

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique  
Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -  
Tasdawit Akli Muḥend Ulḥağ - Tubirett -



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة أكلي محمد أولحاج  
- البويرة -

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

كلية العلوم والعلوم التطبيقية

Référence : ...../MM/ 2023

المرجع : ...../م / 2023

En collaboration avec le Centre de Développement des Technologies Avancée

**CDTA**

## Mémoire de Master

**Présenté au**

**Département :** Génie Électrique

**Domaine :** Sciences et Technologies

**Filière :** Télécommunications

**Spécialité :** Systèmes des Télécommunications

**Réalisé par :**

ACHIT Amani

Et

HAMZA Chaimaa

## Thème

### Conception et réalisation d'un nouveau système d'antennes MIMO pour le standard 5G

Soutenu le : **04/07/2023**

Devant le Jury composé de :

BENZIANE Mourad	M.C.B	Univ. Bouira	Président
ZOUBIRI Bachir	M.R.B	CDTA	Rapporteur
AYAD Mouloud	Prof.	Univ. Bouira	Co-Rapporteur
MEDJEDOUB Smail	M.A.A	Univ. Bouira	Examineur



## نموذج التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث.

انا الممضي اسفله،

السيد(ة).....*حسنة سديما*.....الصفة: طالب، استاذ، باحث.....

الحامل(ة) لبطاقة التعريف الوطنية: *405909862*.....والصادرة بتاريخ *25.05.2023*.....

المسجل(ة) بكلية: العلوم و العلوم التطبيقية..... قسم: الهندسة  
الكهربائية.....

والمكلف(ة) بإنجاز اعمال بحث(مذكرة، التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، اطروحة دكتوراه).

عنوانها: *conception de nouveau système d'antennes*.....

*PIFA pour le standard 5G*.....

تحت إشراف الأستاذ(ة): *عياح حواره*.....

أصرح بشرفي اني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية  
المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: *03/07/2023*.....

توقيع المعني(ة)

رأي هيئة مراقبة السرقة العلمية:

*h. Mulah*

%

*01*

النسبة: *01* %

الامضاء:



## نموذج التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث.

انا الممضي اسفله،

السيد(ة) عشیرة أحادی.....الصفة: طالب، استاذ، باحث.....

الحامل(ة) لبطاقة التعريف الوطنية: 400.629.31.....والصادرة بتاريخ 2022.02.10

المسجل(ة) بكلية: العلوم و العلوم التطبيقية..... قسم: الهندسة  
الكهربائية.....

والمكلف(ة) بإنجاز اعمال بحث(مذكرة، التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، اطروحة دكتوراه).

عنوانها: conception de nouveau système d'antennes  
Pi Mo pour le standard 5G

تحت إشراف الأستاذ(ة): عبد حميد مولود

أصرح بشرفي اني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية  
المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 03/07/2023

توقيع المعني(ة)

رأي هيئة مراقبة السرقة العلمية:

H. Melah

% 01

النسبة: 01 itin

الامضاء:



# Dédicace

*Alhamdulillah, toutes les louanges à Allah pour les forces qui m'ont permis de compléter cette mémoire.*

*Ce travail est dédié en premier de tout mon cœur à mes chers parents, qui ont été toujours pour moi, Merci pour votre soutien, votre courage et votre amour qui ont fait de moi que je suis aujourd'hui, que dieu vous garde pour moi.*

*A mes sœurs Nour el houda et yasmine, ma petite princesse Lyna, à mes frères Rahim et Lyes, qui m'ont toujours soutenu et encouragé.*

*A tous les membres de ma famille.*

*Une dédicace spéciale à ma chère binôme Yasmine qui m'a accompagné tout au long de ces années et qui est devenue ma meilleure amie et sœur.*

*A mes meilleurs amis : Lyes, nesrine, thiziri, Hasna, Amel, Melissa.*

*A tous mes collègues de la section de Ste, en particulier : Achouak, Bouthaina, Soulef, Amira, yousra, Khaoula, Bilel, idir, taher, hafid, mazigh et kamel.*



*Achit Amani.*

---



# Dédicace

*Je dédie ce travail :*

*À l'âme de mon père, je n'aurais pas réussi sans toi, malgré que tu sois physiquement absent de moi, mais tu es toujours à mes côtés. Merci pour tout ce que tu m'as donné, repose en paix.*

*À ma maman tu es la force qui me donne le courage de réussir et d'être là tu es la plus belle chose de ma vie merci pour tout ton soutien je t'aime.*

*À ma chère sœur Fatima, je voudrais exprimer ma plus profonde gratitude pour votre rôle essentiel dans l'éducation et les soins que vous m'avez prodigués.*

*À mes frères Mohammad et Mourad.*

*À ma chère binôme et sœur Amani, qui a été à mes côtés tout au long de ces années, je souhaite exprimer tout mon amour et ma gratitude pour ta présence dans ma vie.*

*À mes meilleurs amis : Amal, Bilal, Rima, Nesrine, Melissa.*

*À mes collègues de section de Ste, en particulier : Bouthaina, Hamza, khaled, hafid, khalil, taher, idir, yousra, mazigh, kamel, soulef.*



*Hamza chaimaa.*

---

# Remerciements

Ce travail a été effectué au sein du département des sciences et sciences appliquées de l'Université de Bouira en collaboration avec le Centre de Développement des Technologies Avancées (CDTA).

Nous tenons à remercier, en premier lieu, Prof. AYAD Mouloud et Zoubiri Bachir, directeurs de ce mémoire.

Nous remercions vivement Dr Zoubiri Bachir et Mr Ibrahim Fortas, ingénieurs en CDTA, pour son soutien et accompagnement durant la réalisation de ce travail.

Nous remercions également les membres de jury Mr. Benziane Mourad et Medjedoub Smail pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail.

Enfin, j'associe à ces remerciements tous ceux qui ont contribué à réaliser ce travail.

## Résumé

Le but de ce mémoire est la conception et le prototypage d'un nouveau système d'antenne MIMO 1x2 microruban à faible coût, de taille compacte, et de bonnes caractéristiques de rayonnement pour les dispositifs 5G Sub-6. En premier, nous avons conçu une antenne monopôle avec deux structures différentes qui fonctionne à la fréquence 3.5GHz. Ensuite, une antenne MIMO à deux éléments est présentée à partir de l'antenne de départ avec 04 configurations différentes afin de choisir la configuration MIMO 1x2 l'optimale pour la réalisation. Cette configuration offre une meilleure adaptation à la fréquence opérationnelle, un faible niveau de couplage entre les antennes, un diagramme de rayonnement omnidirectionnel, un coefficient de corrélation très faible ( $ECC < 0.003$ ) et un gain de diversité élevée ( $DG > 9.95$ ). Les résultats ont montré que les antennes MIMO proposées sont compactes et ont de bonnes performances et sont bien adaptées aux applications 5G Sub-6.

**Mots clés :** Antenne microruban, système MIMO, 5G Sub-6, miniaturisation

# Table des Matières

Remerciements.....	I
Résumé.....	II
Liste des matières.....	III
Liste des Figures.....	VI
Liste des Tableaux.....	VII
Listes des Acronymes et Symboles.....	VIII
Introduction Générale.....	1

## Chapitre1 : Notions générales sur les antennes

1. Introduction.....	3
2. Antenne patch microruban.....	3
2.1 Ligne microruban.....	4
2.2 Les paramètres fondamentaux d'antenne patch microruban.....	4
2.2.1 Impédance d'entrée.....	4
2.2.2 La bande passante.....	4
2.2.3 VSWR.....	5
2.2.4 La perte de retour.....	5
2.2.5 Diagramme de rayonnement.....	6
2.2.6 Directivité.....	7
2.2.7 Gain.....	7
2.2.8 Polarisation.....	7
3. Les antennes MIMO.....	8
3.1. Couplage mutuel.....	8
3.2. Critères de performance de l'antenne MIMO.....	8
3.2.1. Coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC).....	9
3.2.2. Gain de diversité (DG).....	9
3.2.3. Coefficient de réflexion active totale (TARC).....	9
3.2.4. Gain effectif moyen (MEG).....	9
3.2.5. Perte de capacité de canal (CCL).....	10
4. Conclusion.....	10

## Chapitre 2 : Etude et Modélisation d'antenne MIMO



1.Introduction.....	11
2.Technologie MIMO traditionnelle.....	11
2.1 Les Types de système .....	12
2.1.1 Système SISO.....	12
2.1.2 Système SIMO.....	13
2.1.3 Système MISO.....	13
2.1.4 Système MIMO.....	14
2.1.5 Avantages de la technologie MIMO.....	14
3. Technologie MIMO Massive.....	15
3.1 Types Massive MIMO .....	16
3.1.1 SU-MIMO (Single User MIMO) .....	16
3.1.2 Multi-User Massive MIMO .....	17
3.2 Avantage de MIMO massive.....	18
3.3. Comparaison entre MIMO traditionnelle et MIMO massive.....	19
4. Conclusion.....	20

### **Chapitre 3 : Conception, simulation et réalisation d'une antenne MIMO pour applications 5G**

1. Introduction.....	21
2.Conception et simulation d'une antenne monopôle.....	21
2.1. Première structure.....	21
2.1.1 Adaptation de l'antenne initiale.....	23
2.1.2 Les dimensions de l'antenne optimisée (avec les encoches).....	24
2.1.3. Le coefficient de réflexion (après les encoches).....	25
2.1.4. Diagramme de rayonnement et Gain.....	25
2.1.5 La bande passante.....	26
2.2. Deuxième structure.....	26
3. La conception de MIMO 1x 2 à deux éléments.....	28
3.1 Les configurations de MIMO 1x 2.....	28
3.1.1 La première configuration « adjacente ».....	29
3.1.2 La deuxième configuration « orthogonale ».....	30
3.1.3 La troisième configuration « coaxiale (coplanaire) ».....	31
3.1.4 La quatrième configuration « verticale-horizontale (polarisation croisée) ».....	32
3.2 Comparaison entre les configurations.....	33
3.3 Résultat de simulation pour la configuration verticale-horizontale trapézoïdale	33

4 Réalisation (vérification expérimentale).....	37
4.1 Comparaison entre les résultats mesurés et simulés.....	38
5. Conclusion.....	40
Conclusion Générale.....	41
Références bibliographiques.....	42

## Liste des Figures

Figure 1.1 : Structure de l'antenne patch microruban.....	3
Figure 1.2 : Largeur de bande d'une antenne.....	5
Figure 1.3 : Diagramme de rayonnement (a) source isotrope, (b) source directive.....	6
Figure 1.4 : les Types de polarisation.....	8
Figure 2.1 : Principe de la technologie MIMO.....	11
Figure 2.2: SISO-Single Input Single Output.....	13
Figure 2.3: SIMO- Single Input Multiple Output.....	13
Figure 2.4: MISO-Multiple Input Single Output.....	14
Figure 2.5 : MIMO-Multiple Input Multiple Output.....	14
Figure 2.6 : illustration de MIMO massive.....	15
Figure 2.7 : Illustration de technique beamforming.....	16
Figure 2.8 : Illustration de SU_ MIMO.....	17
Figure 2.9 : illustration de MU_ MIMO.....	18
Figure 3.1 : Structure de l'antenne rectangulaire.....	22
Figure 3.2 : Coefficient de réflexion (s11) de l'antenne simulé.....	22
Figure 3.3 : Structure de l'antenne avec les encoches.....	23
Figure 3.4 : L'effet de la variation de L sur le coefficient de réflexion.....	23
Figure 3.5 : L'effet de la variation de W sur le coefficient de réflexion.....	24
Figure 3.6 : Coefficient de Réflexion de l'antenne optimisée.....	25
Figure 3.7 : Diagramme de rayonnement 2D :(a) plan E(b) plan H.....	25
Figure 3.8 : Diagramme de rayonnement 3D : (a) gain (b) directivité.....	26
Figure 3.9 : Largeur de bande de l'antenne optimisée.....	26
Figure 3.10 : Structure de l'antenne trapézoïdale avec encoches.....	27
Figure 3.11 : Le coefficient de réflexion (s11) de l'antenne trapézoïdale.....	28
Figure 3.12 : Le coefficient de diffusion de l'antenne trapézoïdale.....	33
Figure 3.13 : La bande passante de l'antenne trapézoïdale.....	34
Figure 3.14 : Diagramme de rayonnement en 3D de la structure : (a) Port 1, (b) Port 2.	34
Figure 3.15 : Diagramme de rayonnement en 2Dde la structure : (a) Plan E, (b) Plan H.	35
Figure 3.16 : Coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC)de la structure.....	35
Figure 3.17 : Gain de diversité (DG)de la structure.....	36
Figure 3.18 : VSWR de la structure.....	36
Figure 3.19 : Le gain de la structure.....	37

Figure 3.20 : Vue de face et d'arrière de la configuration 1*2 réalisée.....	37
Figure 3.21 : Mesure de l'antenne MIMO 1*2 réalisée.....	38
Figure 3.22 : Coefficients S mesurés et simulés du port1.....	38
Figure 3.23 : Coefficients S mesurés et simulés du port2.....	39

## Liste des Tableaux

Tableau 2.1 : Comparaison des caractéristiques de deux technologies MIMO.....	19
Tableau 3.1 : Les dimensions de l'antenne.....	22
Tableau 3.2 : Les dimensions de l'antenne optimisée.....	24
Tableau 3.3 : Les dimensions de l'antenne trapézoïdale.....	27
Tableau 3.4 : La 1ère configuration.....	29
Tableau 3.5 : La 2ème configuration.....	30
Tableau 3.6 : La 3ème configuration.....	31
Tableau 3.7 : La 4ème configuration.....	32
Tableau 3.8 : Comparaison des résultats des comparaisons.....	33
Tableau 3.9 : comparaison entre les paramètres simulés et mesurés à la fréquence 3.5Ghz.....	39

# Listes des Acronymes et Symboles

- **Acronymes**

2D	Deux dimensions
3D	Trois dimensions
5G	5ème génération
Beamforming	Formation des faisceaux
CCL	Channel Capacity Loss
CST MWS	CST Microwave Studio
dB	Décibels
DG	Diversity Gain
ECC	Envelope Correlation Coefficient
FD	Full Dimension
GHz	Giga hertz
MEG	Mean Effective Gain
MIMO	Multiple-input-Multiple-Output
MISO	Multiple Input Single Output
MU-MIMO	Multi User MIMO
SE	Spectral efficacité
SIMO	Single Input Multiple Output
SISO	Single Input Single Output
SMA	Sub Miniature version A
SU-MIMO	Single User MIMO
SWR	Standing Wave Ratio
TARC	Total Active Reflection Coefficient
UIT	Union Internationale de télécommunications
VNA	Vector Network Analyzer
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio

• **Symboles**

Bp	Bande passante	GHz
D	Directivité	
Fc	La fréquence centrale	GHz
FL	La fréquence la plus élevée de la bande	GHz
Fh	La fréquence la plus bas de la bande	GHz
F <sub>L</sub>	La fréquence la plus élevée de la bande	GHz
G	Le gain	dB
$\eta$	L'efficacité	
P <sub>in</sub>	Puissance d'entrée sur l'antenne	W
P <sub>acceptée</sub>	La puissance nette acceptée par l'antenne	W
P <sub>rad</sub>	La puissance totale rayonnée	W
P <sub>ref</sub>	Puissance réfléchi sur l'antenne	W
PR	Perte de Retour	W
Ra	Résistance d'antenne	$\Omega$
S <sub>ii</sub>	Paramètre S de réflexion	dB
S <sub>ij</sub>	Coefficient S de transmission	dB
U	Intensité de rayonnement	W
Xa	Réactance d'antenne	$\Omega$
Za	L'impédance d'entrée	$\Omega$
$\lambda_0$	Longueur d'onde d'espace libre	Mm
$\epsilon_r$	Constante diélectrique	F.m <sup>-1</sup>
$\delta$	Conductivité électrique	S.m <sup>-1</sup>
$\theta$	Azimutal plane	Degré
$\varphi$	Élévation plane	Degré

# Introduction Générale

Le domaine des télécommunications a connu un progrès technologique au cours des dernières années grâce à la forte demande de la population et de l'industrie de ses services. Pour répondre à ce flux de demande de services des télécommunications, plusieurs solutions et technologies ont été proposées. Le réseau sans fils 5G (5<sup>ème</sup> génération) est l'une de ces solutions. Afin d'augmenter la capacité de ce réseau, l'une des solutions proposées est l'utilisation de la technologie MIMO (Multiple-Input Multiple-Output). Cette technique permet d'augmenter le débit et le nombre d'utilisateurs. Dans la littérature, plusieurs applications de la technique MIMO ont été proposées [1-5].

Dans le présent travail, notre objectif c'est de proposer un nouveau système d'antennes MIMO pour le standard 5G. Pour ce faire, on doit concevoir un prototype d'un nouveau type d'antenne MIMO microruban à deux éléments en utilisant des configurations MIMO 1\*2 fonctionnant dans la fréquence 3.5GHz, composée par des monopoles identiques, imprimés et alimentées par des lignes microruban à faible coût, de taille compacte, de bonnes caractéristiques de rayonnement pour les dispositifs 5G sub-6. Le substrat utilisé dans ce travail est le FR-4. La simulation est réalisée à l'aide du simulateur CST MWS 2019.

Notre travail est organisé en trois chapitres décrits dans ce qui suit :

Le premier chapitre donne une vue d'ensemble des concepts liés aux antennes patch microruban, en traitant les paramètres fondamentaux de ces antennes. En outre, le couplage mutuel des antennes MIMO ainsi que ses critères de performance sont abordés à la fin du chapitre.

Le deuxième chapitre donne un aperçu de l'étude et de la modélisation des antennes MIMO telles que les concepts généraux, les avantages...etc. Enfin, on va terminer ce chapitre par une comparaison détaillée du MIMO traditionnel et du MIMO massif.

Le troisième chapitre présente la simulation et l'analyse de l'antenne monopôle initiale proposé avec deux structures différentes (patch rectangulaire et patch trapézoïdale). Ensuite, la conception des configurations d'antenne MIMO à deux éléments en comparant les différentes configurations simulées et l'interprétation des résultats obtenus. Enfin, la réalisation de la configuration optimale qui a donné les meilleurs résultats, ainsi qu'une comparaison entre les résultats simulés et mesurés.

Enfin, notre travail se termine par une conclusion générale qui résume les principaux résultats ainsi que des perspectives pour l'avenir.

# Chapitre 1 :

## Notions générales sur les antennes

### 1. Introduction

Ces dernières années, les antennes patch microruban ont joué un rôle important et ont attiré une attention considérable. Dans ce chapitre, nous présentons les concepts généraux des antennes patch microruban, leurs ainsi que ses différentes caractéristiques les plus importantes. Ensuite, nous présentons un aperçu sur les antennes MIMO.

### 2. Antenne patch microruban :

Les antennes microruban ont suscité un intérêt important à partir des années 1970, Elles se distinguent par leur faible profil, leur capacité à s'adapter à des surfaces planes et non planes ainsi que par leur coût réduit de fabrication grâce aux avancées de la technologie des circuits imprimés.

Les antennes microruban sont composées d'une fine bande métallique (appelée patch) placée à une petite fraction de la longueur d'onde ( $t \ll \lambda_0$ , où  $\lambda_0$  représente la longueur d'onde de l'espace libre), située juste au-dessus d'un plan de masse. Le patch et le plan de masse sont séparés par une feuille diélectrique, connue sous le nom de substrat.

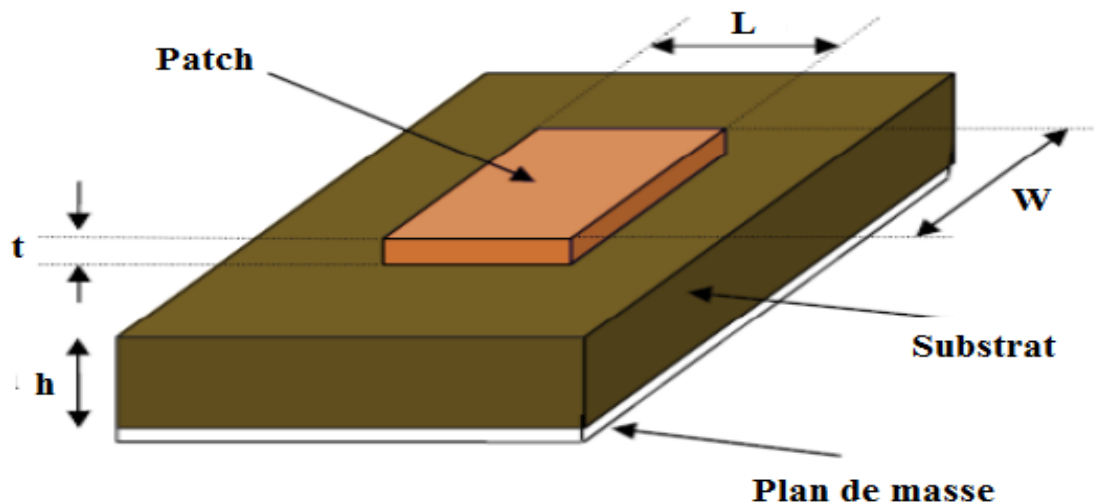


Figure 1.1 : Structure de l'antenne patch microruban.



## **2.1 Ligne microruban :**

La ligne d'alimentation microruban est également constituée d'une bande conductrice, généralement plus étroite que celle du patch, Sa fabrication est facile, et elle peut être ajustée simplement en contrôlant la position d'insertion. De plus, sa modélisation est relativement simple. Cependant, lorsque l'épaisseur du substrat augmente, les ondes de surface et les rayonnements indésirables de l'alimentation augmentent également. Cela limite la largeur de bande disponible dans les conceptions pratiques, généralement à (environ 2-5%) [6].

## **2.2 Les paramètres fondamentaux d'antenne patch microruban :**

### **2.2.1 Impédance d'entrée :**

L'impédance d'entrée est définie comme l'impédance que présente une antenne à ses bornes. Elle peut également être définie comme le rapport entre la tension et le courant au niveau d'une paire de bornes, ou encore comme le rapport entre les composants appropriés du champ magnétique et du champ électrique en un point donnée [6], elle est donnée par :

$$Z_a = R_a + jX_a \quad (1.1)$$

$Z_a$  : l'impédance d'entrée ;

$R_a$  : la partie réelle de l'impédance (résistance d'antenne) ;

$X_a$  : la partie imaginaire de l'impédance (réactance d'antenne).

### **2.2.2 La bande passante :**

La bande passante d'une antenne désigne la plage de fréquences sur laquelle l'antenne est capable de fonctionner de manière optimale. On peut également exprimer la bande passante en pourcentage par rapport à la fréquence centrale de la bande comme suit [7] :

$$BP = 100 \frac{F_H - F_L}{F_c} \quad (1.2)$$

$F_L$  : La fréquence la plus élevée de la bande

$F_H$  : La fréquence la plus basse de la bande

$F_c$  : La fréquence centrale de la bande

La bande passante est généralement calculé à -10dB de coefficient de réflexion, comme le montre la Figure (1.2):

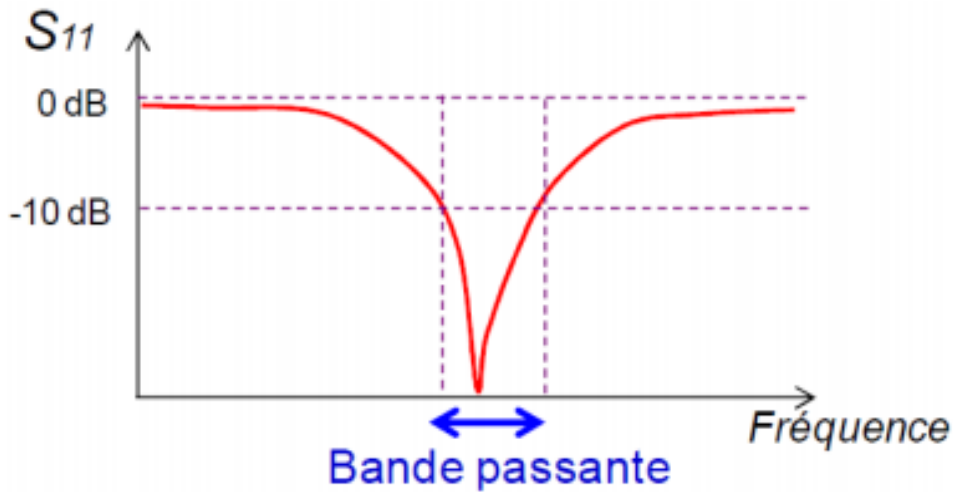


Figure 1.2 : Largeur de bande d'une antenne.

$S_{11}$  : Coefficient de réflexion sur le port 1.

**Remarque :**

$S_{ii}$  : Coefficient de réflexion sur le port i.

$S_{ij}$  : Coefficient de transmission de port j vers le port i.

**2.2.3 VSWR :**

Le VSWR est l'abréviation de (Voltage Standing Wave Ratio) (rapport d'ondes stationnaires de tension). Il s'agit d'une fonction du coefficient de réflexion qui quantifie la puissance réfléchie par l'antenne. Il est défini par la formule suivante :

$$VSWR = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (1.3)$$

Le VSWR est toujours un nombre réel et positif. Une valeur plus petite de VSWR indique une meilleure adaptation entre l'antenne et la ligne de transmission, et plus la puissance délivrée à l'antenne est importante [8].

**2.2.4 La perte de retour :**

La perte de retour est une mesure de l'efficacité de transfert de l'énergie d'une ligne de transmission vers une charge, telle qu'une antenne. Si nous considérons la puissance incidente ( $P_{in}$ ) sur l'antenne sous test et la puissance réfléchie ( $P_{ref}$ ) vers la source, le degré de désadaptation entre la puissance incidente et la puissance réfléchie dans les ondes progressives est exprimé par le rapport ( $P_{in}/P_{ref}$ ). Un rapport élevé indique une meilleure adaptation de la charge et la ligne. Cette valeur est souvent exprimée en décibels (dB) et donnée par :

$$PR = 10 \log\left(\frac{p_{in}}{p_{ref}}\right) = 20 \log\left|\frac{VSWR+1}{VSWR-1}\right| \quad (1.4)$$

## 2.2.5 Diagramme de rayonnement :

Un diagramme de rayonnement d'antenne se réfère à une représentation mathématique ou graphique qui décrit les caractéristiques de rayonnement d'une antenne en fonction des coordonnées spatiales, il est tracé sous la forme d'un graphique 2D ou 3D dans la région de champ lointain. Il existe 2 plans qui sont :

- Le plan E : dans le plan x-z ( $\varphi = 0^\circ$ , élévation plane).
- Le plan H : dans le plan x-y ( $\theta = \pi/2$ , azimuthal plane).

Les types de diagrammes de rayonnement des antennes sont :

- Isotrope : est une antenne hypothétique sans pertes qui rayonne de manière égale dans toutes les directions. Bien qu'il ne puisse pas être réalisé physiquement, il sert souvent de référence pour exprimer les propriétés de directivité des antennes réelles.
- Directionnelle : est une antenne qui possède la capacité de rayonner ou de recevoir des ondes électromagnétiques de manière plus efficace dans certaines directions par rapport à d'autres.
- Omnidirectionnelle : il est défini comme un modèle qui est essentiellement **non directionnel** dans un plan donné, et a un modèle **directionnel** dans n'importe quel plan orthogonal.

Le diagramme de rayonnement d'une antenne montre les variations de puissance rayonnée dans les différentes directions de l'espace. Il change d'une antenne à une autre, il peut être omnidirectionnel comme dans le cas d'une antenne isotrope (Figure 1.3 (a)) ou directive, comme dans le cas d'une antenne parabolique (Figure 1.3(b)).

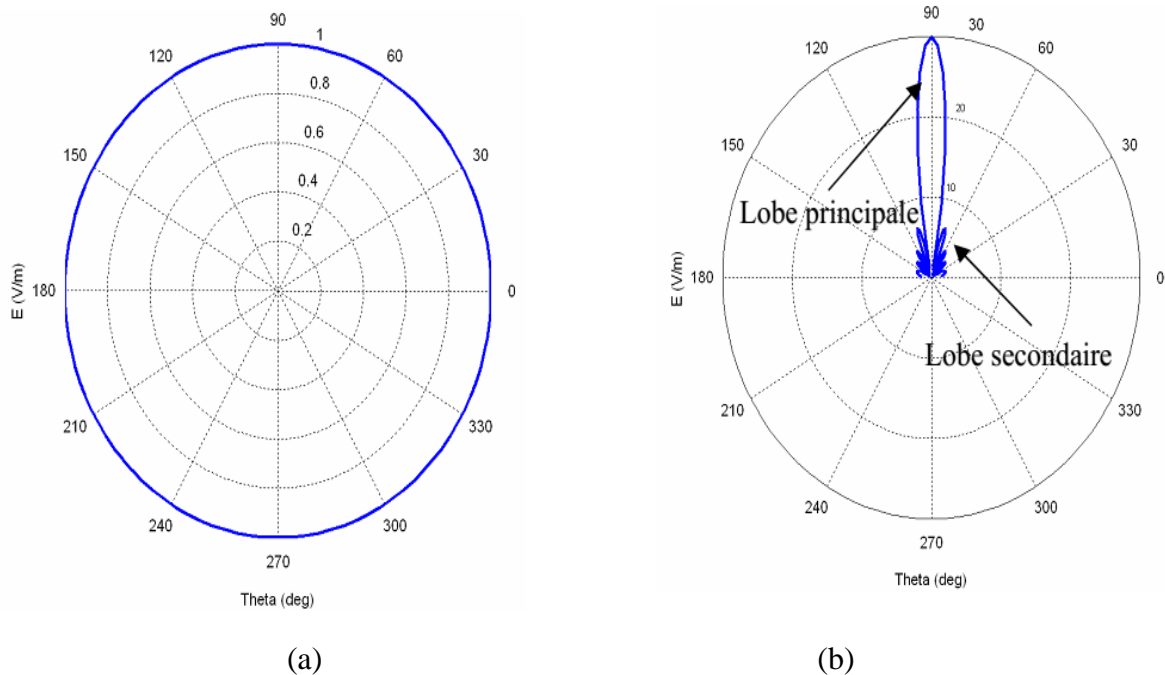


Figure 1.3 : Diagramme de rayonnement (a) source isotrope, (b) source directive.

**2.2.6 Directivité :**

La directivité d'une antenne est définie comme le rapport entre l'intensité de rayonnement dans une direction spécifique et l'intensité de rayonnement moyenne dans toutes les directions, pour une source non isotropique, la directivité est égale au rapport entre son intensité de rayonnement dans une direction donnée et celle d'une source isotrope.

La directivité est donnée par :

$$D = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (1.5)$$

**U** : l'intensité de rayonnement en (W/unité d'angle solide)

**U<sub>0</sub>** : L'intensité de rayonnement d'une source isotrope

**P<sub>rad</sub>** : la puissance totale rayonnée en (W)

**N.B** : pour les sources isotropes → la directivité est unité.

**2.2.7 Gain :**

Le gain  $G(\theta, \phi)$  d'une antenne prend en compte à la fois les pertes dans l'antenne et sa directivité. il peut être définie comme suit : c'est le rapport entre l'intensité du rayonnement dans une direction spécifique et l'intensité du rayonnement qui serait obtenue si la puissance reçue par l'antenne était rayonnée de manière isotrope. Le gain est mesuré en dBi, il peut être obtenue par l'équation suivante [9] :

$$G(\theta, \phi) = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{acceptee}} \quad (1.6)$$

**P<sub>acceptee</sub>** : La puissance nette acceptée par l'antenne .

Le gain dans la direction  $(\theta, \phi)$  est proche de la directivité .il est exprimé par l'équation suivante :

$$G(\theta, \phi) = \eta D(\theta, \phi) \quad (1.7)$$

**η**: L'efficacité qui est une valeur comprise entre 0 et 1 qui représente les pertes présentes au sein de l'antenne.

**N.B** : Plus ( $\eta$ ) est proche de 1, la puissance injectée dans l'antenne est davantage rayonnée, ce qui indique une plus grande efficacité de l'antenne [10].

**2.2.8 Polarisation :**

Fondamentalement, la polarisation d'une antenne fait référence à l'orientation physique des ondes électromagnétiques dans l'espace (champ lointain), En l'absence d'indication de la direction

de polarisation, on considère généralement qu'elle correspond à la direction où le gain maximal est atteint. Il existe trois types de polarisation : la polarisation linéaire, la polarisation elliptique et la polarisation circulaire comme le montre la Figure (1.4).

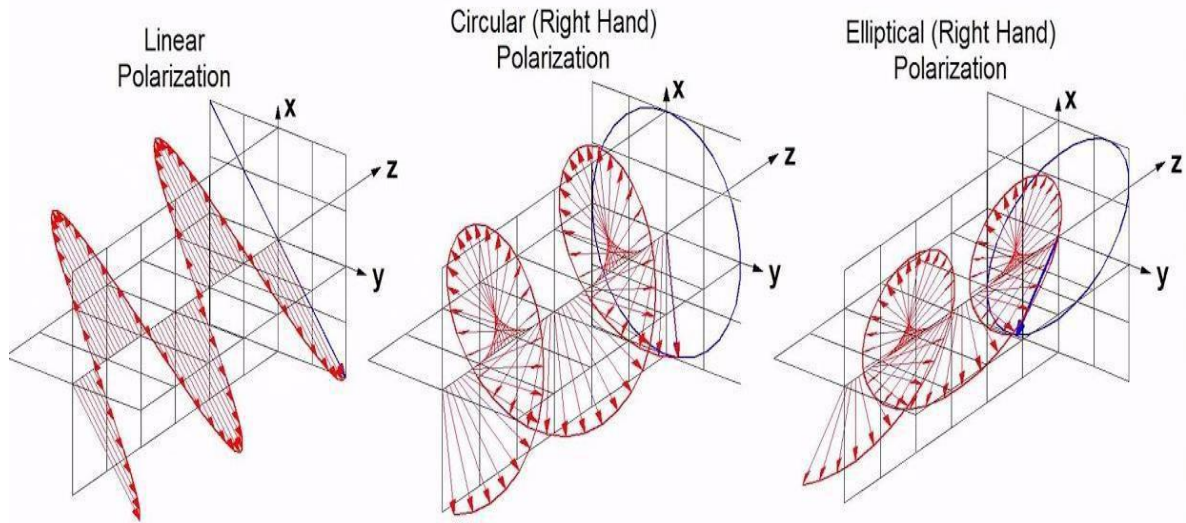


Figure 1.4 : Types de polarisation.

La Co-polarisation ou les antennes appariées se réfèrent à la situation où les antennes d'émission et de réception ont la même polarisation. En revanche, la polarisation croisée se produit lorsque les deux antennes ont des polarisations différentes, ce qui est également connu sous le nom de polarisation non appariée.

### 3. Les antennes MIMO :

#### 3.1. Couplage mutuel :

Le couplage mutuel entre les deux éléments d'antenne d'un système MIMO dépend du sens du courant circulant à la surface des antennes. Lorsque le courant circule dans le même sens sur les deux côtés adjacents des antennes, le couplage mutuel augmente. De même, lorsque des courants circulent dans des directions opposées, le couplage mutuel induit est supprimé [11].

#### 3.2. Critères de performance de l'antenne MIMO :

Dans la conception d'une antenne MIMO, plusieurs paramètres doivent être pris en considération, et certains d'entre eux sont énumérés dans cette section.

##### 3.2.1. Coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC) :

La prise en compte de ce critère est essentielle car elle permet d'évaluer le degré de couplage au sein du système. Lorsque ce critère est réduit, cela entraîne une diminution du couplage et donc une amélioration de performance des antennes. Selon l'Union internationale des

télécommunications (UIT) ECC doit être inférieure ou égale à 0,5 pour les applications mobiles [12].

Le calcul rapide de ce critère à partir des paramètres S, est donné par l'équation suivante [13] :

$$\rho_{eij} = \frac{|s_{ii}^*s_{ij} + s_{ji}^*s_{jj}|^2}{(1-|s_{ii}|^2 - s_{ij}^2) - (1-|s_{ji}|^2 - s_{jj}^2)} \quad (1.8)$$

### 3.2.2. Gain de diversité (DG) :

Ce coefficient vise à évaluer le degré de performance des techniques de diversité et il peut être mesuré par la relation suivant :

$$DG = 10 \sqrt{1 - |\rho_{eij}|^2} \quad (1.9)$$

On remarque que plus le coefficient de corrélation est faible, plus le gain de diversité sera élevé, donc une isolation élevée entre les antennes est nécessaire, sinon le DG sera faible. Pour assurer un fonctionnement optimal de l'antenne MIMO, le DG doit être proche de 10 dB [13].

### 3.2.3. Coefficient de réflexion active totale (TARC) :

Ce coefficient indique le pourcentage de réflexions de la puissance d'entrée et il est calculé par l'équation suivante :

$$\Gamma_a^t = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N |b_i|^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N |a_i|^2}} \quad (1.10)$$

Dans cette équation, (**a<sub>i</sub>**) représenté le signal incident et (**b<sub>i</sub>**) représente le signal réfléchi. Le coefficient TARC varie de 0 à 1, où 0 indique un rayonnement total de toute la puissance incidente, tandis que 1 indique que toute la puissance est soit réfléchi (réflexion totale), ou transmise vers les autres ports [12].

### 3.2.4. Gain effectif moyen (MEG) :

Lorsqu'il s'agit de la diversité, l'évaluation des performances du gain effectif moyen (MEG) est un paramètre clé supplémentaire, qui est défini comme la puissance moyenne reçue dans un environnement de fading (environnement de propagation défavorable) et il est calculé par la relation suivante [13] :

$$MEG_i = 0,5\mu_{irad} = 0,5 \left( 1 - \sum_{j=1}^k |S_{ij}| \right) \quad (1.11)$$

Tel que : K est le nombre d'antennes et i représente l'antenne en observation, et  $\mu_{irad}$  représente l'efficacité de rayonnement.

Pour garantir de bonnes performances en termes de diversité, il est courant de suivre la norme pratique selon laquelle le gain effectif moyen (MEG) doit respecter l'inégalité :

$$-3 \leq \text{MEG (dB)} < -12$$

### 3.2.5. Perte de capacité de canal (CCL) :

Ce paramètre est considéré comme l'un des paramètres de performance importants en MIMO, qui met en évidence les pertes de capacité du système dues à l'effet de corrélation. La valeur du CCL peut être calculée en utilisant l'équation suivant :

$$\mathcal{C}(\text{loss}) = -\log_2 \det(a) \quad (1.12)$$

$$\text{Tel que : } a = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \sigma_{ii} = 1 - (|s_{ii}|^2 - |s_{ij}|^2), \quad \sigma_{ij} = -(s_{ii}^* s_{ij} + s_{ji} s_{jj}^*)$$

Pour obtenir de meilleures performances de diversité MIMO, il est recommandé que le CCL soit maintenu en dessous de 0,4 bits/s/Hz [14].

## 4. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons vu les paramètres et les critères de base et la technique optimale d'alimentation de l'antenne patch qu'on va l'utiliser pour construire notre antenne. Dans le chapitre suivant, on va présenter la technologie des antennes MIMO.

# Etude et Modélisation d'une antenne MIMO

## 1. Introduction

Les antennes MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) sont soumises à une attention croissante dans les systèmes de communications modernes à haut débit et jouent un rôle indispensable dans la génération actuelle de technologie sans fil. Les antennes MIMO peuvent être utilisées pour améliorer la couverture et la capacité du réseau 5G en permettant la transmission simultanée de plusieurs flux de données sur la même fréquence et utilise plusieurs parcours pour transmettre ou recevoir des données, augmentant ainsi la portée et les performances de sortie. Dans ce chapitre, nous présentons les concepts généraux des antennes MIMO.

## 2. Technologie MIMO traditionnelle :

Le principe de la technologie MIMO est de transmettre plusieurs signaux simultanément sur différentes antennes à travers le même canal. De même, lors de la réception, en utilisant un certain nombre d'antennes et de traitements appropriés, il est possible de simuler la réception de plusieurs signaux provenant de différentes sources dans une même bande de (n) canaux différents.

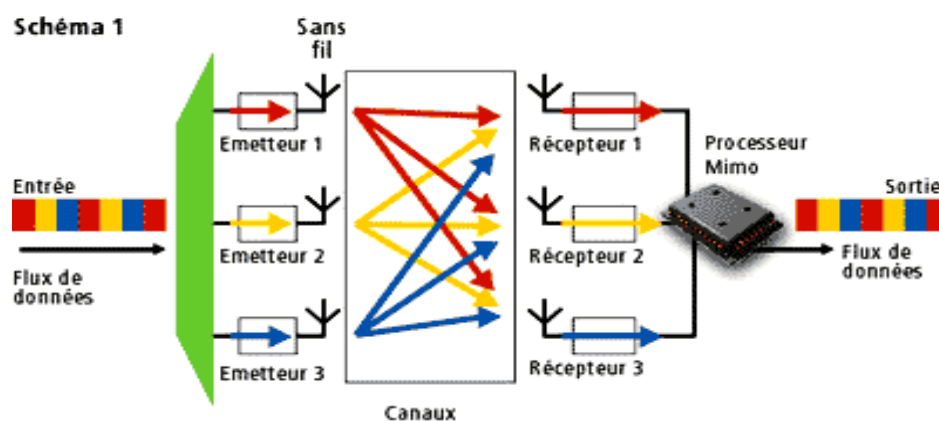


Figure 2.1 : Principe de la technologie MIMO

Le flux est divisé en plusieurs flux de même fréquence, qui sont ensuite envoyés à travers 3 émetteurs vers 3 récepteurs. Un algorithme est ensuite utilisé pour identifier les différents flux et les restituer en un seul flux. Cet algorithme utilise les réflexions des signaux sur les murs, le sol ...etc. Bien que ces réflexions puissent être considérées comme des perturbations, la technologie MIMO utilise ces canaux pour améliorer la vitesse de transmission des données.



Les catégories de base de la technologie MIMO sont :

- **La diversité spatiale MIMO** : le même message est diffusé simultanément sur différentes antennes d'émission. Ensuite, les signaux reçus sur chaque antenne de réception sont synchronisés et combinés de manière cohérente pour augmenter le rapport signal sur bruit (S/B) grâce au gain de diversité de transmission. Pour que cette technique soit efficace, il est nécessaire que les sous-canaux MIMO soient indépendants les uns des autres.
- **Le multiplexage spatiale MIMO** : un processus de transmission de messages qui est divisé en sous-messages, ces sous-messages sont ensuite transmis simultanément sur plusieurs antennes d'émission différentes. Les signaux reçus par les antennes de réception sont ensuite combinés pour reconstituer le message complet d'origine. Pour que cela fonctionne efficacement, les sous-canaux de propagation doivent être indépendants les uns des autres, comme c'est le cas pour la diversité MIMO. Le multiplexage MIMO permet d'augmenter les débits de transmission en utilisant les avantages du multiplexage. Les techniques de multiplexage MIMO et de diversité peuvent être combinées pour augmenter encore plus l'efficacité du système. Par exemple, pour un système MIMO  $5 \times 5$ , on peut configurer un sous-système MIMO  $2 \times 3$  pour le multiplexage et un sous-système MIMO  $3 \times 3$  pour la diversité MIMO.
- **Le MIMO Beamforming (formation des faisceaux)** : l'utilisation d'un réseau d'antennes MIMO est conçue pour orienter et contrôler les ondes radio (phase et amplitude du faisceau). Grâce à cette technique, il est possible de créer des lobes constructifs ou destructifs, ce qui permet d'optimiser la transmission entre la cible et l'émetteur. Les techniques de beamforming offrent la possibilité d'étendre la couverture radio d'une station de base ou d'un point d'accès.

### 2.1 Les Types de système :

Il existe 4 modèles de configuration d'antennes de base : le système SISO, le système SIMO, le système MISO et le système MIMO.

#### 2.1.1 Système SISO :

En termes de MIMO, la liaison radio la plus simple est connue sous le nom de SISO (Single Input Single Output). Cette configuration correspond en fait à un canal radio standard dans lequel l'émetteur et le récepteur fonctionnent avec une seule antenne. Il n'y a pas de diversité et aucun traitement supplémentaire n'est nécessaire.

Le principal avantage d'un système SISO est sa simplicité, car il ne nécessite pas de traitement spécifique pour les différentes formes de diversité qui peuvent être utilisées. Cependant, les performances du canal SISO sont limitées, car les interférences et l'évanouissement ont un

impact plus important sur ce type de système par rapport à un système MIMO qui utilise une certaine forme de diversité.



Figure 2.2: SISO-Single Input Single Output

### 2.1.2 Système SIMO :

La diversité de réception, également connue sous le nom de version SIMO (Single Input Multiple Output) de MIMO, se produit lorsque l'émetteur utilise une seule antenne et le récepteur plusieurs antennes. Cette technique est souvent utilisée pour aider un système récepteur à combattre les effets de l'évanouissement lorsqu'il reçoit des signaux provenant de plusieurs sources indépendantes. Elle a été largement utilisée depuis de nombreuses années dans les stations d'écoute ou de réception à ondes courtes pour contrer les effets de l'évanouissement et des interférences ionosphériques.

Il existe deux formes dans lesquelles SIMO peut être utilisé :

- ❖ **Diversité commutée SIMO** : Consiste à rechercher le signal le plus fort et à commuter vers cette antenne pour l'utilisée.
- ❖ **Rapport maximum combinant SIMO** : Dans cette forme de SIMO, les deux signaux sont combinés en les additionnant, ce qui permet aux signaux provenant des deux antennes de contribuer au signal global.



Figure 2.3: SIMO- Single Input Multiple Output

### 2.1.3 Système MISO :

La diversité de transmission également appelée (Multiple Input Single Output), implique la transmission redondante des mêmes données par les deux antennes émettrices. Le récepteur est alors capable de recevoir le signal optimal, qu'il peut utiliser pour extraire les données nécessaires.

**L'avantage de MISO est** : les antennes multiples et le traitement/redondance sont déplacés de l'appareil récepteur vers l'appareil émetteur. Cela est particulièrement bénéfique dans des contextes tels que les téléphones portables, où cela permet de réduire considérablement l'espace

nécessaire pour les antennes et de limiter le niveau de traitement requis dans l'appareil récepteur pour le codage de redondance [19].

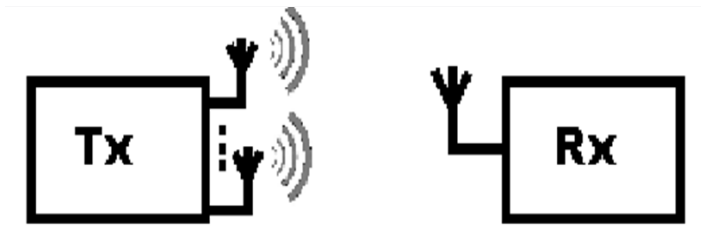


Figure 2.4: MISO-Multiple Input Single Output

### 2.1.4 Système MIMO :

MIMO est en réalité une technologie d'antenne radio qui repose sur l'utilisation de plusieurs antennes à la fois à l'émetteur et au récepteur pour permettre à divers trajets de signal de transporter les données. En effet, elle permet de choisir des chemins séparés pour chaque antenne, ce qui permet l'utilisation de plusieurs chemins de signal simultanément.

Le traitement spatio-temporel est l'une des idées fondamentales derrière les systèmes sans fil MIMO. Cette technique implique l'utilisation de plusieurs antennes réparties dans l'espace, ce qui ajoute une dimension spatiale au traitement temporel. Autrement dit, elle utilise plusieurs antennes situées à différents endroits. De ce fait, les systèmes sans fil MIMO peuvent être perçus comme une extension logique des antennes intelligentes qui ont été utilisées depuis de nombreuses années pour améliorer les réseaux sans fil.

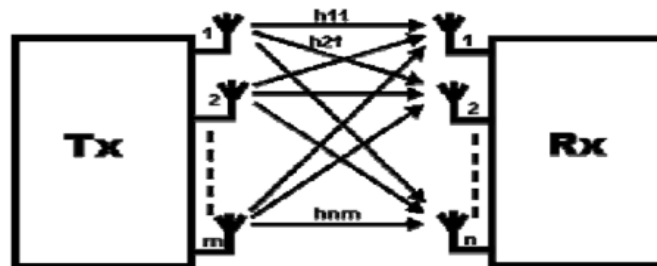


Figure 2.5 : MIMO-Multiple Input Multiple Output

### 2.1.5 Avantages de la technologie MIMO :

La technologie MIMO offre de nombreux avantages qui permettent d'améliorer considérablement les performances du système on peut citer :

- **Le gain de réseau** : se traduit par une amélioration du rapport signal sur bruit de réception, grâce à une combinaison cohérente des signaux sans fil au niveau de récepteur. Le gain de réseau permet d'améliorer la résistance au bruit, ce qui contribue à augmenter la couverture et la portée d'un réseau sans fil.

- **Le gain de diversité spatiale :** Dans un système sans fil, le niveau du signal reçu par un récepteur peut fluctuer ou s'affaiblir. Le gain de diversité spatiale permet de réduire cet affaiblissement en fournissant au récepteur plusieurs copies (idéalement indépendantes) du signal transmis dans l'espace, la fréquence ou le temps. En augmentant le nombre de copies indépendantes, la probabilité qu'au moins l'une d'entre elles ne subissent pas de forte atténuation augmente, ce qui améliore la qualité et la fiabilité de la réception.
- **Le gain de multiplexage spatial :** les systèmes MIMO permettent d'augmenter le débit de données de manière linéaire grâce au multiplexage spatial, qui consiste à transmettre simultanément plusieurs flux de données indépendants sur la bande de fréquence disponible. Lorsque les conditions du canal sont appropriées, comme dans un environnement à forte diffusion, le récepteur est capable de séparer les différents flux de données transmis. Le gain de multiplexage spatial permet d'augmenter la capacité d'un réseau sans fil.
- **Réduction et évitement des interférences :** Les perturbations dans les réseaux sans fil sont causées par le partage des ressources temporelles et fréquentielles entre plusieurs utilisateurs, ce qui entraîne des interférences. Dans les systèmes MIMO, les interférences peuvent être réduites en utilisant la dimension spatiale pour augmenter la séparation entre les utilisateurs. La dimension spatiale peut être utilisée pour éviter les interférences, c'est-à-dire pour orienter l'énergie du signal vers l'utilisateur [15].

### 3. Technologie MIMO Massive :

La technique MIMO massive est une extension de la technologie MIMO traditionnelle et elle est aussi appelée MIMO FD (Full Dimension) avec des caractéristiques plus performantes pour améliorer la qualité des services [16].



Figure 2.6 : illustration de MIMO massive

Le principe de cette technique est d'utiliser un grand nombre d'éléments d'antenne sur un seul panneau d'antenne d'une station de base 5G (environ de 100 ou plus éléments par une seule antenne MIMO massive 5G) pour faire la connexion c.à.d. d'envoyer et de recevoir plus de données simultanément avec un débit très élevée [17].

En fait, la technologie MIMO Massive a fait deux nouvelles innovations qui ont joué le plus grand rôle dans l'amélioration de la qualité du service et ont fait de la technologie MIMO Massive la technologie optimale pour les futures générations des réseaux mobile ; c'est deux innovations sont :

- **Beamforming (formation de faisceau)** : est une technique de filtrage spatiale qui consiste à focaliser le faisceau de données sur une direction spécifique du récepteur, c'est-à-dire elle joue le rôle d'un système de signalisation de trafic pour la station de base c'est-à-dire c'est un système de signalisation de trafic pour la station de base pour identifier le trajet le plus efficace de transmissions vers le récepteur particulière. Et comme nous savons que la technologie MIMO massive utilise des stations de base équipées de dizaines ou de centaines d'antennes individuelles, cela peut provoquer des interférences entre les données transmises alors l'utilisation de la technique de la formation de faisceaux est la solution parfaite à ce problème car elle donne une directivité plus précise et une grande fiabilité et rapidité [18].

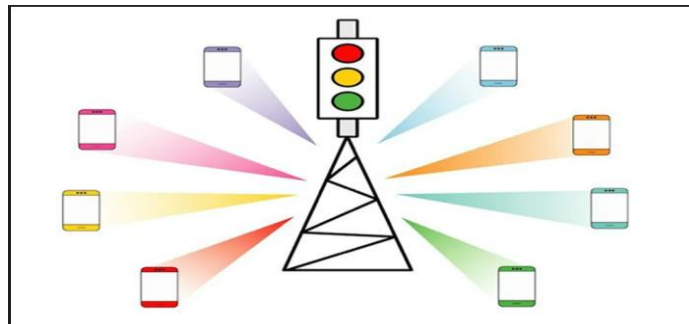


Figure 2.7 : Illustration de technique beamforming

- **MU-MIMO** : C'est une technologie d'antenne qui a la capacité de partager le même bloc spectral entre plusieurs utilisateurs avec des performances élevées et puisque cette technique permet à plusieurs utilisateurs d'être servis simultanément par un point d'accès sans fil alors cela fait augmenter la capacité de réseau et améliorer l'efficacité [19].

Ainsi, grâce à cette combinaison de deux innovations, il devient possible d'augmenter la vitesse de transmission sans fil en augmentant simplement le nombre d'antennes sur la station de base, sans nécessiter une augmentation de la consommation de bande passante.

### 3.1 Types Massive MIMO :

La technologie MIMO massive peut être classée en deux catégories principales en fonction de la structure des antennes utilisées pour émettre et recevoir les signaux.

### 3.1.1 SU-MIMO (Single User MIMO) :

Dans cette technique plusieurs stations de base envoient simultanément des données vers un seul utilisateur le principe ici est l'utilisation de plusieurs antennes de chaque station et de l'utilisateur pour avoir une transmission de plusieurs flux de données dans le même domaine temps-fréquence alors cette méthode permet d'obtenir un débit unitaire crête plus élevé mais en point de vue de l'efficacité énergétique, l'utilisation d'un grand nombre d'antennes pour desservir un seul ou un petit nombre d'utilisateurs peut ne pas être appropriée. Par conséquent, dans ces situations, la mise en œuvre d'un MIMO massif pour le SU-MIMO peut être limitée. Le signal reçu à la BS d'un système SU-MIMO de liaison montante est :

$$Y = \sqrt{Pu}HS + w \quad (2.1)$$

**Pu** : le SNR de liaison montante ; **w** : AWGN (bruit blanc additif gaussien).

**H** : la réponse vectorielle du canal ; **S** : le symbole vectoriel.

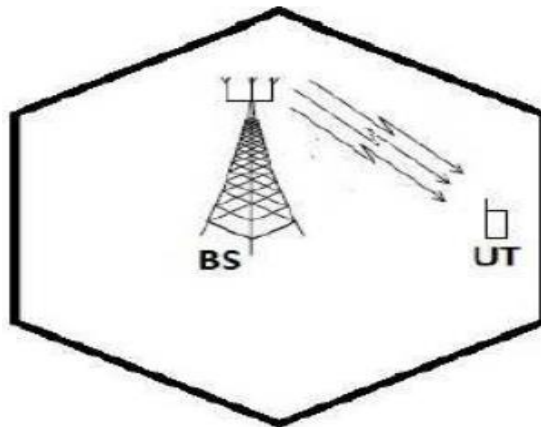


Figure 2.8 : Illustration de SU\_ MIMO

### 3.1.2 Multi-User Massive MIMO :

La technologie MU MIMO offre une efficacité accrue par rapport à celle de SU MIMO grâce à la transmission de plusieurs flux de données simultanément à différents terminaux (UT) sur la même ressource temps-fréquence par une station de base. Le signal reçu à la BS d'un système MU-MIMO de liaison montante est :

$$y = \sum_{k=1}^K \sqrt{Pu} H_k S_k + w \quad (2.2)$$

$$y = \sqrt{Pu} HS + w \quad (2.3)$$

**Y** : la matrice de signal reçu  $M \times 1$ ,

$H_k \in H$  d'où  $H = [H_1 H_2 \dots H_K]$  : Le vecteur de canal entre les antennes BS et le k-ième UT.

$S_K \in \mathbf{S}$ . Ou  $S^T = [s_1 \dots s_k \dots s_K]$  : le symbole transmis par le k-ième UT.

$W$  : AWGN (bruit blanc additif gaussien) [20].

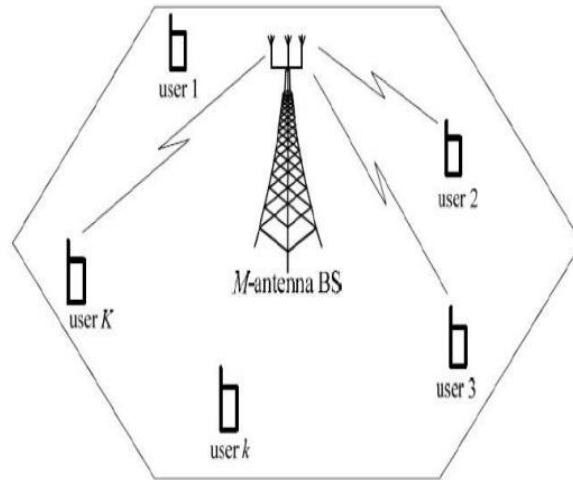


Figure 2.9 : illustration de MU\_MIMO [25].

### 3.2 Avantage de la technique MIMO massive :

Parmi les avantages de la technique MIMO massive, on cite :

- **Augmente la capacité du réseau** : La technique MIMO massive fait l'augmentation de la capacité de réseau sans fils par l'utilisation de la technique MU\_MIMO ou par le déploiement des fréquences plus élevées et c'est le cas pour la spécification Sub-6 en 5G (FR1).
- **Améliorer la couverture du réseau** : La technique Massive MIMO permet une efficacité spectrale élevée grâce à la coordination de plusieurs antennes, sans nécessiter de traitement complexe ni de forte consommation d'énergie et cela fait l'amélioration de la couverture des zones en profondeur.
- **Compléments Beamforming** : Les avantages de cette technologie incluent une communication directe entre l'émetteur et le récepteur, une connectivité plus stable et fiable, ainsi qu'une transmission de données plus rapide.
- **Active les technologies de nouvelle génération** : Le MIMO massif joue un rôle clé dans la technologie 5G. Par exemple, dans la spécification 5G Sub-6, il permet l'utilisation de fréquences inférieures à 6 GHz. En outre, dans la spécification mmWave 5G, cette technologie améliore la portée des fréquences, ce qui étend la couverture du réseau. Elle optimise également la propagation des ondes électromagnétiques porteuses de signaux et permet une véritable communication sans fil multi-utilisateurs dans une zone donnée [21].

### 3.3. Comparaison entre MIMO traditionnelle et MIMO massive :

Le tableau suivant représente une comparaison entre les deux technologies MIMO :

<b>Caractéristique</b>	<b>MIMO traditionnelle</b>	<b>MIMO Massive</b>
<b>Nombre d'antenne</b>	$\leq 8$	$\geq 16$
<b>Contamination pilote</b>	Faible	Haut
<b>Débit</b>	Faible	Haut
<b>Couplage d'antenne</b>	Faible	Haut
<b>Le taux d'erreur binaire</b>	Haut	Faible
<b>Résistance au bruit</b>	Faible	Haut
<b>Diversité/Gain de capacité</b>	Faible	Haut
<b>Efficacité énergétique</b>	Faible	Haut
<b>Coût</b>	Faible	Haut
<b>Complexité</b>	Faible	Haut
<b>Évolutivité</b>	Faible	Haut
<b>Stabilité du lien</b>	Faible	Haut
<b>Corrélation d'antenne</b>	Faible	Haut

Tableau 2.1 : Comparaison des caractéristiques de deux technologies MIMO [22]

Les avantages de la technologie MIMO massive par rapport à la technologie MIMO traditionnelle sont [23] :

- ❖ L'amélioration de l'efficacité spectrale (SE) ;
- ❖ Liberté massive dans le domaine spatial ;
- ❖ Le système présente de bonnes performances en utilisant uniquement un schéma de pré-codage linéaire simple, tel que le forçage nul, la transmission du rapport maximal ou la minimisation de l'erreur quadratique moyenne ;
- ❖ Simplifier l'allocation des ressources.

### 4. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous concluons que le MIMO massif présente des avantages significatifs par rapport à la technologie MIMO traditionnelle dans les réseaux 5G car les architectures MIMO massives peuvent prendre en charge un grand nombre d'utilisateurs simultanés et offrent une



meilleure couverture et capacité du réseau. De plus, le MIMO massif peut être utilisé pour gérer les interférences et améliorer la qualité de la liaison dans des environnements difficiles. D'autre part, la mise en œuvre du MIMO massif présente des défis majeurs tels que la complexité des algorithmes de traitement du signal, la nécessité d'un grand nombre d'antennes, ainsi qu'une forte consommation d'énergie. Par conséquent, la décision d'utiliser le MIMO traditionnel ou le MIMO massif dépend des besoins spécifiques du système de communication sans fil. Dans le chapitre suivant, nous présentons la conception, la simulation et la réalisation d'une antenne MIMO pour applications 5G.

# Conception, simulation et réalisation d'une antenne MIMO pour applications 5G

## 1. Introduction

Dans ce chapitre, on va étudier, simuler et réaliser une antenne patch microruban monopôle spécialement conçue pour répondre aux besoins des applications mobiles 5G, en se concentrant sur les bandes Sub-6. Le choix de l'antenne monopôle est dû à ses caractéristiques attrayantes telles que la facilité de fabrication et de modification, la taille compacte, le diagramme de rayonnement omnidirectionnel. En outre, elle permet d'augmenter la capacité des systèmes MIMO.

## 2. Conception et simulation d'une antenne monopôle :

L'antenne de départ est alimentée par une ligne microruban de  $50\Omega$  placée sur la surface supérieure du substrat FR-4, qui a une épaisseur de 1.5 mm, une constante diélectrique ( $\epsilon_r=4.3$ ) et une perte tangente ( $\tan(\delta)=0.025$ ) qui fonctionne dans la fréquence d'opération de 3.5 GHz, ensuite on va simuler antennes MIMO à deux éléments qui est basée sur l'antenne initial avec ses différentes configurations. La procédure de conception et les étapes d'évolution, l'analyse paramétrique sont étudiées tout au long du chapitre pour améliorer les performances de fonctionnement de la structure dans la fréquence d'opération. Les procédures de conception et de simulation sont réalisées à l'aide de CST microwave studio (MWS) 2019. Dans notre travail, le logiciel de simulation utilisé est le CST Microwave Studio.

### 2.1. Première structure :

Dans cette partie, nous proposons une antenne patch monopôle de forme rectangulaire alimenté par une ligne micro-ruban imprimé sur un substrat FR4, qui fonctionne dans la fréquence 3.5 GHz comme le montre la Figure 3.1.

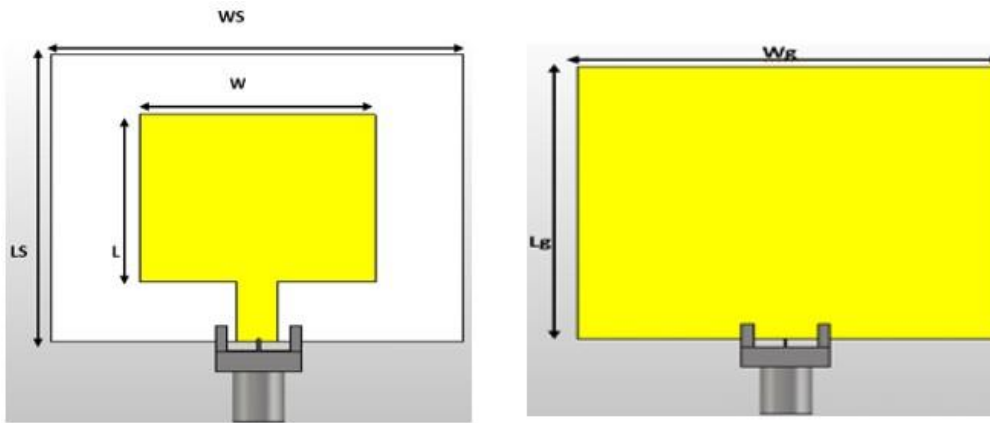


Figure 3.1 : Structure de l'antenne rectangulaire.

Les dimensions de l'antenne proposée sont illustrées dans le Tableau 3.1.

Paramètre	Valeur (mm)	Description
Ws	35	Largeur du substrat
Ls	35	Longueur du substrat
H	1.5	Epaisseur du substrat
Tm	0.035	Epaisseur du métal
Wg	35	Largeur du plan de masse
Lg	35	Longueur du plan de masse
W	20	Largeur du patch
L	19.3	Longueur du patch
Wf	3.5	Largeur de la ligne d'alimentation
Lf	13	Longueur de la ligne d'alimentation

Tableau 3.1 : Les dimensions de l'antenne.

Après la simulation on a obtenu le coefficient de réflexion suivant :

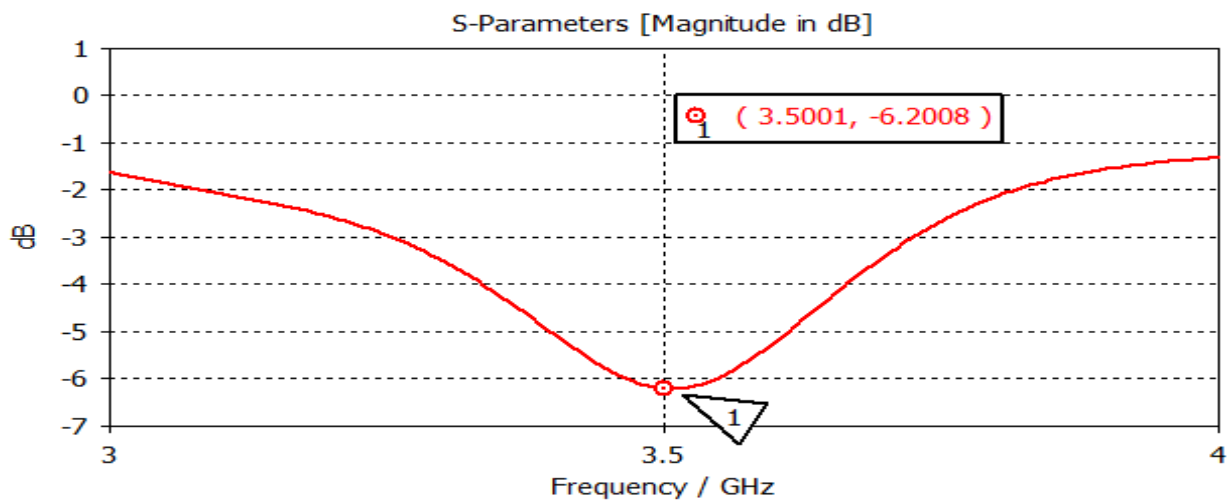


Figure 3.2 : Coefficient de réflexion ( $S_{11}$ ) de l'antenne simulée.

Les résultats indiquent que le coefficient de réflexion  $S_{11}$  est situé à la fréquence de résonance de 3.5 GHz mais n'est pas adapté ( $>-10$  dB). Donc il faut améliorer l'adaptation de l'antenne.

### 2.1.1 Adaptation de l'antenne initiale :

Afin d'améliorer l'adaptation de l'antenne, on recourt à la méthode des encoches, qui est illustrée sur la Fig. 3.3 :

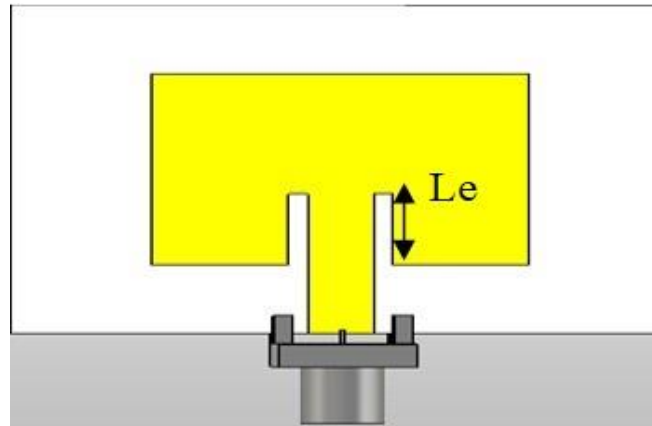


Figure 3.3 : Structure de l'antenne avec les encoches

Dans cette partie, une étude paramétrique est réalisée pour déterminer et présenter l'effet des différents paramètres sur les performances de l'antenne.

#### • Effet de L (longueur du patch) :

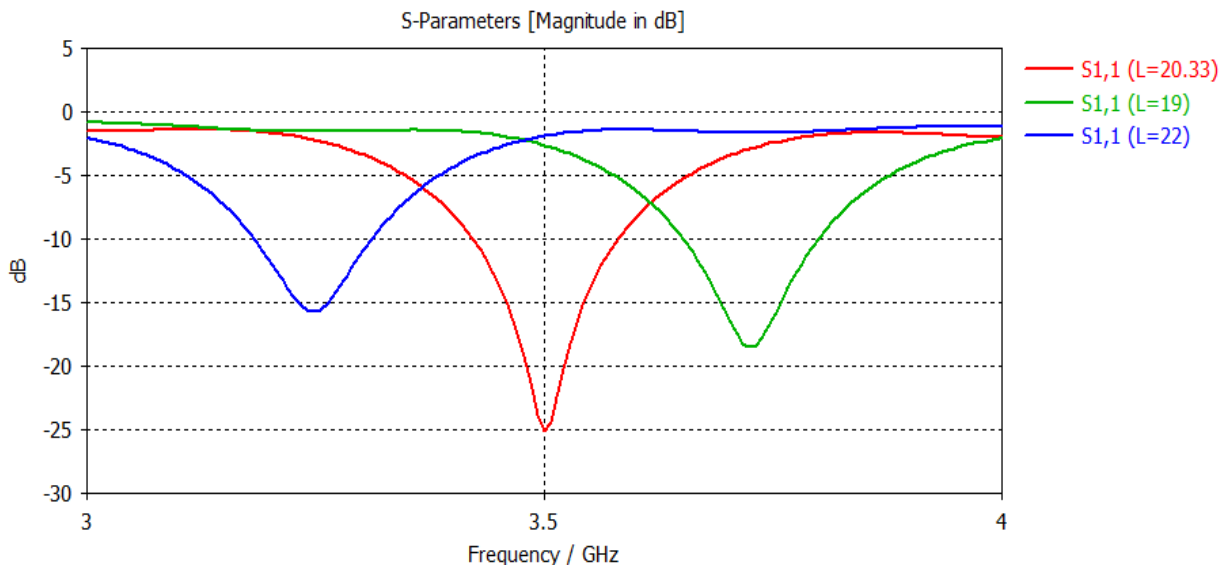


Figure 3.4 : L'effet de la variation de L sur le coefficient de réflexion

D'après la Figure 3.4, On remarque que la modification de la longueur du patch à un effet sur la fréquence de résonance lorsqu'on l'augmente, la fréquence diminue et la courbe de  $s_{11}$  se déplace vers la gauche en direction de la fréquence d'opération 3.5 GHz, La longueur du patch a été choisie pour être = 20.33mm.

• Effet de W (Largeur du patch) :

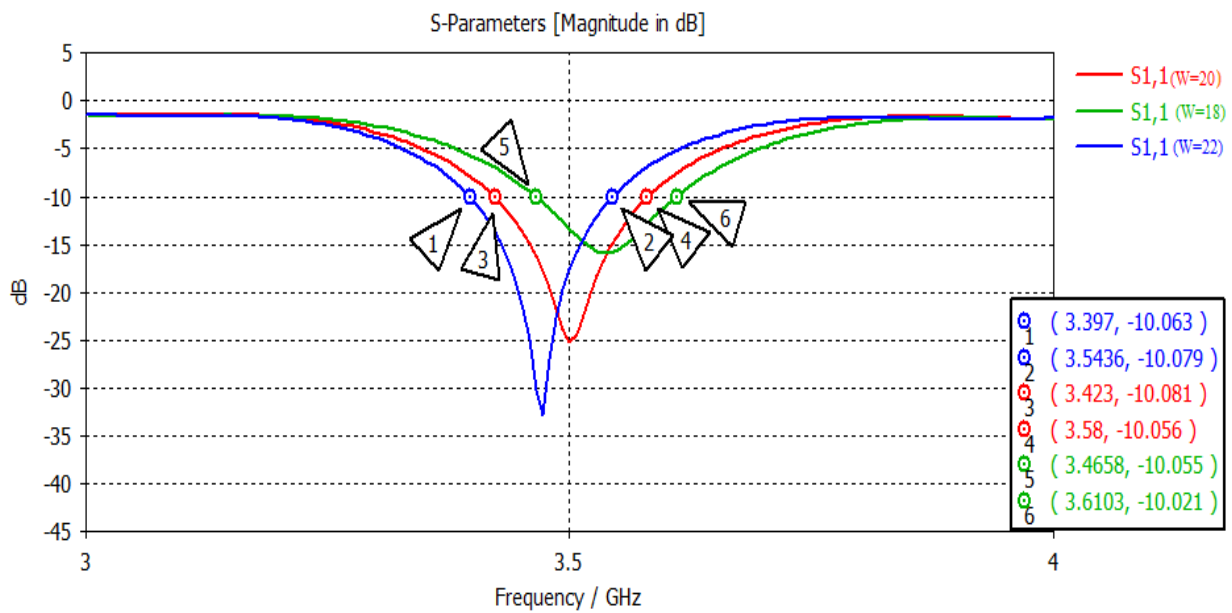


Figure 3.5 : L'effet de la variation de W sur le coefficient de réflexion

La Figure 3.5 illustre le coefficient de réflexion pour différentes valeurs de W. On peut observer que la variation de la largeur du patch influe sur la largeur de bande, W a été choisi à 20 mm parce qu'il combine en termes de niveau de coefficient de réflexion et de largeur de bande ; en d'autres termes, il préserve la meilleure adaptation d'impédance sur la bande large.

Les dimensions de l'antenne optimisées (avec les encoches) sont présentées sur le Tableau 3.2.

Paramètre	Valeur (mm)	Description
Ws	35	Largeur du substrat
Ls	35	Longueur du substrat
H	1.5	Epaisseur du substrat
Tm	0.035	Epaisseur du métal
Wg	35	Largeur du plan de masse
Lg	35	Longueur du plan de masse
W	20	Largeur du patch
L	20.33	Longueur du patch
Wf	3.5	Largeur du la ligne d'alimentation
Lf	13	Longueur du la ligne d'alimentation
Le	7.5	Longueur de l'encoche
We	1	Largeur de l'encoche

Tableau 3.2 : Dimensions de l'antenne optimisée

**2.1.2. Le coefficient de réflexion (après les encoches) :**

Après la simulation, on a obtenu le S11 comme la montre la Figure 3.6 qui représente le coefficient de réflexion de l'antenne initiale étudiée après l'optimisation.

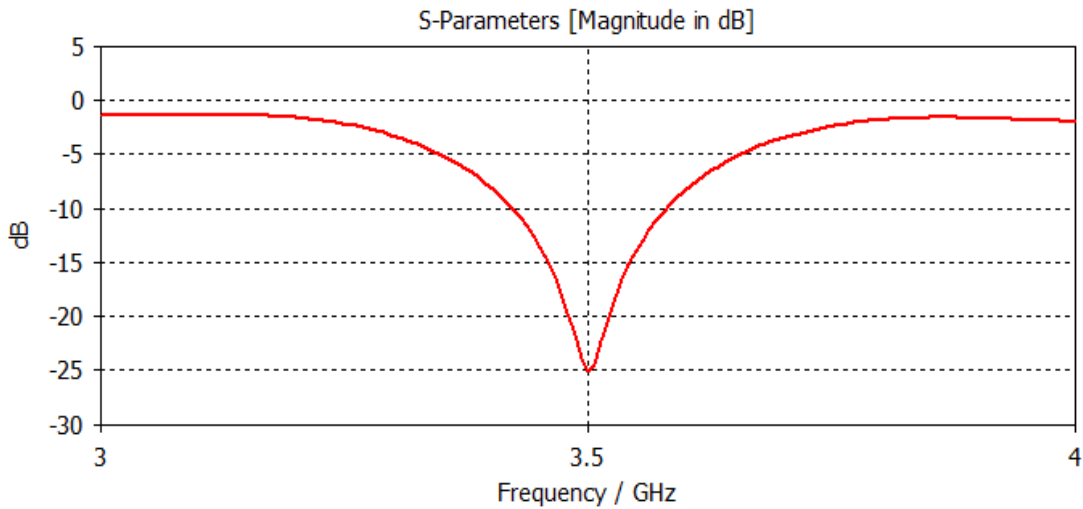


Figure 3.6 : Coefficient de Réflexion de l'antenne optimisée

On remarque que le coefficient de réflexion est de (-25dB) à la fréquence 3.5 GHz, ce qui montre que la fréquence de résonance est bien ajustée et adaptée à la fréquence de fonctionnement désirée.

**2.1.3. Diagramme de rayonnement et Gain :**

La Figure 3.7 représente les diagrammes de rayonnement 2D simulés dans le plan E et le plan H à la fréquence 3.5GHz.

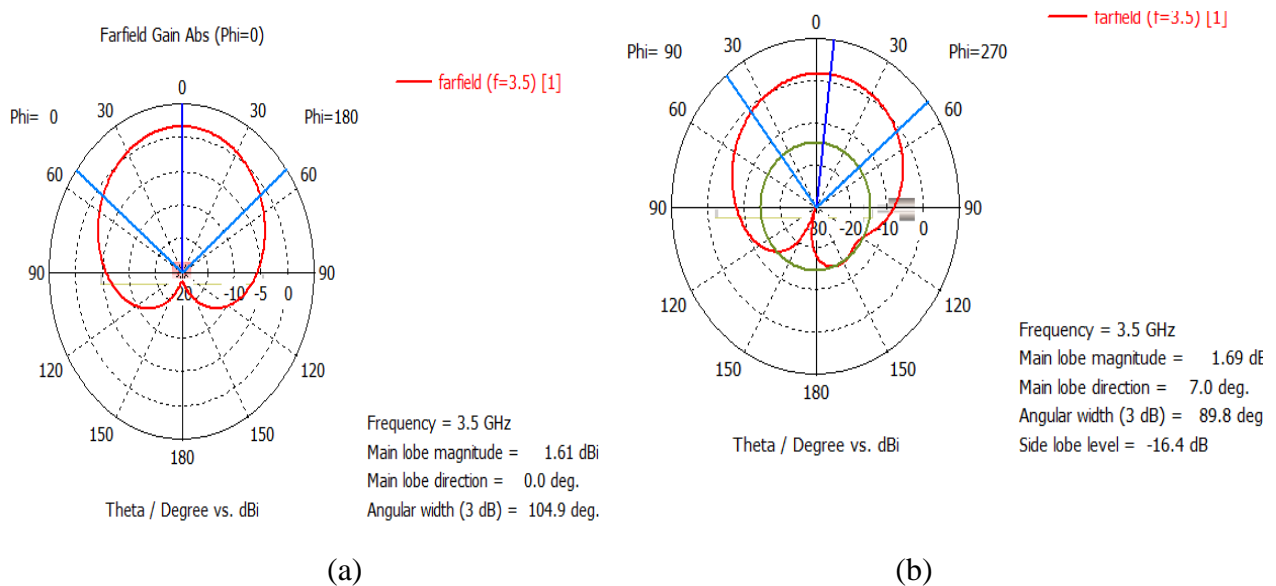


Figure 3.7 : Diagramme de rayonnement 2D :(a) plan E(b) plan H

La Figure 3.8 représentent et le diagramme de rayonnement 3D pour l'antenne étudiée à la fréquence 3.5GHz respectivement.

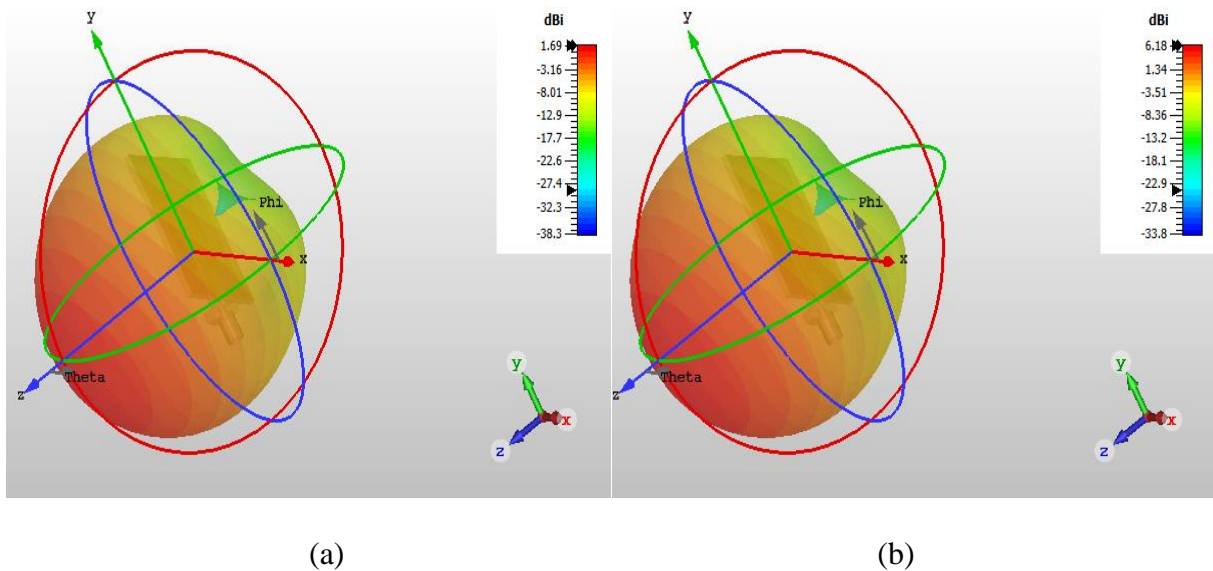


Figure 3.8 : Diagramme de rayonnement 3D : (a) gain (b) directivité.

Il faut noter que l'antenne présente un rayonnement de type monopole dans le plan E (plan YZ), ainsi qu'un rayonnement omnidirectionnel dans le plan H (plan XZ). Cela rend l'antenne utilisable dans la plupart des systèmes de communication sans fil.

### 2.1.4 La bande passante :

La bande passante de l'antenne de la première structure est donnée dans la Figure 3.9.

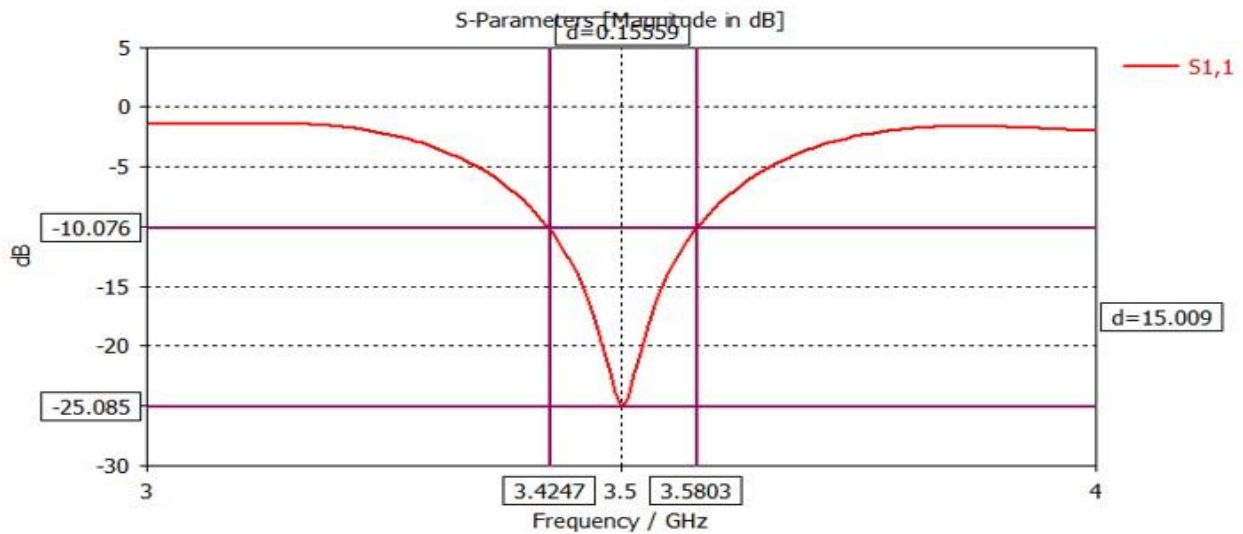


Figure 3.9 : Largeur de bande de l'antenne optimisée.

On peut visualiser que l'antenne a une largeur de bande maximale de 0.155 GHz autour de la fréquence de résonance (3.5GHz) dans l'intervalle (3.424- 3.580) GHz.

### 2.2. Deuxième structure :

Dans cette section, nous proposons une antenne patch monopôle de forme trapézoïdale qui a les mêmes dimensions du substrat et le plan de masse que la structure précédente, alimenté par une

ligne micro-ruban imprimé sur un substrat FR4, qui fonctionne dans la fréquence 3.5 GHz comme le montre la Figure 3.10.

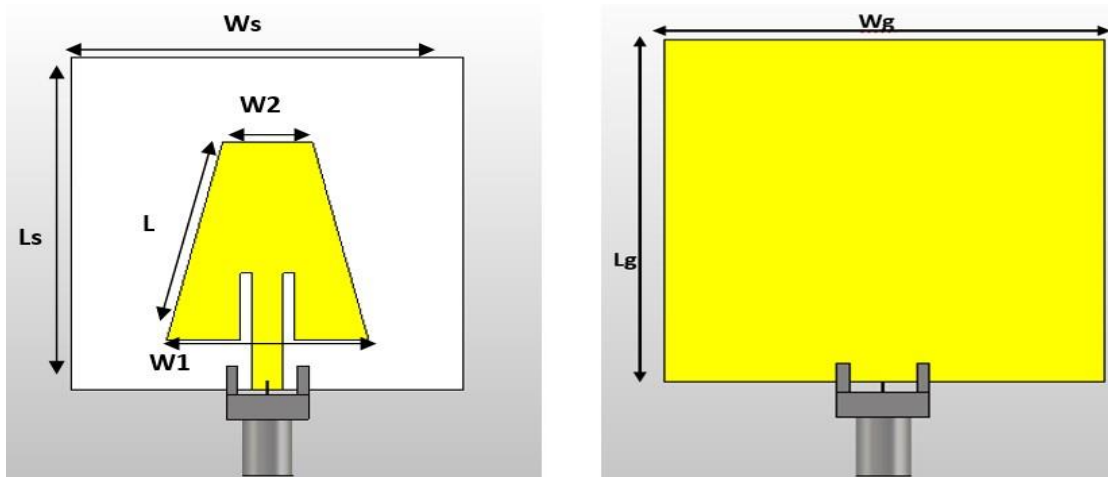


Figure 3.10 : Structure de l'antenne trapézoïdale avec encoches

Nous étudierons notre simulation avec les paramètres suivant :

Paramètre	Valeur (mm)	Description
$W_s$	35	Largeur du substrat
$L_s$	35	Longueur du substrat
$H$	1.5	Epaisseur du substrat
$T_m$	0.035	Epaisseur du métal
$W_g$	35	Largeur du plan de masse
$L_g$	35	Longueur du plan de masse
$W_1$	18	La grande base
$W_2$	8	La petite base
$L$	20.85	La hauteur de trapèze
$W_f$	2.8	Largeur du la ligne d'alimentation
$L_f$	10	Longueur du la ligne d'alimentation
$A$	1	Largeur de l'encoche
$F$	7	Longueur de l'encoche

Tableau 3.3 : Les dimensions de l'antenne trapézoïdale

Après la simulation, on a obtenu le coefficient de réflexion suivant :



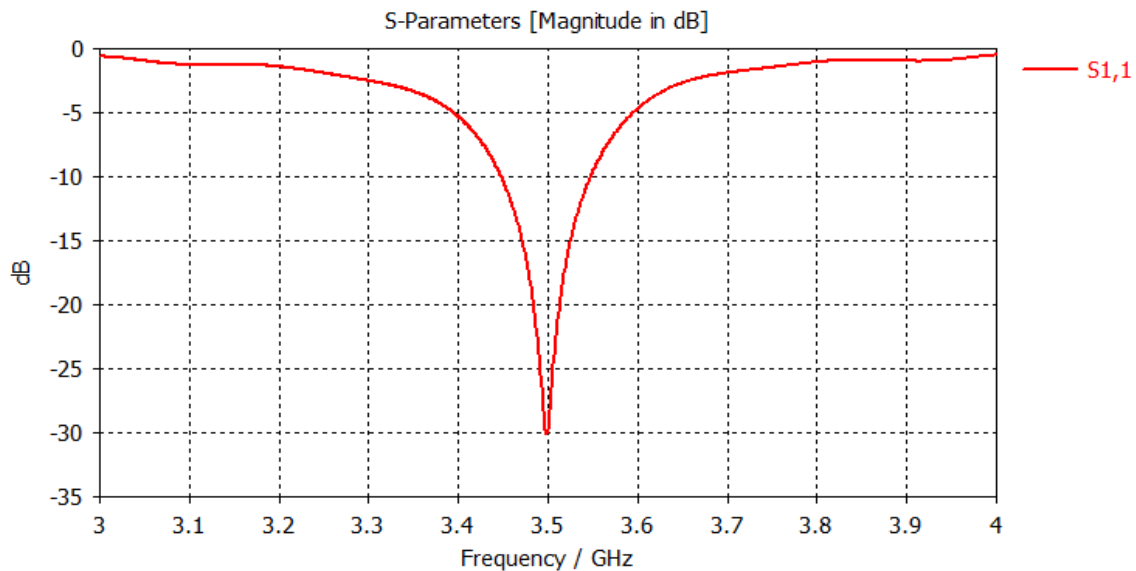


Figure 3.11 : Le coefficient de réflexion (s11) de l'antenne trapézoïdale

D'après le résultat obtenu, on remarque que le coefficient de réflexion est de (-30dB) à la fréquence 3.5 GHz, ce qui montre que la fréquence de résonance est bien ajustée et adaptée à la fréquence de fonctionnement désirée.

### 3. La conception de MIMO 1x 2 à deux éléments :

Dans cette partie du chapitre, on va présenter la conception et la simulation d'une antenne MIMO à deux éléments par l'utilisation des deux structures initiales. L'étude sera menée sur quatre configurations différentes afin de trouver la configuration optimale.

#### 3.1 Les configurations de MIMO 1x 2 :

Pour étudier la configuration MIMO (1×2), on va étudier quatre configurations :

- Configuration adjacente ;
- Configuration orthogonale ;
- Configuration coaxiale (coplanaire) ;
- Configuration verticale-horizontale (polarisation croisée).

3.1.1 La première configuration « adjacente » :

Les résultats de simulation des deux structures (rectangulaire et trapézoïdale) de la première configuration sont représentés sur le Tableau 3.4.

	Rectangulaire	Trapézoïdale
Structure		
Niveau de couplage pour SP=0	<p>S-Parameters [Magnitude in dB]</p> <p>— S1,1 (1) — S2,1 (1)</p> <p>3.4547</p> <p>Frequency / GHz</p> <p>S1,1 (1) : -22.792415 S2,1 (1) : -22.646776</p>	<p>S-Parameters [Magnitude in dB]</p> <p>— S1,1 (SP=0) — S2,1 (SP=0)</p> <p>3.4455</p> <p>Frequency / GHz</p> <p>S1,1 (SP=0) : -35.337146 S2,1 (SP=0) : -25.488919</p>
Niveau de couplage pour différents cas de SP	<p>S-Parameters [Magnitude in dB]</p> <p>— S1,1 (SP=0) — S1,1 (SP=10) — S1,1 (SP=20) — S1,1 (SP=30) — S2,1 (SP=0) — S2,1 (SP=10) — S2,1 (SP=20) — S2,1 (SP=30)</p> <p>3.4547</p> <p>Frequency / GHz</p> <p>S1,1 (1) : -22.792415 S1,1 (2) : -20.623229 S1,1 (3) : -21.231267 S1,1 (4) : -20.834367 S1,1 (5) : -20.847836 S2,1 (1) : -22.646776 S2,1 (2) : -12.773146 S2,1 (3) : -28.331766 S2,1 (4) : -30.706562 S2,1 (5) : -31.957628</p>	<p>S-Parameters [Magnitude in dB]</p> <p>— S1,1 (SP=30) — S1,1 (SP=20) — S1,1 (SP=10) — S1,1 (SP=0) — S1,1 (SP=-10) — S2,1 (SP=30) — S2,1 (SP=20) — S2,1 (SP=10) — S2,1 (SP=0) — S2,1 (SP=-10)</p> <p>3.444</p> <p>Frequency / GHz</p> <p>S1,1 (SP=30) : -28.573763 S1,1 (SP=20) : -29.150669 S1,1 (SP=10) : -33.927083 S1,1 (SP=0) : -37.783977 S1,1 (SP=-10) : -41.081587 S2,1 (SP=30) : -33.926936 S2,1 (SP=20) : -32.746732 S2,1 (SP=10) : -29.640526 S2,1 (SP=0) : -25.47771 S2,1 (SP=-10) : -18.47809</p>

Tableau 3.4 : La 1ère configuration.

**SP** : le paramètre d'espacement entre les deux antennes (distance entre les deux substrat).

**Commentaire sur les résultats de la première configuration :** Lorsque SP est mis à zéro : on observe que le niveau de couplage pour la structure rectangulaire est de -22,64 alors qu'il est de -25,48 pour la trapézoïdale. On conclut donc que la structure trapézoïdale a le niveau de couplage le plus faible (-25,48 < -22,64) ce qui en fait la configuration la plus efficace dans ce cas.

Pour les autres états de SP : On note que 30 qui donne le niveau de couplage le plus faible des deux structures -31,95 pour le rectangle et -33,92 pour le trapèze.

**3.1.2 La deuxième configuration « orthogonale » :**

Les résultats de simulation des deux structures (rectangulaire et trapézoïdale) de la deuxième configuration sont représentés sur le Tableau 3.5.

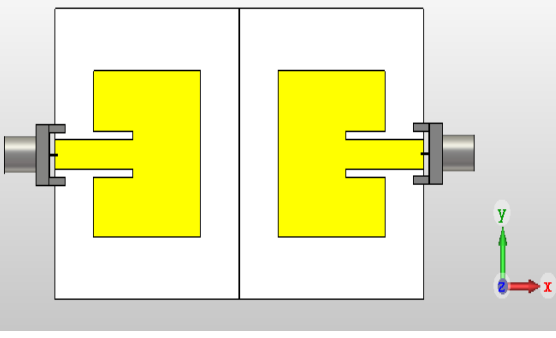
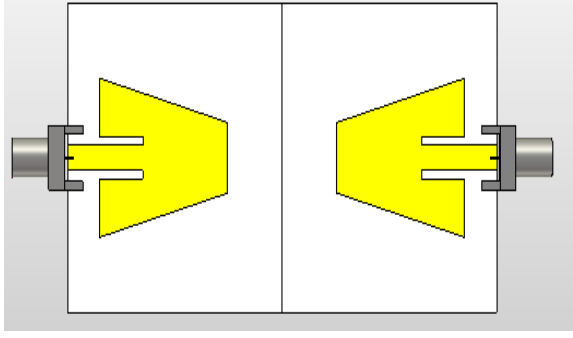
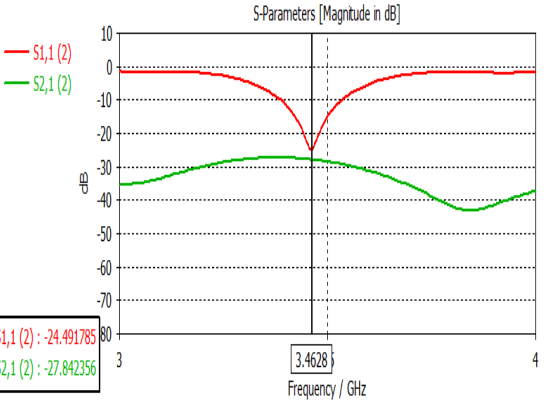
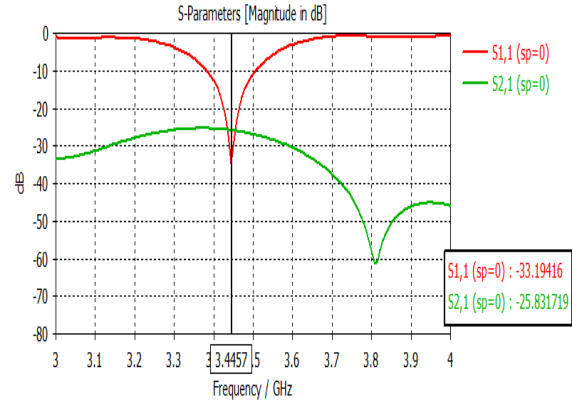
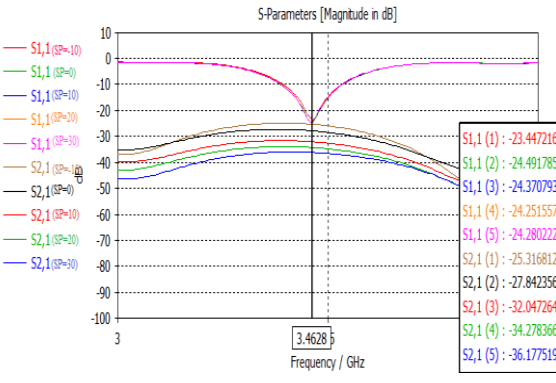
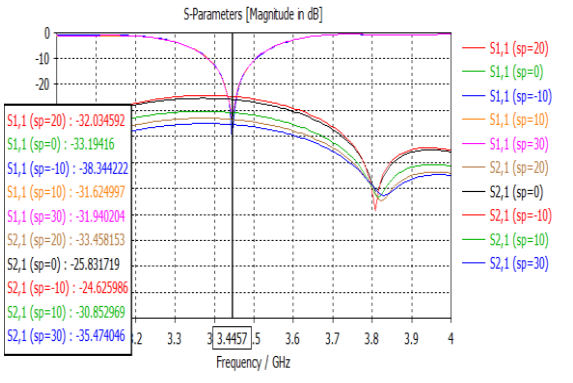
	Rectangulaire	Trapézoïdale
Structure		
Niveau de couplage pour SP=0		
Niveau de couplage pour différents cas de SP		

Tableau 3.5 : La 2ème configuration

**Commentaire sur la deuxième configuration :** Lorsque SP est mis à zéro : on note que le paramètre S21 pour la structure rectangulaire est de -27,84 par contre il est de -25,83 pour la trapézoïdale alors on dit que la structure rectangulaire dans ce cas est la plus efficace car elle a le niveau de couplage le plus bas.

Pour les autres états de SP : quand le SP est fixé à 30 cela donne le nouveau de couplage le moindre (-36.17 pour le rectangle et -35.47 pour le trapèze).

**3.1.3 La troisième configuration « coaxiale (coplanaire) » :**

Les résultats de simulation des deux structures (rectangulaire et trapézoïdale) de la troisième configuration sont représentés sur le Tableau 3.6.

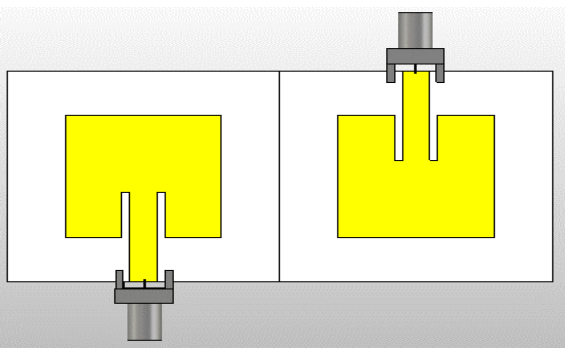
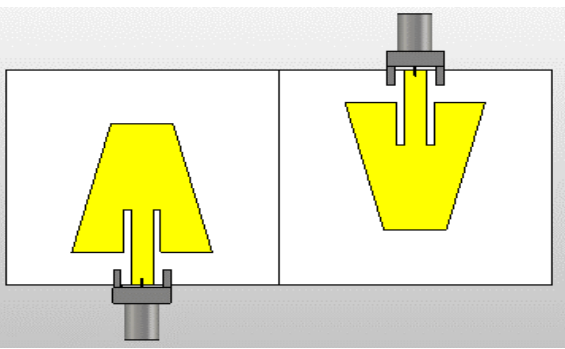
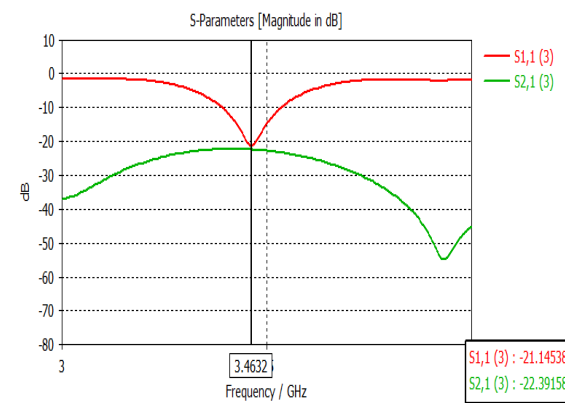
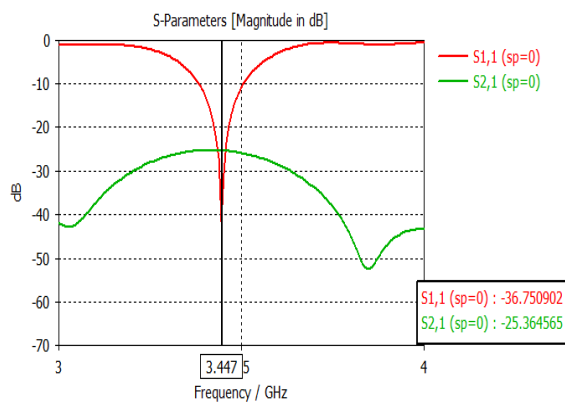
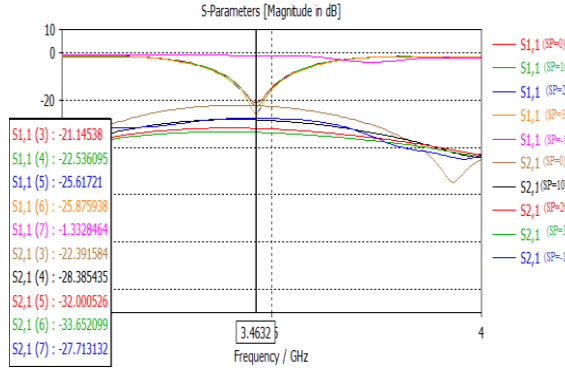
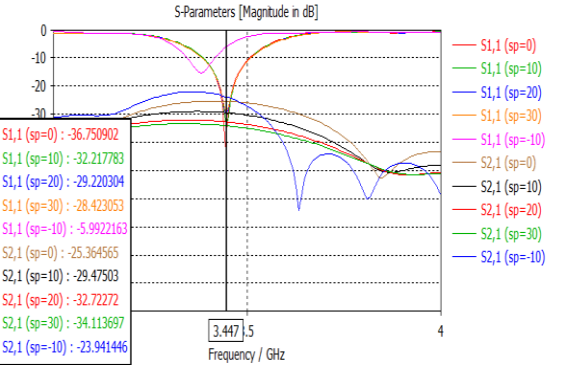
	<b>Rectangulaire</b>	<b>Trapézoïdale</b>
<b>Structure</b>		
<b>Niveau de couplage pour SP=0</b>	 <p> <b>S1,1 (3) : -21.14538</b>  <b>S2,1 (3) : -22.391584</b> </p>	 <p> <b>S1,1 (sp=0) : -36.750902</b>  <b>S2,1 (sp=0) : -25.364565</b> </p>
<b>Niveau de couplage pour différents cas de SP</b>	 <p> <b>S1,1 (3) : -21.14538</b>  <b>S1,1 (4) : -22.536095</b>  <b>S1,1 (5) : -25.61721</b>  <b>S1,1 (6) : -25.875938</b>  <b>S1,1 (7) : -1.3328464</b>  <b>S2,1 (3) : -22.391584</b>  <b>S2,1 (4) : -28.385435</b>  <b>S2,1 (5) : -32.000526</b>  <b>S2,1 (6) : -33.652099</b>  <b>S2,1 (7) : -27.713132</b> </p>	 <p> <b>S1,1 (sp=0) : -36.750902</b>  <b>S1,1 (sp=10) : -32.217783</b>  <b>S1,1 (sp=20) : -29.220304</b>  <b>S1,1 (sp=30) : -28.423053</b>  <b>S1,1 (sp=10) : -5.9922163</b>  <b>S2,1 (sp=0) : -25.364565</b>  <b>S2,1 (sp=10) : -29.47503</b>  <b>S2,1 (sp=20) : -32.72272</b>  <b>S2,1 (sp=30) : -34.113697</b>  <b>S2,1 (sp=10) : -23.941446</b> </p>

Tableau 3.6 : La 3ème configuration

**Commentaire sur la troisième configuration :** Lorsque SP est mis à zéro : Dans ce cas, on observe que la structure trapézoïdale a un faible niveau de couplage estimé à -25,36, alors que pour

la structure rectangulaire ce niveau est de -22,39 dB. Pour les autres états de SP : on remarque que le niveau le plus bas était atteint dans la configuration trapézoïdale (-34,11dB) pour un SP de 30.

**3.1.4 La quatrième configuration « verticale-horizontale (polarisation croisée) » :**

Les résultats de simulation des deux structures (rectangulaire et trapézoïdale) de la quatrième configuration sont représentés sur le Tableau 3.7.

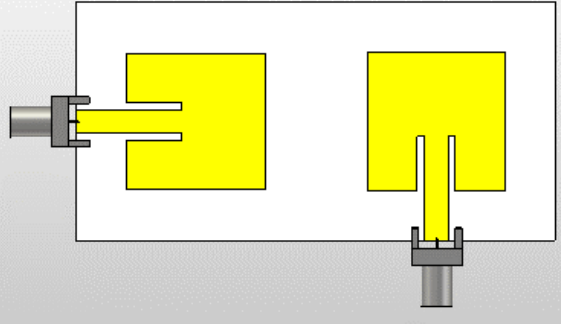
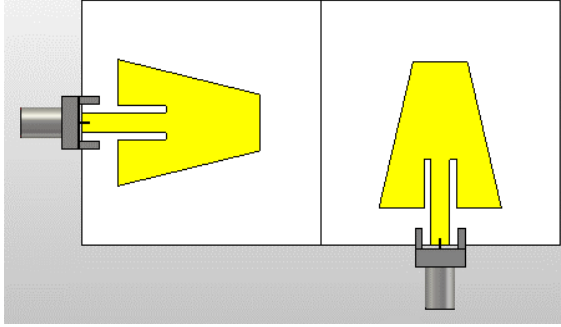
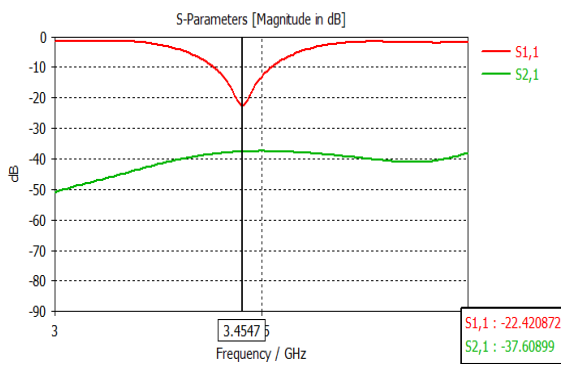
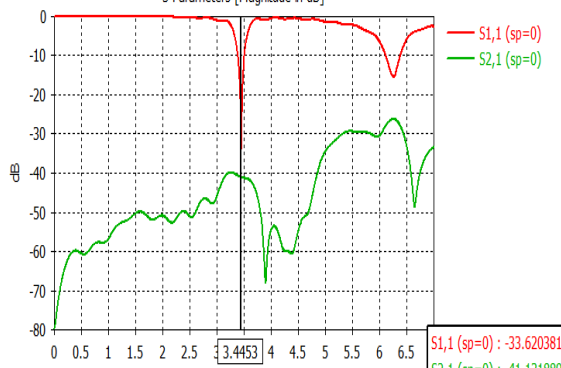
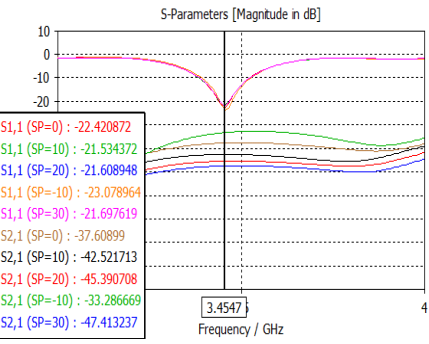
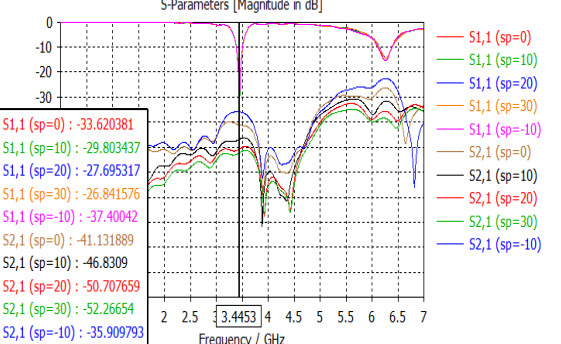
	<b>Rectangulaire</b>	<b>Trapézoïdale</b>
<b>Structure</b>		
<b>Niveau de couplage pour SP=0</b>		
<b>Niveau de couplage pour différents cas de SP</b>		

Tableau 3.7 : La 4<sup>ème</sup> configuration

**Commentaire sur la quatrième configuration :** Dans ce dernier cas on remarque que la structure trapézoïdale présente le niveau de couplage le plus bas par rapport au celle de rectangulaire (-41.13 < -37.60) pour (SP=0) et pour les autres états de SP le cas de (SP=30) donne le faible niveau (-52.26 dB).

### 3.2 Comparaison entre les configurations :

On prend seulement le cas où  $SP = 0$  car c'est ce qui nous intéresse :

Configuration	Rectangulaire	Trapézoïdale
La première	-22,64	-25,48
La deuxième	-27,84	-25,83
La troisième	-22,39	-25,36
La quatrième	-37.60	-41.13

Tableau 3.8 : Comparaison des résultats des comparaisons

D'après les résultats de tableau on conclut que la quatrième configuration trapézoïdale est la disposition optimale car elle présente le niveau de couplage le plus bas possible comparativement aux autres configurations alors on va choisir cette configuration pour poursuivre notre travail. Les dimensions de cette configuration sont :  $(70 \times 35 \times 1.5) \text{ mm}^3$ .

### 3.3 Résultat de simulation pour la configuration verticale-horizontale trapézoïdale :

Dans cette partie, on va présenter les résultats de simulation de la configuration verticale-horizontale pour la structure trapézoïdale.

Le coefficient de diffusion (Paramètres S) est représenté sur la Figure 3.12.

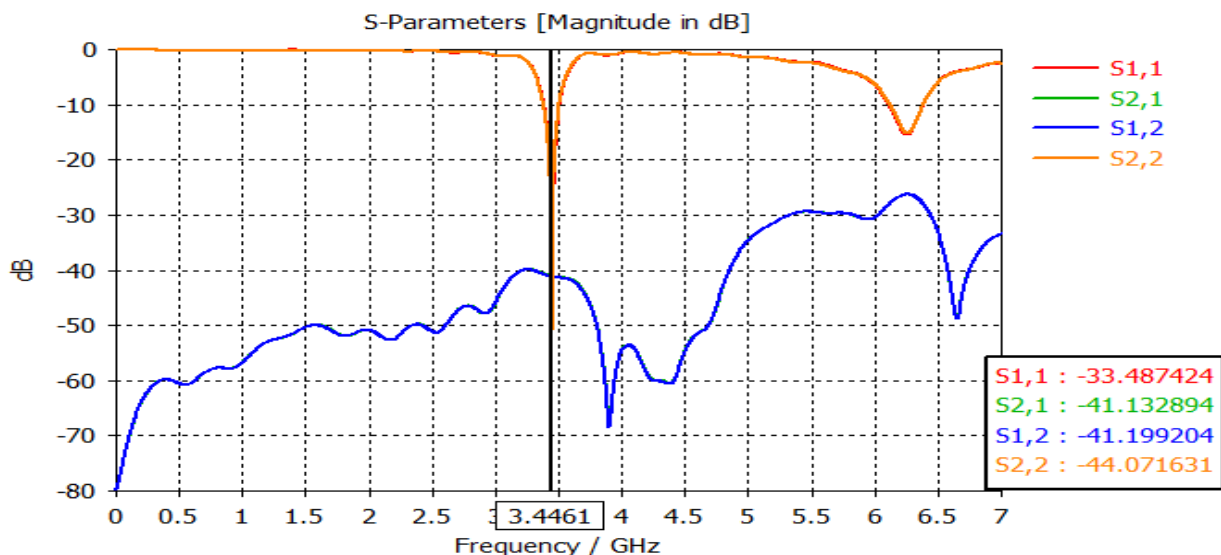


Figure 3.12 : Le coefficient de diffusion de l'antenne trapézoïdale.

Les résultats montrent de bonnes performances en termes de faibles niveaux de réflexion et de couplage entre les antennes, ce qui signifie que cette antenne est très adaptée à la transmission et à la réception simultanées de signaux et est capable d'améliorer la qualité de la communication en réduisant les interférences et en augmentant la capacité du système, ce qui est le but de notre étude.

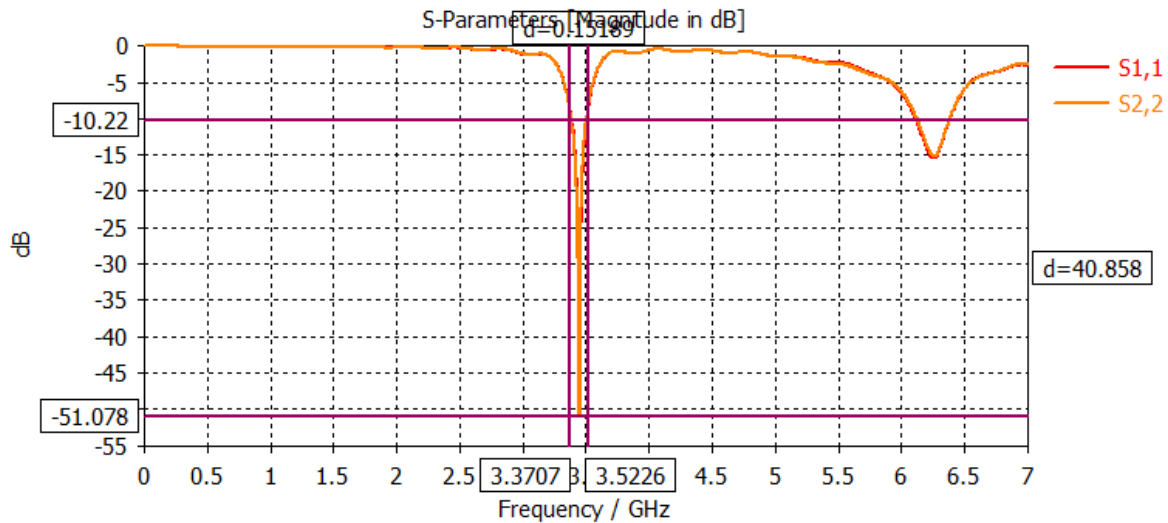


Figure 3.13 : La bande passante de l'antenne trapézoïdale.

La bande passante de l'antenne est de 0,15189, cette plage indique que le système MIMO est capable de prendre en charge les exigences de débit élevé et de faible latence associées aux applications 5G.

Les diagrammes de rayonnement en 3D pour les ports 1 et 2 sont donnés sur la Figure 3.14.

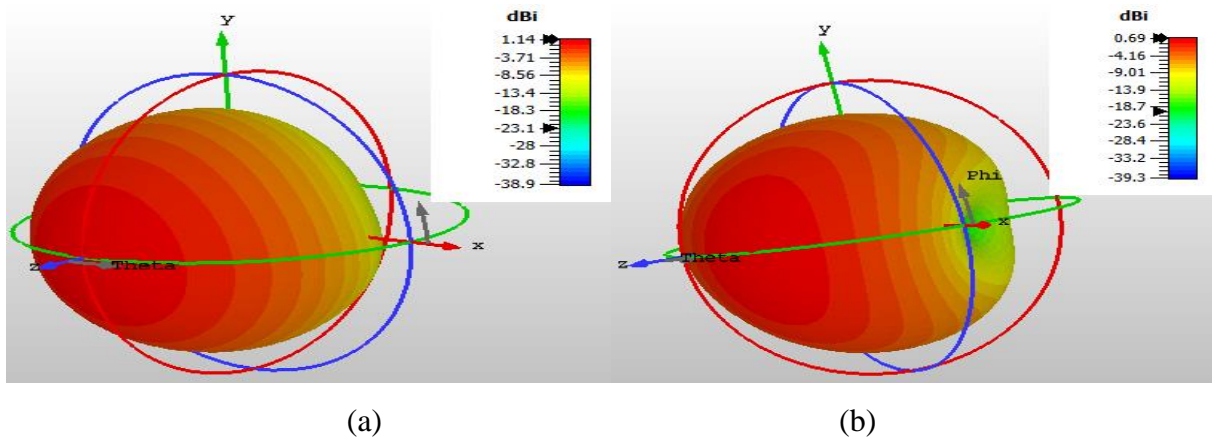


Figure 3.14 : Diagramme de rayonnement en 3D de la structure : (a) Port 1, (b) Port 2.

Les résultats ont montré que le diagramme de rayonnement des deux antennes est de type omnidirectionnel, mais la première antenne a un gain supérieur de 1,14 dB par rapport à la seconde qui a un gain de 0,69 dB, ce qui rend la première plus adaptée à l'optimisation d'antenne. D'autre part, la seconde est utilisée pour compléter la première antenne et améliorer la connectivité globale dans un système MIMO 1x2.

Les diagrammes de rayonnement en 2D dans le plan E et plan H sont donnés sur la Figure 3.15.



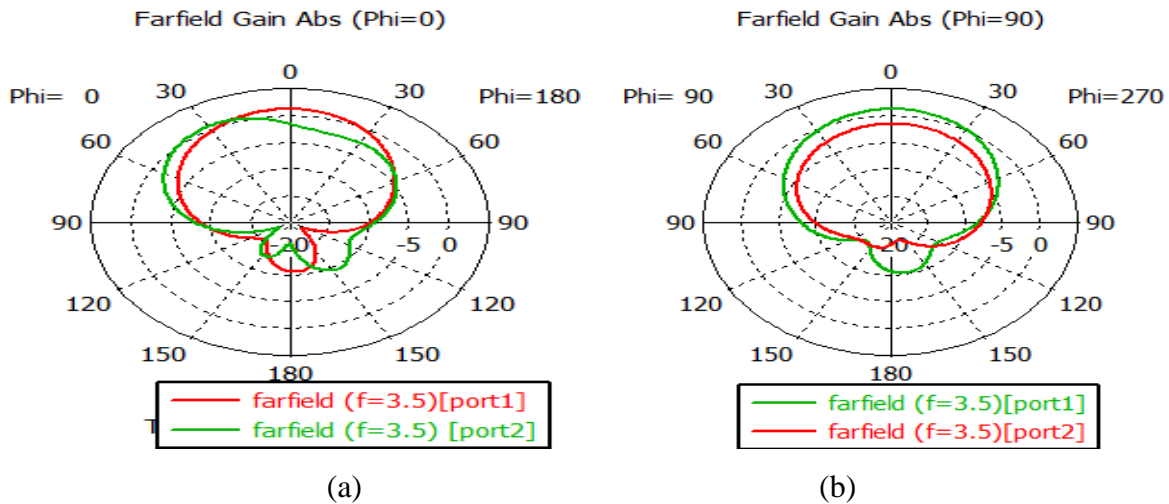


Figure 3.15 : Diagramme de rayonnement en 2D de la structure : (a) Plan E, (b) Plan H.

Les résultats ont montré que la première et la deuxième antenne ont une forme identique dans les deux plans, on peut donc dire que les deux antennes sont compatibles, c'est-à-dire que la conception est équilibrée et cela peut aider à réduire les interférences entre les deux antennes.

Le Coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC) de la configuration verticale-horizontale pour la structure trapézoïdale est donné sur la Figure 3.16.

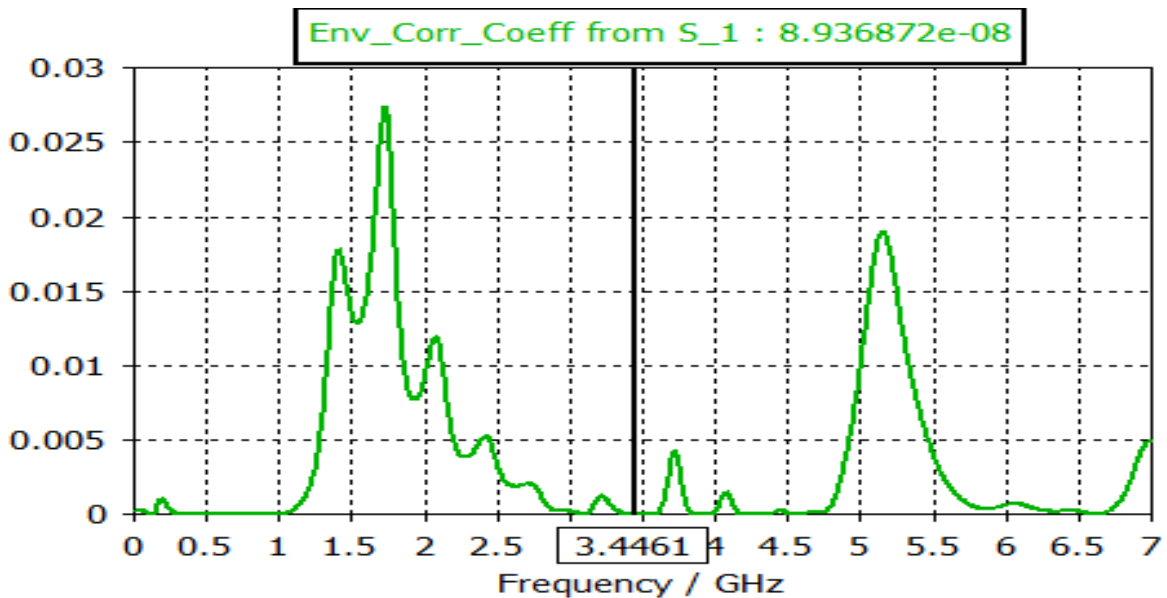


Figure 3.16 : Coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC) de la structure.

Les résultats indiquent que le « ECC » de l'antenne répond aux spécifications UIT  $0,0029 < 0,5$ . Ce qui signifie que l'antenne est capable de corriger les erreurs.

Le Gain de diversité (DG) de la configuration verticale-horizontale pour la structure trapézoïdale est donné sur la Figure 3.17.



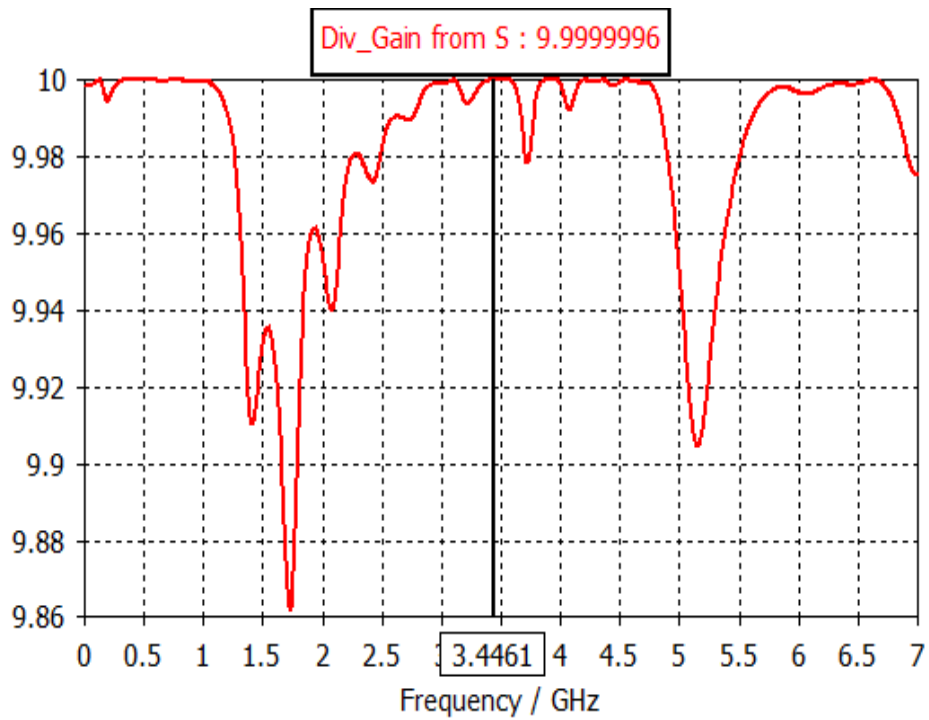


Figure 3.17 : Gain de diversité (DG)de la structure.

Les résultats montrent que le DG est proche à 10 (9.99) et cela donne un fonctionnement optimal pour l'antenne MIMO.

Le VSWR de la configuration verticale-horizontale pour la structure trapézoïdale est donné sur la Figure 3.18.

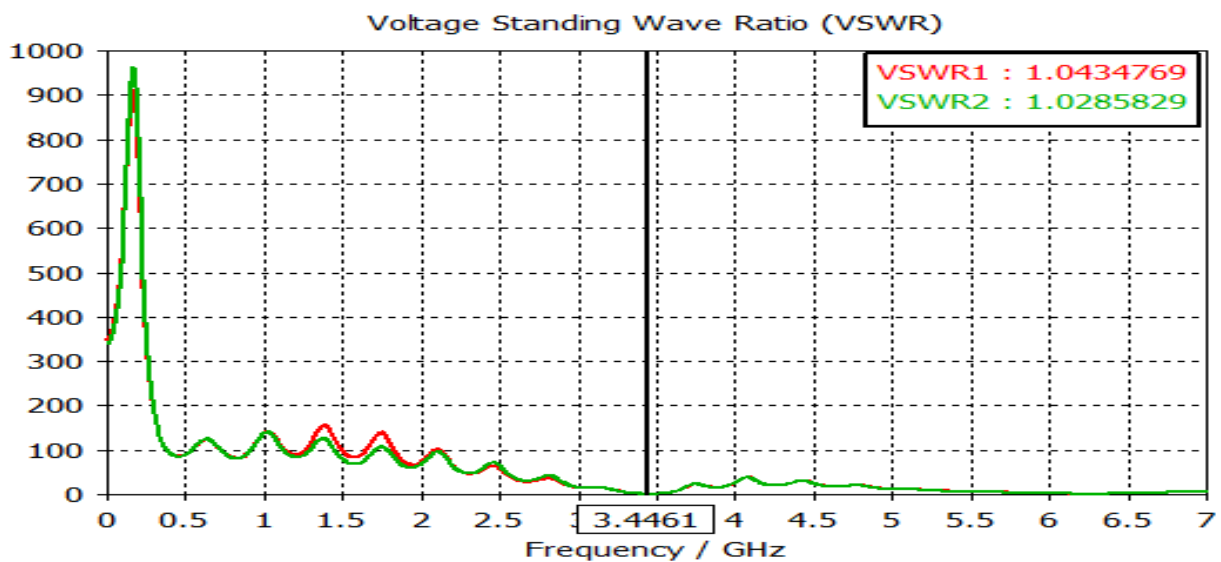


Figure 3.18 : VSWR de la structure.

Les résultats montrent que le VSWR est inférieur à 2 et très proche à 1 cela implique que l'antenne est très adaptée pour la communication sans fils avec haute qualité et des performances optimales pour système MIMO.

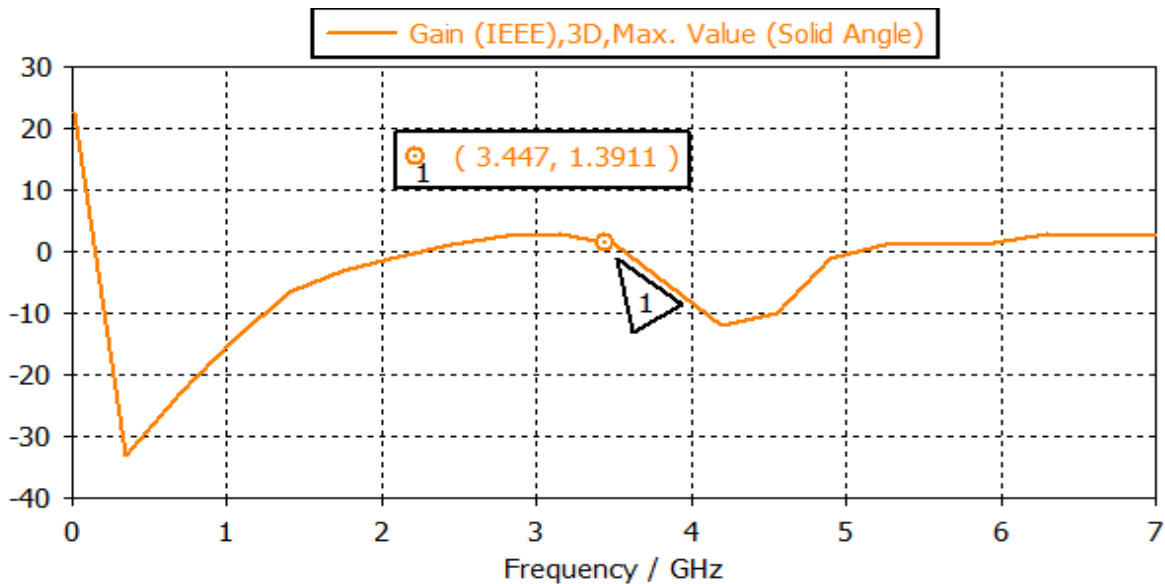


Figure 3.19 : Gain de la structure.

Le chiffre de 1.39 dans le gain indique une amélioration de la portée.

#### 4. Réalisation (vérification expérimentale) :

On a réalisé la configuration proposée MIMO (1\*2) verticale-horizontale (polarisation croisée) dans une entreprise privée en utilisant le substrat FR-4 qui a une épaisseur de 1.5mm et une constante diélectrique de 4.3 ainsi que les connecteurs SMA. Le prototype de l'antenne MIMO 1\*2 réalisée est montré sur la Figure 3.20.

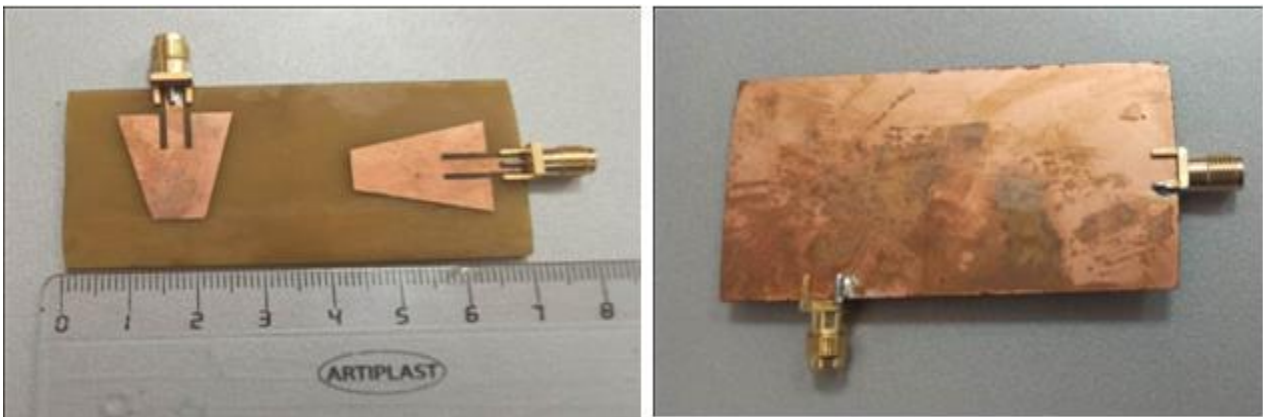


Figure 3.20 : Vue de face et d'arrière de la configuration 1\*2 réalisée

Les mesures des paramètres S de l'antenne MIMO réalisée sont effectués à l'aide de l'analyseur de réseau vectoriel (VNA) keysight N5224A de 10MHz à 43.5GHz à 04 ports, disponible au CDTA (Centre de Développement des Technologies Avancée), Baba Hassen-Alger.

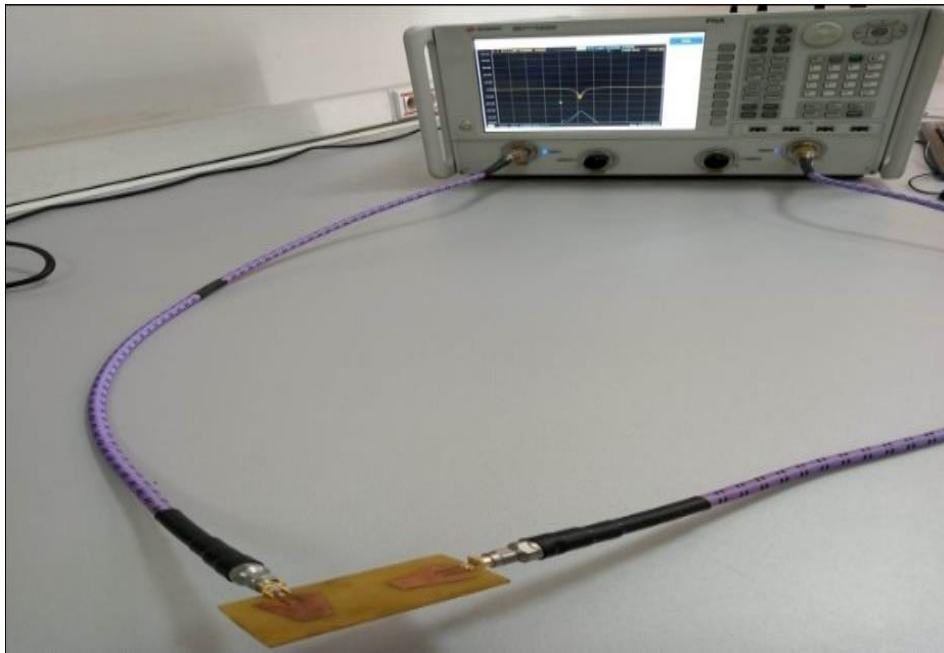


Figure 3.21 : Mesure de l'antenne MIMO 1\*2 réalisée

#### 4.1 Comparaison entre les résultats mesurés et simulés :

Les résultats de simulation et mesure des coefficients de diffusion (S) pour les ports 1 et 2 sont représentés sur les Figures 3.22 et 3.23.

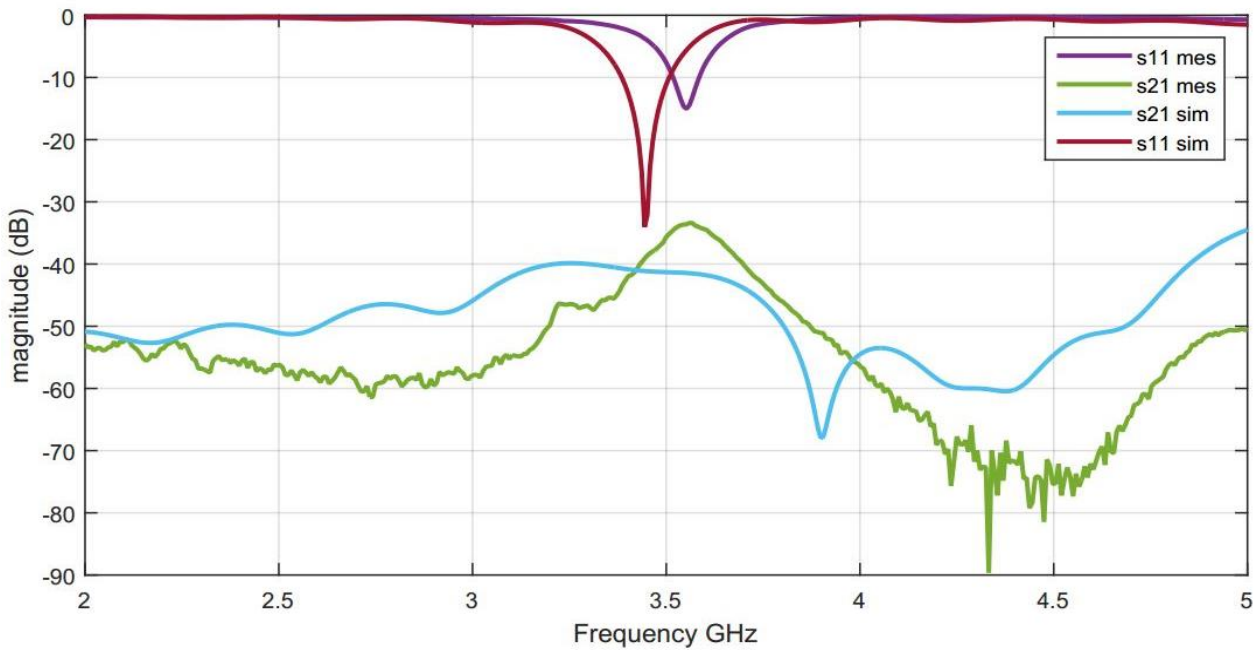


Figure 3.22 : Coefficients S mesurés et simulés du port 1.

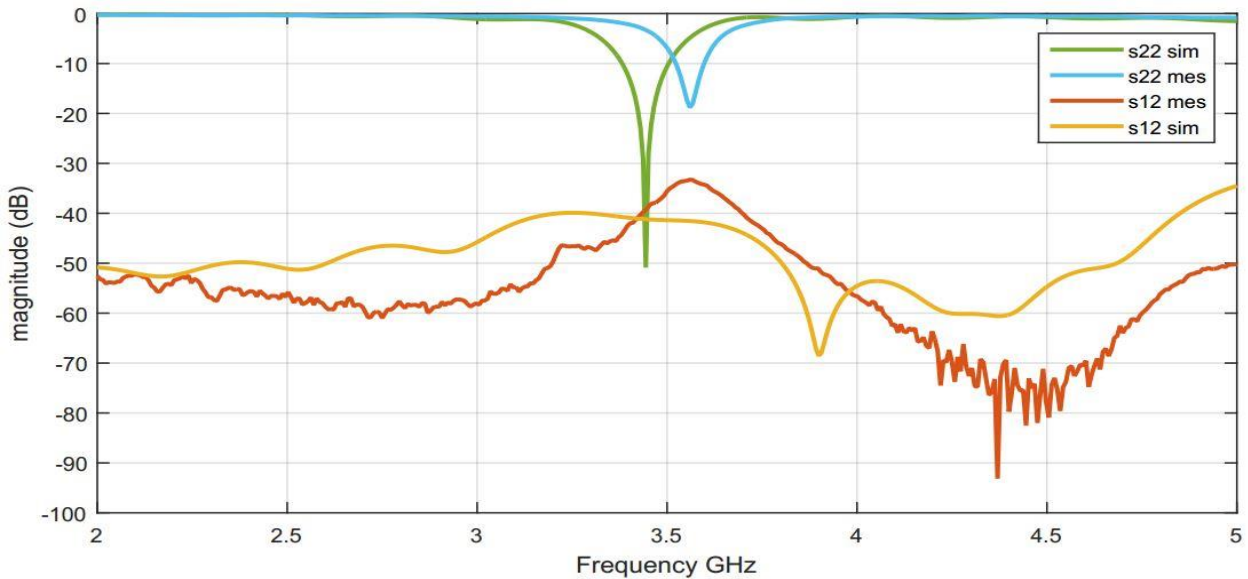


Figure 3.23 : Coefficients S mesurés et simulés du port2.

Pour calculer l'erreur de mesure on à utiliser cette équation :

$$\text{Pourcentage d'erreur} = \left| \frac{\text{valeur expérimentale} - \text{valeur théorique}}{\text{valeur théorique}} \right| \times 100\% \quad (3.1)$$

Paramètre en dB		Simulé	Mesuré	Pourcentage de l'erreur de mesure
Port1	S <sub>11</sub>	-12.85	-9.50	26%
	S <sub>21</sub>	-41.60	-37.20	10.5%
Port 2	S <sub>12</sub>	-41.20	-37.02	10%
	S <sub>22</sub>	-12.06	-9.02	25.2%

Tableau 3.9 : Comparaison entre les paramètres simulés et mesurés à la fréquence 3.5Ghz.

**Commentaire sur le tableau :** Le tableau 3.9 montre un bon niveau d'accord entre les coefficients de transmission simulés et mesurés. Le désaccord entre les deux coefficients de réflexion est dû aux tolérances et au soudage dans le processus de fabrication ainsi que l'environnement de mesure contenant les objets réfléchissants.

### **5. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons d'abord vu la technique d'adaptation des antennes monopôles (technique d'encoche) qui a nous aidé à améliorer les performances de notre antenne. Ensuite, on a exploré différentes configurations afin de trouver la meilleure offrant les performances optimales pour notre antenne. Cependant, lors de nos tests, nous avons observé un léger glissement de la fréquence de fonctionnement vers la gauche, passant de 3.5GHz à 3.447GHz. Ce glissement est dû à l'effet de couplage entre les éléments de l'antenne. Enfin, on a réalisé et mesuré cette configuration et on a remarqué une légère différence entre les résultats simulés et mesurés. Par contre l'antenne MIMO a deux éléments a montré une bonne adaptation d'impédance et un faible couplage mutuel dans la plage de fréquence de 3 à 4 GHz, ce qui est essentiel pour assurer une performance optimale de l'antenne.

## Conclusion Générale

Nous avons pleinement atteint notre objectif dans le cadre de notre travail, ce qui est clairement démontré par les résultats obtenus de la configuration optimale (verticale-horizontale).

Cette configuration répond à la grande majorité des exigences de la 5G, notamment en termes de bande passante de 0,15189 GHz permettant de prendre en charge des débits élevés et une faible latence. De plus, avec un ECC de 0.0029 notre système est capable de corriger les erreurs, et un DG de 9.99 assure un fonctionnement optimal de l'antenne MIMO.

Pour les futurs travaux, il sera intéressant d'étudier les tâches suivantes :

- ❖ Utiliser la technique d'isolation entre les antennes afin de réduire au maximum l'effet de couplage mutuel .
- ❖ Implémenter l'antenne MIMO avec un meilleur matériau de substrat tel que le matériau haute fréquence de Rogers et avec des connecteurs SMA appropriés.
- ❖ Miniaturiser l'antenne.
- ❖ En augmentant le nombre d'éléments MIMO, des améliorations significatives du débit et de la couverture des réseaux cellulaires peuvent être obtenues .

Utiliser des chambres anéchoïques pour réduire les influences extérieures sur l'antenne.

## Références bibliographiques

- [1] Jaiswal, R. K., Dutta, R. K., Das, G., Ojha, A. K., & Srivastava, K. V. (2023). Circularly polarized three-element MIMO antenna with diversity and polarization reconfigurability techniques. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 162, 154566.
- [2] Hussain, M., Awan, W. A., Alzaidi, M. S., & Elkamchouchi, D. H. (2023). Self-decoupled tri band MIMO antenna operating over ISM, WLAN and C-band for 5G applications. *Heliyon*, 9 (7).
- [3] Ghosh, S., Baghel, G. S., & Swati, M. V. (2023). Design of a highly-isolated, high-gain, compact 4-port MIMO antenna loaded with CSRR and DGS for millimeter wave 5G communications. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 169, 154721.
- [4] Das, G. S., Chamuah, B. B., Beria, Y., Kalita, P. P., & Buragohain, A. (2023). Compact four elements SUB-6 GHz MIMO antenna for 5G applications. *Materials Today: Proceedings*.
- [5] Chouhan, S., Dubey, P. K., Mukati, G., Kumbhare, K., Yadav, J., Kurre, S. K., & Deorari, R. (2023). 2x1 slotted MIMO antenna with slotted ground for high frequency wireless application. *Materials Today: Proceedings*.
- [6] Balanis, Constantine A. (1996). *Antenna Theory: Analysis and Design*, Second Edition. Hoboken, NJ : John Wiley & Sons.
- [7] Zennaro, M., & Fonda, C. (2004). *Radio Laboratory Handbook of the ICTP "School on Digital Radio Communications for Research and Training in Developing Countries"*. February 2004. Disponible : [https://www.academia.edu/2236600/Radio\\_Laboratory\\_Handbook/](https://www.academia.edu/2236600/Radio_Laboratory_Handbook/)
- [8] “Antenna Theory” [en ligne] Disponible : <https://www.antenna-theory.com/definitions/vswr.php>, [consulté le 26/05/2023]
- [9] Ramamoorth, D. (2014). “Impact of Mutual Coupling among Antenna Arrays on the Performance of the Multipath Simulator System” Master’s Thesis in Electronics. Faculty of Engineering and Sustainable Development, University of Gavle.
- [10] A.C. Lepage, " les caractéristiques des antennes", [en ligne] Disponible: [https://lms.fun-mooc.fr/c4x/MinesTelecom/04009/asset/MOOC\\_fiche\\_antenne\\_v4.pdf](https://lms.fun-mooc.fr/c4x/MinesTelecom/04009/asset/MOOC_fiche_antenne_v4.pdf), [consulté le 29/05/2023].

- [11] Alsultan, R. G. S., & Yetkin, G. Ö. (2018). Mutual Coupling Reduction of E-Shaped MIMO Antenna with Matrix of C-Shaped Resonators. *Hindawi International Journal of Antennas and Propagation*, Volume 2018, 13 pages. DOI : 10.1155/2018/4814176.
- [12] L. D. Malviya, R. K. Panigrahi and M. V. Kartikeyan (2021) *MIMO Antennas for Wireless Communication: Theory and Design* (1st ed.) CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003080275>.
- [13] M. Khalid, S. I. Naqvi, N. Hussain and M. U. Rahman, "4-Port MIMO antenna with defected ground structure for 5G millimeter wave applications", *Electronics*, vol. 9, no. 1, pp. 71, 2020.
- [14] Sultan, K. S., & Abdullah, H. H. (2019). Planar UWB MIMO-diversity antenna with dual notch characteristics. *Progress In Electromagnetics Research C*, 93, 119-129.
- [15] E. Biglieri et al, *MIMO Wireless Communications*, Cambridge university press, (pp. 2-3), 2007.
- [16] Huawei (2021) Introduction to 5G: 5G Massive MIMO Overview. Huawei Enterprise Forum [en ligne]. Disponible sur : <https://forum.huawei.com/enterprise/en/introduction-to-5g-5g-massive-mimo-overview/thread/802407-100305> [Consulté le 15 mars 2023]
- [17] Huawei (2019) Massive MIMO. Huawei Enterprise Forum [en ligne]. Disponible sur : <https://forum.huawei.com/enterprise/en/massive-mimo/thread/656041-100305?page=1> [Consulté le 16 mars 2023]
- [18] Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (2020) 5G Bytes: Beamforming Explained. *IEEE Spectrum* [en ligne]. Disponible sur : <https://spectrum.ieee.org/5g-bytes-beamforming-explained> [Consulté le 16 mars 2023].
- [19] Wang, Micco (2018) The Role of Massive MIMO in 5G. *Medium* [en ligne]. Disponible sur : <https://medium.com/@miccowang/the-role-of-massive-mimo-in-5g-c362e790ef61> [Consulté le 16 mars 2023]
- [20] Abboud, Ahmad. Interference mitigation in 5G mobile networks: Uplink pilot contamination in TDD massive MIMO scheme. Diss. Limoges, 2017
- [21] Profolus (2022) Massive MIMO Explained: Advantages and Disadvantages. Profolus [en ligne]. Disponible sur : <https://www.profolus.com/topics/massive-mimo-explained-advantages-and-disadvantages/> [Consulté le 18 mars 2023].
- [22] Sanguinetti, L. et al. (2020) 5G and IoT : Total Technological Surveillance in the Making. *Journal of Public Health Research* [en ligne], 9(2), e1810. Disponible sur : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7284607/> [Consulté le 19 mars 2023].



- [23] Sun, D. (2017). Spectral efficiency and energy efficiency in massive MIMO systems. These de doctorate, University of New South Wales, Australia.

## ملخص

الهدف من هذه الأطروحة هو تصميم ونمذجة نظام هوائي MIMO 1x2 microstrip جديد بتكلفة منخفضة، وحجم صغير، وخصائص إشعاع جيدة لأجهزة 5G Sub-6. أولاً، قمنا بتصميم هوائي أحادي القطب يهيكلين مختلفين يعملان في نطاق تردد 3.5 جيجا هرتز. بعد ذلك، يتم تقديم هوائي MIMO ثنائي العناصر من هوائي البدء مع 04 تكوينات مختلفة من أجل اختيار التكوين الأمثل 1x2 MIMO من أجل التحقيق. يوفر هذا التكوين تطابقاً أفضل مع تردد التشغيل، ومستوى منخفض من الاقتران بين الهوائيات، ومخطط إشعاع شامل الاتجاهات، ومعامل ارتباط منخفض جداً ( $ECC < 0.003$ ) وكسب تنوع عالٍ ( $DG > 9.95$ ). أظهرت النتائج أن هوائيات MIMO المقترحة مضغوطة وذات أداء جيد ومناسبة تماماً لتطبيقات 5G Sub-6.

الكلمات المفتاحية: هوائي microstrip ، نظام MIMO ، 5G Sub-6 ، تصغير

## Résumé

Le but de ce mémoire est la conception et le prototypage d'un nouveau système d'antenne MIMO 1x2 microruban à faible coût, de taille compacte, et de bonnes caractéristiques de rayonnement pour les dispositifs 5G Sub-6. En premier, nous avons conçu une antenne monopôle avec deux structures différentes qui fonctionne à la fréquence 3.5GHz. Ensuite, une antenne MIMO à deux éléments est présentée à partir de l'antenne de départ avec 04 configurations différentes afin de choisir la configuration MIMO 1x2 l'optimale pour la réalisation. Cette configuration offre une meilleure adaptation à la fréquence opérationnelle, un faible niveau de couplage entre les antennes, un diagramme de rayonnement omnidirectionnel, un coefficient de corrélation très faible ( $ECC < 0.003$ ) et un gain de diversité élevée ( $DG > 9.95$ ). Les résultats ont montré que les antennes MIMO proposées sont compactes et ont de bonnes performances et sont bien adaptées aux applications 5G Sub-6.

**Mots clés :** Antenne microruban, système MIMO, 5G Sub-6, miniaturisation.

## Abstract

The purpose of this master dissertation is the design and prototyping of a new low-cost, compact size, and good radiation characteristics 1x2 microstrip MIMO antenna system for 5G Sub-6 devices. First, we designed a monopole antenna with two different structures that operate at the 3.5GHz frequency. Then, a two-element MIMO antenna is presented from the starting antenna with 04 different configurations to choose the optimal 1x2 MIMO configuration for the realization. This configuration offers a better adaptation to the operational frequency, a low level of coupling between the antennas, an omnidirectional radiation pattern, a very low correlation coefficient ( $ECC < 0.003$ ) and a high diversity gain ( $DG > 9.95$ ). The results showed that the proposed MIMO antennas are compact, have good performance, and are well suited for 5G Sub-6 applications.

**Keywords:** Microstrip antenna, MIMO system, 5G Sub-6, miniaturization