 2015, pp. 9 14, 23-24, 26-29.
- [9] « Ansoft High Frequency Structure Simulator v10 User's Guide », 2005.
- [10] S. BENAOUZIA et K. BERROUCHE, « Simulation d'antennes sous CST (Computer Simulation Technology) », Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2014.
- [11] Sotyohadi, R. Afandi, et D. R. Hadi, « Design and Bandwidth Optimization on Triangle Patch Microstrip Antenna for WLAN 2.4 GHz », MATEC Web Of Conferences, vol. 164, p. 01042, janv. 2018, doi : 10.1051/mateconf/201816401042.
- [12] R. R. Elsharkawy, Khalid. F. A. Hussein, et A. E. Farahat, « Dual-Band (28/38 GHz) Compact MIMO Antenna System for Millimeter-Wave Applications », *Journal Of Infrared, Millimeter, And Terahertz Waves*, vol. 44, n° 11-12, p. 1016-1037, oct. 2023, doi : 10.1007/s10762-023-00943-0.