

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

LA REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Saad Dahleb Blida 1  
Institut d'Aéronautique et des Études Spatiales  
Département Études Spatiales



**Mémoire de fin d'études**

En vue de l'obtention du diplôme de

**Master en Aéronautique**

**Option : Télécommunications Spatiale(s)**

**THEME**

**Etude des systèmes antennaires pour les communications  
MIMO en bande millimétrique**

Proposé et dirigé par :

**Dr. MOUFFOK Lila**

Réalisé par :

**Mr. BAOUNI Younes**

*Soutenue devant le jury composé de :*

**Mme Othmane Fadhila**

**MCA**

**Président**

**Mr Hebib Sami**

**Professeur**

**Examineur**

**Promotion : 2022 / 2023**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## *REMERCIEMENT*

Tout d'abord, j'exprime ma plus grande gratitude et mes remerciements à Allah, le Plus Puissant, pour m'avoir accordé la force, le courage et la détermination nécessaires pour atteindre mon objectif.

Je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude et mes remerciements à mes parents, dont le soutien indéfectible et les années de sacrifice et de patience ont contribué à mon succès.

Avec une profonde gratitude et une profonde gratitude, je tiens à exprimer mes plus sincères remerciements à mon encadreur, Madame **Mouffok Lila**. Son soutien inestimable, ses conseils avisés et sa gentillesse inébranlable ont été déterminants pour me guider non seulement tout au long du développement de ce projet, mais également tout au long de mon parcours académique.

De plus, j'aimerais exprimer ma gratitude à tous les membres du jury d'avoir accepté la responsabilité de lire, de présider et de revoir ce modeste projet, ainsi que d'avoir fourni les commentaires nécessaires pour la mise en forme de ce projet, qui seront d'une grande aide pour l'avenir.

Je voudrais également profiter de cette occasion pour adresser mes sincères remerciements à tous les professeurs du département d'études spatiales qui ont été à mes côtés tout au long de mes années d'études, m'apportant conseils et soutien. Leur dévouement à l'enseignement et leur expertise dans leurs domaines respectifs ont joué un rôle crucial dans la formation de mes connaissances et de mes compétences. Je suis profondément reconnaissant de leur engagement envers mon développement académique et de leur volonté de partager leurs connaissances et leurs expériences.

Enfin, à tous ceux qui m'ont soutenu de quelque manière que ce soit, de près ou de loin, dans la réalisation de ce projet final, j'apprécie profondément leur estime et leur bienveillance.

## *RESUME*

La demande croissante de réseaux 5G et le nombre croissant d'internautes ont conduit à l'exploration de nouvelles technologies pour surmonter les limites de la bande passante traditionnelle inférieure à 6 GHz. L'une de ces technologies est mmWave, qui fonctionne à des fréquences extrêmement élevées et offre une bande passante importante pour une transmission de données plus rapide.

Cependant, mmWave présente également des défis tels qu'une portée effective plus courte et une perte d'espace libre plus élevée en raison de ses caractéristiques de fréquence plus élevées.

Pour relever ces défis, les chercheurs se sont tournés vers les techniques MIMO qui utilisent plusieurs antennes aux extrémités de l'émetteur et du récepteur pour améliorer les performances du système. Cependant, la mise en œuvre de MIMO dans les petits appareils des utilisateurs finaux comme les téléphones mobiles pose des défis pratiques. De plus, un plus grand nombre d'antennes peut générer plus de chaleur, ce qui affecte les performances de l'appareil et la durée de vie de la batterie.

Pour surmonter ces défis, les métasurfaces, des structures conçues artificiellement qui manipulent les ondes électromagnétiques, offrant un contrôle unique sur la propagation des ondes, sont apparues comme une solution prometteuse. En intégrant des métasurfaces avec des antennes, il est possible de réduire le nombre d'antennes requises dans les systèmes MIMO tout en améliorant les performances globales.

Dans ce mémoire, nous allons concevoir des antennes mimo 2\*2 qui fonctionneront en ondes millimétriques avec une bande passante de 23,5 à 29,4 GHz et une fréquence centrale de 26 GHz, après quoi nous ajouterons une métasurface non uniforme 2\*2 pour augmenter la performance du système tels que le gain, le diagramme de rayonnement et les performances de diversité.

## *ABSTRACT*

The increasing demand for 5G networks and the growing number of internet users have led to the exploration of new technologies to overcome the limitations of traditional sub-6 GHz bandwidth. One of these technologies is mmWave, which operates at extremely high frequencies and offers significant bandwidth for faster data transmission.

However, mmWave also presents challenges such as shorter effective range and higher free space path loss due to its higher frequency characteristics.

To address these challenges, researchers have turned to MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) techniques, which utilize multiple antennas at the transmitter and receiver ends to improve system performance. However, implementing MIMO in small end-user devices such as mobile phones pose practical challenges. Moreover, a larger number of antennas can generate more heat, which affects device performance and battery life.

To overcome these challenges, metasurfaces have emerged as a promising solution. Metasurfaces are artificially designed structures that manipulate electromagnetic waves, offering unique control over wave propagation. By integrating metasurfaces with antennas, it is possible to reduce the number of antennas required in MIMO systems while improving overall performance.

In this project, we will design 2x2 MIMO antennas that operate in mmWave with a bandwidth of 23.5 to 29.4 GHz and a central frequency of 26 GHz. Afterward, we will add a non-uniform 2x2 metasurface to enhance system performance, such as gain, radiation pattern, and diversity performance.

## TABLE DES MATIERES

<i>Remerciement</i> .....	III
<i>Résumé</i> .....	IV
<i>Abstract</i> .....	V
<i>Table des matières</i> .....	VI
<i>List de figure</i> .....	IX
<i>List de tables</i> .....	X
<i>List des abréviations</i> .....	XI
Introduction generale.....	1
CHAPTER I. ....	3
I.1    Introduction : .....	4
I.2    Historique de la communication : .....	4
I.3    Définition de la 5G : .....	4
I.4    Les avantages de la 5G : .....	5
I.5    Les technologies de la 5G : .....	5
I.5.1    Ondes millimétriques (mmWave) .....	6
I.5.2    Small cell.....	6
I.5.3    Massive MIMO .....	6
I.5.4    Beamforming.....	7
I.5.5    Full-Duplex .....	7
I.6    Les ondes millimétriques 5G (mmWave) : .....	8
I.6.1    Avantages de la 5G mmWave : .....	8
I.6.2    Inconvénients de la 5G mmWave : .....	10
I.7    Définition des antennes : .....	12
I.8    Caractéristiques des antennes : .....	12
I.8.1    Impédance d'entrée .....	12
I.8.2    Coefficient de réflexion ( $\Gamma$ ) et rapport d'onde stationnaire (ROS) .....	13
I.8.3    Bande Passante .....	13
I.8.4    Régions du champ électromagnétique.....	14
I.8.5    Diagramme de rayonnement.....	15
I.8.6    Directivité.....	15
I.8.7    Gain .....	16
I.8.8    L'efficacité d'antenne.....	16
I.9    Antennes MIMO : .....	17
I.9.1    La Diversité .....	17
I.10    Performances de la diversité : .....	18
I.10.1    Couplage mutuel et Isolation.....	18
I.10.2    Envelope Correlation Coefficient (ECC) .....	18

I.10.3	Diversity Gain (DG).....	19
I.10.4	Gain Effectif Moyen (MEG) .....	19
I.10.5	Total Adjacent Rejection Ratio (TARC).....	20
I.10.6	Channel capacity loss (CCL).....	20
I.11	Conclusion :.....	21
CHAPTER II	.....	22
II.1	Introduction .....	23
II.2	Définition des Métasurfaces :.....	23
II.3	Historique des métasurfaces :.....	23
II.4	Composants des métasurfaces :.....	24
II.5	Principe de fonctionnement des métasurfaces :.....	25
II.6	Applications de métasurface : .....	26
II.7	Métasurface pour antenne MIMO :.....	27
II.8	État de l'art des antennes MIMO utilisant les métasurfaces : .....	28
II.9	Synthèses des travaux présentés :.....	31
II.10	Conclusion :.....	32
CHAPTER III	.....	33
III.1	Introduction :.....	34
III.2	Logiciel CST STUDIO SUITE : .....	34
III.3	Simulation d'une antenne monopole de forme circulaire à 26 GHz :.....	34
III.4	Simulation d'une antenne MIMO à 4 ports à 26 GHz : .....	38
III.4.1	Les coefficients de réflexion .....	39
III.4.2	Isolation.....	39
III.4.3	L'efficacité .....	40
III.4.4	Gain .....	40
III.4.5	Diagramme de rayonnement.....	41
III.4.6	Envelope Correlation Coefficient (ECC) .....	42
III.4.7	Diversity Gain (DG).....	42
III.5	Simulation d'antenne MIMO à 4 ports à 26 GHz avec métasurface :.....	43
III.5.1	Les coefficients de réflexion d'antennes avec métasurface.....	45
III.5.2	Isolation d'antennes avec métasurface .....	45
III.5.3	Gain d'antennes avec métasurface .....	45
III.5.4	ECC d'antennes avec métasurface .....	46
III.5.5	DG d'antennes avec métasurface .....	46
III.6	Simulation d'antenne MIMO à 18GHz :.....	47
III.6.1	Les coefficients de réflexion d'antenne MIMO à 18 GHz .....	47
III.6.2	Isolation d'antenne MIMO à 18 GHz.....	48
III.6.3	L'efficacité d'antenne MIMO à 18 GHz .....	48

III.6.4	Gain d'antennes MIMO à 18 GHz .....	48
III.6.5	Diagramme de rayonnement d'antennes MIMO à 18 GHz.....	49
III.6.6	ECC d'antennes MIMO à 18 GHz : .....	50
III.6.7	DG d'antennes MIMO à 18 GHz : .....	50
III.7	MIMO antenna + Metasurface à 18 GHz :.....	51
III.7.1	Les coefficients de réflexion d'antennes + MS à 18 GHz.....	52
III.7.2	Isolation d'antennes + MS à 18 GHz .....	53
III.7.3	Gain d'antennes + MS à 18 GHz.....	53
III.7.4	ECC d'antennes + MS à 18 GHz.....	54
III.7.5	DG d'antennes + MS à 18 GHz.....	54
III.8	Comparaison des résultats des simulations : .....	55
III.9	Conclusion :.....	55
Conclusion generale : .....		56
References .....		57

## *LISTE DES FIGURES*

Figure I.1: Historique de la communication mobile [3] .....	4
Figure I.2: Les technologies de la 5G [2]. .....	5
Figure I.3: Ondes millimétriques(mmWave) [5]. .....	6
Figure I.4 : Beamforming [7]. .....	7
Figure I.5: 5G mmWave [10]. .....	8
Figure I.6: l'atténuation des ondes millimétriques due O2 et H2O [11]. .....	11
Figure I.7: l'atténuation des ondes millimétriques due à la pluie [13]. .....	11
Figure I.8 : Impédance d'entrée d'antenne [14]. .....	12
Figure I.9 : Bande Passante [14]. .....	13
Figure I.10 : Régions du champ EM [15]. .....	14
Figure I.11 : Diagramme de rayonnement [15]. .....	15
Figure I.12 : Principe de la technologie MIMO [16]. .....	17
Figure II.1: structures de manipulation des ondes EM [21]. .....	23
Figure II.2 : L'architecture de base de la métasurface [23]. .....	24
Figure II.3 : (a)Section de la surface champignon (b) circuit équivalent .....	26
Figure II.4: (a) 2*2 MIMO, (b) 2*2 Metasurface.....	28
Figure II.5 : (a) 2*2 MIMO, (b) Metasurface.....	28
Figure II.6: (a) 2*2 MIMO antenna, (b) 9*6 Metasurface .....	29
Figure II.7 : 4 MIMO antenna avec metasurface.....	29
Figure II.8: (a) 2 MIMO antenna, (b) 8*4 Metasurface .....	30
Figure II.9: antennes (a) front view, (b) back view, (c) 2*3 metasurface. ....	30
Figure II.10: Antenna (a) front view, (b) back view. ....	31
Figure III.1: la structure primaire de l'antenne .....	35
Figure III.2 : $S_{11}$ initial .....	35
Figure III.3: (a) patch avec des fentes ; (b) ground plane avec fente .....	36
Figure III.4 : $S_{11}$ après inséré les fentes sur le Patch .....	36
Figure III.5 : $S_{11}$ après inséré une fente sur le plan de masse.....	36
Figure III.6 : $S_{11}$ après la modification de $I_{cl}$ & $I_{cw}$ .....	37
Figure III.7 : l'efficacité d'antenne.....	37
Figure III.8 : (a) SMA connector, (b) antenne avec connector.....	38
Figure III.9 : 4-port MIMO antenna.....	38
Figure III.10 : coefficients de réflexion de l'antenna a 4-port.....	39
Figure III.11 : isolation de l'antenna a 4-port.....	39
Figure III.12 : L'efficacité de système .....	40
Figure III.13 : Gain des 4 antennes .....	40
Figure III.14 : Diagramme de rayonnement.....	41
Figure III.15 : Envelope Correlation Coefficient de système.....	42
Figure III.16 : Diversity Gain des antennes.....	42
Figure III.17 : (a) unit cell ; (b) metasurface, (c) MIMO + MS .....	43
Figure III.18 : la phase de réflexion de l'unit cell .....	43
Figure III.19 : $S_{11}$ de different espace d'air.....	44
Figure III.20 : Gain d'antenna 1 de different espace d'air.....	44
Figure III.21 : Les coefficients de réflexion d'antennes avec métasurface. ....	45
Figure III.22 : Isolation d'antennes avec métasurface.....	45
Figure III.23 : Gain d'antenne avec métasurface .....	45
Figure III.24 : ECC d'antenne avec métasurface .....	46
Figure III.25 : DG d'antenne avec métasurface .....	46
Figure III.26 MIMO antenna 18 GHz, (a) front view, (b) back view.....	47
Figure III.27 : Les coefficients de réflexion d'antennes à 18 GHz .....	47
Figure III.28: Isolation d'antennes à 18 GHz.....	48
Figure III.29 : L'efficacité d'antenne à 18 GHz.....	48

Figure III.30 : Gain d'antenne à 18 GHz.....	48
Figure III.31 : Diagramme de rayonnement d'antennes à 18 GHz.....	49
Figure III.32: ECC d'antennes à 18 GHz .....	50
Figure III.33 : DG d'antennes à 18 GHz .....	50
Figure III.34 : new unit cell.....	51
Figure III.35 : La phase de réflexion à 18 GHz.....	51
Figure III.36 : MIMO antenna + Metasurface.....	51
Figure III.37 : Gain en fonction d'espace d'air .....	52
Figure III.38: coefficients de réflexion d'antennes + MS à 18 GHz : .....	52
Figure III.39: Isolation d'antennes + MS à 18 GHz : .....	53
Figure III.40 : Gain d'antennes + MS à 18 GHz : .....	53
Figure III.41: ECC d'antennes + MS à 18 GHz .....	54
Figure III.42: DG d'antennes + MS à 18 GHz .....	54

## *LISTE DES TABLEAUX*

Table II.1: Comparaison entre les études .....	31
Table III.1: les dimensions d'antenne .....	34
Table III.2: Les paramètre des fentes .....	35
Table III.3 : les composant du connecteur.....	38
Table III.4 : Comparaison des résultats des simulations .....	55

## *LISTE DES ABREVIATIONS*

2G	Deuxième génération
3G	Troisième génération
4G	Quatrième génération
5G	Cinquième génération
AR	Augmented Reality
BIE	Bande Interdite électromagnétique
CCL	Channel capacity loss
CST	Computer Simulation Technology
DG	Diversity Gain
EBG	Electromagnetic Band Gap
ECC	Envelope Correlation Coefficient
EGC	Equal Gain Combining
EHF	Extremely High Frequency
EM	Electromagnetic
eMBB	Enhanced Mobile Broadband
FIT	Finite Integration Technique
FM	Frequency Modulation
FSPL	Free space path loss
FWA	Fixed Wireless Access
GSM	Global System for Mobile Communications
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IoT	Internet of Things
LTE	Long-Term Evolution
MEG	Mean Effective Gain
MIMO	Multiple Input Multiple Output
mMTC	Massive Machine Type Communications
mmWave	Les ondes millimétriques
MRC	Maximal Ratio Combining
MS	Metasurface

MU-MIMO	Multi -User Multiple Input Multiple Output
MWS	Microwave Studio
NR	New Radio
RF	Radio Frequency
ROS	Rapport d'Onde Stationnaire
SC	Selection Combining
SMA	SubMiniature version A
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SU-MIMO	Single-User Multiple Input Multiple Output
TARC	Total Adjacent Rejection Ratio
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
uRLLC	Ultra-Reliable and Low Latency
VHF	Very High Frequency
VR	Virtual Reality
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access

## INTRODUCTION GENERALE

Comme nous le savons, une nouvelle génération de communication sans fil émerge environ tous les 10 ans, chacune apportant des solutions et des avancées par rapport aux précédentes.

La génération actuelle est la cinquième (5G), qui utilisait initialement une bande de fréquences connue sous le nom de sous-6 GHz. Cependant, avec le besoin croissant de débits de données et de capacité plus élevés, nous avons commencé à utiliser des bandes de fréquences plus élevées, avec une longueur d'onde pouvant être mesurée en millimètre appelée ondes millimétriques (mmWave). Bien sûr ce dernier a répondu à nos demandes, mais il a montré aussi une grande limitation comme la courte distance, la faible pénétration à travers l'objet, ou encore l'atténuation par l'atmosphère.

Pour pallier ces limitations et conserver les bénéfices de la technologie mmWave, les chercheurs explorent des solutions innovantes ; Dans ce mémoire nous allons étudier une de ces solutions dont la mise en place d'antennes MIMO avec des métasurfaces selon la référence [1]. En utilisant les métasurfaces, nous pouvons augmenter le gain des systèmes antennaires et par le même occasionnée augmenter les zones de couverture tout en gardant une faible épaisseur.

Pour remplir les objectifs de ce projet, nous diviserons notre étude en différents chapitres, chacun se concentrant sur différents aspects. Dans le premier chapitre, nous explorerons la cinquième génération de télécommunications sans fil et ses technologies, avec un accent particulier sur la technologie mmWave. Cette section fournira une compréhension approfondie des ondes millimétriques et de ses technologies associées.

Dans la deuxième partie du premier chapitre, nous allons explorer les antennes et leurs paramètres de manière générale. Nous discuterons des caractéristiques de l'antenne, telles que le gain, la directivité et les diagrammes de rayonnement. De plus, nous parlerons de la technologie MIMO et des techniques de diversité, en examinant leurs mesures et évaluations de performance.

Alors que dans le deuxième chapitre, nous donnerons un aperçu des métasurfaces et de leur impact sur les systèmes MIMO, nous commencerons par expliquer le concept de métasurfaces et leurs propriétés uniques et voir ils peuvent contrôler la phase et la direction des ondes incidentes permettant une augmentation du gain de l'antenne. Ensuite, nous approfondirons l'application des métasurfaces dans les systèmes MIMO pour améliorer leurs performances, en

fournissant quelques cas d'étude et en voyant les changements dans les performances de l'antenne.

Dans le chapitre 3, nous nous concentrerons sur la conception d'une antenne qui fonctionne mmWave, plus précisément à 26 GHz. Nous utiliserons à cette fin le logiciel de simulation CST Microwave Studio (CST MWS). Nous commencerons par une introduction au CST, puis nous concevrons un élément d'antenne unique pouvant fonctionner à 26 GHz et nous analyserons les résultats obtenus en termes d'adaptation d'impédance, diagramme de rayonnement et gain.

Ensuite, nous nous concentrerons sur la caractérisation de la méta surface à 26 GHz puis la modélisation du système MIMO à 4 antennes et enfin nous étudions l'ensemble (MIMO+métasurface) à la fréquence 26 GHz puis à 18 GHz.

Enfin, nous présenterons un tableau résumant tous les résultats obtenus en mettant en évidence les performances du système d'antenne avec et sans la métasurface.

Nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale.

## **CHAPTER I.**

# **Les antennes MIMO pour 5G mmWave**

## I.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous fournirons une compréhension complète de la télécommunication sans fil 5G, en nous concentrant sur ses technologies et en explorant spécifiquement le concept d'ondes millimétriques (mmWave) entre ses avantages et ses inconvénients dans la première partie. Alors que, dans la deuxième partie du chapitre, nous nous concentrerons sur les antennes et leurs paramètres. De plus, nous parlerons des systèmes MIMO, puis explorerons le concept de diversité et examinerons les paramètres qui contribuent à sa performance.

## I.2 Historique de la communication :

La première apparition des communications mobiles remonte à la fin des années 70 et au début des années 80, aux États-Unis et en Europe, en forme de communication analogique sous le nom 1G (first generation), et dans les années 90 les communications numériques sont apparues avec la 2G (second generation) aussi appelée GSM, avec les développements et l'émergence des données mobiles, la 3G (third generation ) est apparue aux années 2000 sous le nom UMTS/WCDMA, avec une augmentation du débit de transfert de données, puis la LTE 4G (fourth generation) est venue avec une plus grand augmentation du débit et de la vitesse de transfert de données. Aujourd'hui, avec les développements sans fin, la 5G (fifth generation) est apparue avec une augmentation significative du débit, rapidité et facilité (Figure I.1) [2].

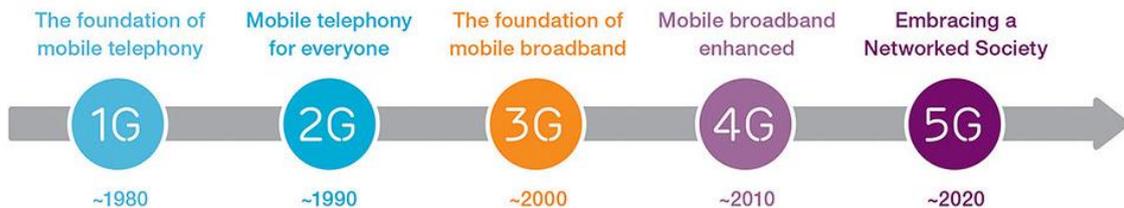


Figure I.1: Historique de la communication mobile [3]

## I.3 Définition de la 5G :

Le réseau sans fil de cinquième génération, appelé 5G, est la dernière itération de la technologie de communication sans fil. Les réseaux 5G utilisent une combinaison de technologies, notamment des antennes avancées, des bandes de fréquence plus élevées et une architecture de réseau innovante pour offrir des vitesses de données nettement plus rapides, une latence plus faible et une plus grande capacité de réseau. Il vise à prendre en charge un large éventail d'applications, y compris les véhicules autonomes, la réalité virtuelle et augmentée, l'Internet des objets et d'autres technologies émergentes, en offrant une connectivité et des performances améliorées [2].

## I.4 Les avantages de la 5G :

Les principaux avantages des réseaux 5G sont les suivants :

- ✓ **Vitesse** : les réseaux 5G peuvent fournir des vitesses de download allant jusqu'à 20 (Gbps) et des vitesses de upload allant jusqu'à 10 (Gbps), ce qui est beaucoup plus rapide que les réseaux 4G.
- ✓ **Faible latence** : la latence fait référence au délai entre l'envoi d'une demande et la réception d'une réponse. Avec la 5G, la latence devrait être réduite à moins de 1 ms, ce qui est bien inférieur aux 10-20 ms de la 4G. Cela permettra aux applications telles que la réalité virtuelle, les jeux et le streaming vidéo en temps réel de fonctionner plus facilement.
- ✓ **Bande passante accrue** : 5G pourra prendre en charge plus d'appareils et plus d'applications gourmandes en données en raison de l'augmentation de la bande passante. Cela signifie qu'un plus grand nombre de personnes pourront utiliser simultanément des applications à haut débit sans subir de retards ni de décalage.
- ✓ **Connectivité améliorée** : les réseaux 5G offrent une connectivité plus fiable et plus stable, garantissant un accès cohérent et ininterrompu aux services, applications et contenus. Ceci est particulièrement crucial pour les applications critiques telles que les chirurgies à distance, l'automatisation industrielle et les communications critiques.

## I.5 Les technologies de la 5G :

Pour répondre aux exigences strictes définies dans la spécification internationale 5G, les ingénieurs ont adopté une approche fondamentalement différente de la conception des réseaux sans fil. L'amélioration des performances de la 5G repose sur un certain nombre de technologies clés (Figure I.2). Voici quelques-unes des technologies clés qui forment la base de 5G :



### I.5.1 Ondes millimétriques (mmWave)

La bande millimétrique (mmWave) fait souvent référence à la gamme de fréquences de 30 GHz à 300 GHz (Figure I.3), également appelée extrêmement haute fréquence (EHF), qui est la bande de fréquences radio la plus élevée du spectre radio. Le terme "mmWave" vient du fait que les longueurs d'onde de ces fréquences vont de 1 mm à 10 mm [2] [3]. Nous couvrirons plus des détails de cette technique au point I.6.

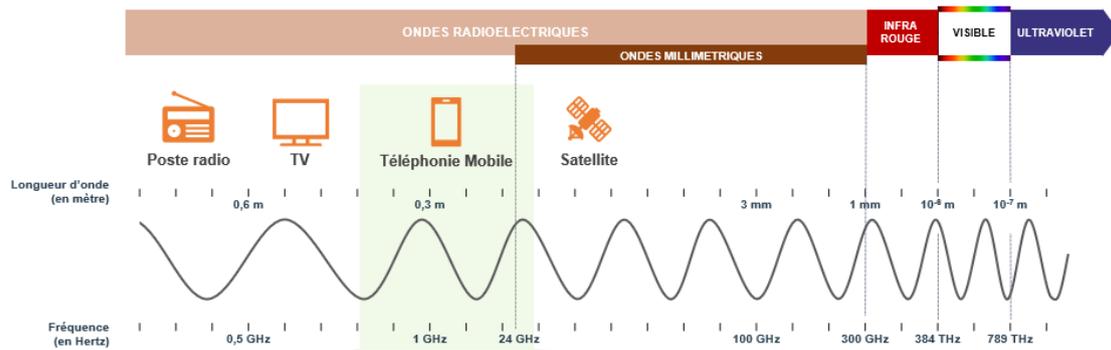


Figure I.3: Ondes millimétriques(mmWave) [5].

### I.5.2 Small cell

Les petites cellules (small cell) 5G sont des points d'accès sans fil à faible puissance et à courte portée (10 m à 1 km) conçus pour améliorer la capacité et la couverture des réseaux 5G. Ils sont généralement utilisés dans les zones densément peuplées (des bâtiments...) Où la demande de données sans fil est élevée et où la congestion du réseau est un problème [3].

On distingue principalement trois types de Small cell en fonction de leurs puissances d'émission et de la zone de couverture, femto-cellules, pico-cellules et microcellules.

### I.5.3 Massive MIMO

Massive MIMO est une autre technique utilisée dans la technologie 5G pour améliorer la capacité et la couverture des systèmes de communication sans fil. Les réseaux MIMO standard ont tendance à utiliser deux ou quatre antennes. Massive MIMO, en revanche, est un système MIMO avec un nombre particulièrement élevé d'antennes [4] [5].

### I.5.4 Beamforming

La formation de faisceaux (Beamforming) est une technique par laquelle un réseau d'antennes peut être dirigé pour transmettre des signaux radio dans une direction spécifique (Figure I.4). Plutôt que de simplement diffuser de l'énergie/des signaux dans toutes les directions, les réseaux d'antennes qui utilisent la formation de faisceaux déterminent la direction d'intérêts et envoient/reçoivent un faisceau de signaux plus fort dans cette direction spécifique.

Cette technique est utilisée dans les radars et les sonars, biomédicaux, et en particulier dans les communications, particulièrement la 5G où des débits de données très élevés sont nécessaires et la seule façon de prendre en charge, cela serait de maximiser l'efficacité de transmission et de réception en utilisant la formation de faisceaux [6] [7].

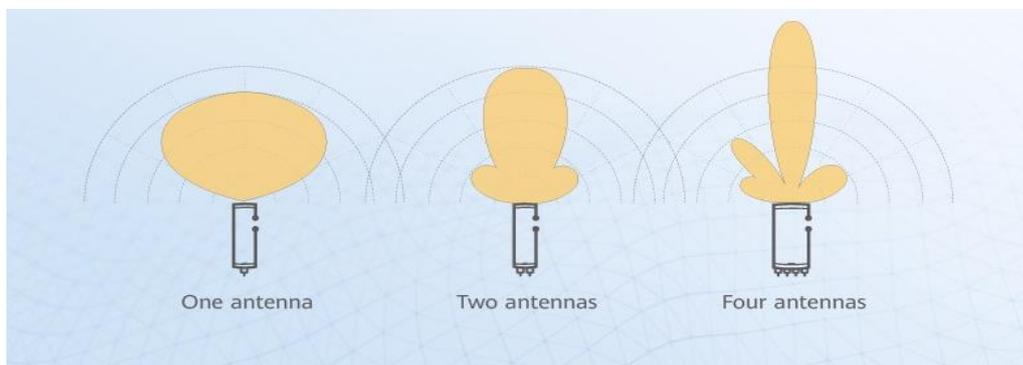


Figure I.4 : Beamforming [7].

### I.5.5 Full-Duplex

Jusqu'à présent, les stations de base et les téléphones portables reposent sur des émetteurs-récepteurs qui doivent se relayer pour transmettre et recevoir des informations sur la même fréquence, ou fonctionner sur des fréquences différentes si un utilisateur souhaite transmettre et recevoir des informations en même temps [8].

En 5G, avec la technologie Full-duplex, nous pouvons transmettre et recevoir des données en même temps, sur la même fréquence. Et cela pourrait doubler la capacité des réseaux sans fil au niveau de leur couche physique la plus fondamentale [9].

## I.6 Les ondes millimétriques 5G (mmWave) :

Le spectre des services 5G couvre non seulement les bandes inférieures à 6 GHz, y compris les bandes actuellement utilisées pour les réseaux 4G LTE, mais s'étend également à des bandes de fréquences beaucoup plus élevées qui n'étaient pas envisagées auparavant pour les communications mobiles. C'est l'utilisation des bandes entre 24 -100 GHz, appelées ondes millimétriques 5G (mmWave), qui offre de nouveaux défis et avantages aux réseaux 5G [10].

Les bandes haute fréquence du spectre au-dessus de 24 GHz ont été ciblées comme ayant le potentiel de prendre en charge de larges bandes passantes et des débits de données élevés, ce qui est idéal pour augmenter la capacité des réseaux sans fil. Ces bandes de haute fréquence sont souvent appelées "mmWave" en raison des courtes longueurs d'onde qui peuvent être mesurées en millimètres. Bien que les mmWave s'étendent jusqu'à 300 GHz, ce sont les bandes 24 GHz à 100 GHz qui devraient être utilisées pour la 5G (Figure I.5). Les bandes mmWave jusqu'à 100 GHz sont capables de prendre en charge des bandes passantes jusqu'à 2 GHz, sans qu'il soit nécessaire d'agréger les bandes pour un débit de données plus élevé [10].

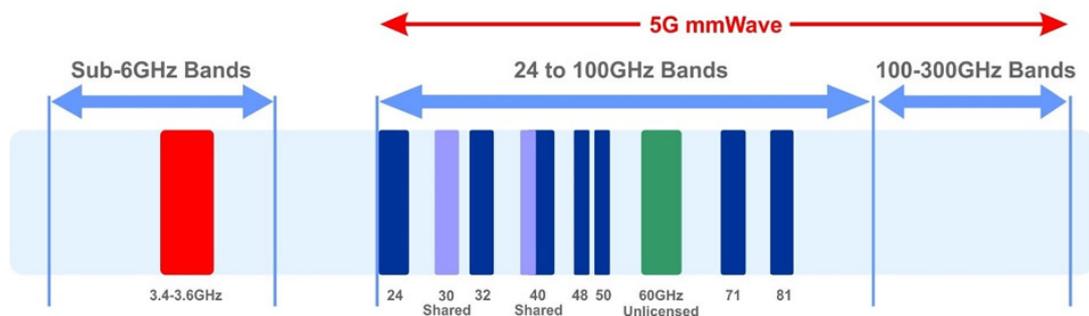


Figure I.5: 5G mmWave [10].

### I.6.1 Avantages de la 5G mmWave :

#### ✓ La Vitesses

La fréquence plus élevée de la communication mmWave permet une vitesse de données beaucoup plus rapide que les technologies sans fil actuelles. Cela signifie que les utilisateurs peuvent charger et télécharger des données beaucoup plus rapidement, ce qui est particulièrement utile pour les applications à large bande passante telles que le streaming vidéo, la réalité virtuelle et augmentée (VR/AR).

### ✓ **Latence plus faible**

La longueur d'onde plus courte de la communication mmWave signifie également qu'elle a une latence plus faible que les technologies sans fil actuelles. Cela signifie qu'il y a moins de retard entre le moment où un utilisateur envoie une commande et le moment où l'appareil répond à cette commande. Ceci est particulièrement important pour des applications telles que les jeux, et les véhicules autonomes, où même un petit retard peut avoir des conséquences importantes.

### ✓ **Larges bandes passantes et débits élevés**

Les bandes mmWave offrent des bandes passantes plus larges par rapport aux bandes de fréquences inférieures. Cette bande passante accrue permet la transmission simultanée de plus grandes quantités de données, ce qui se traduit par des débits de données plus élevés. La disponibilité de larges morceaux de spectre contigus dans les bandes mmWave permet aux opérateurs d'allouer une bande passante substantielle aux utilisateurs ou applications individuelles, facilite un transfert de données plus rapide

### ✓ **Taille d'antenne réduite**

Comme les ondes millimétriques ont une longueur d'onde très courte, les antennes utilisées à ces fréquences peuvent être très petites. Cela permet d'intégrer et d'utiliser un nombre significativement plus grand d'éléments d'antenne dans une zone plus petite, permette l'utilisation d'antennes à réseau de phase, d'antennes à orientation électronique et de diverses autres technologies d'antennes.

### ✓ **Sécurité améliorée**

La longueur d'onde plus courte de la communication mmWave signifie également qu'il est plus difficile d'intercepter et de pirater les signaux que les technologies sans fil actuelles.

### ✓ **Potentiel d'innovation**

La 5G dans les bandes millimétriques ouvre de nouvelles applications et de nouveaux services qui n'étaient pas possibles auparavant, tels que les réseaux privés 5G pour les entreprises, les communications ultra-fiables à faible latence (URLLC) pour les applications industrielles, les villes intelligentes et les systèmes de transport intelligents.

### I.6.2 Inconvénients de la 5G mmWave :

Bien qu'il existe de nombreux avantages à utiliser les ondes millimétriques pour la communication sans fil, il existe également plusieurs inconvénients du mmWave :

#### ✓ Portée limitée

D'après l'équation de télécommunication (loi de Friis). Nous avons la portée (R) donner par la relation (I.1) :

$$R = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_t}{P_r} G_t G_r} \quad \text{I.1}$$

La portée R est proportionnelle à longueur d'onde  $\lambda$ , ce qui signifie que les ondes millimétriques ont une très faible portée efficace par rapport aux autres ondes.

*$P_t$  et  $P_r$  : sont respectivement la puissance transmise et reçue.  
 $G_t$  et  $G_r$  : sont respectivement des gains d'émetteur et de récepteur,  
 $R$  : e la distance entre les antennes Tx & Rx,  $\lambda$  : longueur d'onde*

#### ✓ Free space path loss (FSPL)

La perte sur le trajet en espace libre (FSPL) est relativement élevée pour les mmWave par rapport aux autres bandes de basse fréquence [11], d'après la relation (I.2) ci-dessous :

$$\text{FSPL} = \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2 \quad \text{I.2}$$

#### ✓ Pénétration limitée

Les ondes millimétriques ont des longueurs d'ondes plus courtes et ne peuvent donc pas pénétrer profondément dans la plupart des matériaux, contrairement aux signaux basse fréquence.

#### ✓ Coût élevé

L'investissement requis pour construire l'infrastructure de communication mmWave est important, ce qui peut rendre difficile pour les petites entreprises de rivaliser avec les grandes entreprises qui ont les ressources nécessaires pour investir dans la technologie. L'année dernière, les opérateurs mobiles américains US ont investi près de 4,5 milliards de dollars pour acquérir les ondes millimétriques 5G (mmWave) dans les bandes 37,39 et 47 GHz.

### ✓ Atténuation Atmosphérique :

En plus de l'atténuation causée par la propagation, les obstacles et le milieu environnant, cette bande de fréquences millimétriques fera face à une atténuation supplémentaire due à la présence de gaz atmosphériques qui sont principalement des molécules d'oxygène et de vapeur d'eau [11] [12]. La figure (I.6) indique l'atténuation des ondes millimétriques dues aux gaz atmosphériques et aux molécules.

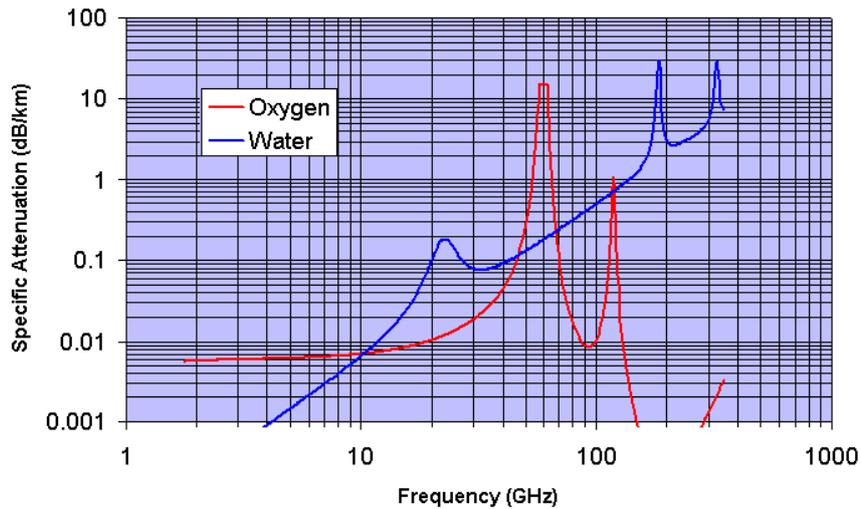


Figure I.6: l'atténuation des ondes millimétriques due O2 et H2O [11].

La pluie est un autre problème lié à la propagation des ondes millimétriques, car les gouttes de pluie ont à peu près la même taille que les longueurs d'ondes radio et provoquent donc la dispersion des signaux radio. Ainsi, l'atténuation par la pluie présentera un impact minimal sur la propagation des ondes millimétriques pour les small cell [3]. La figure (I.7) indique l'atténuation des ondes millimétriques dues à la pluie [13].

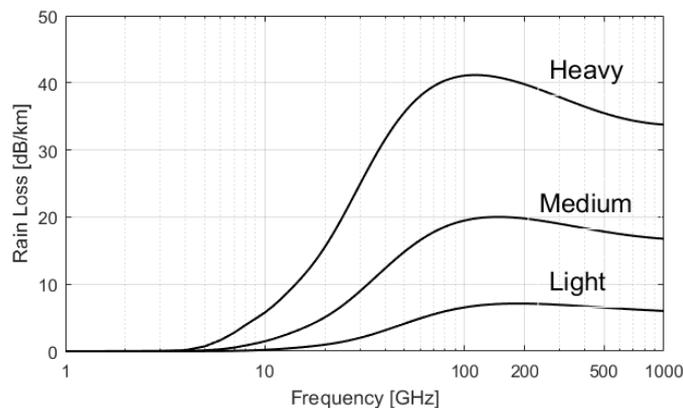


Figure I.7: l'atténuation des ondes millimétriques due à la pluie [13].

## I.7 Définition des antennes :

Selon la norme IEEE, une antenne est définie comme "Un système d'émission ou de réception d'ondes radio" [14]. Autrement dit, l'antenne est une structure de transition entre l'espace libre et le dispositif de guidage, ou inversement.

L'antenne transforme l'énergie électrique d'un signal en énergie électromagnétique qui se propage sous forme d'onde. Une antenne émettrice reçoit un signal d'une ligne de transmission et le diffuse dans l'espace libre. Au contraire, une antenne réceptrice capte l'onde électromagnétique incidente et la convertit en tension.

Les antennes sont utilisées dans une variété d'applications, y compris la radiodiffusion et la télédiffusion, les communications mobiles, les radars, les communications par satellite et les systèmes de navigation. Les performances d'une antenne sont affectées par de nombreux facteurs, tels que sa conception, sa fréquence de fonctionnement et son environnement.

## I.8 Caractéristiques des antennes :

### I.8.1 Impédance d'entrée

L'impédance d'entrée d'une antenne notée  $Z_A$  est définie comme l'impédance présentée par une antenne à ses bornes (Figure I.8), comme le rapport entre la tension et le courant à ses bornes, ou encore comme le rapport entre les composantes électrique et magnétique du champ aux accès de l'antenne [14]

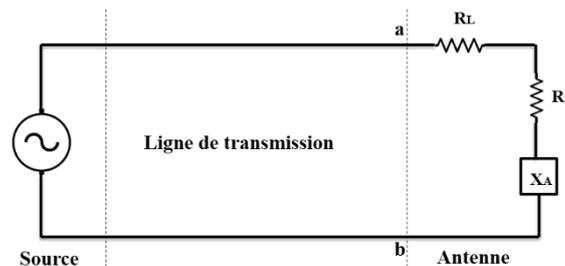


Figure I.8 : Impédance d'entrée d'antenne [14].

L'impédance d'entrée  $Z_A$  constitue une partie réelle  $R_A$  et imaginaire  $X_A$ , la relation (I.3) :

$$Z_A = R_A + jX_A \quad \text{I.3}$$

$$R_A = R_r + R_L \quad \text{I.4}$$

$R_A$  ( $\Omega$ ) : est la résistance de l'antenne.  $X_A$  ( $\Omega$ ) : est la réactance d'antenne

$R_r$  ( $\Omega$ ) : la résistance de rayonnement.  $R_L$  ( $\Omega$ ) : la résistance de perte

### I.8.2 Coefficient de réflexion ( $\Gamma$ ) et rapport d'onde stationnaire (ROS)

Lorsqu'une onde incidente change de milieu de propagation, une partie de cette onde est réfléchiée, une autre partie est transmise dans le milieu. Le coefficient de réflexion noté ( $\Gamma$ ) ou ( $S_{11}$ ) d'une antenne se définit comme étant le rapport entre l'amplitude de l'onde réfléchiée et l'onde incidente. Le coefficient de réflexion ( $\Gamma$ ) est donné par la relation (I.5) :

$$\Gamma = \frac{Z_A - Z_C}{Z_A + Z_C} \quad \text{I.5}$$

$Z_C$  ( $\Omega$ ) : l'impédance caractéristique de la ligne. Généralement  $Z_C = 50 \Omega$

Si  $Z_A = Z_C$ , l'antenne est parfaitement adaptée, et  $\Gamma=0$ , pas de réflexion.

Le rapport d'ondes stationnaires en tension (ROS), (VSWR) en anglais, est le rapport entre la tension maximale et la valeur minimale de l'onde stationnaire existant aux bornes d'entrée de l'antenne, on peut le calculer en utilisant la relation (I.6) :

$$\text{ROS} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad \text{I.6}$$

### I.8.3 Bande Passante

La bande passante d'une antenne est la plage de fréquences dans laquelle on peut normalement l'utiliser. La valeur des limites sur les critères de fonctionnement de l'antenne définit un domaine de fréquence situé entre une valeur minimale  $f_1$  et une valeur maximale  $f_2$  (Figure I.9). La largeur de bande Passante  $B$  est donnée par la relation (I.7) :

$$B = f_2 - f_1 \quad \text{I.7}$$

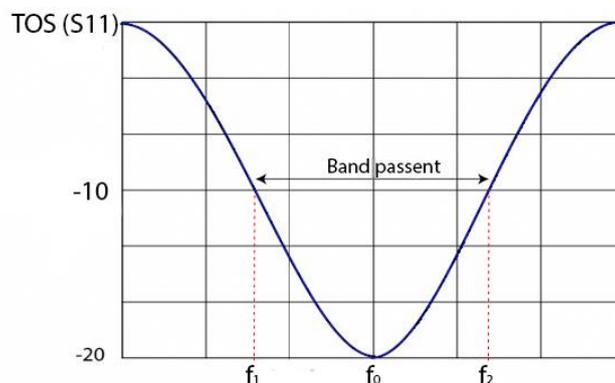


Figure I.9 : Bande Passante [14].

### I.8.4 Régions du champ électromagnétique

L'espace entourant une antenne est généralement divisé en trois régions (Figure I.10) [15]:

- ✓ Région du champ proche réactif (Rayleigh) : la partie de la région du champ proche entourant immédiatement l'antenne où le champ réactif prédomine. En général, la limite externe est la distance donner par la relation (I.8) :

$$R < 0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \quad \text{I.8}$$

- ✓ Région du champ proche rayonné (Fresnel) : La région du champ entre la région du champ proche réactive et la région du champ lointain où la distribution du champ dépend de la distance de l'antenne donner par la relation (I.9) :

$$0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \leq R < \frac{D^2}{2\lambda} \quad \text{I.9}$$

- ✓ Région du champ lointain (Fraunhofer) : La région du champ où la distribution angulaire du champ est indépendante de la distance de l'antenne. Dans cette région, les composantes du champ sont essentiellement transversales. La limite de cette région est la distance donner par la relation (I.10) :

$$R \geq \frac{D^2}{2\lambda} \quad \text{I.10}$$

$\lambda$ : la longueur d'onde  
 $D$  : la plus grande dimension de l'antenne

Ces régions sont indiquées pour identifier la structure du champ dans chacune d'elles.

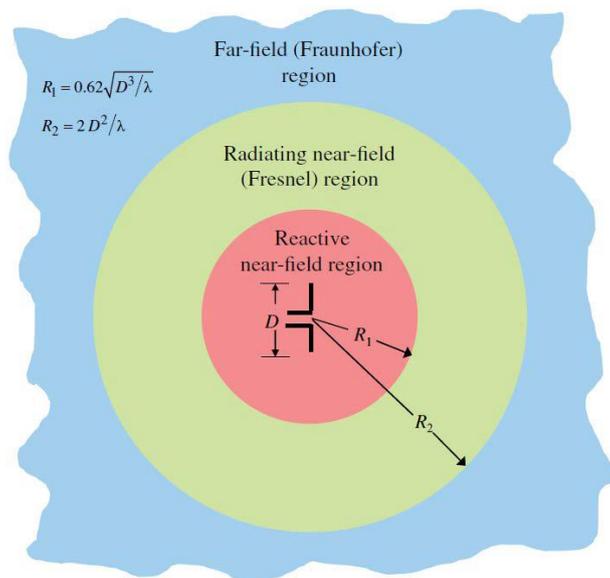


Figure I.10 : Régions du champ EM [15].

### I.8.5 Diagramme de rayonnement

Un diagramme de rayonnement d'antenne est une représentation graphique des variations de la puissance que rayonne l'antenne dans les différentes directions de l'espace autour d'elle, et il est déterminé dans la région du champ lointain et représenté en fonction des coordonnées sphériques (Figure I.11).

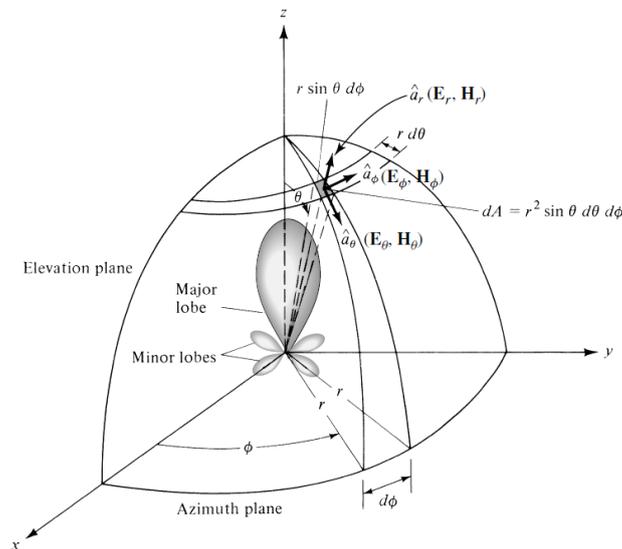


Figure I.11 : Diagramme de rayonnement [15].

Différentes parties d'un diagramme de rayonnement sont appelées lobes, qui peuvent être subdivisés en lobes principaux ou en lobes secondaires.

### I.8.6 Directivité

La directivité est à la concentration de la puissance rayonnée dans une direction particulière. Il décrit à quel point une antenne concentre son énergie dans une direction spécifique et est une mesure de sa capacité à transmettre ou à recevoir des signaux dans cette direction. Elle est le rapport de l'intensité de rayonnement d'une antenne dans une direction donnée à l'intensité de rayonnement moyenne dans toutes les directions, voire la relation (I.11).

$$D = \frac{U}{U_{moy}} = \frac{U}{\frac{P_{ray}}{4\pi}} = \frac{4\pi U}{P_{ray}} \quad I.11$$

D : la directivité.

U : l'intensité de rayonnement.

$U_{moy}$  : l'intensité de rayonnement moyenne.

$P_{ray}$  : puissance de rayonnement.

### I.8.7 Gain

Le gain est une autre mesure utile décrivant la performance d'une antenne. Il définit l'augmentation de puissance émise ou reçue dans le lobe principal. Il est dû au fait que l'énergie est focalisée dans une direction, comme l'énergie lumineuse peut être concentrée grâce à un miroir et/ou une lentille convergente.

Le gain est défini comme le rapport entre la densité de puissance d'antenne dans une direction donnée à la densité de puissance rayonnée par une antenne isotrope, la relation (I.12).

$$G(\theta, \Phi) = \frac{P_{ray}(\theta, \Phi)}{P_i} \quad \text{I.12}$$

G : le gain.

$P_i$  : puissance de rayonnement d'une antenne isotrope.

### I.8.8 L'efficacité d'antenne

Un autre paramètre qui est fréquemment employé pour juger la qualité des antennes de transmettre et de recevoir est l'efficacité. Ce dernier indique la quantité d'énergie qui est rayonnée par rapport à celle qui est consommée par l'antenne elle-même. Elle est souvent exprimée en pourcentage et doit être la plus élevée possible pour une antenne donnée.

L'expression générale de l'efficacité du rayonnement est donnée par la relation (I.13), et l'efficacité totale est donnée par la relation (I.14).

$$\eta = \frac{P_{ray}}{P_{in}} \times 100 \% \quad \text{I.13}$$

$$\eta_{tot} = \eta \times (1 - |S_{11}|^2) \quad \text{I.14}$$

La relation entre le gain, la directivité et l'efficacité est (I.15) :

$$G = \eta \times D \quad \text{I.15}$$

$\eta$ : l'efficacité de rayonnement.

$P_{in}$  : puissance fournie à l'antenne.

## I.9 Antennes MIMO :

Les antennes MIMO sont une technologie utilisée dans les systèmes de communication sans fil. Cela fait référence à l'utilisation de plusieurs antennes pour la transmission et la réception simultanées de plusieurs flux de données (figure I.12) [16], ce qui nous permet d'augmenter le débit de données et d'améliorer la capacité globale du système. En tirant parti des différents chemins de signal et de la diversité spatiale, la technologie MIMO peut atténuer des problèmes tels que l'évanouissement et les interférences, ce qui se traduit par une qualité de signal améliorée et des débits de données plus élevés.

Les systèmes MIMO peuvent être classés en fonction du nombre d'antennes utilisées. Les configurations courantes incluent des configurations d'antenne 2x2, 4x4 ou même supérieures, indiquant le nombre d'antennes côté émetteur et côté récepteur. Chaque configuration offre différents niveaux de multiplexage spatial et de diversité, offrant des avantages de performances variables.

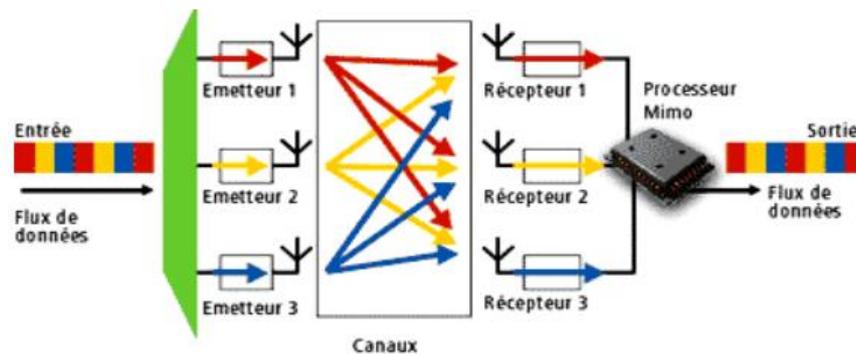


Figure I.12 : Principe de la technologie MIMO [16].

### I.9.1 La Diversité

Le signal transmit allons de l'émetteur au récepteur subie plusieurs sortes d'atténuations comme L'affaiblissement de parcours L'évanouissement rapide (fast fading) ...etc. Cependant le plus imprévisible des évanouissements est l'évanouissements de Raleigh qui est due essentiellement au multi trajet suivie par les signaux causant leur arriver de façons cumulatifs ou soustractive provoquant des variations continues et imprévisibles des phases des signaux suivant le temps, entraînant des évanouissements répétitifs. Une technique de réception spéciale connu sous le nom de diversité est envisageable [17].

Le principe de base de la diversité est que le récepteur doit disposer de plusieurs versions du signal transmis et une bonne combinaison d'antennes pour avoir des signaux à évanouissement indépendants, mais aussi une bonne technique de combinaison de signaux permettant de maximiser le SNR moyen à la sortie.

## I.10 Performances de la diversité :

La performance d'une technique de diversité peut être mesurée en termes de différents paramètres :

### I.10.1 Couplage mutuel et Isolation

Lorsque deux antennes sont proches l'une de l'autre, les champs électromagnétiques générés par une antenne affectent le comportement des autres antennes du système. Cette interaction est appelée couplage mutuel. Ce couplage doit être pris en compte car il joue un rôle très important sur les performances des systèmes d'antennes car il est inclus dans le calcul des performances en diversité du système [15] [18].

D'autre part, l'isolation fait référence au degré auquel les signaux transmis par une antenne sont isolés ou séparés des signaux transmis par d'autres antennes dans le même système. Une isolation élevée signifie qu'il y a une interaction ou des interférences minimales entre les antennes, ce qui est souhaitable car cela peut améliorer la qualité du signal et réduire la probabilité d'interférences [14].

### I.10.2 Envelope Correlation Coefficient (ECC)

Le coefficient de corrélation d'enveloppe nous indique à quel point les diagrammes de rayonnement de deux antennes sont indépendants. Un ECC élevé indique que les antennes sont fortement corrélées, ce qui signifie qu'elles sont susceptibles de recevoir des signaux similaires. Un faible ECC indique que les antennes sont moins corrélées, ce qui peut conduire à un gain de diversité amélioré. Le coefficient de corrélation d'enveloppe prend en compte la forme du diagramme de rayonnement des antennes, la polarisation et même la phase relative des champs entre les deux antennes [14] [18].

Pour obtenir la formule mathématique de l'ECC, nous allons d'abord définir mathématiquement le diagramme de rayonnement comme une fonction vectorielle en coordonnées sphériques, la relation (I.16) [19].

L'ECC peut être calculé à l'aide de la formule (I.17 & I.18)

$$\overrightarrow{F}_{(\theta,\varphi)}(\Omega) = F_{(\theta)} \cdot \overrightarrow{u}_{(\theta)} + F_{(\varphi)} \cdot \overrightarrow{u}_{(\varphi)} \quad \text{I.16}$$

$$\rho = \frac{(\iint \overrightarrow{F}_1 \cdot \overrightarrow{F}_2^* d\Omega)^2}{\iint F_1^2 d\Omega \cdot \iint F_2^2 d\Omega} \quad \text{I.17}$$

$$\text{ECC} = |\rho| \quad \text{I.18}$$

Si  $ECC = 0,5$  c'est ok, supérieur à 0,5 est considéré comme mauvais et 0,3 ou moins est considéré comme assez bon pour les applications MIMO.

L'ECC s'obtient aussi en utilisant les paramètres S par la formule (I.19), pour N antennes :

$$\rho = \frac{(\sum_{n=1}^N S_{i,n}^* S_{n,j}^*)^2}{\prod_{k=i,j}(1 - \sum_{n=1}^N S_{k,n}^* S_{n,k}^*)} \quad \text{I.19}$$

$F_i, F_j$ : le diagramme de rayonnement d'antenne (i) et (j).

$\vec{u}_{(\theta)}, \vec{u}_{(\varphi)}$ : des vecteurs unitaires.

$(\Omega) = (\theta, \varphi)$  les angles sphériques.

$\rho$ : coefficient de corrélation

### I.10.3 Diversity Gain (DG)

L'avantage obtenu en utilisant un système de diversité peut être exprimé par le gain de diversité (DG). Le DG est exprimé en termes de rapport entre le (SNR) obtenu avec plusieurs antennes et le SNR obtenu avec une seule antenne. Un DG plus élevé signifie que la qualité du signal est améliorée, ce qui peut entraîner de meilleures performances du système et des débits de données plus élevés. La valeur de DG peut être extraite de la formule (I.20) suivante :

$$DG = 10\sqrt{1 - ECC^2} \quad \text{I.20}$$

### I.10.4 Gain Effectif Moyen (MEG)

Le gain effectif moyen (MEG) est un paramètre utilisé pour caractériser les performances d'une antenne dans un environnement spécifique. Il est défini comme le rapport de la puissance moyenne reçue par une antenne mimo et de la puissance reçue par une antenne isotrope [20].

La valeur MEG nécessaire pour présenter de bonnes caractéristiques de diversité doit être  $-12\text{dB} < \text{MEG} < -3\text{dB}$ . Pour le système de N antennes MEG peut être évalué par (I.21) :

$$\text{MEG}_i = 0.5 \left( 1 - \sum_{j=1}^N |S_{ij}|^2 \right) \quad \text{I.21}$$

### I.10.5 Total Adjacent Rejection Ratio (TARC)

TARC est défini comme le rapport de la racine carrée de la puissance totale réfléchie ( $P_r$ ) divisée par la racine carrée de la puissance incidente totale ( $P_i$ ). Il est généralement utilisé dans le cadre de filtres d'antenne et de duplexeurs.

En mesurant le TARC d'un système d'antenne, nous pouvons déterminer dans quelle mesure il est capable de rejeter ces signaux indésirables des bandes de fréquences adjacentes. Un TARC plus élevé signifie que le système d'antenne est plus apte à rejeter ces signaux, ce qui peut améliorer les performances du système et réduire les interférences [20].

Pour un système mimo N-antennes, le TARC est donnée par (I.22) :

$$\text{TARC} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N |P_{r_k}|^2}{\sum_{k=1}^N |P_{i_k}|^2}} \quad \text{I.22}$$

### I.10.6 Channel capacity loss (CCL)

La perte de capacité de canal (CCL) est une mesure de la réduction du débit de données maximal réalisable dans un système de communication en raison de divers facteurs tels que le bruit, les interférences et l'évanouissement. Le CCL est particulièrement important dans les systèmes de communication sans fil, où la qualité du canal de transmission peut varier dans le temps et dans l'espace. Aussi CCL décrit la perte de taux de transmission d'informations due à l'effet de corrélation. Pour une meilleure fonction de diversité, la valeur pratique acceptable de CCL (<0,4 bits/sec/Hz) [20]. Le CCL peut être calculé en utilisant la formule (I.23) suivante :

$$\text{CCL} = -\log_2 \det(\Psi_R) \quad \text{I.23}$$

Avec que  $\Psi_R$  est la matrice de corrélation d'antenne donnée par (I.24) :

$$\Psi_R = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \dots & \sigma_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{N1} & \dots & \sigma_{NN} \end{bmatrix} \quad \text{I.24}$$

$$\sigma_{ii} = 1 - \left| \sum_{j=1}^N S_{ij}^* S_{ji} \right| \quad \text{I.25}$$

$$\sigma_{ij} = 1 - \left| \sum_{k=1}^N S_{ik}^* S_{ki} \right| \quad \text{I.26}$$

## **I.11 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons couvert deux grandes parties. Dans la première partie, nous avons discuté de la 5G en général et exploré ses différentes technologies et leur rôle dans l'amélioration de la capacité des canaux. Nous nous sommes spécifiquement concentrés sur la technologie mmWave, nous avons examiné ses avantages, tels que sa capacité à fournir des débits de données élevés et une faible latence. Cependant, nous avons également reconnu ses limites, telles que la zone de couverture limitée et la sensibilité au blocage du signal par des obstacles.

Passant à la deuxième partie où nous nous sommes penchés sur les antennes, nous avons exploré différentes caractéristiques d'antenne, y compris le gain, la directivité et les diagrammes de rayonnement. De plus, nous avons introduit le concept de systèmes MIMO, et nous avons également discuté du concept de diversité dans le système MIMO et de la manière d'évaluer les performances d'un système de communication sans fil, nous avons mis en évidence des mesures clés telles qu'un coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC) et un gain de diversité (DG)

**CHAPTER II.**  
**Etat de l'art des antennes MIMO utilisant des  
métasurfaces**

## II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter le principe de fonctionnement des métasurfaces, leurs intérêts et ses applications, puis on présentera comment elles peuvent être utilisées dans le cadre des systèmes d'antennes MIMO pour améliorer leurs performances et on finira par un état de l'art des antennes MIMO utilisant les métasurface en mm-Wave.

## II.2 Définition des Métasurfaces :

Les métasurfaces sont des surfaces artificiellement conçues qui consistent en un réseau de minuscules éléments résonants disposés de façon à contrôler la propagation des ondes électromagnétiques (Figure II.1) [21]. Ces éléments sont conçus pour interagir avec les ondes électromagnétiques incidents et manipuler leurs propriétés telles que la phase, l'amplitude, la polarisation et la direction. Grâce à leur capacité à manipuler les ondes électromagnétiques à des échelles sous-longueur d'onde, les métasurfaces offrent un niveau remarquable de flexibilité et de précision dans le façonnage des ondes électromagnétiques, ce qui les rend très précieuses dans une variété d'applications telles que les antennes, l'optique, la détection et les télécommunications.

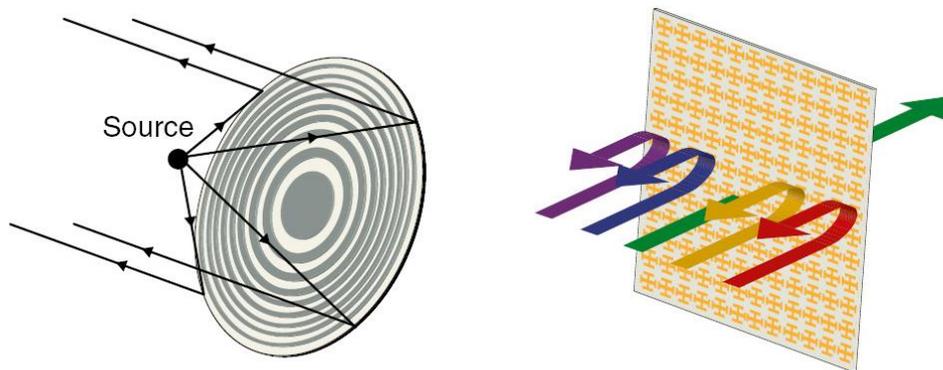


Figure II.1: structures de manipulation des ondes EM [21].

## II.3 Historique des métasurfaces :

Les métasurfaces ont évolué à partir du domaine des métamatériaux, qui a émergé à la fin des années 1990. Le concept d'utiliser des matériaux artificiellement structurés pour obtenir des propriétés électromagnétiques extraordinaires a été proposé par John Pendry [22]. Au début des années 2000, les chercheurs ont commencé à explorer la manipulation des ondes électromagnétiques en utilisant des résonateurs sous-longueurs d'onde disposés en réseau planétaire. Cela a conduit au développement des métasurfaces en tant que contreparties bidimensionnelles, offrant des avantages tels que des profils plans et une compatibilité avec les systèmes optiques existants.

## II.4 Composants des métasurfaces :

Les métasurfaces sont composées de plusieurs composants clés qui fonctionnent ensemble pour manipuler les propriétés des ondes EM (Figure II.2) [23]. Ici, nous mentionnons quelques composants d'une métasurface :

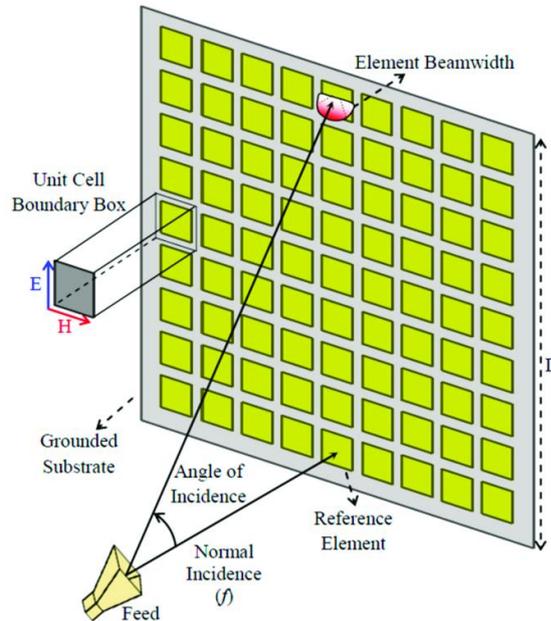


Figure II.2 : L'architecture de base de la métasurface [23].

### ✓ Éléments de sous-longueur d'onde (Subwavelength Elements)

Les éléments de sous-longueur d'onde, également appelés méta-atomes, sont les éléments constitutifs d'une métasurface. Ces éléments sont généralement plus petits que la longueur d'onde de l'onde électromagnétique incidente et sont responsables de la réponse optique souhaitée. Leur taille, leur géométrie et les propriétés de leur matériau déterminent le comportement de la métasurface.

### ✓ Cellule unitaire (Unit cell)

La cellule unitaire est le bloc de construction d'une métasurface, constituée d'éléments de sous-longueur d'onde disposés selon un motif périodique. La disposition, l'espacement et l'orientation des éléments de sous-longueur d'onde dans la cellule unitaire influencent la façon dont la métasurface interagit avec l'onde EM.

### ✓ Substrat de métasurface

Le substrat de métasurface fournit le support physique et la stabilité des éléments de sous-longueur d'onde et de la structure de la cellule unitaire. Il peut s'agir d'un matériau solide, comme le verre ou le silicium, ou d'un matériau souple, comme les polymères ou le graphène.

✓ Matériaux diélectriques ou métalliques

Les éléments de sous-longueur d'onde peuvent être constitués de matériaux diélectriques ou métalliques, en fonction des propriétés optiques souhaitées. Les méta-atomes diélectriques offrent un comportement à faible perte, ce qui les rend adaptés aux applications nécessitant une transmission élevée ou une manipulation de phase efficace. Les méta-atomes métalliques, présentent des effets plasmoniques et sont efficaces pour les applications impliquant de fortes interactions lumière-matière ou des champs optiques améliorés.

✓ Éléments fonctionnels

Cette catégorie englobe les éléments de contrôle de phase et les éléments de contrôle de polarisation. Les éléments de contrôle de phase introduisent des déphasages contrôlés, permettant la mise en forme du front d'onde et l'orientation du faisceau. Les éléments de commande de polarisation manipulent l'état de polarisation de la lumière, permettant la conversion et le filtrage de polarisation.

## II.5 Principe de fonctionnement des métasurfaces :

Pour mieux comprendre le fonctionnement des métasurface, certains modèles de circuit ont été proposés. On s'intéressera au modèle de circuit résonant de type LC parallèle [23].

Ce modèle a été introduit par Sievenpiper [23]. L'impédance d'une surface (formes métalliques imprimé sur un substrat) est remplacée par celle d'un circuit LC résonant parallèle comme montre la figure (II.3) dont l'expression est présentée dans l'équation (II.1). Le modèle d'impédance de surface est utilisé pour prédire les propriétés de réflexion et peut être calculé par :

$$Z = \frac{j\omega L}{1 - \omega^2 LC} \quad \text{II.1}$$

Cette équation montre que la surface est inductive à faible fréquences et capacitive à haute fréquences. A la fréquence de résonance  $\omega_0$ , l'impédance est très élevée. La valeur de la fréquence de résonance est présentée dans l'équation (II.2). Cette fréquence de résonance conduit à un déphasage nul des ondes réfléchies.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{II.2}$$

Sievenpiper, explique que l'impédance élevée est associée à une bande de fréquences où la propagation des courants électriques de surfaces est bloquée. Cette bande de fréquences est appelée bande interdite et elle est centrée à la fréquence de résonance. C'est ce qui confère le nom de Matériaux à Bande Interdite électromagnétique (BIE) ou Electromagnetic Band Gap (EBG) en anglais, aux surfaces à hautes impédance.

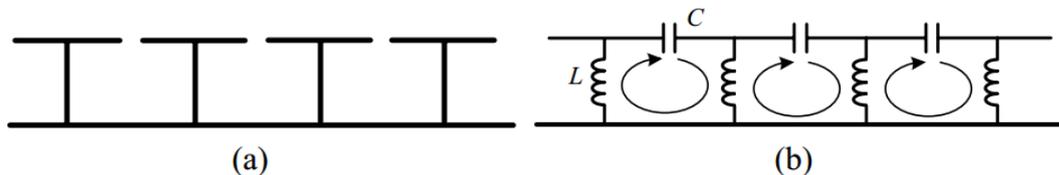


Figure II.3 : (a)Section de la surface champignon (b) circuit équivalent

## II.6 Applications de métasurface :

- ✓ Mise en forme et focalisation du faisceau

En manipulant la phase et l'amplitude des ondes EM, les métasurfaces peuvent façonner et contrôler la direction des faisceaux d'ondes EM avec une grande précision. Cette capacité permet la génération de fronts d'onde complexes, y compris des faisceaux vortex et des faisceaux de Bessel non diffractant, qui trouvent des applications dans divers domaines tels que l'imagerie, la communication et le piégeage optique.

- ✓ Applications de détection et de bio-détection

Les métasurfaces ont trouvé des applications dans la détection et la bio-détection grâce à leur capacité à améliorer l'interaction entre les ondes EM et le milieu environnant. En concevant les propriétés de la métasurface, telles que les fréquences de résonance et les améliorations de champ, ils peuvent détecter les changements d'indice de réfraction, de liaison moléculaire ou de réactions chimiques avec une sensibilité élevée. Cette capacité permet aux métasurfaces d'être utilisées dans la bio-détection, la surveillance environnementale et l'analyse chimique, offrant des opportunités prometteuses pour les technologies de détection avancées.

- ✓ Applications haute fréquence

Les métasurfaces se sont étendues aux gammes haute fréquence (térahertz), fournissant des dispositifs compacts pour la détection, l'imagerie et la communication. Ils offrent un contrôle précis de la phase, de la polarisation et de la direction du faisceau des ondes micro-ondes. Les métasurfaces trouvent des applications dans divers domaines, notamment l'imagerie de sécurité, les tests non destructifs, la communication sans fil et les systèmes radar.

## II.7 Méta-surface pour antenne MIMO :

Les mé-ta-surfaces sont devenues une technologie prometteuse pour améliorer les performances des antennes MIMO [24]. Voici quelques applications spécifiques des mé-ta-surfaces pour les antennes MIMO :

- ✓ Réduction du couplage mutuel

L'ajout de mé-ta-surface à un système d'antenne mimo est l'une des solutions pour réduire le couplage mutuel et augmenter l'isolation entre les antennes. Dans laquelle la mé-ta-surface agit comme une couche de découplage, minimisant efficacement les interférences et améliorant l'isolation entre les antennes. Cela aidera à améliorer les performances globales du système, à réduire l'impact du couplage sur la capacité des canaux et à obtenir une meilleure qualité de signal.

- ✓ Beamforming et multiplexage spatial

Les mé-ta-surfaces intégrées aux antennes MIMO offrent des capacités avancées de formation de faisceaux, permettant un multiplexage spatial efficace. En contrôlant la distribution de phase et d'amplitude à travers les éléments de mé-ta-surface, le diagramme de rayonnement de chaque élément MIMO peut être ajusté dynamiquement. Cela facilite la direction du faisceau, la mise en forme du faisceau et le beamforming vers des directions spécifiques, ce qui améliore la capacité du canal, augmente le rapport signal sur bruit (SNR) et améliore le multiplexage spatial dans les systèmes de communication MIMO.

- ✓ Amélioration de la sélectivité en fréquence et de la bande passante

En adaptant la géométrie et les propriétés des matériaux de la mé-ta-surface, il est possible d'obtenir des réponses sélectives à des fréquences ou bandes de fréquences spécifiques, améliorant ainsi la bande passante et les performances globales du système.

- ✓ Réduction du nombre d'antennes

Avec l'utilisation d'une mé-ta-surface, un seul ensemble d'antennes peut être contrôlé dynamiquement pour produire plusieurs diagrammes de rayonnement, ce qui réduit efficacement le nombre total d'antennes requises dans le système. Cette approche simplifie la conception du système, minimise les besoins en espace et peut entraîner des économies de coûts en termes de matériel d'antenne et d'installation.

## II.8 État de l'art des antennes MIMO utilisant les métasurfaces :

Les auteurs de la référence [1] présente une conception d'un système d'antenne MIMO basé sur une métasurface pour les systèmes de communication 5G à ondes millimétriques. L'antenne MIMO se compose de quatre éléments placés avec un décalage de 90 degrés, permettant une configuration compacte. Avec une taille globale de  $24 \times 24 \text{ mm}^2$ , et il fonctionne dans une large bande passante allant de 23,5 à 29,4 GHz. Une métasurface non uniforme, comprenant quatre éléments, est placée à l'arrière de la configuration MIMO pour améliorer les caractéristiques de rayonnement (Figure II.4). L'antenne MIMO proposée atteint un gain maximal d'environ 7 dB, qui est encore amélioré à 10,44 dB en incorporant la métasurface.

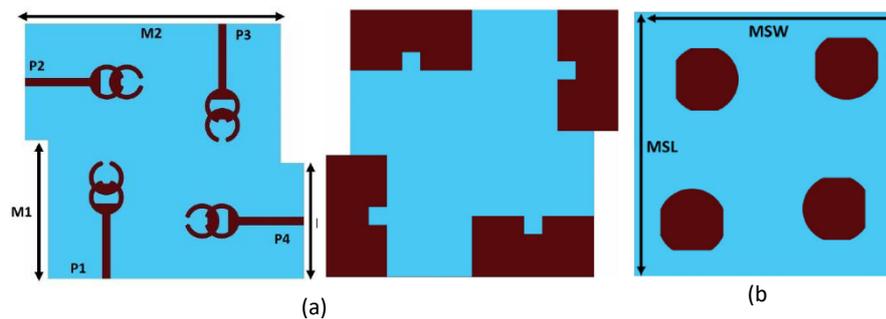


Figure II.4: (a) 2\*2 MIMO, (b) 2\*2 Metasurface

Dans la référence [25], les auteurs se présentent une antenne MIMO compacte intégrée à la métasurface pour les systèmes de communication sans fil sous-6 GHz 5G. La conception de l'antenne intègre un patch rayonnant tronqué en diagonale avec un plan partiellement au sol, et une métasurface est utilisée pour améliorer ses performances. Les résultats simulés et mesurés démontrent une caractéristique large bande de 3,11 à 7,67 GHz. Le système MIMO à quatre éléments est construit en disposant chaque antenne unique orthogonalement l'une par rapport à l'autre, tout en conservant une taille compacte et des propriétés à large bande dans la plage de fréquences de 3,2 à 7,6 GHz (Figure II.5). L'intégration de la métasurface proposée avec un fond de panier réduit considérablement le rayonnement vers l'arrière et manipule le champ électromagnétique, ce qui améliore le gain et l'isolation parmi les composants MIMO. L'antenne MIMO à 4 ports suggérée atteint un gain réalisé élevé de 8,3 dBi.

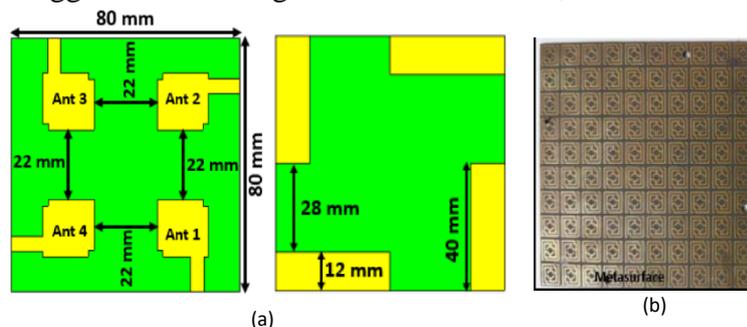


Figure II.5 : (a) 2\*2 MIMO, (b) Metasurface

La référence [26] présente une conception d'antenne MIMO à 4 éléments pour les systèmes de communication à ondes millimétriques 5G dans la bande de fréquence allant de 24,55 à 26,5 GHz. Chaque élément d'antenne MIMO consiste en un réseau 1x2 avec un réseau d'alimentation. La structure du réseau de métasurface se compose de 9x6 cellules en forme d'anneau fendu circulaire (Figure II.6). Intégrant la couche de métasurface, l'antenne atteint un gain amélioré, avec un gain de crête mesuré de 10,27 dBi. De plus, l'isolation entre les éléments d'antenne MIMO est améliorée de 5 dB après l'intégration de la métasurface.

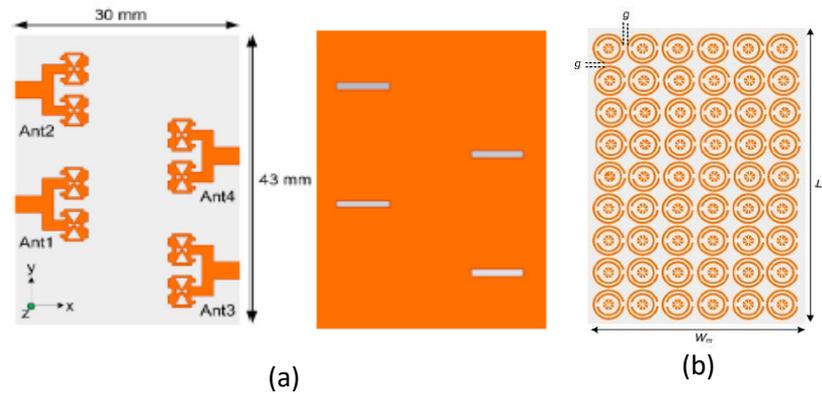


Figure II.6: (a) 2\*2 MIMO antenna, (b) 9\*6 Metasurface

L'article [27] publié en 2023 traite du développement d'une antenne à ondes millimétriques et de sa configuration MIMO utilisant des métasurfaces pour les applications du système 5G. L'objectif est de créer une antenne compacte mais performante qui peut fonctionner sur l'ensemble du spectre 5G mondial. Les chercheurs proposent une conception d'antenne patch microruban à ondes millimétriques qui intègre des métasurfaces pour améliorer ses performances. Les métasurfaces, sous la forme de résonateurs en anneau carré, sont imprimées sur une seule couche diélectrique avec le patch rayonnant (Figure II.7). En utilisant des métasurfaces comme radiateurs secondaires, l'antenne atteint une large couverture de bande de 23,9 à 30,7 GHz, un gain de crête élevé de 9,4 dBi et une efficacité supérieure à 87 %.

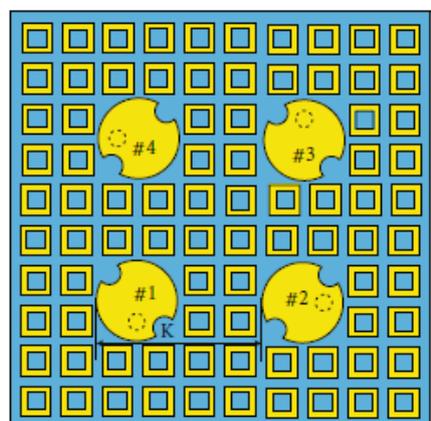


Figure II.7 : 4 MIMO antenna avec metasurface

L'article [28] (publié en 2022) propose deux conceptions d'antennes MIMO basées sur des superstrats de métasurface pour réduire le couplage mutuel dans les applications de cinquième génération (Figure II.8). La première conception, l'antenne 2, consiste en un superstrat de métasurface unique suspendue au-dessus d'une antenne MIMO. La deuxième conception, l'antenne 3, intègre des couches de superstrat à double métasurface suspendues au-dessus de la même antenne MIMO. Les deux antennes MIMO basées sur la métasurface permettent une réduction significative du couplage mutuel sur toute la bande passante. L'antenne 3, en particulier, atteint une réduction de couplage mutuelle de -44 dB, ainsi qu'une large bande passante de 5,92 à 6,2 GHz et un gain maximum de 6,79 dB.

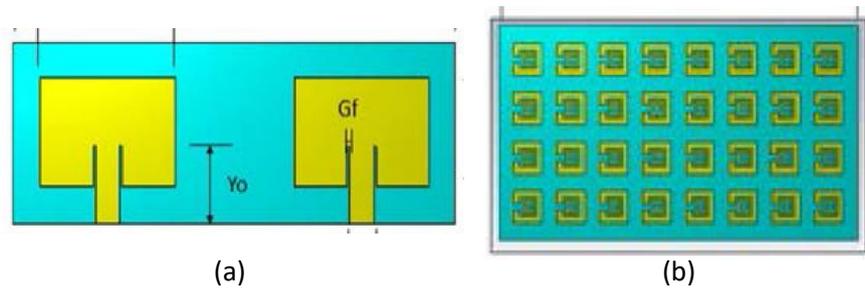


Figure II.8: (a) 2 MIMO antenna, (b) 8\*4 Metasurface

Les auteurs de la référence [29] (publié en 2021) présente une analyse de la conception et des performances d'une antenne à base de métamatériau pour les applications LTE 46/WLAN et en bande Ka. L'antenne utilise une surface de métamatériau aux propriétés uniques pour améliorer ses caractéristiques de rayonnement. La conception d'antenne proposée offre une large bande passante, couvrant une gamme de fréquences de 5,35 à 5,69 GHz pour le LTE 46/WLAN et de 17,81 à 20,67 GHz pour la bande Ka (Figure II.9). Un réseau 2 x 3 de la surface du métamatériau est placé, ce qui améliore considérablement le gain de l'antenne. Le gain est amélioré de 4,52 à 9,13 dB pour la bande Ka et de 1,17 à 5,04 dB pour la bande LTE 46/WLAN.

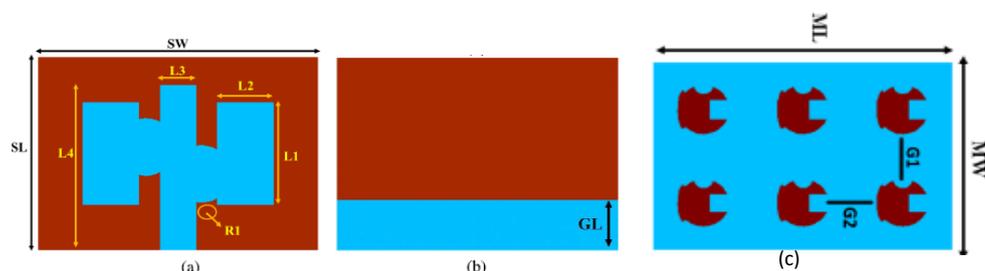


Figure II.9: antennas (a) front view, (b) back view, (c) 2\*3 metasurface.

L'article [30] (publié en 2020) se concentre sur l'analyse et la comparaison des performances d'une conception d'antenne de la 5G avec et sans antenne à base de métamatériaux pour les systèmes de communication 5G (Figure II.10). L'utilisation de surfaces métamatérielles est explorée pour améliorer les performances de l'antenne en supprimant les ondes de surface et en réalisant une réflexion en phase. Les plans de masse conducteurs conventionnels ne parviennent souvent pas à fournir une suppression suffisante des ondes de surface, ce qui peut avoir un impact négatif sur l'efficacité et le gain de l'antenne. Dans ce travail, les chercheurs abordent ces problèmes en incorporant une surface de métamatériau comme réflecteur. La surface du métamatériau se caractérise par sa caractéristique de réflexion en phase et sa nature à haute impédance, ce qui contribue à améliorer le gain de l'antenne. L'antenne traditionnelle atteint un gain de 2,76 dB, tandis que l'antenne à base de métamatériaux atteint un gain de 6,26 dB. De plus, l'antenne 5G à base de métamatériaux proposée présente une efficacité de rayonnement supérieure à 85 % à la fréquence centrale souhaitée.

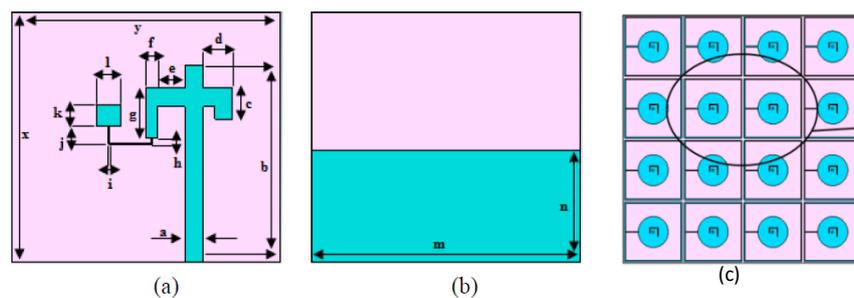


Figure II.10: Antenna (a) front view, (b) back view.

## II.9 Synthèses des travaux présentés :

Ci-dessous un tableau (II.1) qui résume les travaux de l'état de l'art

Table II.1: Comparaison entre les études

Ref/date	bandwidth (GHz)	Isolation (dB)	efficiency (%)	Gain (dBi)	Gain MS (dBi)	ECC	DG (dB)
[1]/ (2021)	23.5 - 29.4	<-25	92	7	10.42	<0.5	10
[25]/ (2022)	3.08 - 7.75	<-15.5	73-84	5.5	8.3	<0.004	>9.98
[26]/ (2021)	24.55 - 26.5	<-45	---	8.1	10.27	<0.1e-6	9.98
[27]/ (2023)	23.9 - 30.7	<-26	86	8.2	9.4	<0.0005	>9.9998
[28]/ (2022)	5.92 - 6.2	<-25	>55	4.88	6.79	<0.02	---
[29]/ (2021)	17.81 - 20.67 5.35 - 5.69	---	---	4.52 1.17	9.13 5.04	---	---
[30]/ (2020)	3.32 - 3.6	---	>85	2.76	6.26	---	---

## **II.10 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les métasurfaces, en discutant de leurs composants et de la capacité des éléments de sous-longueur d'onde à manipuler les ondes électromagnétiques. Nous avons exploré comment les métasurfaces peuvent contrôler la direction des ondes électromagnétiques incidentes et comment l'intégration de la métasurface avec des antennes, en particulier les systèmes MIMO, peut optimiser ses performances. Enfin, un état de l'art sur ce type de structure antennaire a permis de voir tous les travaux qui existent jusqu'à présent.

## **CHAPTER III.**

# **Simulation d'Antenne MIMO à 4 Ports utilisant les métasurfaces dans la bande mmWave.**

### III.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous aborderons la conception et la simulation d'antennes patch à l'aide du logiciel CST MWS. Nous commencerons par présenter le logiciel on discutera les résultats simulation d'une antenne monopole fonctionnant en bande mmWave, qu'on mettra, par la suite dans un système à 4 ports. Afin d'augmenter le gain, on va insérer une méta surface et on étudiera et présentera les résultats de l'ensemble (antenne MIMO à 4 éléments avec la métasurface).

### III.2 Logiciel CST STUDIO SUITE :

CST STUDIO SUITE est une solution logicielle complète développée par CST (Computer Simulation Technology) pour la simulation et l'analyse des champs électromagnétiques. Il offre une suite puissante d'outils pour la conception, la modélisation et l'analyse de systèmes et d'appareils électromagnétiques.

Ce logiciel utilise la méthode des finitions intégrales (FIT, Finite Integration Technique). FIT est une méthode numérique qui reformule les équations intégrales de Maxwell sous une forme discrète, permettant le calcul de problèmes avec des géométries complexes. Cette approche permet la discrétisation de l'espace, permettant une représentation 3D directe des composants du système. Et il peut être appliqué à la fois dans le domaine temporel et le domaine fréquentiel [25].

### III.3 Simulation d'une antenne monopole de forme circulaire à 26 GHz :

D'abord, on va dimensionner une antenne monopole constituée de 2 cercles [1], alimentée par une ligne microstrip, comme le montre la Figure (III.1) pour fonctionner à la fréquence de 26 GHz. Elle est imprimée sur du substrat Rogers RT-5880, de taille  $10 \times 12$  mm<sup>2</sup>, de permittivité 2.2 et d'épaisseur 0.254 mm. Les dimensions de la structure sont données sur la table (III.1).

Table III.1: les dimensions d'antenne

Dimensions	Valeur (mm)
Al	12
Aw	10
Fl	5.6
Fw	0.7
Icl	1.4
Gl	5

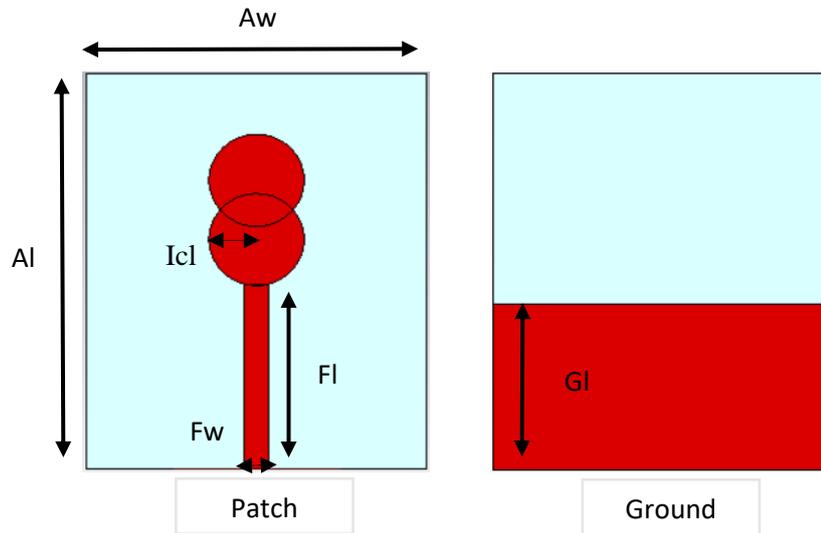


Figure III.1: la structure primaire de l'antenne

Après avoir exécuté la simulation, nous avons le coefficient de réflexion  $S_{11}$  (Figure III.2).

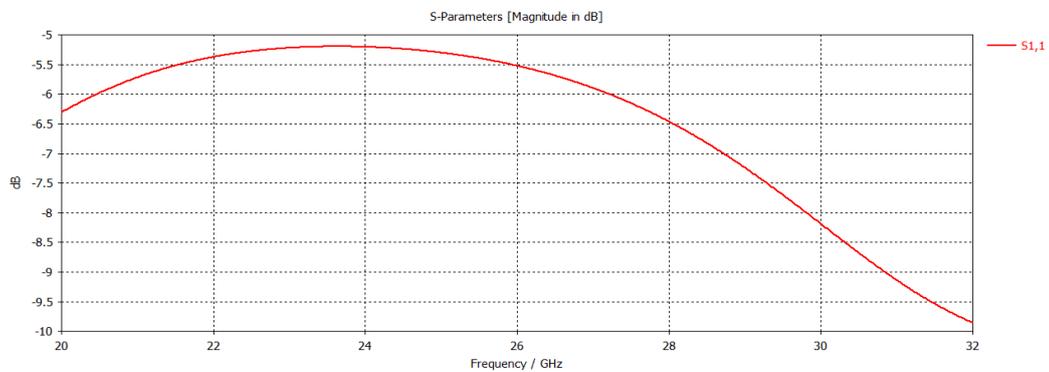


Figure III.2 :  $S_{11}$  initial

La lecture de la figure (III.2) montre que le coefficient de réflexion initial  $S_{11}$  est supérieur à -10 dB autour de la fréquence de résonance (26 GHz), indiquant que l'antenne a une mauvaise adaptation d'impédance. Par conséquent, une insertion de fentes au niveau des cercles est opérée, comme le montre la Figure (III.3 (a)), afin d'améliorer l'adaptation. On remarque l'apparition d'une résonance à la fréquence de 31 GHz avec une adaptation de -14 dB, comme le montre la Figure (III.4).

Les nouvelles dimensions de la structure sont données sur la Table (III.2)

Table III.2: Les paramètres des fentes

Le paramètre	Valeur (mm)
Icw	1.05
Ccw	0.8
Gcl	1.5
Ccw	1.9
Cl	1

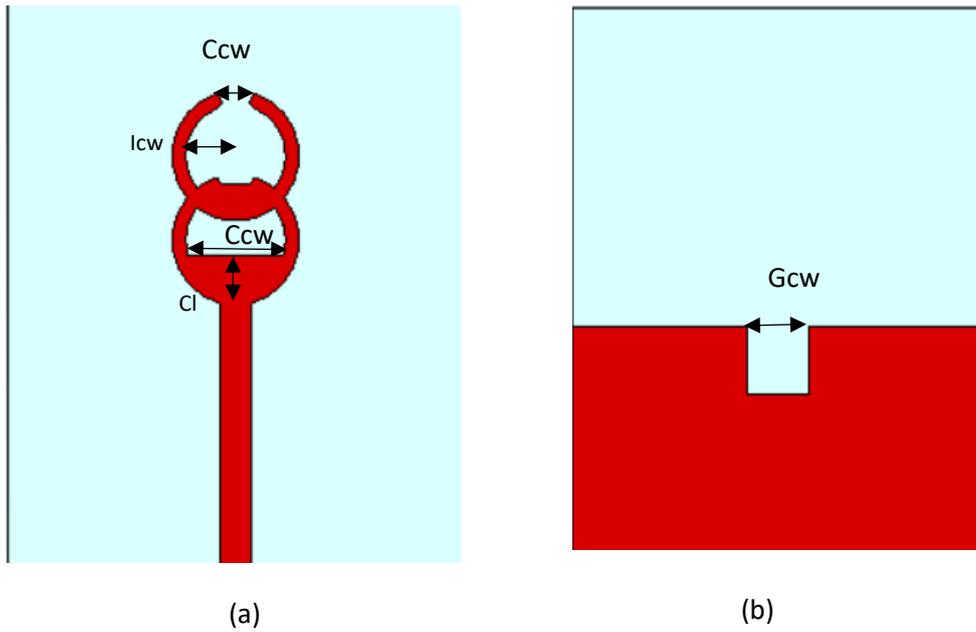


Figure III.3: (a) patch avec des fentes ; (b) ground plane avec fente

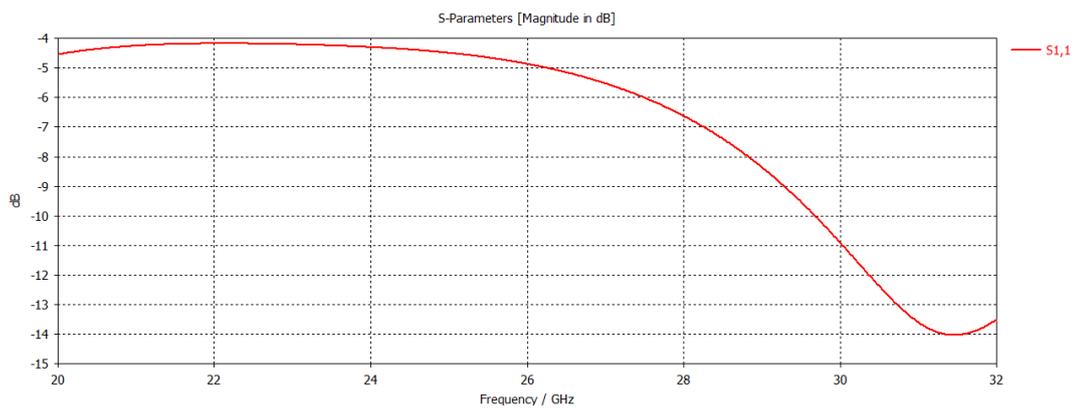


Figure III.4 :  $S_{11}$  après inséré les fentes sur le Patch

Afin de décaler cette fréquence de résonance vers 26 GHz, une fente carrée est insérée sur le plan de masse comme le montre la Figure (III.3 (b)). La Figure (III.5) montre une bonne adaptation autour de 26 GHz

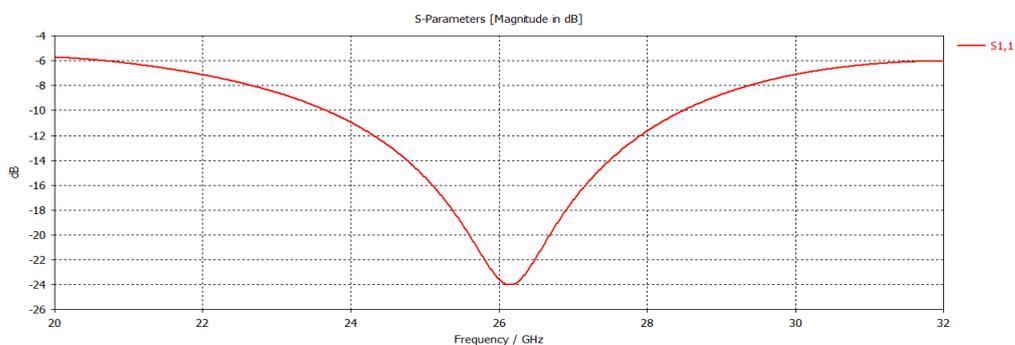


Figure III.5 :  $S_{11}$  après inséré une fente sur le plan de masse.

### ✓ Une étude paramétrique sur Icl

Sur la base de la Figure (III.6), le graphique illustre la relation entre le rayon du cercle (Icl) et le coefficient de réflexion ( $S_{11}$ ). La figure indique que lorsque le rayon de Icl augmente, la valeur de crête de  $S_{11}$  augmente également. Dans lequel, la valeur de Icl atteint 1,45, la valeur crête correspondante de  $S_{11}$  est proche de -45 dB, ce qui signifie un haut niveau d'adaptation ou d'adaptation d'impédance.

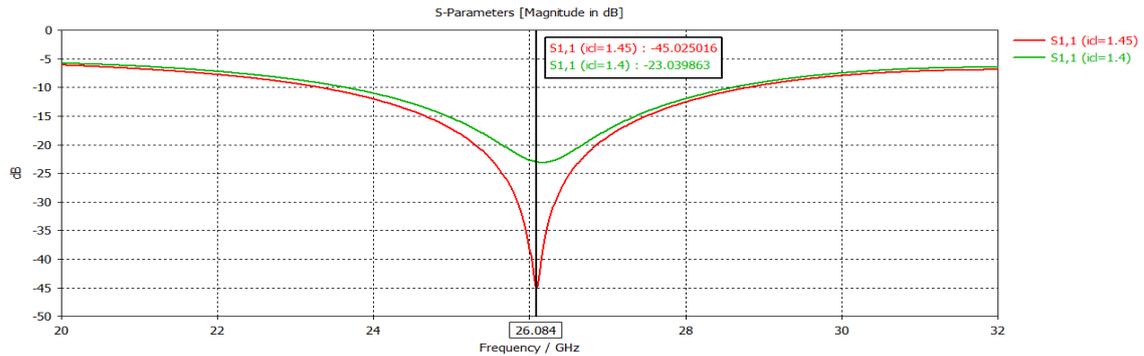


Figure III.6 :  $S_{11}$  après la modification de Icl & Icw.

On voit (Figure III.7) que dans notre bande de fréquence 23.5 GHz à 29.4 GHz, L'efficacité est supérieure à 85%.

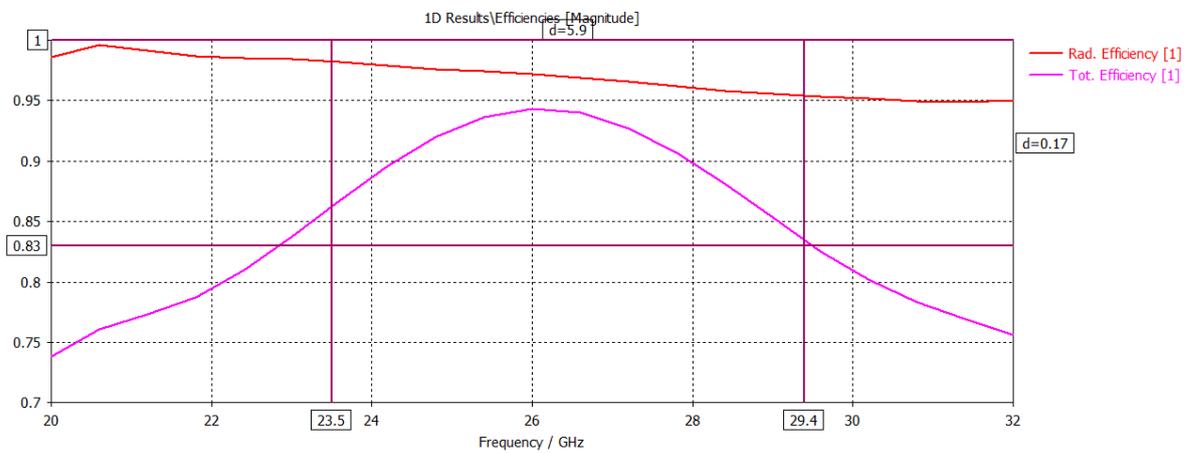


Figure III.7 : l'efficacité d'antenne.

### III.4 Simulation d'une antenne MIMO à 4 ports à 26 GHz :

On va commencer d'abord par introduire l'antenne sur un connecteur SMA. Les connecteurs SMA (SubMiniature version A) sont couramment utilisés dans les applications RF et les systèmes de communication en raison de leur petite taille et de leur excellente atténuation du signal et de la stabilité de la connexion. La figure (III.8) illustre le connecteur que nous avons utilisé et aussi illustre l'antenne avec le connecteur. Les matériaux utilisés pour le connecteur SMA sont dans le tableau (III.3)

Table III.3 : les composant du connecteur

Les composant	Matériaux	Rayon extérieur	Rayon intérieur
Base, Coat	PEC	-	-
Pin	PEC	0.25 mm	-
Dielectric	PTFE	0.84 mm	0.25 mm

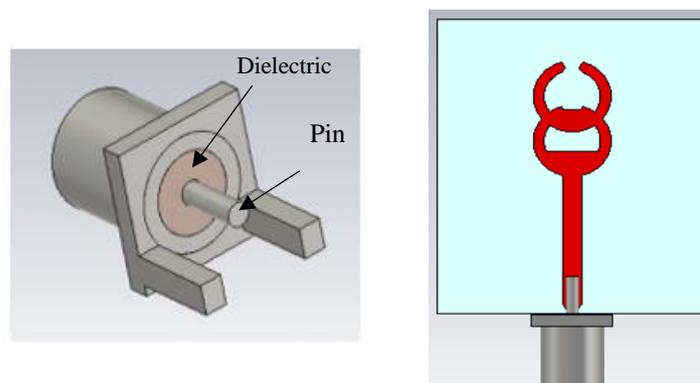


Figure III.8 : (a) SMA connector, (b) antenne avec connecteur

Pour avoir une antenne MIMO à 4 ports, nous faisons tourner l'élément d'antenne précédemment conçu dans quatre directions (Figure III.9).

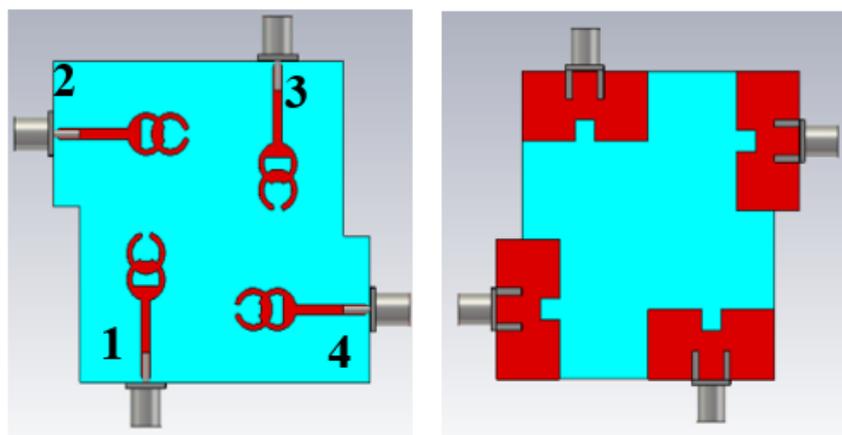


Figure III.9 : 4-port MIMO antenna

### III.4.1 Les coefficients de réflexion

D'après la figure (III.10) nous avons que les coefficients de réflexion toujours dans la plage désirée, dans laquelle on a  $S_{11}$  et  $S_{33}$  sont autour de -35 dB, et par contre les deux  $S_{22}$  et  $S_{44}$  se rapprochent de -25 dB.

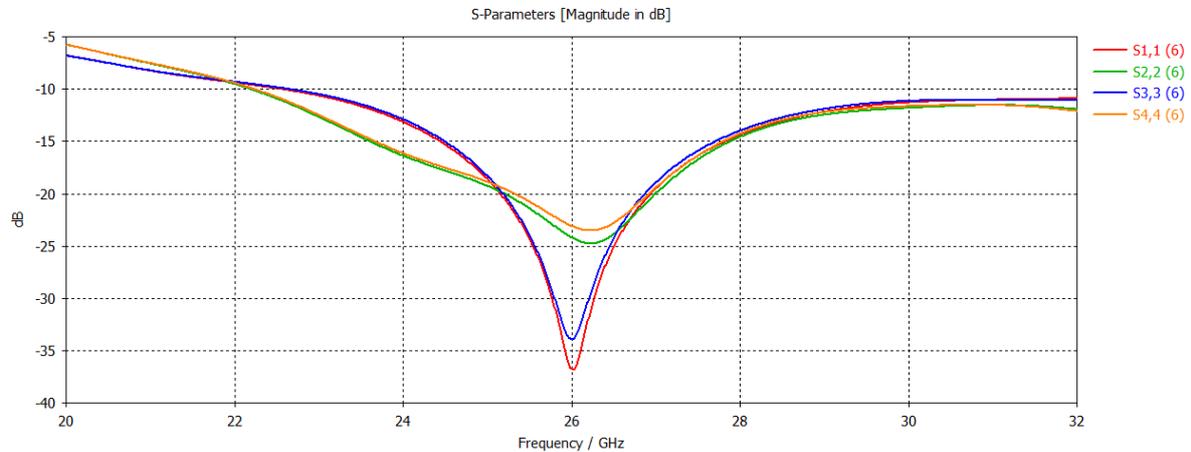


Figure III.10 : coefficients de réflexion de l'antenna a 4-port.

### III.4.2 Isolation

D'après la figure (III.11), on peut voir les coefficients de transmission sont inférieur à -15 dB. Dans le contexte des applications à ondes millimétriques et haute fréquence, ces valeurs sont considérées comme souhaitables et bonnes, en particulier lors de l'utilisation de seulement 4-antennes. Ces valeurs indiquent un niveau d'isolation qui permet de minimiser les interférences entre les ports d'antenne, ce qui améliore les performances du système.

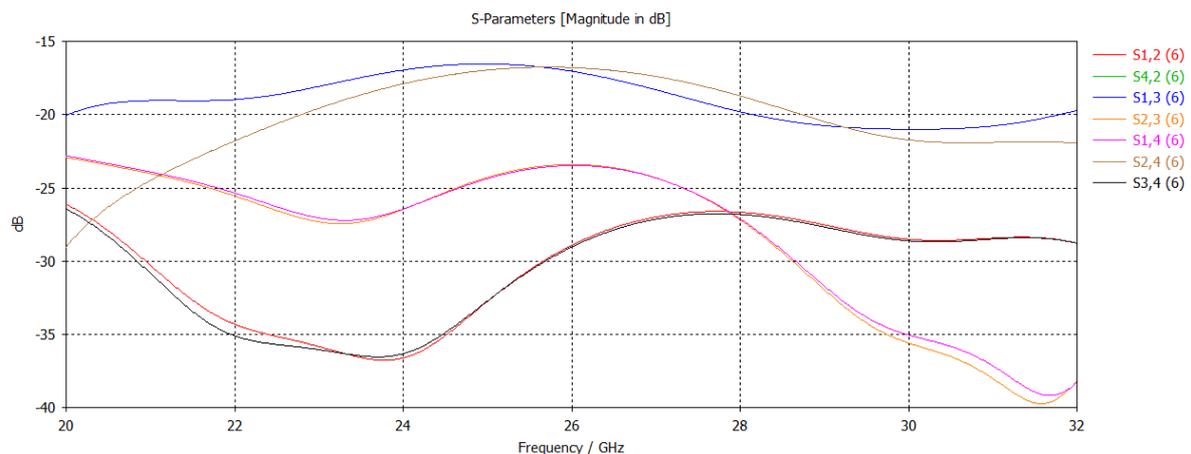


Figure III.11 : isolation de l'antenna a 4-port

### III.4.3 L'efficacité

Après avoir développé notre élément unique en un système MIMO, nous avons observé que l'efficacité est supérieure à 85 % pour toutes les antennes (Figure III.12). Cela indique que le système fonctionne bien et utilise efficacement les ressources disponibles.

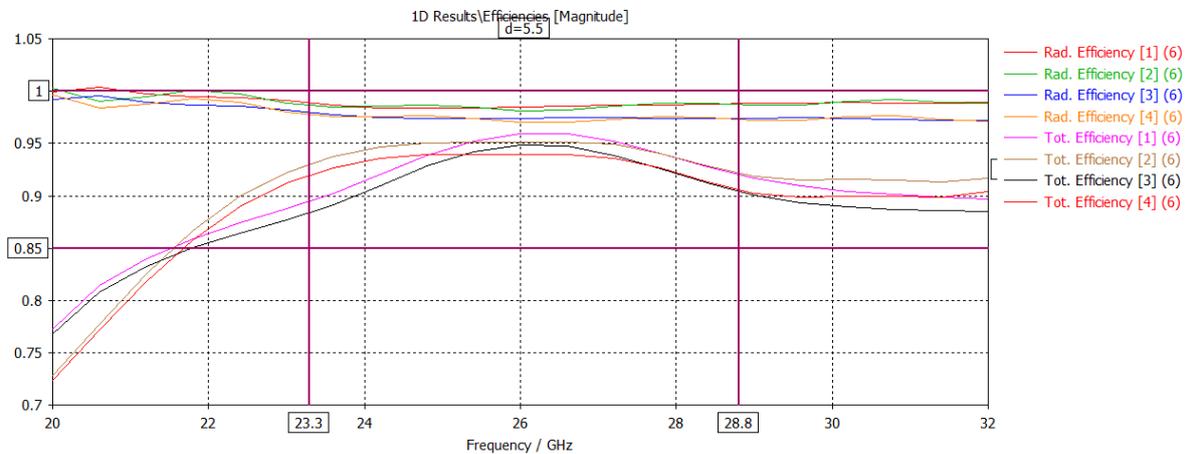


Figure III.12 : L'efficacité de système

### III.4.4 Gain

D'après la figure (III.13), nous pouvons observer que toutes les antennes présentent des gains similaires, allant de 6,1 dBi à 6,2 dBi, autour de la fréquence 26 GHz.

Cependant, le gain maximal est atteint par l'antenne 2, avec une valeur proche de 6,3 dBi à la bande de fréquence de fonctionnement.

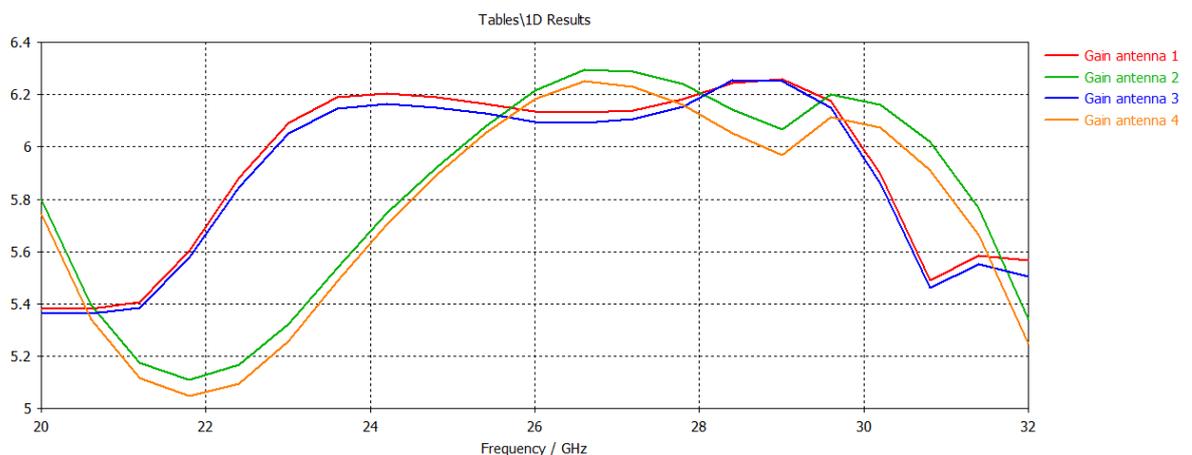


Figure III.13 : Gain des 4 antennes

### III.4.5 Diagramme de rayonnement

Après avoir regardé la figure (III.14), nous voyons que chaque antenne rayonne dans des directions différentes. Et que les antennes 1 et 3 ont un diagramme de rayonnement plus focalisé avec un angle d'ouverture de 35 degrés. D'autre part, les antennes 2 et 4 affichent une couverture plus large avec un angle d'ouverture de 73 degrés.

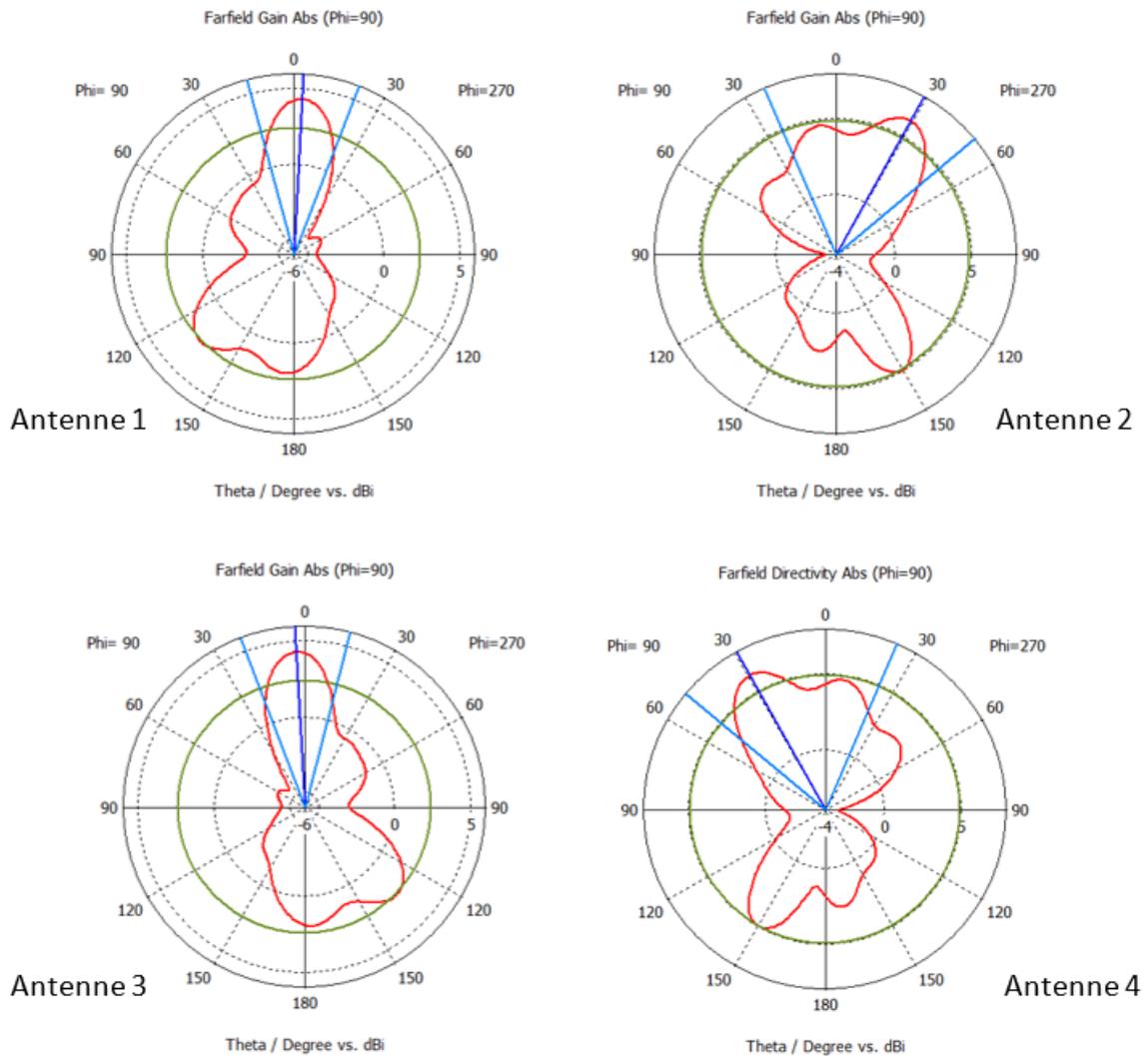


Figure III.14 : Diagramme de rayonnement

### III.4.6 Envelope Correlation Coefficient (ECC)

On peut dire après avoir vu la figure (III.15) que l'ECC est inférieur à 0,004 dans notre bande de fonctionnement, ce qui indique une très faible corrélation entre les antennes, et qui nous donne des antennes capables de fournir des chemins de signal indépendants avec de faibles interférences. Cette faible corrélation améliorera la capacité du système à atteindre des débits de données plus élevés.

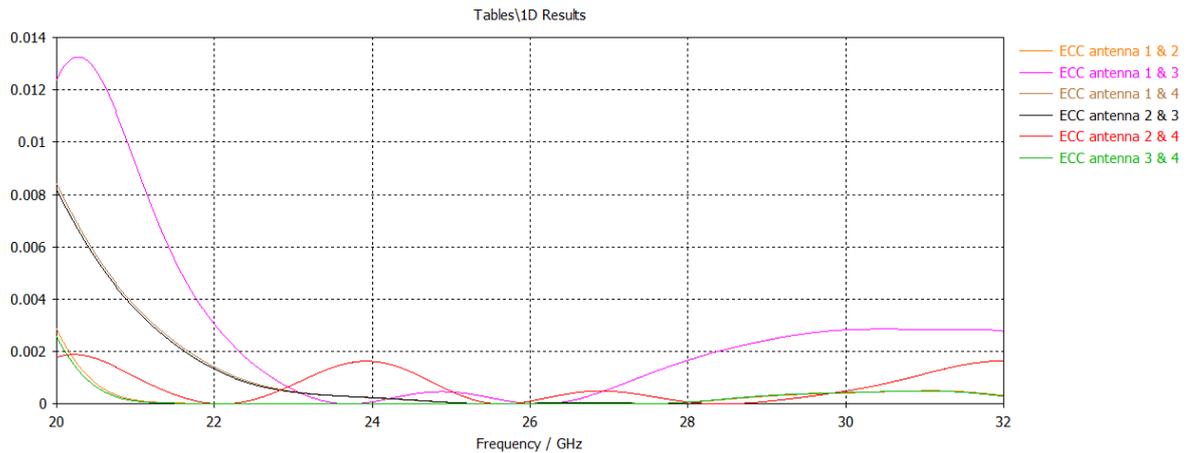


Figure III.15 : Envelope Correlation Coefficient de système

### III.4.7 Diversity Gain (DG)

Dans la figure (III.16), nous avons un gain de diversité (DG) supérieur à 9,98 dBi de toutes les antennes dans la bande 23.5 à 29.4 GHz, ce qui indique que le système a réalisé une amélioration significative des performances grâce à l'utilisation de plusieurs antennes et de techniques de diversité.

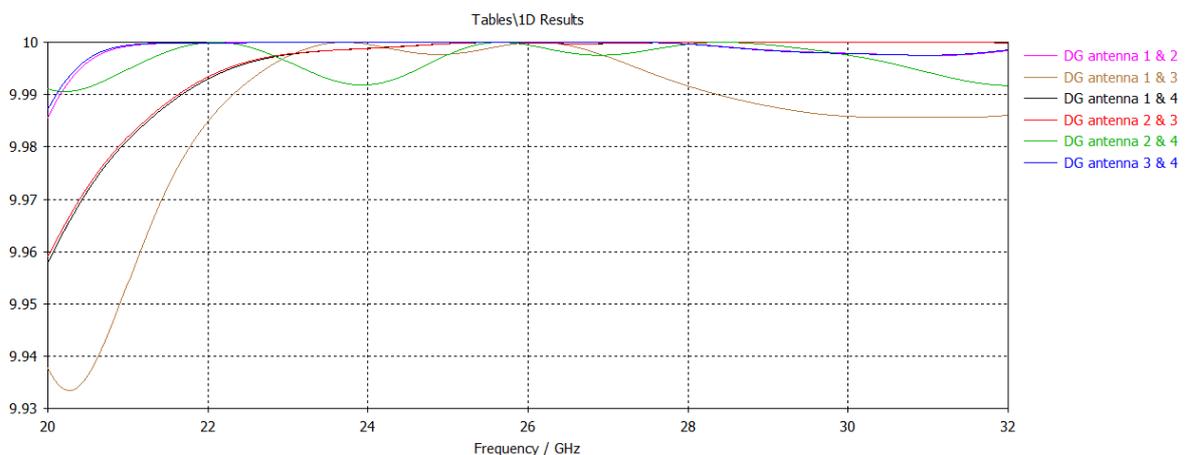


Figure III.16 : Diversity Gain des antennes

### III.5 Simulation d'antenne MIMO à 4 ports à 26 GHz avec métasurface :

Pour notre métasurface, nous avons utilisé Rogers RT 5880 pour le substrat. La cellule unitaire mesure  $10,3 \times 10,3 \text{ mm}^2$  (III.17 (a)). Les cellules unitaires sont disposées de manière à recouvrir au moins la première découpe interne inférieure de l'élément rayonnant de la figure d'antenne MIMO (III.17 (b)). Cette disposition vise à améliorer les performances du système antenne sans utiliser un grand nombre de cellules élémentaires dans une même frontière de substrat. La figure (III.18 (c)) illustre la métasurface derrière l'antenne avec un espace d'air.

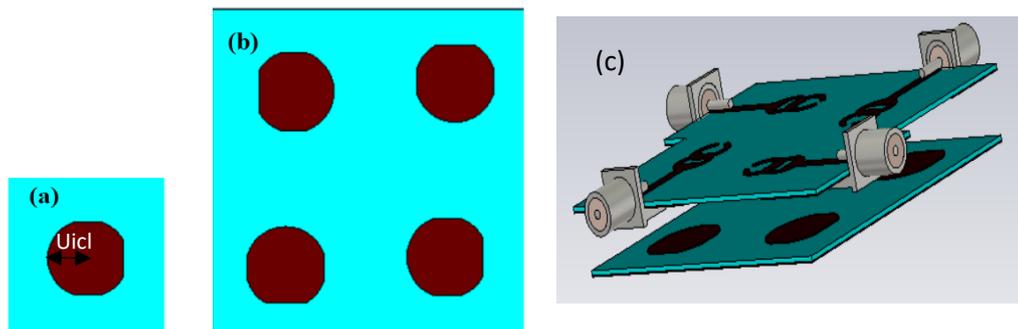


Figure III.17 : (a) unit cell ; (b) metasurface, (c) MIMO + MS

#### ✓ Une étude paramétrique sur le rayon $U_{icl}$

La figure (III.18) montre la phase de réflexion pour différentes valeurs de  $U_{icl}$  (2, 2.2, 2.4, 2.6 mm). Nous pouvons observer que  $U_{icl} = 2.6$  est celle qui présente une phase de réflexion proche de 0 sur toute la bande de fréquences. Cela indique que l'onde incidente des antennes et l'onde réfléchi sont en phase lorsqu'elles interagissent avec la métasurface. En revanche, les autres valeurs montrent une certaine phase dans la bande de fréquences, ce qui peut affecter les performances du système.

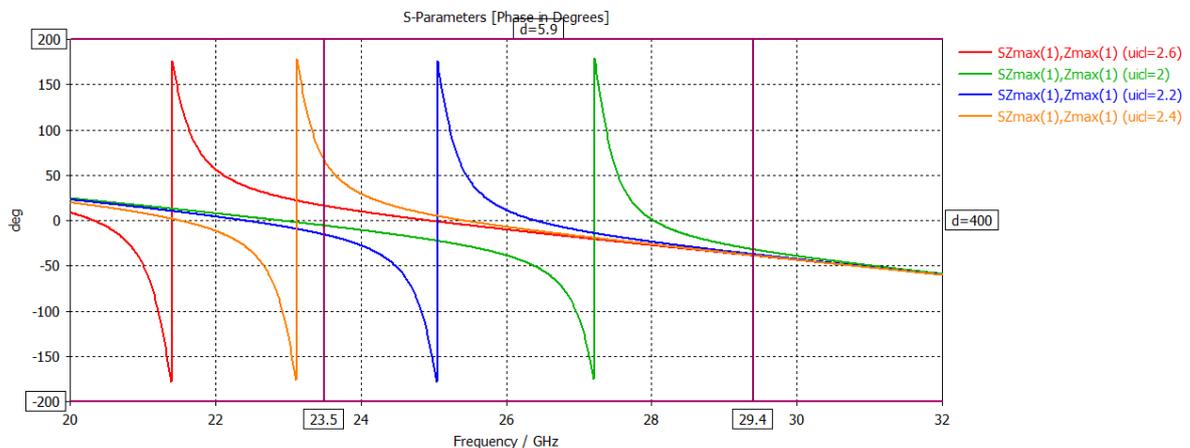


Figure III.18 : la phase de réflexion de l'unit cell

### ✓ Une étude paramétrique sur l'espace d'air

Nous allons exécuter plusieurs simulations et mesurer  $S_{11}$  et le gain des antennes 1 aux différentes valeurs d'espace d'air 0, 2, 3, 4mm.

On peut voir sur la figure (III.19) qu'un espace d'air de 0 mm n'a pas d'adaptation avec des valeurs de  $S_{11}$  proches de 0 dB. Par contre, un espace d'air de 3 mm & 4 mm montre la meilleure adaptation, avec des valeurs de  $S_{11}$  en dessous -20 dB à 26 GHz.

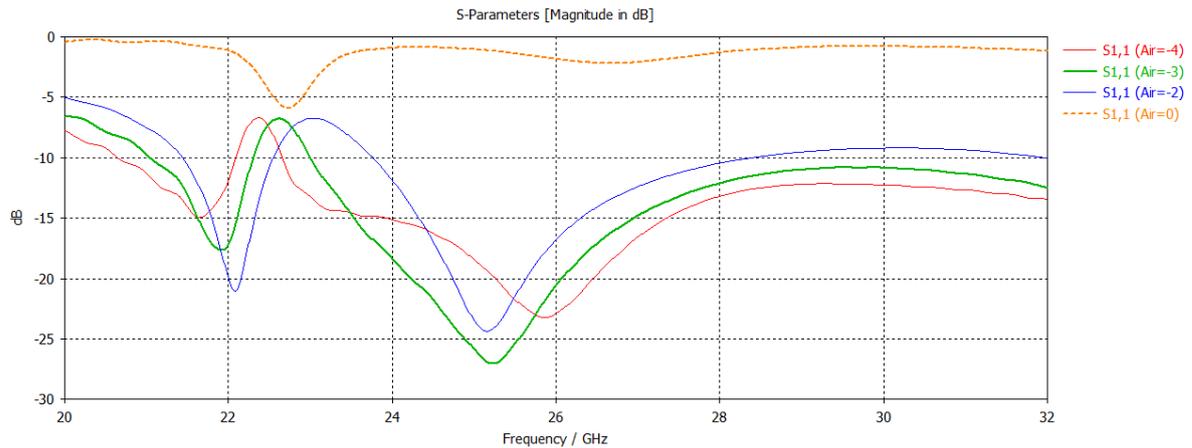


Figure III.19 :  $S_{11}$  de different espace d'air

La figure (III.20) nous indique que l'espace d'air de 3 mm démontre un gain nettement amélioré, atteignant 10,4 dBi. Cependant, la valeur de gain la plus élevée est obtenue avec un espace d'air de 2 mm, atteignant 10, 5 dBi.

Après avoir vérifié le coefficient de réflexion de gain de différents espaces d'air, nous concluons qu'un espace d'air de 3 mm entre les antennes et les métasurfaces offre les meilleures performances globales.

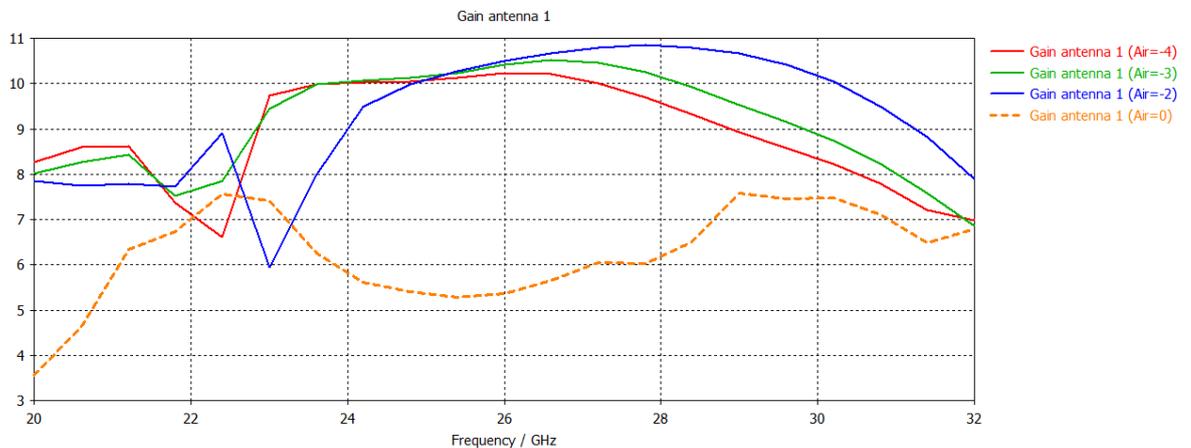


Figure III.20 : Gain d'antenna 1 de different espace d'air

### III.5.1 Les coefficients de réflexion d'antennes avec métasurface

Dans la figure (III.21), nous observons que les valeurs des coefficients de réflexion sont inférieures à -15 dB.

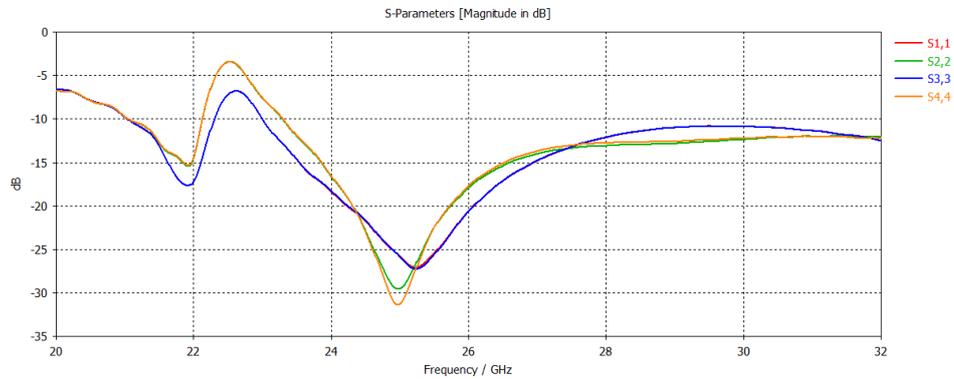


Figure III.21 : Les coefficients de réflexion d'antennes avec métasurface.

### III.5.2 Isolation d'antennes avec métasurface

Avec la métasurface, les valeurs d'isolation sont inférieures à -15 (Figure III.22)

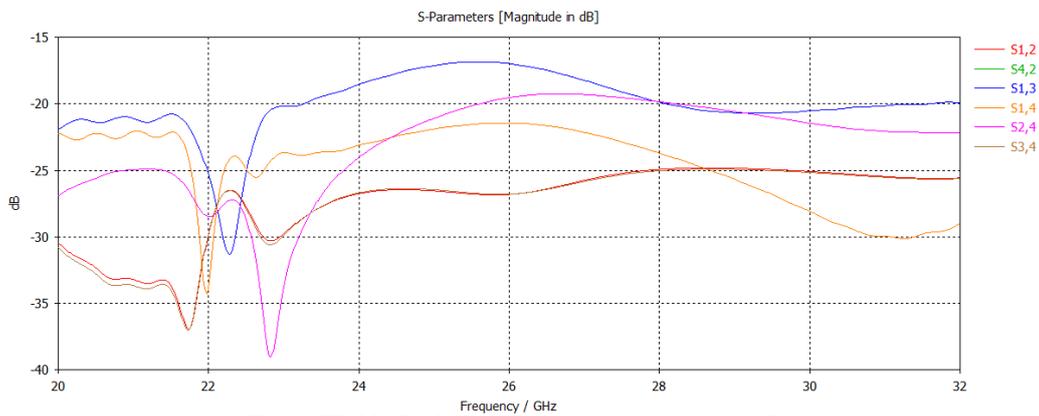


Figure III.22 : Isolation d'antennes avec métasurface

### III.5.3 Gain d'antennes avec métasurface

Après avoir incorporé la métasurface avec les antennes, nous voyons sur la figure (III.23) une augmentation remarquable du gain, résultant en une valeur de gain maximal de 10.53 dBi.

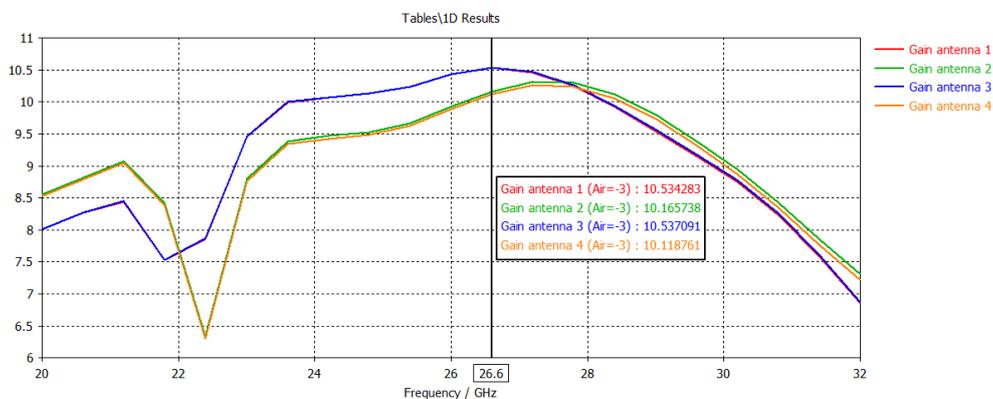


Figure III.23 : Gain d'antenne avec métasurface

### III.5.4 ECC d'antennes avec métasurface

La figure (III.24) montre que la corrélation entre les antennes reste constamment faible sur toute la bande de fréquence avec des valeurs  $<0.003$ .

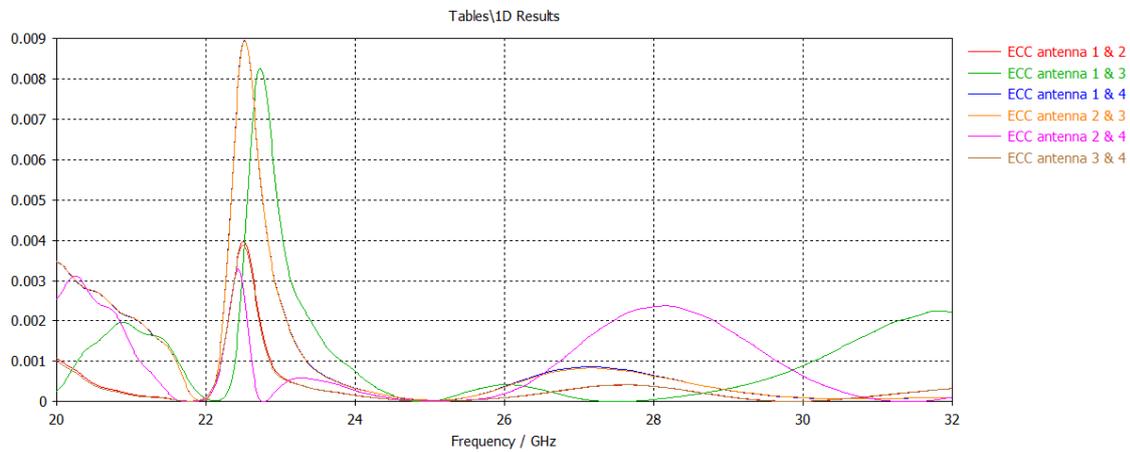


Figure III.24 : ECC d'antenne avec métasurface

### III.5.5 DG d'antennes avec métasurface

La figure (III.25) montre que le gain de diversité (DG) entre les antennes est toujours supérieur à 9.98 dBi sur toute la bande de fréquence.

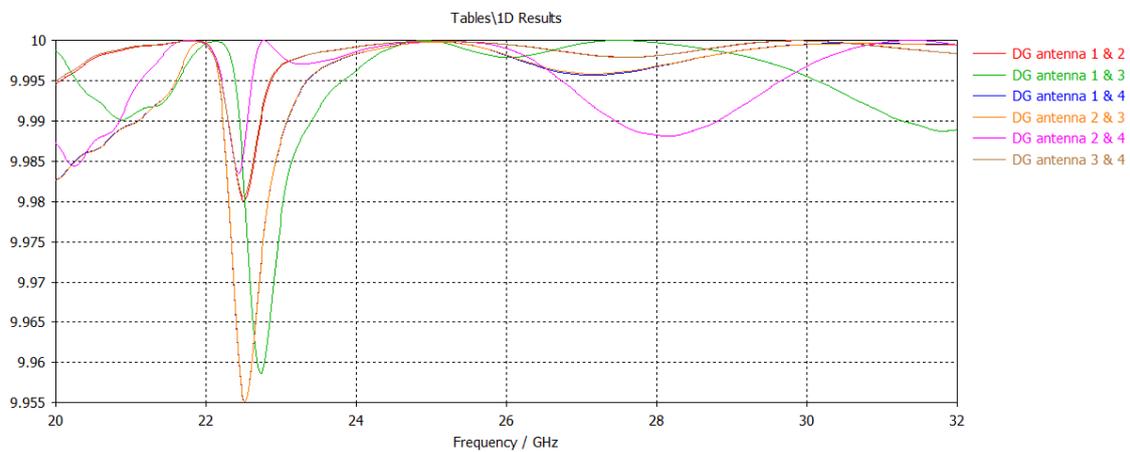


Figure III.25 : DG d'antenne avec métasurface

### III.6 Simulation d'antenne MIMO à 18GHz :

Dans cette partie, nous fournirons une simulation à 18 GHz, pour y parvenir, nous allons changer la conception et le matériau de l'antenne. Pour le substrat nous utiliserons le FR-4 avec une épaisseur de 0,8 mm et Permittivité diélectrique 4.3.

Comme vous le voyez sur la figure (III.26) nous avons réduit les slots dans le patch, pour avoir un rayonnement à 18 GHz.

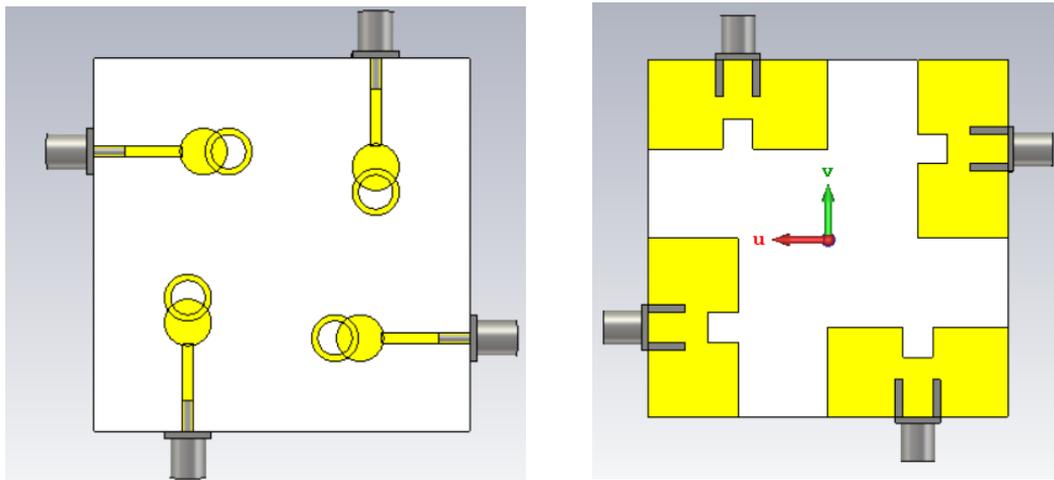


Figure III.26 MIMO antenna 18 GHz, (a) front view, (b) back view

#### III.6.1 Les coefficients de réflexion d'antenne MIMO à 18 GHz

De la figure (III.27) nous pouvons lire les valeurs des coefficients de réflexion à 18 GHz sont -25 dB, ce qui indique une bonne adaptation.

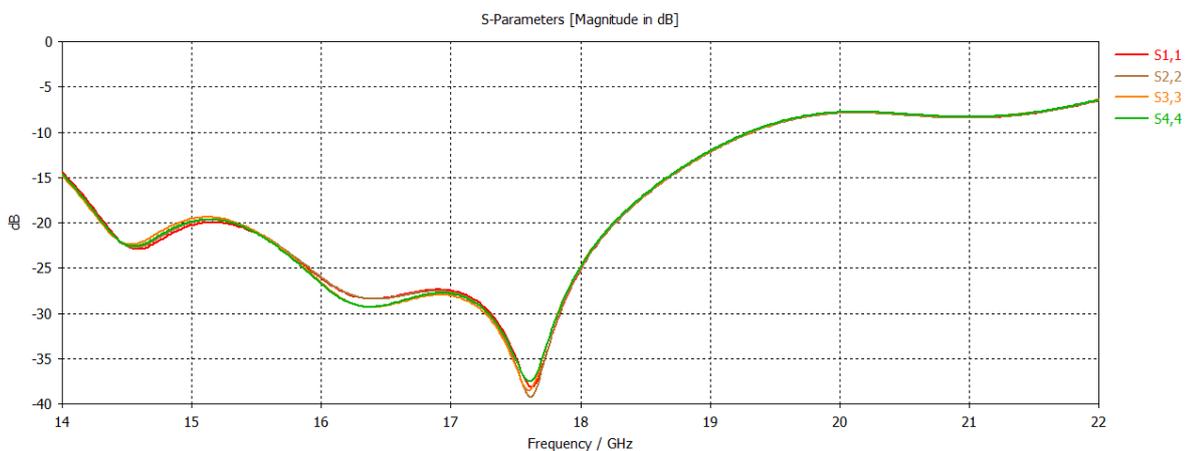


Figure III.27 : Les coefficients de réflexion d'antennes à 18 GHz

### III.6.2 Isolation d'antenne MIMO à 18 GHz

Nous pouvons voir sur la figure (III.28) que l'isolation est dans la plage acceptée à 18 GHz avec une valeur de -12 dB.

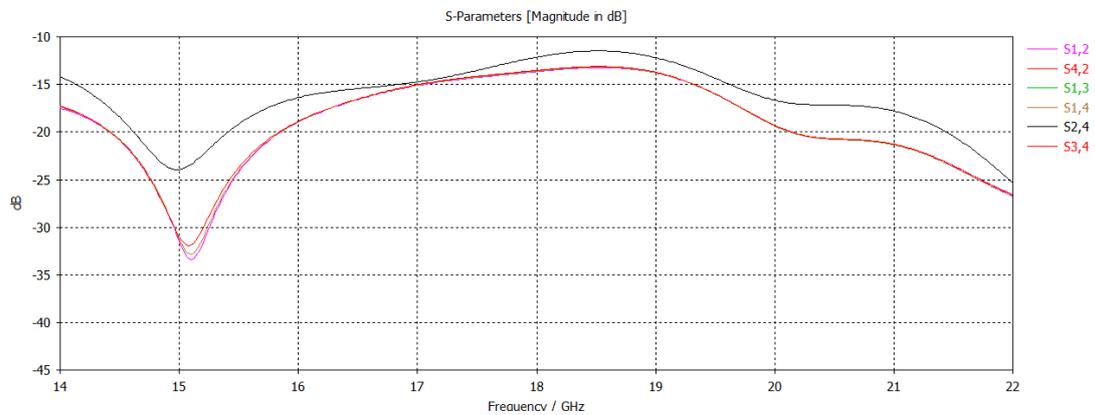


Figure III.28: Isolation d'antennes à 18 GHz.

### III.6.3 L'efficacité d'antenne MIMO à 18 GHz

La figure (III.29) nous montre que nous avons une bonne efficacité à 18 GHz avec une valeur supérieure à 80 %.

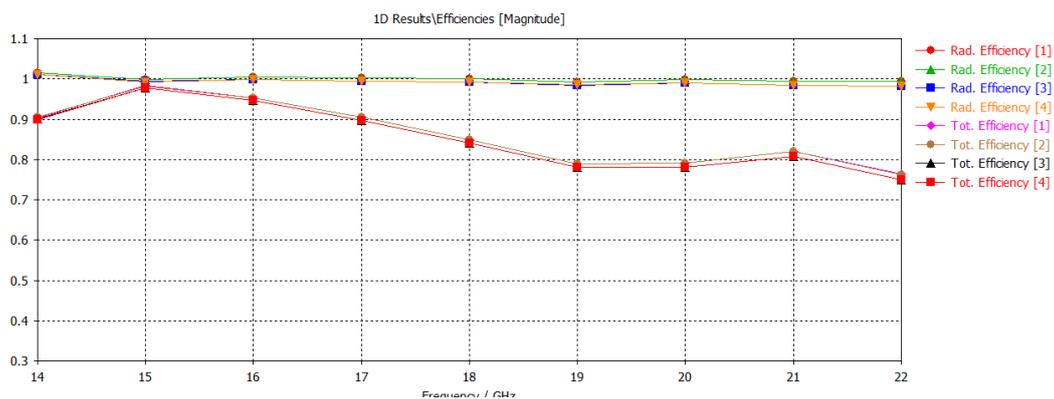


Figure III.29 : L'efficacité d'antenne à 18 GHz.

### III.6.4 Gain d'antennes MIMO à 18 GHz

Nous pouvons (Figure III.30) voir que les antennes ont un gain de 5,85 dBi à 18 GHz.

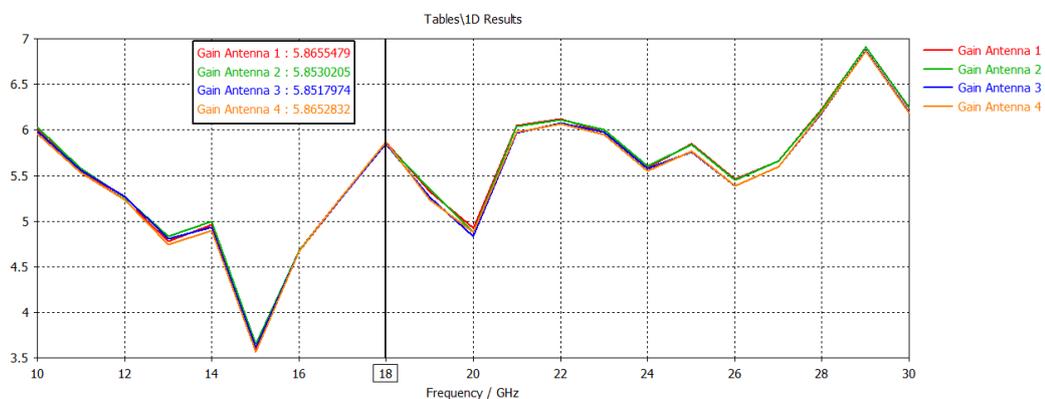


Figure III.30 : Gain d'antenne à 18 GHz

### III.6.5 Diagramme de rayonnement d'antennes MIMO à 18 GHz

Les diagrammes de rayonnement des antennes de la figure (III.31) montrent que les antennes 1 et 3 ont des lobes principaux dans la même direction, tandis que les antennes 2 et 4 ont des lobes principaux dans des directions opposées.

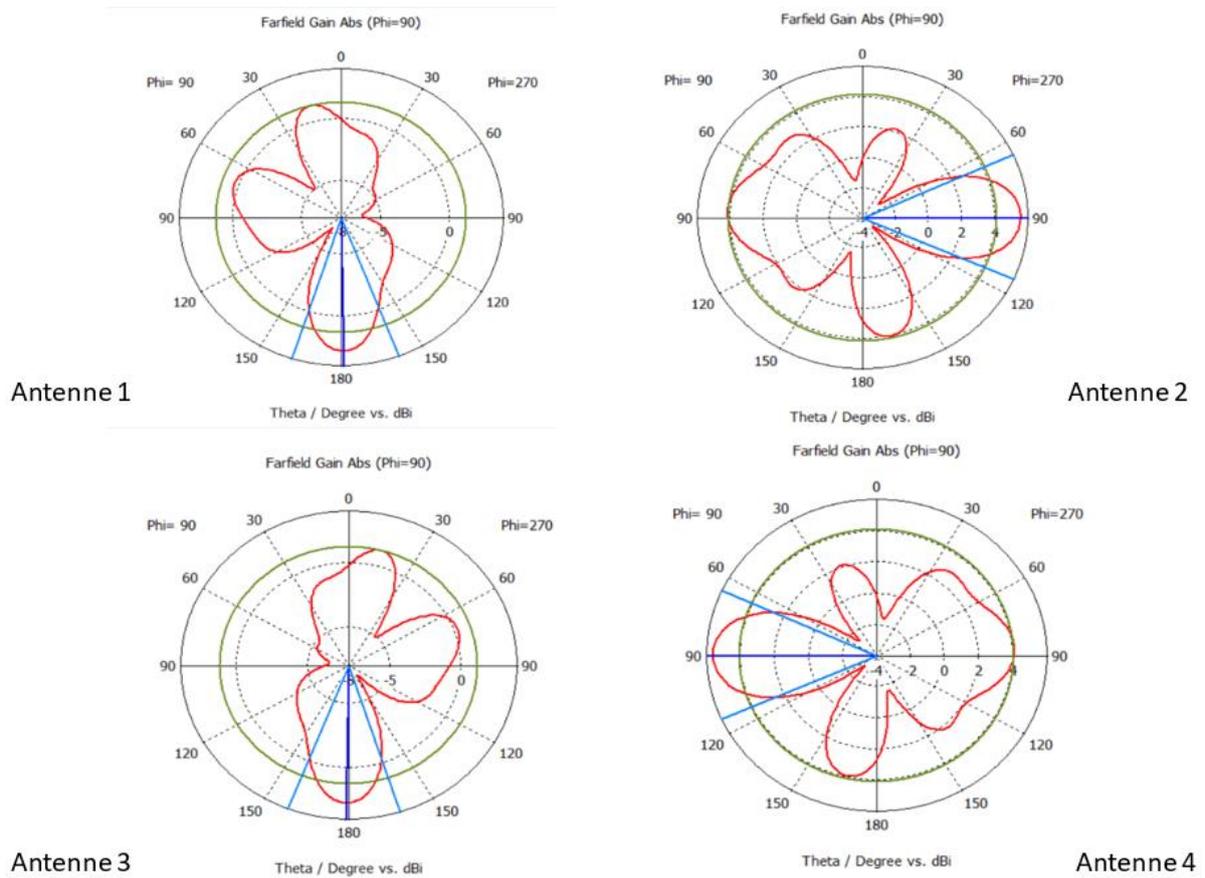


Figure III.31 : Diagramme de rayonnement d'antennes à 18 GHz

### III.6.6 ECC d'antennes MIMO à 18 GHz :

Nous pouvons lire les valeurs d'ECC à partir de figure (III.32) et elles sont inférieures à 0,01, ce qui nous donne une bonne isolation entre les antennes

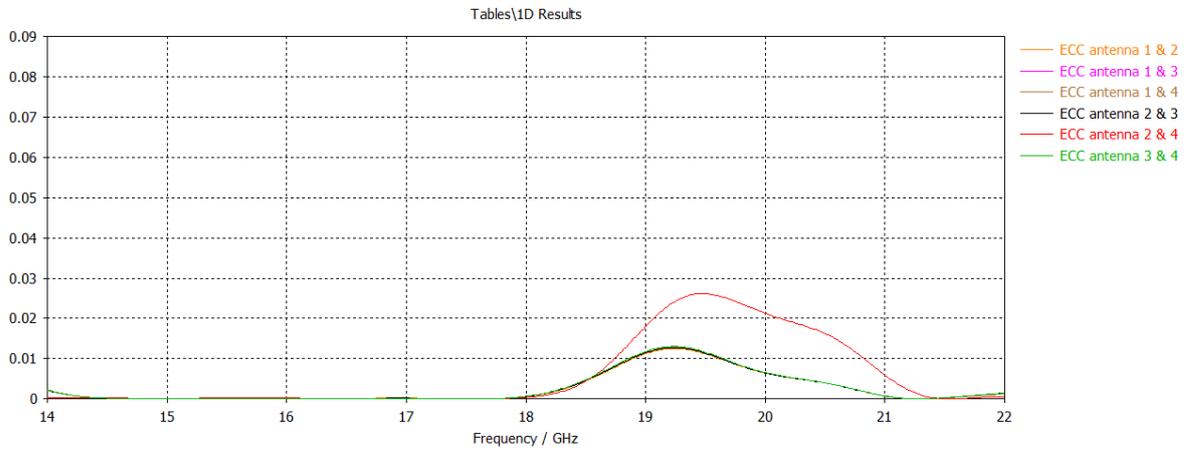


Figure III.32: ECC d'antennes à 18 GHz

### III.6.7 DG d'antennes MIMO à 18 GHz :

Les valeurs DG indiquées sur la figure (III.33) sont supérieures à 9,95 dB, cela indique que les antennes offrent un gain de diversité important. Cela signifie que les antennes atténuent efficacement l'évanouissement et les interférences, ce qui améliore la qualité du signal, augmente la couverture et améliore les performances du système.

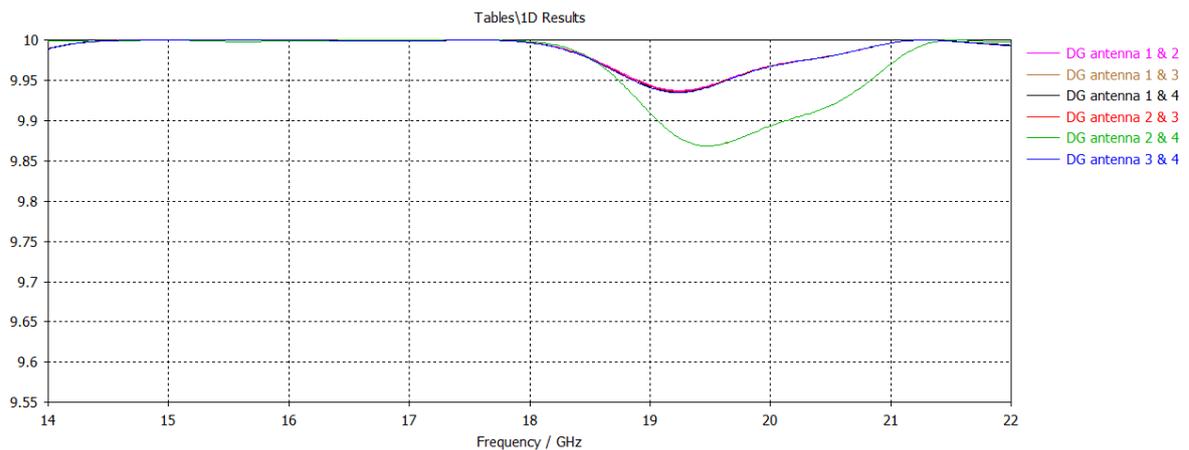


Figure III.33 : DG d'antennes à 18 GHz

### III.7 MIMO antenna + Metasurface à 18 GHz :

Après avoir changé le matériau du substrat en FR-4 avec une épaisseur de 0,8 mm, nous avons la cellule unitaire illustrée sur la figure (Figure III.34).

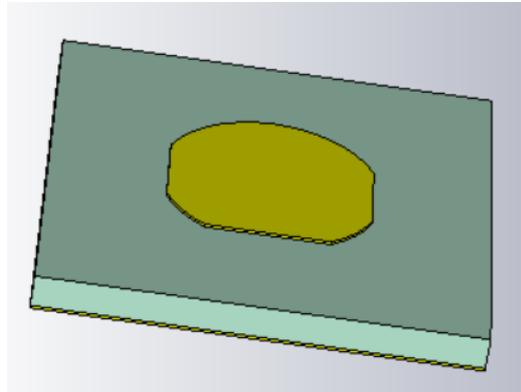


Figure III.34 : new unit cell

La phase de réflexion (Figure III.37) de la nouvelle cellule unitaire sont observées pour vérifier que la caractéristique de réflexion de phase sont atteintes à 18 GHz.

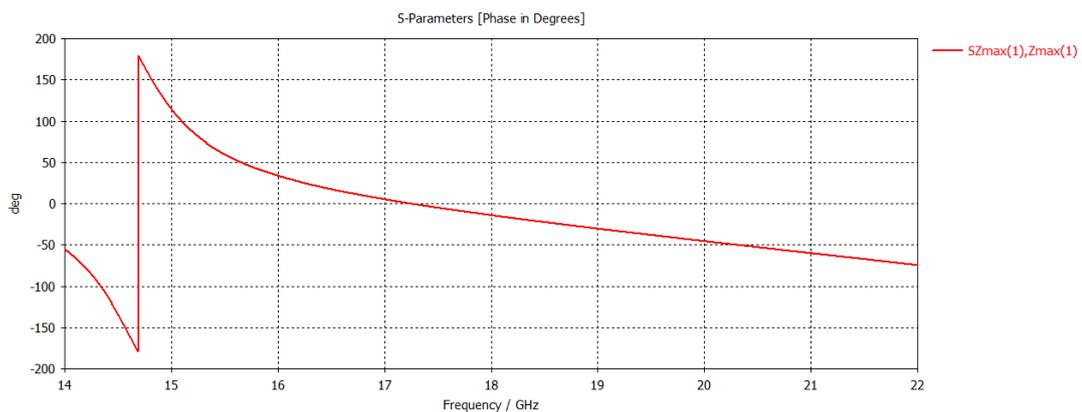


Figure III.35 : La phase de réflexion à 18 GHz

Après avoir fini de concevoir la métasurface, nous avons placé derrière les antennes comme indiqué sur la figure (III.36)

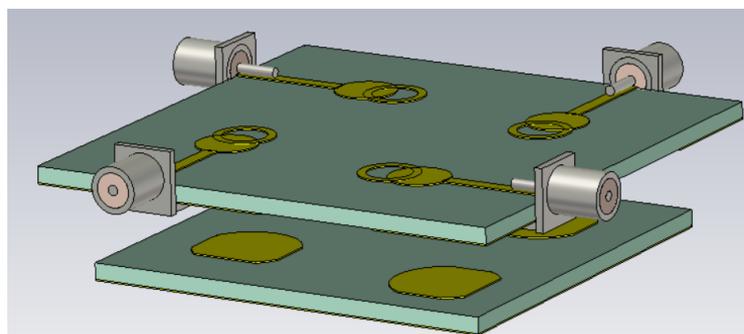


Figure III.36 : MIMO antenna + Metasurface

### ✓ Une étude paramétrique sur l'espace d'air

La figure (III.37) donne le gain d'antenne de 1 à 18 GHz en termes d'entrefer différent (-3 mm, -4 mm et -5 mm) et on peut voir que l'entrefer de -5 mm a le gain le plus élevé avec une valeur de 6.57 dBi.

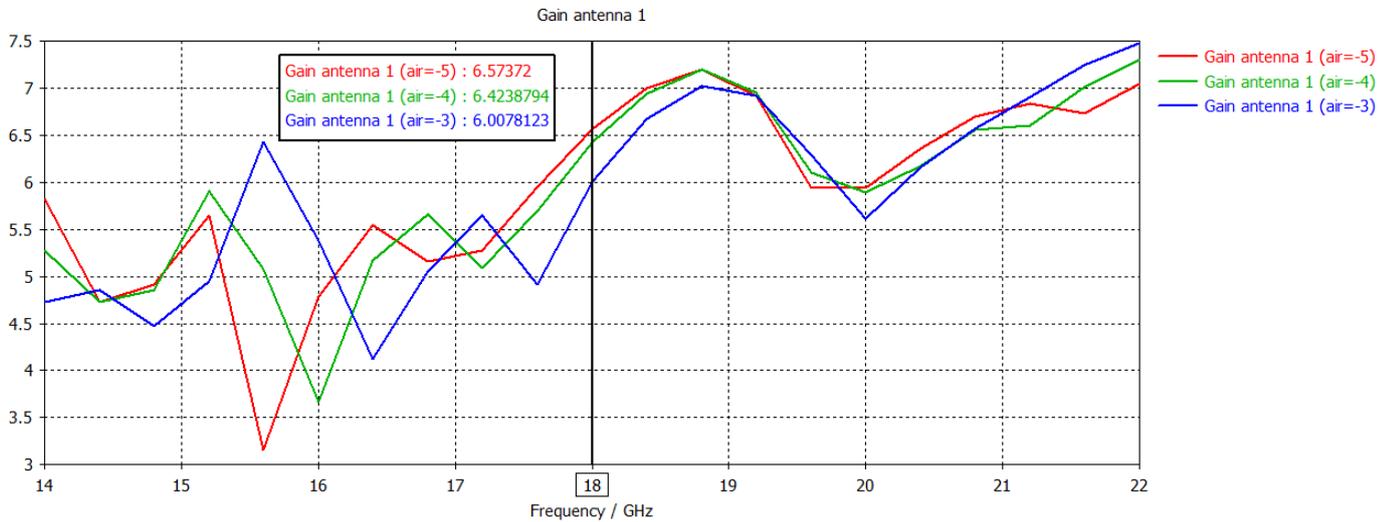


Figure III.37 : Gain en fonction d'espace d'air

### III.7.1 Les coefficients de réflexion d'antennes + MS à 18 GHz

On peut dire sur la figure (III.38) que les coefficients de réflexion sont inférieurs à -25 dB, ce qui signifie une bonne adaptation entre les antennes et la métasurface.

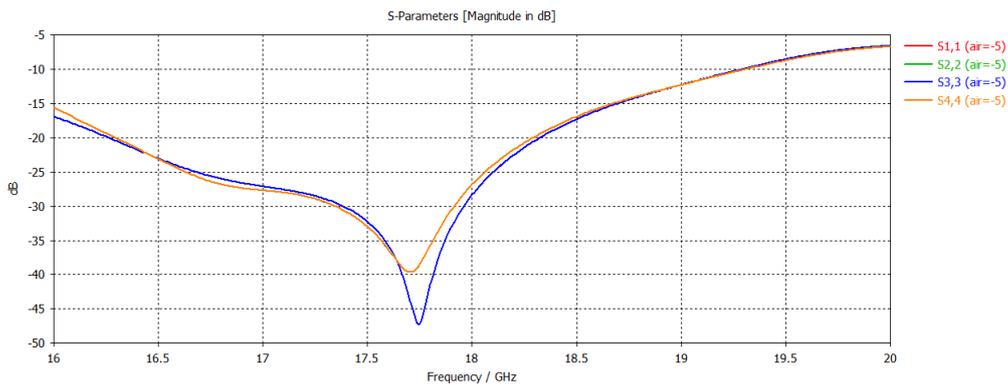


Figure III.38: coefficients de réflexion d'antennes + MS à 18 GHz :

### III.7.2 Isolation d'antennes + MS à 18 GHz

Nous avons (Figure III.39) qui montre une isolation inférieure à -10 dB.

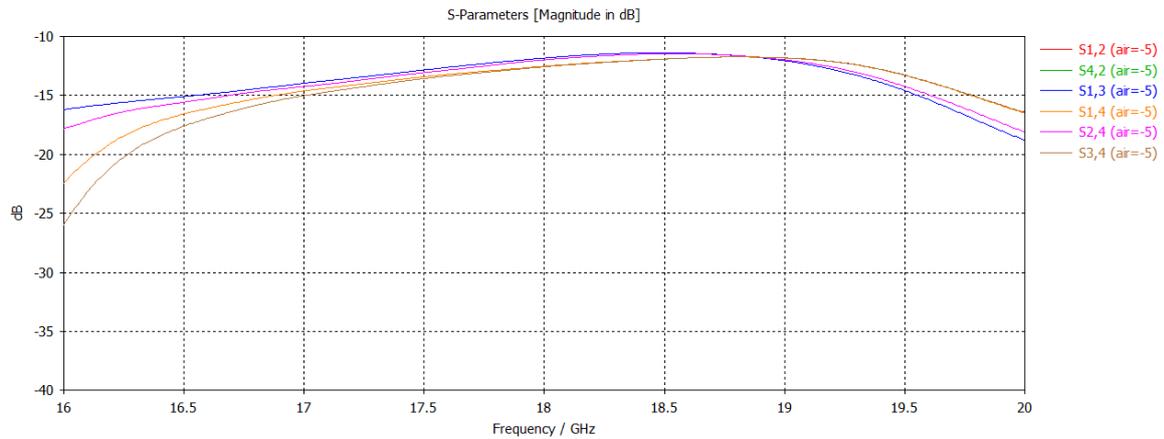


Figure III.39: Isolation d'antennes + MS à 18 GHz :

### III.7.3 Gain d'antennes + MS à 18 GHz

La figure (III.40) montre que le gain des antennes 1 et 3 a augmenté à 7,12 dBi, représentant le gain le plus élevé à 18 GHz. Tandis que les antennes 2 & 4 ont atteint 6,5 dBi.

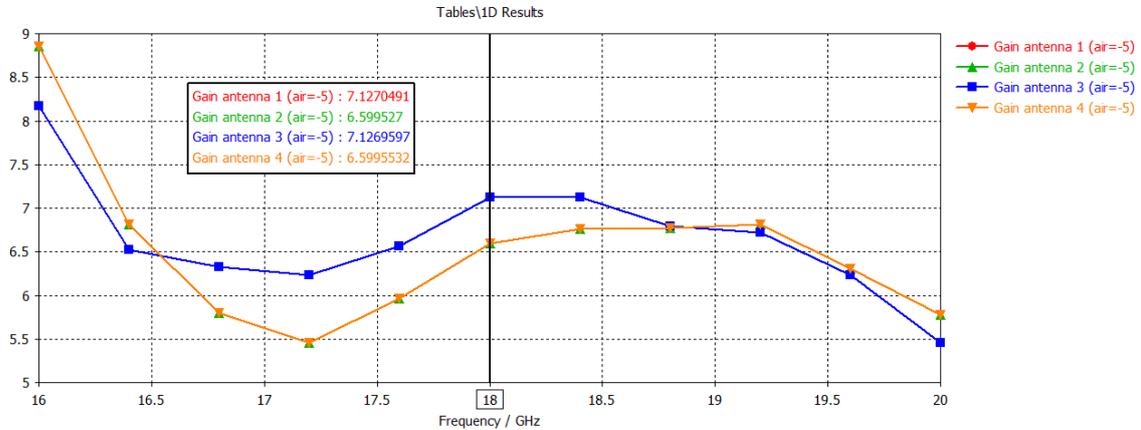


Figure III.40 : Gain d'antennes + MS à 18 GHz :

### III.7.4 ECC d'antennes + MS à 18 GHz

Quand on lit la valeur de l'ECC à 18 GHz (Figure III. 41), on voit que celle-ci a diminué pour atteindre une valeur inférieure à 0,005. Un faible coefficient de corrélation d'enveloppe, comme observé sur la figure (III.54), indique une bonne isolation entre les antennes et suggère que le système MIMO peut atteindre des performances améliorées en termes de qualité du signal, de capacité et d'efficacité globale du système.

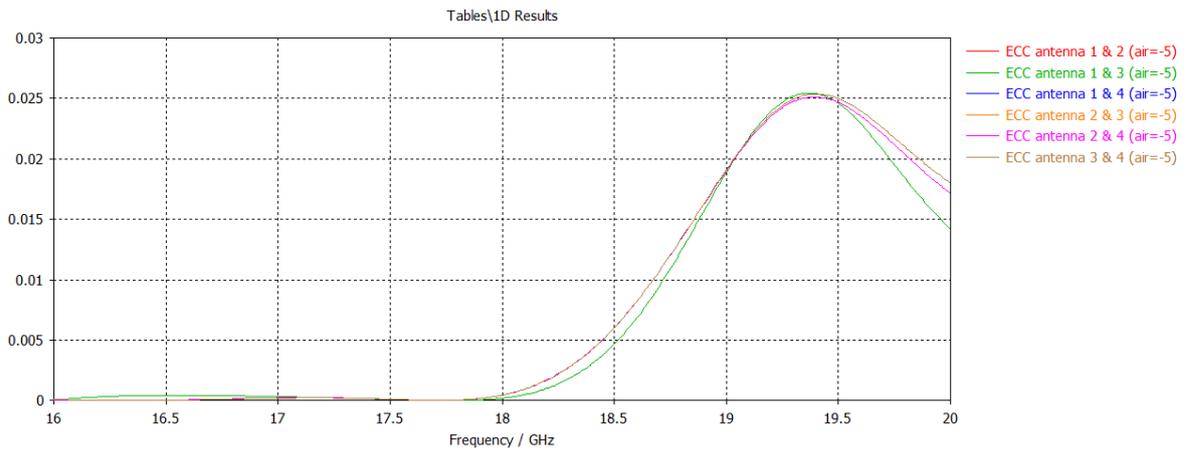


Figure III.41: ECC d'antennes + MS à 18 GHz

### III.7.5 DG d'antennes + MS à 18 GHz

La figure (III.42) montre qu'après ajout de la métasurface le gain de diversité DG a atteint des valeurs supérieures à 9,98 dB.

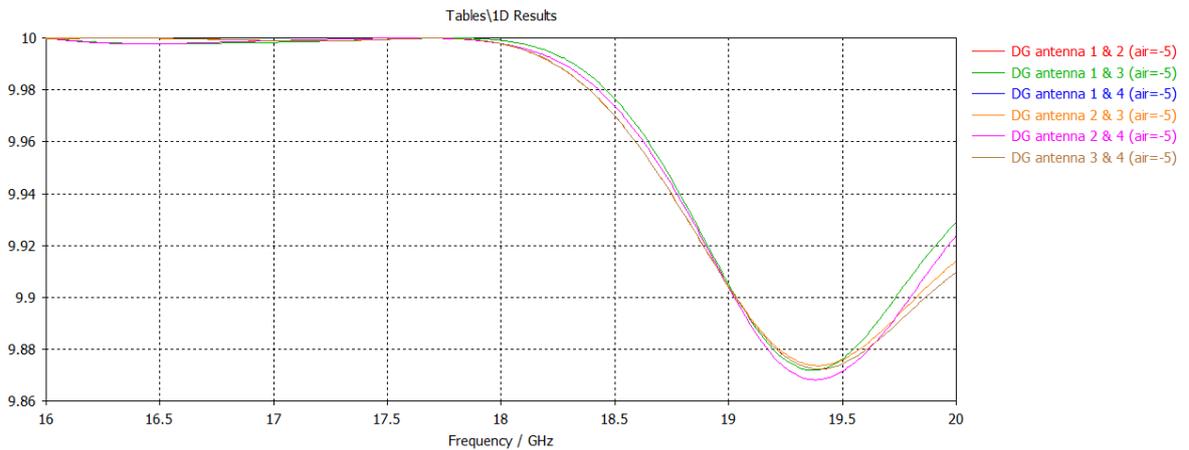


Figure III.42: DG d'antennes + MS à 18 GHz

### III.8 Comparaison des résultats des simulations :

Table III.4 : Comparaison des résultats des simulations

	Fréquence	Efficacité (%)	Gain max (dBi)	Isolation (dB)	ECC	DG (dBi)
<b>MIMO</b>	26	>85	6.3	<-15	<0.004	>9.98
<b>MIMO + MS</b>	26	>90	10.2	<-15	<0.003	>9.985
<b>Article [1]</b>	26	>92	10.44	<-20	<0.006	~10
<b>MIMO</b>	18	>80	5.8	<-10	<0.01	>9.95
<b>MIMO + MS</b>	18	>80	6.57	<-10	<0.005	>9.98

### III.9 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous nous sommes concentrés sur la conception et l'optimisation d'une antenne patch à un seul élément fonctionnant à 26 GHz pour les applications haute fréquence. La conception initiale a subi plusieurs modifications, notamment l'ajout de fentes et d'encoches, pour améliorer le coefficient de réflexion et obtenir la réponse souhaitée. Grâce à des ajustements minutieux des dimensions du patch et de la fente, les performances souhaitées ont finalement été atteintes. De plus, nous avons développé un système d'antenne à 4 ports, puis ajouté un connecteur SMA pour une intégration facile. L'introduction d'une métasurface derrière les éléments d'antenne a considérablement amélioré les performances du système d'antenne en termes de gain.

De plus, une simulation à 18 GHz a été réalisée en ajustant les dimensions de l'antenne pour évaluer ses performances à une fréquence différente. Les résultats ont été résumés dans un tableau, mettant en évidence l'influence de la métasurface sur des paramètres tels que le gain, l'ECC (circuits circulaires équivalents) et le DG (gain de directivité).

## CONCLUSION GENERALE :

En conclusion, ce mémoire a présenté une exploration complète de la technologie 5G mmWave et de son impact profond sur les systèmes de communication sans fil. Nous avons commencé par établir les bases du chapitre 1, où les principes fondamentaux des réseaux 5G ont été abordés, en mettant particulièrement l'accent sur l'importance des fréquences d'ondes millimétriques. De plus, nous nous sommes penchés sur les rôles cruciaux joués par les antennes et les systèmes MIMO pour faciliter la communication par ondes millimétriques.

Au chapitre 2, nous nous sommes concentrés sur le concept de métasurfaces et leur effet transformateur sur les systèmes MIMO. Nous avons observé comment les métasurfaces se présentent sous différentes formes et tailles, chacune contribuant différemment aux performances du système.

Dans le troisième chapitre, nous avons concentré notre attention sur la conception d'antennes qui fonctionnent à mmWave et à des fréquences plus élevées, puis en utilisant cette antenne pour créer une antenne mimo  $2 \times 2$ , de plus nous avons intégré une métasurface au système. Et nous avons vu les résultats démontrer comment l'utilisation de métasurfaces améliore considérablement les performances des systèmes de communication, tels que le gain et le diagramme de rayonnement, atténuant efficacement certaines des limitations précédemment associées à la technologie des ondes millimétriques.

Après avoir terminé ce travail, je peux dire qu'il est vrai que l'adoption des ondes millimétriques dans les télécommunications sans fil a en effet répondu à de nombreuses demandes jusque-là non satisfaites par les générations précédentes. La bande passante plus large, les débits de données plus élevés et la vitesse accrue ont permis des avancées significatives dans divers domaines, notamment l'IoT, les véhicules autonomes et les applications de réalité virtuelle. Et bien que l'utilisation des ondes millimétriques ait présenté des défis, l'utilisation de la technologie MIMO et l'intégration des métasurfaces ont joué un rôle essentiel pour surmonter ces limitations. Comme la façon dont la perte d'espace libre a été résolue grâce à l'utilisation de plusieurs antennes au niveau du récepteur. De plus, la portée efficace limitée qui a été surmontée par la formation de faisceau qui a été formée en intégrant une métasurface avec plusieurs antennes au niveau de l'émetteur.

## REFERENCES

- [1] M. Asif, D. A. Sehrai, W. A. Shah et J. Khan, «Metasurface-Based Wideband MIMO Antenna for 5G Millimeter-Wave Systems,» *IEEE Access* vol 9 pp:125348-125357, 2021.
- [2] BOUHAFS ABDERREZZAQ & ICHOU ABDELKADER, MEMOIRE : Etude et conception d'un réseau d'antenne pour des applications 5G, 2020.
- [3] R. Q. H. Y. Q. a. G. L. Wei, «"Key elements to enable millimeter wave communications for 5G wireless systems,"» *IEEE Wireless Commun.*, pp. vol. 21, no. 6, pp.136-143., Dec. 2014..
- [4] A. NGOM, THÈSE DE DOCTORAT: Conception de petits réseaux d'antennes reconfigurables ou « Small-Cells » pour le standard 5G, 2019.
- [5] avnet, «Understanding Massive MIMO technology,» 23 nov 2020. [En ligne]. Available: <https://www.avnet.com/wps/portal/abacus/solutions/markets/communications/5g-solutions/understanding-massive-mimo-technology/>.
- [6] Editorial Team - everything RF, «What Is Beamforming?,» 4 avr 2019. [En ligne]. Available: <https://www.everythingrf.com/community/what-is-beamforming>.
- [7] IP Encyclopedia, «What Is Beamforming?,» IP Encyclopedia, [En ligne]. Available: <https://info.support.huawei.com/info-finder/encyclopedia/en/Beamforming.html>.
- [8] By Jon Mundy and Sacha Kavanagh, «What Is Massive MIMO Technology?,» 17 nov 2022. [En ligne]. Available: <https://5g.co.uk/guides/what-is-massive-mimo-technology/>.
- [9] IEEE Spectrum, «5G Bytes: Full Duplex Explained,» 01 AVR 2017. [En ligne]. Available: <https://spectrum.ieee.org/5g-bytes-full-duplex-explained>.
- [10] Accton, «The Emergence of 5G mmWave,» 12 oct 2022. [En ligne]. Available: <https://www.accton.com/Technology-Brief/the-emergence-of-5g-mmwave/>.
- [11] Editorial Team - everything RF, «What are mmWaves or Millimeter Waves?,» 8 jan 2023. [En ligne]. Available: <https://www.everythingrf.com/community/what-are-millimeter-waves>.
- [12] propagation tutorial, «gases,» 26 dec 2006. [En ligne]. Available: <http://www.mike-willis.com/Tutorial/gases.htm>.
- [13] Wei Jiang Hans D. Schotten, «Full-Spectrum Wireless Communications for 6G and Beyond: From Microwave, Millimeter-Wave, Terahertz to Lightwave,» May 2023.
- [14] L. SADAoui, THÈSE DE DOCTORAT: Conception de systèmes antennaires MIMO multi-standards LTE pour les noeuds relais, 2018.
- [15] Z. Ahmed, Polycopié de Cours "Antennes", 2018.
- [16] BENDIMERAD Fethi Tarik , «MIMO ET ACCÈS MULTIPLES AVANCÉS POUR RÉSEAUX SANS FIL,» Novembre 2013.
- [17] clicours, «Diversité des systèmes multi-antennaires,» 2023. [En ligne]. Available: <https://www.clicours.com/diversite-des-systemes-multi-antennaires/>.
- [18] A. DIALLO, THÈSE DE DOCTORAT: SYTEMES MULTI-ANTENNES POUR DIVERSITE ET MIMO, 2007.

- [19] antenna-theory, «Envelope Correlation Coefficient (ECC),» 2016. [En ligne]. Available: <https://www.antenna-theory.com/definitions/envelope-correlation-coefficient-ecc.php>.
- [20] Vipul Kaushal, Amit Birwal ,Kamlesh Patel, «Diversity characteristics of four-element ring slot-based MIMO antenna for sub-6-GHz applications,» *Etri Journal*, March 2023.
- [21] Karim Achouri Christophe Caloz, «Design, concepts, and applications of electromagnetic metasurfaces,» De Gruyter, 29 may 2018. [En ligne]. Available: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/nanoph-2017-0119/html>.
- [22] Chenzi Guo & Yu Luo, «Light People: Prof. Sir John Pendry, father of metamaterials, spoke about the future of meta,» 20 february 2023. [En ligne]. Available: <https://www.nature.com/articles/s41377-023-01082-w>.
- [23] Muhammad Hashim Dahri Fauziahanim C. Seman Mohd haizal Jamaluddin Muhammad Inam Abbasi, «Aspects of Efficiency Enhancement in Reflectarrays with Analytical Investigation and Accurate Measurement,» nov 2020.
- [24] D. Sievenpiper, Z. Lijun, R. F. J. Broas, N. G. Alexopolous, and E. Yablonovitch. , «High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band.,» *IEEE Trans Microwave Theory and Techniques.* , vol. vol. 47, pp. pp. 2059-2074,, 1999.
- [25] CHRISTOPHE FISNE, THÈSE DE DOCTORAT : Métasurfaces actives pour applications large bande, 23 oct 2020.
- [26] BERROUA Nora,GHERIS Akila, «Mémoire: Etude paramétrique et simulation de,» 2017.
- [27] H. D. S. Wei Jiang, «Full-Spectrum Wireless Communications for 6G and Beyond: From Microwave, Millimeter-Wave, Terahertz to Lightwave,» 2023.
- [28] G. Mohamed, «Mémoire : Conception d'une antenne''PIFA''multi-bandes pour applications sans fil,» 2016.
- [29] Jean-Pierre, «Comprendre comment les antennes actives 5G Massive MIMO vont révolutionner l'expérience client,» 26 avr 2020. [En ligne]. Available: <https://www.nexcom.fr/comprendre-comment-les-antennes-actives-5g-massive-mimo-vont-revolutionner-lexperience-client/>.
- [30] X. G. H.-C. W. R. I. H. J. G. F. a. A. J. Thompson, «"5G wireless communication systems: Prospects and challenges",» *IEEE Commun. Mag.*, pp. vol. 52, no. 2, pp. 62-64, 2014.
- [31] T. L. M. H. Q. N. Y. Erik G. Larsson, «ANTENNA COUNT FOR MASSIVE MIMO: 1.9 GHZ VERSUS 60 GHZ,» 2018.
- [32] M. Donegan et J. Rogerson, «What is 5G?,» 19 april 2023. [En ligne]. Available: <https://5g.co.uk/guides/what-is-5g/>.
- [33] A. boyer, «Antennes Techniques et systèmes de transmission,» 2014. [En ligne]. Available: <https://slideplayer.fr/slide/1319027/>.
- [34] A. BANSAL, «Patch antenna,» slideshare, 24 march 2015. [En ligne]. Available: <https://www.slideshare.net/RomaRicoFlores/microstrip-antennas-75295092>.
- [35] Antenna-Theory, «Antenna,» 2005. [En ligne]. Available: <https://www.antenna-theory.com/intro/main.php>.

- [36] DORE Jean-Baptiste, «Pourquoi la 5G ?,» encyclopedie, 19 07 2022. [En ligne]. Available: <https://www.encyclopedie-environnement.org/physique/5g/>.
- [37] Eva Webster, «MIMO (multiple input, multiple output),» March 2021. [En ligne]. Available: <https://www.techtarget.com/searchmobilecomputing/definition/MIMO>.
- [38] slideshare, «Microstrip Antennas,» 22 april 2017. [En ligne]. Available: <https://www.slideshare.net/RomaRicoFlores/microstrip-antennas-75295092>.
- [39] digitalcorner, «Les ondes millimétriques et la 5G : une nouvelle dimension pour la téléphonie mobile,» digitalcorner, 2021. [En ligne]. Available: <https://www.digitalcorner-wavestone.com/2021/06/les-ondes-millimetriques-et-la-5g-une-nouvelle-dimension-pour-la-telephonie-mobile/>.
- [40] F. Wang, Z. Duan, X. Wang, Q. Zhou, and Y. Gong, «High isolation millimeter-wave wideband MIMO antenna for 5G communication,» *Int.J. Antennas Propag*, pp. vol. 2019, pp. 1-12, 2019.
- [41] Mhedi Hasan, Mohammad Tariqul Islam, Mohd Hafiz Baharuddin, Mohamed S. Soliman, «Gain and isolation enhancement of a wideband MIMO antenna using metasurface for 5G sub-6 GHz communication systems,» 2022.
- [42] Clusted Networks, «Full Duplex vs Half Duplex and Video Conferences,» 20 Aug 2021. [En ligne]. Available: <https://www.clusterednetworks.com/blog/post/full-duplex-vs-half-duplex-and-video-conferences>.
- [43] Steve Taranovich , «Creating 5G massive MIMO: Part 1,» 11 august 2022. [En ligne]. Available: <https://www.5gtechnologyworld.com/creating-5g-massive-mimo-part-1/>.
- [44] S. Tariq, S. I. Naqvi, N. Hussain, and Y. Amin,, «A metasurface-based MIMOantenna for 5G millimeter-wave applications,» *IEEE Access*, 2021.
- [45] M. Khalid, S. I. Naqvi, N. Hussain, M. Rahman, Fawad, S. S. Mirjavadi, M. J. Khan, and Y. Amin,, «4-port MIMO antenna with defected ground structure for 5G millimeter wave applications,» *Electronic*, pp. vol. 9, no. 1.p. 71., Jan. 2020.
- [46] Thanh Nghia Cao, Minh Tam Nguyen, Huu Lam Phan, Duc Dung Nguyen, Thi Quynh Hoa Nguyen , and Jung-Mu Kim, «Millimeter-Wave Broadband MIMO Antenna Using Metasurfaces for 5G Cellular Networks,» Vols. %1 sur %29938824, , p. 11, 2023.
- [47] Sthembile P. Dubazane, Pradeep Kumar, and Thomas J. O. Afullo, «Metasurface Superstrate-based MIMO Patch Antennas with Reduced Mutual Coupling for 5G Communications,» Vols. %1 sur %2Vol. 37., p. 4, 2022.
- [48] MUHAMMAD ASIF , DANIYAL ALI SEHRAI , SAAD HASSAN KIANI, JALAL KHAN , MUJEEB ABDULLAH , MUHAMMAD IBRAR,, «Design of a Dual Band SNG Metamaterial Based Antenna for LTE 4G/WLAN and Ka-Band Applications,» 2021.
- [49] Daniyal Ali Sehrai, Fazal Muhammad, Saad Hassan Kiani, Ziaul Haq Abbas, Muhammad Tufail and Sunghwan Kim, «Gain-Enhanced Metamaterial Based Antenna for 5G Communication Standards,» Vols. %1 sur %2vol.64, no.3, , pp. pp. 1587-1599, 2020.