

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلكايد - تلمسان -

Université Abou bakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : Télécommunications

Spécialité : Réseaux de Télécommunications

Dans le cadre de l'arrêté 1275 : LABEL / PME

Par :

Bellahcene Hayat

Sujet

Antennes miniatures pour les futures générations mobiles

Soutenu publiquement, le **30/06/2025**, devant le jury composé de :

Mr. N. BOUKLI HACENE	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
Mr. A.A. KANOUN	MRA	C.D.S Oran	Examineur
Mr. A. BOUACHA	Professeur	Univ. Tlemcen	Examineur
Mme. H. BENOSMAN	MCA	Univ. Tlemcen	Examinatrice
Mme. F. BOUSALAH	MCA	Univ. Tlemcen	Directrice de mémoire
Mme. F. KANOUN	MRB	C.D.S Oran	Invitée

Année universitaire : 2024/2025

Dédicace

Je dédie ce mémoire à toutes les personnes chères à mon cœur, qui m'ont soutenue et encouragée tout au long de ce parcours.

À mes parents, pour leur amour inconditionnel, leur patience et leurs sacrifices. Votre présence dans ma vie est une bénédiction inestimable.

À mes sœurs, Houda et Imène, pour leur tendresse, leur soutien moral et leur présence constante à mes côtés.

À mes deux adorables nièces, Safya et Tesnim, sources de joie et de lumière dans ma vie.

À mon beau-frère Hakim et à sa famille, pour leurs encouragements sincères et leur gentillesse qui m'ont touchée.

À vous tous, un grand merci. Ce mémoire est aussi le fruit de votre amour et de votre confiance.

Remerciements

Je souhaite avant tout exprimer ma profonde reconnaissance envers Allah, le Tout-Puissant, pour Ses bienfaits, Sa guidance et Sa miséricorde tout au long de ce parcours. Sans Sa grâce et Son soutien, ce travail n'aurait pu voir le jour. Je L'en remercie pour la force, la patience et la persévérance qu'Il m'a accordées afin de mener ce projet à terme.

*Par ce modeste travail, je tiens à adresser mes plus sincères remerciements à mon encadrante, Mme **BOUSALAH FAYZA**, Maître de conférences classe A à l'Université Abou Bekr-Belkaïd de Tlemcen, pour avoir accepté de superviser ce mémoire. Je lui suis profondément reconnaissante pour sa disponibilité, sa bienveillance, son soutien constant, ses précieux conseils ainsi que sa patience tout au long de ce travail.*

*Je remercie également Monsieur **BOUKLI HACENE NOUREDDINE**, Professeur à l'Université de Tlemcen, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury de ce mémoire. Mes remerciements s'adressent aussi à **Mr. BOUACHA ABDELHAFID**, **Mr. KANOUN** et **Mme. BENOSMAN HAYAT** pour leur participation au jury et l'examen attentif de ce travail.*

J'exprime aussi toute ma gratitude aux enseignants et au personnel du département des télécommunications de la Faculté de Technologie de Tlemcen, pour la qualité de leur enseignement, leur gentillesse et leur disponibilité.

Enfin, je remercie chaleureusement toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation et à la réussite de ce modeste travail.

Résumé

Avec l'émergence des réseaux mobiles 5G et des futures générations, la miniaturisation des antennes devient un défi crucial afin de concilier compacité, performance et intégration dans des dispositifs modernes. Ce mémoire aborde cette problématique en explorant des techniques de réduction de taille des antennes patch, tout en assurant le maintien de bonnes performances en bande passante, gain et efficacité de rayonnement.

La première partie présente les bases des antennes et leurs caractéristiques essentielles. La seconde analyse le rôle des réseaux d'antennes dans les architectures 5G, en mettant l'accent sur les technologies comme le beamforming et le MIMO massif. La dernière partie propose une étude comparative de structures simulées sous CST Studio Suite, en utilisant deux substrats : le FR-4 et le silicone à haute permittivité.

Les résultats démontrent que les substrats à forte permittivité permettent une réduction notable de la taille, mais posent des contraintes sur la bande passante. Pour y remédier, des structures à sol défectueux (DGS) sont introduites afin d'améliorer l'adaptation d'impédance et la qualité de rayonnement. Ce mémoire met ainsi en évidence les compromis techniques liés à la miniaturisation et suggère des solutions adaptées aux futurs systèmes de communication.

MOTS-CLÉS : Antenne MIMO, 5G, S11, VSWR, isolation, S21, ECC, gain de diversité.

Abstract

With the emergence of 5G and future mobile networks, antenna miniaturization has become a crucial challenge in combining compactness, performance, and integration into modern devices. This thesis addresses this issue by exploring techniques to reduce the size of patch antennas while maintaining good performance in terms of bandwidth, gain, and radiation efficiency.

The first part presents the fundamentals of antennas and their key characteristics. The second focuses on antenna arrays in 5G architectures, emphasizing advanced technologies such as beamforming and massive MIMO. The final part offers a comparative study of simulated structures using CST Studio Suite, with two substrates: FR-4 and high-permittivity silicone.

The results show that high-permittivity substrates significantly reduce antenna size, but may limit bandwidth. To overcome this, Defected Ground Structures (DGS) are introduced to improve impedance matching and radiation quality. This work thus highlights the technical trade-offs of miniaturization and proposes solutions tailored to future wireless communication systems.

KEYWORDS: MIMO antenna, 5G, S11, VSWR, isolation, S21, ECC, diversity gain.

ملخص

مع ظهور شبكات الجيل الخامس (5G) والأجيال المستقبلية، أصبحت مسألة تصغير حجم الهوائيات تحديًا أساسيًا يجمع بين الحجم الصغير، الأداء العالي، وإمكانية الاندماج في الأجهزة الحديثة. يعالج هذا البحث هذه الإشكالية من خلال دراسة تقنيات تصغير هوائيات الباتش مع الحفاظ على أدائها من حيث عرض النطاق الترددي، الكسب، وكفاءة الإشعاع.

يقدم الجزء الأول المفاهيم الأساسية للهوائيات وخصائصها الرئيسية، بينما يركز الجزء الثاني على شبكات الهوائيات ضمن بنية شبكات 5G، مع تسليط الضوء على تقنيات متقدمة مثل تشكيل الحزمة (Beamforming) و MIMO الكثيف. أما الجزء الأخير، فيعرض دراسة مقارنة لهياكل هوائيات تمت محاكاتها باستخدام برنامج CST Studio Suite ، باستخدام نوعين من المواد FR-4 : والسيليكون عالي السماحية.

أظهرت النتائج أن استخدام المواد ذات السماحية العالية يساهم بشكل كبير في تقليص الحجم، لكنه قد يقيّد عرض النطاق الترددي. لذلك، تم استخدام تقنيات مثل الهيكل الأرضي المعطوب (DGS) لتحسين التوافق في المعاوقة وجودة الإشعاع. يبرز هذا العمل التحديات التقنية المرتبطة بالتصغير، ويقترح حلولاً مناسبة لأنظمة الاتصالات اللاسلكية المستقبلية.

الكلمات المفتاحية: هوائي MIMO ، G5 ، معامل الانعكاس S11 ، نسبة الموجة الثابتة VSWR ، العزل، معامل الاقتران S21 ، معامل الارتباط ECC ، كسب التنوع.

Table des matières

Dédicace.....	2
Remerciements	3
Résumé.....	4
Abstract	5
ملخص.....	6
Sigles et abréviations	10
Liste des figures.....	12
Liste des tableaux.....	17
INTRODUCTION GENERALE	19
Chapitre I :.....	22
Généralités sur les antennes.....	22
I .1.Introduction	23
I .2. Définition d'une antenne	23
I .3. Importance des Antennes.....	24
I .4. Historique.....	25
I .5. Les caractéristiques des antennes	25
I .5.1. Diagramme de rayonnement	25
I .5.2. Directivité	27
I .5.3. Gain	28
I .5.4. Bande Passante	29
I .5.5. Impédance	31
I .5.6. Polarisation	32
I .5.7. Coefficient de réflexion et rapport d'onde stationnaire	33
I .6. Différents types d'antennes	33
I .6.1. Antenne isotrope	34
I .6.2. Antenne Monopôle	34
I .6.3. Antenne Dipôle	35
I .6.4. Antenne Hélicoïdale (Hélice).....	37
I .6.5. Antenne Yagi	38
I .6.6. Antenne cornet	39
I .6.7. Réflecteur	40

I .6.8. Antenne patch.....	41
I .7. Conclusions	50
Bibliographie	51
Chapitre II :.....	55
Les réseaux d’antennes et leurs applications dans le domaine de la 5G.....	55
II .1.Introduction	56
II .2. Historique.....	56
II .3.La cinquième génération	57
II .4. Objectifs de la 5G	58
II .5. Catégories d’usages de la 5G	59
II .5.1.eMBB (Enhanced Mobile Broadband)	59
II .5.2. mMTC (Massive Machine Type Communications).....	60
II .5.3. uRLLC (Ultra-Reliable and Low Latency Communications)	60
II .6. Applications visées pour le réseau 5G	61
II .7. Les technologies clés de la 5G.....	62
II .7.1. Les ondes millimétriques	63
II .7.2. Les Micro-cellules.....	64
II .7.3. Beamforming.....	65
II .7.4.Full-Duplex	65
II .7.5.Massive MIMO	65
II .8. Systèmes MIMO traditionnels.....	66
II .8.1. Principes du MIMO	67
II .8.2. Architectures des systèmes MIMO	68
II .8.3.Capacité d’un canal MIMO.....	71
II .8.4. Avantages et limitations de la technologie MIMO.....	72
II .9. Évolution vers la sixième génération (6G)	73
II .9.1. Objectifs des réseaux sans fil 6G.....	74
II .10. Conclusion.....	75
Bibliographie	76
Chapitre III :.....	78
Résultats et Simulations.....	78
III .1. Introduction	79
III .2. Principe de la miniaturisation par substrat à haute permittivité.....	79

III.2.1. Effet de la permittivité sur la taille de l'antenne.....	79
III.2.2. Choix des matériaux (FR-4 vs Silicone)	80
III.2.3. Avantages et inconvénients des substrats à haute permittivité.....	80
III.3. Description du Logiciel de Simulation CST	80
III.4.Étude comparative de différents types d'antennes avec différents types d'alimentations utilisant les substrats FR-4 et silicone	81
III.4.1.Conception et simulation d'une antenne patch alimentée par une ligne micro-ruban	81
III.4.2. Conception d'une antenne patch alimentée par un câble coaxial	112
III.5. REALISATION ET MESURES	136
III.5.1. Réalisation et mesures du réseau MIMO à deux éléments d'une antenne sans fente alimentée par une ligne micro-ruban	138
III.5.2. Réalisation et mesures du réseau MIMO à deux éléments d'une antenne avec fente alimentée par une ligne micro-ruban	141
III.5.3. Réalisation et mesures du réseau MIMO à deux éléments d'une antenne sans fente alimentée par un câble coaxial	143
III.5.4. Réalisation et mesures du réseau MIMO à deux éléments d'une antenne avec fente alimentée par un câble coaxial	145
III.5.5. Conclusion :	148
Bibliographie	149
CONCLUSION GENERALE	150
BMC.....	153

Sigles et abréviations

3GPP	3rd Generation Partnership Project
5G	Cinquième génération de réseau mobile
5G NR	5G New Radio
6G	Sixième génération de réseau mobile
AR	Augmented Reality
BP	Bande passante
C	Capacité de canal
CST	Computer Simulation Technology
D	Directivité
DDR	Diagramme de rayonnement
DG	Diversity Gain
DGS	Defected Ground Structure
ECC	Envelope Correlation Coefficient
FIT	Finite Integration Technique
FR-4	Flame Retardant 4 (matériau de substrat standard)
Full-Duplex	Communication bidirectionnelle simultanée
G	Gain
GHz / MHz	Gigahertz / Mégahertz
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
GaAs	Gallium Arsenide
HD	High Definition
IoT	Internet of Things (Internet des objets)
LL, GW, GL, LW	Longueurs / largeurs caractéristiques (ligne micro-ruban, substrat, etc.)
LTE	Long Term Evolution
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MISO	Multiple Input Single Output
NG-Core	Next Generation Core

NR	New Radio
PTFE	Polytetrafluoroethylene
R, L, C	Résistance, inductance, capacité (dans le modèle électrique RLC)
S-parameters	Scattering Parameters (paramètres de diffusion)
SIMO	Single Input Multiple Output
SISO	Single Input Single Output
SNR	Signal to Noise Ratio
VR	Virtual Reality
VSWR / ROS	Voltage Standing Wave Ratio / Rapport d'Onde Stationnaire
Wi-Fi	Wireless Fidelity
XR	eXtended Reality
Z _a	Impédance d'entrée de l'antenne
Z _c	Impédance caractéristique de la ligne de transmission
dB / dBi	Décibels (isotrope pour dBi)
eMBB	Enhanced Mobile Broadband
j	Unité imaginaire
mMTC	Massive Machine-Type Communication
mm	Millimètre
mmWave	MillimeterWave
tan δ	Tangente de l'angle de pertes diélectriques
uRLLC	Ultra-Reliable and Low Latency Communication
ε _r	Permittivité relative
η	Rendement de rayonnement
λ	Longueur d'onde

Liste des figures

- Figure I.1 : Schéma de base d'un système de communication sans fil
- Figure I.2 : Lobes de rayonnement et largeur de faisceau d'un diagramme de rayonnement
- Figure I.3 : Diagramme de rayonnement des antennes (a) Omnidirectionnel (b) Directionnel et (c) Isotrope
- Figure I.4 : Bande passante à partir du TOS (ou S11)
- Figure I.5 : Coefficient de réflexion à l'entrée d'un patch rectangulaire résonant à 10 GHz
- Figure I.6 : Modèle électrique d'une antenne
- Figure I.7 : Les trois types de polarisation
- Figure I.8 : Rayonnement d'une antenne isotrope
- Figure I.9 : Antenne monopôle quart d'onde
- Figure I.10 : L'antenne ground plane et le diagramme associé
- Figure I.11 : Antenne doublet d'Hertz
- Figure I.12 : Antenne demi-onde
- Figure I.13 : Antenne dipôle replié
- Figure I.14 : L'antenne dipôle et son diagramme de rayonnement
- Figure I.15 : Antenne hélice en mode de rayonnement axiale
- Figure I.16 : L'antenne Yagi et son diagramme de rayonnement
- Figure I.17 : Schéma de principe d'un guide d'onde
- Figure I.18 : Antenne cornet rectangulaire et son diagramme de rayonnement
- Figure I.19 : L'antenne parabole et son diagramme de rayonnement
- Figure I.20 : Schéma d'une antenne imprimée rectangulaire
- Figure I.21 : Différentes formes d'antennes microbandes
- Figure I.22 : Une antenne patch alimentée par sonde coaxial
- Figure I.23 : Une antenne patch alimentée par micro-ruban
- Figure I.24 : Une antenne patch alimentée par fente
- Figure I.25 : Une antenne patch alimentée par proximité
- Figure I.26 : Adaptation par ligne quart d'onde
- Figure I.27 : Adaptation par encoche
- Figure II.1 : Catégories d'usages de la 5G

Figure II.2 : Applications visées pour le réseau 5G

Figure II.3 : Technique utilisée dans la technologie 5G

Figure II.4 : Technique utilisée dans la technologie 5G (ondes millimétriques)

Figure II.5 : Illustration de MIMO massive

Figure II.6 : Schéma d'un système SISO

Figure II.7 : Schéma d'un système SIMO

Figure II.8 : Schéma d'un système MISO

Figure II.9 : Schéma d'un système MIMO

Figure II.10 : L'évolution du 1G à 6G

Figure III.1 : L'antenne initiale avant l'adaptation (vues de face et d'arrière).

Figure III.2 : Coefficient de réflexion (S_{11}) de l'antenne initiale.

Figure III.3 : Antenne initiale avec FR-4 alimentée par une ligne micro-ruban (vues de face et d'arrière).

Figure III.4 : Coefficient de réflexion (S_{11}) de l'antenne adaptée avec FR-4.

Figure III.5 : Rapport d'Onde Stationnaire (VSWR) de l'antenne avec FR-4.

Figure III.6 : Diagramme de rayonnement en 2D et 3D de l'antenne initiale avec FR-4.

Figure III.7 : Antenne sans fente en silicone alimentée par une ligne micro-ruban (vues de face et d'arrière).

Figure III.8 : Coefficient de réflexion (S_{11}) de l'antenne avec silicone.

Figure III.9 : Rapport d'Onde Stationnaire (VSWR) de l'antenne avec silicone.

Figure III.10 : Diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne avec silicone.

Figure III.11 : Réseau MIMO à deux éléments d'antenne initiale avec FR-4 (vues de face et d'arrière).

Figure III.12 : Paramètres S du réseau MIMO avec FR-4.

Figure III.13 : Diagramme de rayonnement en 2D et 3D du réseau MIMO avec FR-4.

Figure III.14 : Rapport d'Onde Stationnaire (VSWR) du réseau MIMO avec FR-4.

Figure III.15 : Gain de diversité du réseau MIMO avec FR-4.

Figure III.16 : Coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC) du réseau MIMO avec FR-4.

Figure III.17 : Réseau MIMO à deux éléments d'antenne initiale avec silicone (vues de face et d'arrière).

Figure III.18 : Paramètres S du réseau MIMO avec silicone.

Figure III.19 : Rapport d'Onde Stationnaire (VSWR) du réseau MIMO avec silicone.

Figure III.20 : Diagramme de rayonnement en 2D et 3D du réseau MIMO avec silicone.

Figure III.21 : Coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC) du réseau MIMO avec silicone.

Figure III.22 : Gain de diversité du réseau MIMO avec silicone.

Figure III.23 : Antenne avec fente en utilisant le substrat FR-4 (vues de face et d'arrière).

Figure III.24 : Coefficient de réflexion (S11) de l'antenne avec fente et FR-4.

Figure III.25 : Diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne avec fente et FR-4.

Figure III.26 : Rapport d'Onde Stationnaire (VSWR) de l'antenne avec fente et FR-4.

Figure III.27 : Antenne avec fente en utilisant le substrat silicone (vues de face et d'arrière).

Figure III.28 : Coefficient de réflexion (S11) de l'antenne avec fente et silicone.

Figure III.29 : Diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne avec fente et silicone.

Figure III.30 : Rapport d'Onde Stationnaire (VSWR) de l'antenne avec fente et silicone.

Figure III.31 : Réseau MIMO à deux éléments d'antenne avec fente et FR-4 (vues de face et d'arrière).

Figure III.32 : Paramètres S du réseau MIMO avec fente et FR-4.

Figure III.33 : Rapport d'Onde Stationnaire (VSWR) du réseau MIMO avec fente et FR-4.

Figure III.34 : Diagramme de rayonnement en 2D et 3D du réseau MIMO avec fente et FR-4.

Figure III.35 : Coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC) du réseau MIMO avec fente et FR-4.

Figure III.36 : Gain de diversité du réseau MIMO avec fente et FR-4.

Figure III.37 : Réseau MIMO à deux éléments d'antenne avec fente et silicone (vues de face et d'arrière).

Figure III.38 : Paramètres S du réseau MIMO avec fente et silicone.

Figure III.39 : Rapport d'Onde Stationnaire (VSWR) du réseau MIMO avec fente et silicone.

Figure III.40 : Diagramme de rayonnement en 2D et 3D du réseau MIMO avec fente et silicone.

Figure III.41 : Coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC) du réseau MIMO avec fente et silicone.

Figure III.42 : Gain de diversité du réseau MIMO avec fente et silicone.

Figure III.43 : Antenne sans fente en utilisant le substrat FR-4 alimentée par un câble coaxial (vues de face et d'arrière).

Figure III.44 : Représentation des trois couches de l'antenne.

Figure III.45 : Coefficient de réflexion (S11) de l'antenne sans fente et FR-4 en coaxial.

Figure III.46 : Rapport d'Onde Stationnaire (VSWR) de l'antenne sans fente et FR-4 en coaxial.

Figure III.47 : Diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne sans fente et FR-4 en coaxial.

Figure III.48 : Antenne sans fente en utilisant le substrat silicone alimentée par un câble coaxial (vues de face et d'arrière).

Figure III.49 : Coefficient de réflexion (S11) de l'antenne sans fente et silicone en coaxial.

Figure III.50 : Rapport d'Onde Stationnaire (VSWR) de l'antenne sans fente et silicone en coaxial.

Figure III.51 : Diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne sans fente et silicone en coaxial.

Figure III.52 : Réseau MIMO à deux éléments d'antenne sans fente et FR-4 en coaxial (vues de face et d'arrière).

Figure III.53 : Paramètres S du réseau MIMO sans fente et FR-4 en coaxial.

Figure III.54 : Rapport d'Onde Stationnaire (VSWR) du réseau MIMO sans fente et FR-4 en coaxial.

Figure III.55 : Diagramme de rayonnement en 2D et 3D du réseau MIMO sans fente et FR-4 en coaxial.

Figure III.56 : Coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC) du réseau MIMO sans fente et FR-4 en coaxial.

Figure III.57 : Gain de diversité du réseau MIMO sans fente et FR-4 en coaxial.

Figure III.58 : Réseau MIMO à deux éléments d'antenne sans fente et silicone en coaxial (vues de face et d'arrière).

Figure III.59 : Paramètres S du réseau MIMO sans fente et silicone en coaxial.

Figure III.60 : Rapport d'Onde Stationnaire (VSWR) du réseau MIMO sans fente et silicone en coaxial.

Figure III.61 : Diagramme de rayonnement en 2D et 3D du réseau MIMO sans fente et silicone en coaxial.

Figure III.62 : Coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC) du réseau MIMO sans fente et silicone en coaxial.

Figure III.63 : Gain de diversité du réseau MIMO sans fente et silicone en coaxial.

Figure III.64 : Antenne avec fente en utilisant le substrat FR-4 alimentée par un câble coaxial (vues de face et d'arrière).

Figure III.65 : Coefficient de réflexion (S11) de l'antenne avec fente et FR-4 en coaxial.

Figure III.66 : Rapport d'Onde Stationnaire (VSWR) de l'antenne avec fente et FR-4 en coaxial.

Figure III.67 : Diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne avec fente et FR-4 en coaxial.

Figure III.68 : Antenne avec fente en utilisant le substrat silicone alimentée par un câble coaxial (vues de face et d'arrière).

Figure III.69 : Coefficient de réflexion (S11) de l'antenne avec fente et silicone en coaxial.

Figure III.70 : Diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne avec fente et silicone en coaxial.

Figure III.71 : Rapport d'Onde Stationnaire (VSWR) de l'antenne avec fente et silicone en coaxial.

Figure III.72 : Réseau MIMO à deux éléments d'antenne avec fente et FR-4 en coaxial (vues de face et d'arrière).

Figure III.73 : Paramètres S du réseau MIMO avec fente et FR-4 en coaxial.

Figure III.74 : Rapport d'Onde Stationnaire (VSWR) du réseau MIMO avec fente et FR-4 en coaxial.

Figure III.75 : Diagramme de rayonnement en 2D et 3D du réseau MIMO avec fente et FR-4 en coaxial.

Figure III.76 : Coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC) du réseau MIMO avec fente et FR-4 en coaxial.

Figure III.77 : Gain de diversité du réseau MIMO avec fente et FR-4 en coaxial.

Figure III.78 : Réseau MIMO à deux éléments d'antenne avec fente et silicone en coaxial (vues de face et d'arrière).

Figure III.79 : Paramètres S du réseau MIMO avec fente et silicone en coaxial.

Figure III.80 : Rapport d'Onde Stationnaire (VSWR) du réseau MIMO avec fente et silicone en coaxial.

Figure III.81 : Diagramme de rayonnement en 2D et 3D du réseau MIMO avec fente et silicone en coaxial.

Figure III.82 : Coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC) du réseau MIMO avec fente et silicone en coaxial.

Figure III.83 : Gain de diversité du réseau MIMO avec fente et silicone en coaxial.

Figure III.84 : Prototype du réseau MIMO à 2 éléments d'une antenne sans fente alimentée par une ligne micro-ruban.

Figure III.85 : Paramètres S mesurés du réseau MIMO sans fente et ligne micro-ruban.

Figure III.86 : Prototype du réseau MIMO à 2 éléments d'une antenne avec fente alimentée par une ligne micro-ruban.

Figure III.87 : Paramètres S mesurés du réseau MIMO avec fente et ligne micro-ruban.

Figure III.88 : Prototype du réseau MIMO à 2 éléments d'une antenne sans fente alimentée par un câble coaxial.

Figure III.89 : Paramètres S mesurés du réseau MIMO sans fente et coaxial.

Figure III.90 : Prototype du réseau MIMO à 2 éléments d'une antenne avec fente alimentée par un câble coaxial.

Figure III.91 : Paramètres S mesurés du réseau MIMO avec fente et coaxial.

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Les substrats

Tableau I.2 : Les substrats

Tableau I.3 : Comparaison entre les différentes techniques d'alimentation

Tableau II.1 : Tableau comparatif des générations de réseaux mobiles

Tableau III.1 : Dimensions de l'antenne patch initiale silicone.

Tableau III.2 : Dimensions de l'antenne initiale avant l'adaptation.

Tableau III.3 : Dimensions de l'antenne initiale adaptée avec FR-4.

Tableau III.4 : Dimensions de l'antenne patch initiale silicone.

Tableau III.5 : Comparaison entre deux antennes sans fente, alimentées par une ligne micro-ruban.

Tableau III.6 : Comparaison des performances entre deux réseaux MIMO à deux éléments d'antennes sans fente, alimentées par ligne micro-ruban.

Tableau III.7 : Dimensions de l'antenne patch initiale silicone.

Tableau III.8 : Dimensions de l'antenne patch initiale silicone.

Tableau III.9 : Comparaison entre deux antennes avec fente, alimentées par une ligne micro-ruban.

Tableau III.10 : Comparaison des performances entre deux réseaux MIMO à deux éléments d'antennes avec fente, alimentées par ligne micro-ruban.

Tableau III.11 : Dimensions de l'antenne patch initiale silicone.

Tableau III.12 : Dimensions de l'antenne patch initiale silicone.

Tableau III.13 : Comparaison des performances entre deux antennes sans fente, alimentées par un câble coaxial.

Tableau III.14 : Comparaison des performances entre deux réseaux MIMO à deux éléments d'antennes sans fente, alimentées par un câble coaxial.

Tableau III.15 : Dimensions de l'antenne patch initiale silicone.

Tableau III.16 : Dimensions de l'antenne patch initiale silicone.

Tableau III.17 : Comparaison des performances entre deux antennes avec fente, alimentées par un câble coaxial.

Tableau III.18 : Comparaison des performances entre deux réseaux MIMO à deux éléments d'antennes avec fente, alimentées par un câble coaxial.

Tableau III.19 : Comparaison des performances entre les résultats de simulation et ceux obtenus par analyseur de réseau (sans fente, ligne micro-ruban).

Tableau III.20 : Comparaison des performances entre les résultats de simulation et ceux obtenus par analyseur de réseau (avec fente, ligne micro-ruban).

Tableau III.21 : Comparaison des performances entre les résultats de simulation et ceux obtenus par analyseur de réseau (sans fente, coaxial).

Tableau III.22 : Comparaison des performances entre les résultats de simulation et ceux obtenus par analyseur de réseau (avec fente, coaxial).

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'avènement des futures générations de réseaux mobiles, notamment la 5G et la 6G, entraîne une transformation profonde des technologies de communication, exigeant des dispositifs plus compacts, performants et adaptés à une densité croissante d'utilisateurs. Dans ce contexte, les antennes, éléments clés des systèmes sans fil, doivent être miniaturisées tout en maintenant des performances élevées en termes de bande passante, de gain, d'efficacité de rayonnement et d'isolation. La recherche de solutions technologiques permettant d'atteindre ces objectifs devient alors essentielle, en particulier à travers le choix des matériaux, des structures et des techniques d'intégration.

Ce mémoire s'inscrit dans cette problématique en étudiant les possibilités de miniaturisation des antennes patch pour applications 5G, en mettant l'accent sur l'utilisation de substrats à haute permittivité et sur l'introduction de techniques d'amélioration comme les structures à sol déflectueux (DGS). Il s'articule autour de trois chapitres principaux :

- **Chapitre I : Généralités sur les antennes**

Ce chapitre pose les bases théoriques nécessaires à la compréhension du fonctionnement des antennes. Il présente leurs caractéristiques principales (gain, directivité, bande passante, impédance, polarisation), ainsi que les différents types d'antennes utilisées en télécommunications, en insistant sur les antennes patch, largement adoptées pour leur compacité et leur intégration facile dans des circuits imprimés.

- **Chapitre II : Les réseaux d'antennes et leurs applications dans le domaine de la 5G**

Les réseaux d'antennes sont devenus indispensables dans les architectures 5G, notamment grâce à leur capacité à former des faisceaux directionnels (beamforming) et à supporter la technologie MIMO massive. Ce chapitre explore leur rôle, leurs principes de fonctionnement, ainsi que les défis liés à leur déploiement, comme l'interférence inter-éléments ou l'optimisation de l'espacement et de l'isolation entre antennes.

- **Chapitre III : Résultats et simulations**

Ce dernier chapitre présente les travaux de simulation réalisés sous CST Studio Suite, en comparant différentes configurations d'antennes patch utilisant deux types de substrats : FR-4 (classique) et silicone (haute permittivité). Il analyse l'impact du substrat sur les performances de l'antenne, notamment en termes de miniaturisation, de coefficient de réflexion (S_{11}), de diagramme de rayonnement, de VSWR, d'ECC et de gain. Des structures DGS sont également introduites pour améliorer l'adaptation d'impédance et réduire le couplage mutuel dans les réseaux MIMO.

Ce travail vise ainsi à proposer des approches de conception d'antennes compactes et performantes, adaptées aux contraintes des futures générations de réseaux mobiles, en conciliant exigences de miniaturisation et qualité de rayonnement.

Chapitre I :

Généralités sur les antennes

I.1.Introduction

Les antennes jouent un rôle fondamental dans les systèmes de communication modernes.[1]Elles sont un moyen de communication entre les ondes électromagnétiques qui se propagent dans l'espace et les signaux électriques employés par les appareils électroniques. Les antennes sont utilisées dans de nombreuses applications, allant des télécommunications aux radars en passant par la radio et la télévision, pour transmettre et recevoir des informations sur différentes fréquences.[2]

Elles sont développées selon les exigences particulières de chaque application : certaines sont orientées, l'émission et la réception sont concentrées dans une direction spécifique, d'autres sont omnidirectionnelles, captent ou émettent dans toutes les directions. Grâce aux progrès technologiques, il est possible de concevoir des antennes de plus en plus performantes, compactes et adaptées aux nouvelles exigences des communications sans fil, telles que la 5G, l'Internet des Objets (IoT) et les satellites.[3]

Les antennes sont étudiées en se basant sur divers paramètres essentiels tels que le gain, la directivité, l'impédance et la polarisation. Il est crucial de comprendre comment ils fonctionnent afin d'améliorer la transmission des signaux et d'assurer une communication efficace dans divers environnements.[4]

Dans ce chapitre, nous commencerons par présenter les concepts fondamentaux relatifs aux antennes, en mettant un accent particulier sur les antennes, leurs principes de fonctionnement, ainsi que leurs caractéristiques essentielles.

I.2. Définition d'une antenne

Une antenne est un dispositif radioélectrique servant à convertir des signaux électriques en ondes électromagnétiques lors de l'émission, et inversement lors de la réception. Elle permet ainsi la transmission et la réception d'informations sans fil, jouant un rôle essentiel dans les systèmes de communication modernes tels que la radiodiffusion, les réseaux Wi-Fi, les satellites, ou encore les télécommunications mobiles.[1]

Les antennes remplissent deux fonctions fondamentales dans un système de communication sans fil :

- **Antenne d'émission** : Elles convertissent les signaux électriques émis par un dispositif électronique en ondes électromagnétiques, qui se propagent ensuite dans l'espace afin d'atteindre d'autres antennes situées à distance. L'efficacité de cette conversion dépend

notamment de paramètres tels que la fréquence d'opération, la polarisation et la directivité de l'antenne.[1]

- **Antenne Réception** : Elles interceptent les ondes électromagnétiques présentes dans l'environnement et les transforment en signaux électriques exploitables par les circuits du récepteur. Cette étape est cruciale pour assurer la qualité et la fiabilité de la communication.[5]

Ces deux fonctions permettent de maintenir une transmission bidirectionnelle fluide et efficace, sans nécessiter de connexion filaire entre les dispositifs communicants.

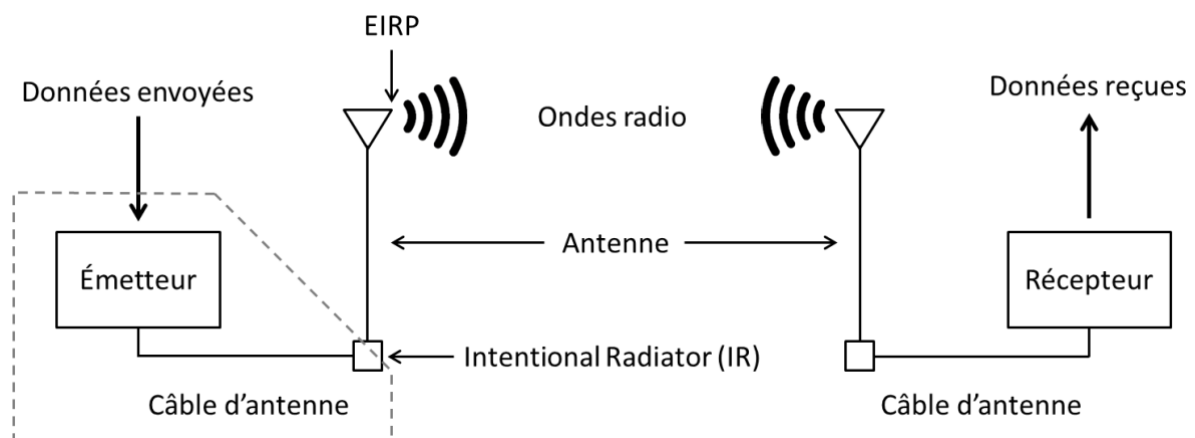


Figure I.1: Schéma de base d'un système de communication sans fil.

I.3. Importance des Antennes

Les antennes sont indispensables dans de nombreux secteurs technologiques :

- **Télécommunications Mobiles** : Elles relaient les signaux entre les appareils mobiles et les infrastructures réseau, assurant une connectivité continue pour les utilisateurs. [6]
- **Réseaux Wi-Fi** : Elles diffusent des signaux sans fil permettant aux appareils de se connecter à Internet et de communiquer entre eux au sein d'un réseau local. [7]
- **Radiodiffusion** : Elles transmettent des signaux audio et vidéo aux récepteurs grand public, rendant possible la diffusion de programmes radio et télévisés. [8]
- **Systèmes de Navigation** : Les antennes GPS reçoivent des signaux satellites pour fournir des informations précises de positionnement et de synchronisation. [9]
- **Communications Satellitaires** : Elles permettent les échanges de données entre stations terrestres et satellites, facilitant les communications globales et l'accès à des services tels que la télévision par satellite et l'Internet haut débit.[10]

L'évolution constante des technologies d'antennes contribue à l'amélioration des performances des systèmes de communication, répondant aux besoins croissants en termes de vitesse, de capacité et de fiabilité dans notre société connectée.[11]

I.4. Historique

Les antennes, éléments fondamentaux des systèmes de communication sans fil, ont connu une évolution remarquable, jalonnée par des avancées scientifiques et technologiques majeures. Depuis les premières expérimentations sur les ondes électromagnétiques[12] jusqu'aux systèmes sophistiqués actuels, leur développement met en évidence l'interaction constante entre la physique fondamentale et l'ingénierie appliquée.[1]

Les perspectives futures dans ce domaine présentent plusieurs défis scientifiques et technologiques notables. L'optimisation des antennes pour 6G, ainsi que pour les applications émergentes comme les communications quantiques, constitue un axe de recherche particulièrement actif.[13] Par ailleurs, leur intégration dans des environnements complexes tels que les villes intelligentes et les réseaux de l'Internet des objets (IoT) à haute densité, tout en assurant une consommation énergétique réduite, représente un enjeu majeur.[14]

En somme, l'évolution des antennes au cours du siècle et demi écoulé, depuis les travaux pionniers de Heinrich Hertz jusqu'aux infrastructures 5G contemporaines[15], témoigne d'un progrès continu et soutenu. Cette dynamique répond aux exigences croissantes en matière de débit, de latence et de connectivité ubiquitaire, consolidant ainsi le rôle central des antennes dans l'écosystème des télécommunications modernes.

I.5. Les caractéristiques des antennes

Les antennes sont généralement définies par un ensemble de paramètres essentiels, qui permettent de comparer leurs performances et de distinguer les différentes structures. Les principaux paramètres sont les suivants :

I.5.1. Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement constitue une caractéristique fondamentale d'une antenne, décrivant la répartition spatiale de l'énergie électromagnétique qu'elle émet ou reçoit. Il représente la variation de l'intensité du rayonnement en fonction des directions dans l'espace, généralement exprimée en coordonnées sphériques (angles azimutal et d'élévation)[1]. Cette représentation met en évidence la manière dont l'antenne privilégie certaines directions de propagation au détriment d'autres.

Traditionnellement, le diagramme de rayonnement est analysé dans deux plans orthogonaux :

- **Le plan E** : contient le vecteur du champ électrique et l'axe de propagation.
- **Le plan H** : contient le vecteur du champ magnétique et l'axe de propagation.

Ces deux plans sont perpendiculaires et permettent une analyse complète des propriétés directionnelles de l'antenne. [1]

Le diagramme de rayonnement révèle généralement plusieurs zones appelées *lobes*, qui correspondent à des directions spécifiques où l'antenne rayonne de manière significative. On distingue principalement :

- **Le lobe principal** : direction dans laquelle l'antenne émet ou reçoit le maximum d'énergie.
- **Les lobes secondaires** : zones où l'antenne rayonne avec une intensité moindre, souvent indésirables car pouvant entraîner des interférences ou des pertes d'efficacité. [16]

La représentation graphique du diagramme de rayonnement peut être effectuée en :

- **Coordonnées polaires** : offrant une vue circulaire de la distribution angulaire de l'énergie.
- **Coordonnées cartésiennes** : permettant une analyse linéaire de la variation de l'intensité en fonction de l'angle. [1]

Ces représentations facilitent l'interprétation des performances directionnelles de l'antenne et sont essentielles pour son dimensionnement et son intégration dans un système de communication.

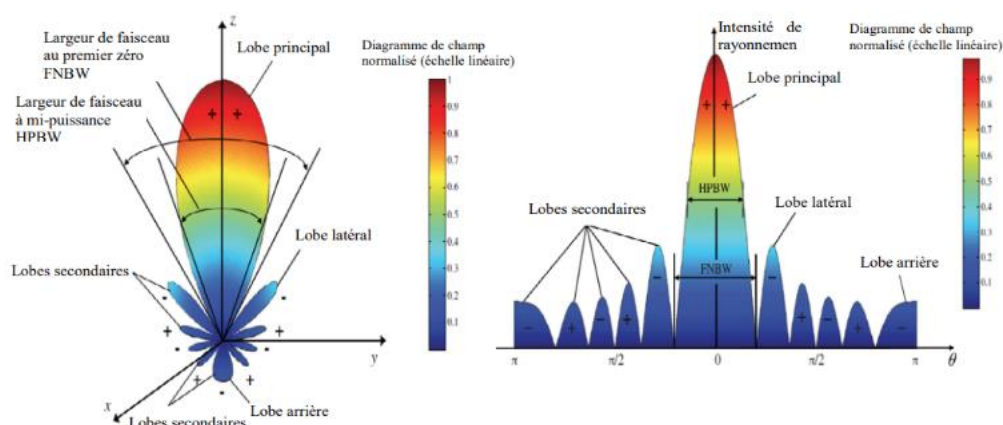


Figure I.2 : Lobes de rayonnement et largeur de faisceau d'un diagramme de rayonnement.

Les antennes sont classifiées selon la distribution spatiale de leur rayonnement, représentée par leur diagramme de rayonnement. Trois formes typiques sont couramment utilisées pour décrire cette propriété :

- **Antenne isotrope** : Il s'agit d'une antenne théorique qui rayonne uniformément dans toutes les directions de l'espace, formant un diagramme de rayonnement sphérique. Bien qu'irréalisable en pratique, elle sert de référence pour évaluer les performances des antennes réelles en termes de gain et de directivité. (**Figure I.3 : c**)
- **Antenne directionnelle** : Ce type d'antenne concentre l'énergie rayonnée dans une direction spécifique, offrant ainsi un gain plus élevé dans cette direction par rapport aux autres. Elle est utilisée dans des applications nécessitant une portée accrue ou une communication ciblée, comme les liaisons point-à-point. (**Figure I.3 : b**)
- **Antenne omnidirectionnelle** : Conçue pour émettre ou recevoir des signaux de manière uniforme dans un plan donné, généralement le plan horizontal, cette antenne présente un diagramme de rayonnement en forme de tore. Elle est idéale pour des applications nécessitant une couverture étendue autour de l'antenne, comme la radiodiffusion ou les réseaux cellulaires. (**Figure I.3 : a**) [17]

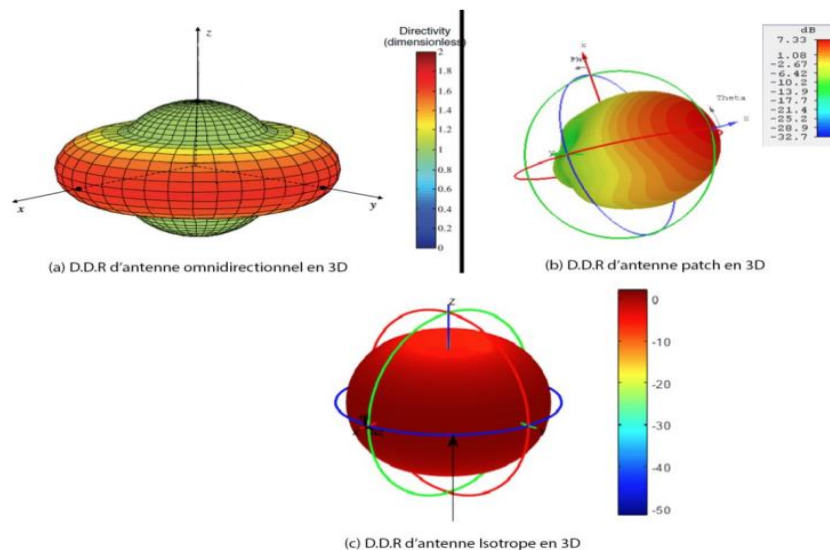


Figure I.3 : DDR des antennes (a) Omnidirectionnel (b) Directionnel et (c) Isotrope.

I.5.2. Directivité

La directivité est une caractéristique fondamentale d'une antenne, exprimant sa capacité à concentrer l'énergie rayonnée dans une direction spécifique. Selon la norme IEEE Std 145-1983, la directivité d'une antenne dans une direction donnée est définie comme le rapport entre

l'intensité de rayonnement dans cette direction et l'intensité de rayonnement moyenne calculée sur l'ensemble des directions.

Mathématiquement, la directivité D s'exprime par :

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

Où :

- U : intensité de rayonnement dans une direction donnée (W/sr),
- U_{moy} : L'intensité de rayonnement moyenne sur toutes les directions,
- P_{ray} : puissance totale rayonnée par l'antenne (W).

Lorsque la direction n'est pas spécifiée, la directivité maximale D_{max} est considérée, correspondant à la direction d'intensité maximale du rayonnement :

$$D_{\text{max}} = \frac{U_{\text{max}}}{U_{\text{moy}}} = \frac{4\pi U_{\text{max}}}{P_{\text{ray}}} \quad .II$$

Où :

- D_{max} : La directivité maximale.
- U_{max} : L'intensité de rayonnement maximale.

Remarques importantes :

- Pour une antenne isotrope idéale, qui rayonne uniformément dans toutes les directions, la directivité est $D=1$.
- Pour les antennes réelles, la directivité est généralement supérieure à 1 ($D>1$), indiquant une concentration de l'énergie dans certaines directions.
- Une antenne est qualifiée de **directive** lorsque sa directivité est significativement supérieure à 1, c'est-à-dire lorsqu'elle concentre une grande partie de son énergie dans une direction spécifique.[18]

1.5.3. Gain

Le **gain** d'une antenne est une mesure essentielle de sa capacité à concentrer l'énergie rayonnée dans une direction spécifique. Il combine la **directivité** de l'antenne et son **rendement de rayonnement**.

Selon la norme IEEE Std 145-1983, le gain dans une direction donnée est défini comme le rapport entre l'intensité de rayonnement dans cette direction et l'intensité de rayonnement moyenne d'une antenne isotrope idéale, qui rayonne uniformément dans toutes les directions.[17]

Mathématiquement, le gain $G(\theta, \phi)$ s'exprime par :

$$G(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{U_{\text{iso}}} = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{\text{in}}} \quad .\text{III}$$

Où :

- $U(\theta, \phi)$: intensité de rayonnement dans la direction spécifiée,
- U_{iso} : intensité de rayonnement moyenne d'une antenne isotrope,
- P_{in} : puissance d'entrée de l'antenne.

Le gain peut également être exprimé en fonction de la directivité D et du rendement de rayonnement η de l'antenne :

$$G = \eta \cdot D \quad .\text{IV}$$

Où :

- η : rendement de rayonnement, défini comme le rapport de la puissance rayonnée
- P_{rad} à la puissance d'entrée P_{in} :

$$\eta = \frac{P_{\text{rad}}}{P_{\text{in}}} \quad .\text{V}$$

- D : directivité de l'antenne.[1]

Ainsi, le gain tient compte à la fois de la capacité de l'antenne à concentrer l'énergie dans une direction (directivité) et de son efficacité à convertir la puissance d'entrée en énergie rayonnée (rendement).

Le gain est souvent exprimé en décibels par rapport à une antenne isotrope (dBi) :

$$G_{\text{dBi}} = 10 \log_{10} (G) \quad .\text{VI}$$

Une antenne avec un gain élevé concentre davantage d'énergie dans une direction spécifique, ce qui est essentiel dans des applications telles que les liaisons point à point, les systèmes radar ou les communications satellites.[18]

I.5.4. Bande Passante

La bande passante d'une antenne correspond à l'intervalle de fréquences au sein duquel les performances de l'antenne respectent des critères prédéfinis liés à son bon fonctionnement.[1][4] Elle est généralement centrée autour d'une fréquence centrale et s'étend des deux côtés de celle-ci.

Les paramètres pris en compte pour définir cette bande peuvent inclure l'impédance d'entrée, le diagramme de rayonnement, la largeur de faisceau, la polarisation, le niveau des lobes secondaires, le gain, la direction du faisceau, ou encore l'efficacité de rayonnement.[1][18]

L'intervalle de fréquences admissible est donc limité par une fréquence minimale f_1 et une fréquence maximale f_2 , ce qui permet de définir la **bande passante absolue** Δf par la relation suivante :

$$\Delta f = f_2 - f_1 \quad .VII$$

Par ailleurs, on définit également la **bande passante relative** (ou normalisée), exprimée en pourcentage, comme étant le rapport entre la bande passante absolue et la fréquence centrale f_0 :

$$\Delta f_{\text{relative}} = \frac{f_2 - f_1}{f_0} \times 100 \quad .VIII$$

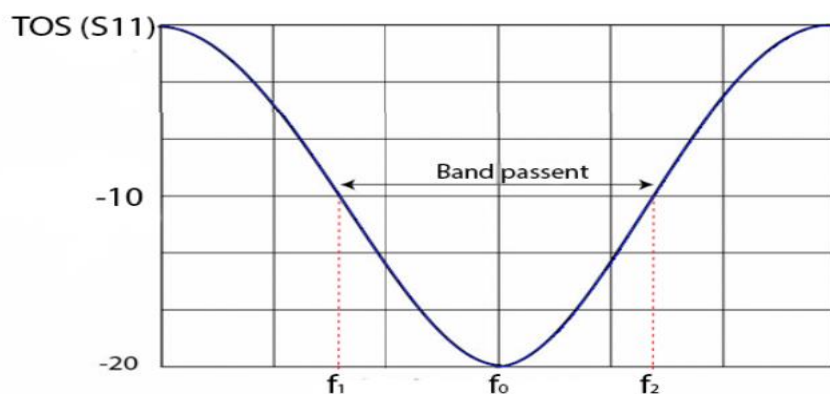


Figure I.4 : Bande passante à partir du TOS (ou S11).

De plus, il est fréquent de définir la bande passante en pourcentage comme suit :

$$B(\%) = 200 \cdot \frac{f_{\text{max}} - f_{\text{min}}}{f_{\text{max}} + f_{\text{min}}} \quad .IX$$

En hyperfréquences, la **bande passante** d'une antenne est fréquemment définie comme l'intervalle de fréquences pour lequel le **coefficient de réflexion à l'entrée** de l'antenne, noté, est **inférieur à -10 dB** (voir figure 1.5). Cette condition indique une bonne adaptation d'impédance, impliquant une faible quantité d'énergie réfléchie et un transfert efficace du signal.[4][16]

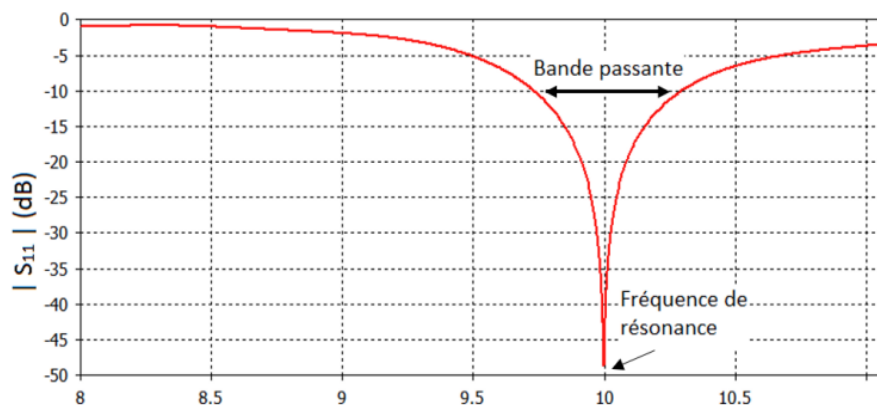


Figure I.5 : Coefficient de réflexion à l'entrée d'un patch rectangulaire résonant à 10 GHz

Classification des antennes selon leur bande passante :

1. **Bande étroite** ($\Delta f/f_0 < 10\%$) : Antennes résonantes (dipôles $\lambda/2$, antennes patch).
2. **Bande large** ($\Delta f/f_0 \geq 20\%$) : Antennes spirales, antennes Vivaldi.
3. **Ultra-large bande (ULB)** ($\Delta f/f_0 \gg 100\%$) : Antennes pour radars impulsifs ou communications UWB.[18]

I.5.5. Impédance

Le comportement électrique d'une antenne peut être modélisé de manière équivalente par un **circuit RLC série**, c'est-à-dire un circuit passif dans lequel le courant et la tension ne sont pas nécessairement en phase. Dans ce contexte, l'**impédance d'entrée** de l'antenne peut être exprimée par la relation complexe suivante :

$$Z(\omega) = R(\omega) + jX(\omega) \quad .X$$

Où :

- **R(ω)** Représente la **résistance totale**, donnée par la somme de la **résistance de rayonnement R_r** et de la **résistance de pertes R_p** , soit $R = R_r + R_p$
- **X(ω)** Est la **réactance**, exprimée par la relation :

$$X = L\omega - \frac{1}{C\omega} \quad .XI$$

Avec :

- $\omega = 2\pi f$: la **pulsation** (en rad/s),
- **L** : l'inductance (H),
- **C** : la capacité (F),
- **J** : l'unité imaginaire.

Ce modèle permet de représenter le comportement fréquentiel de l'antenne en tenant compte à la fois de ses capacités de rayonnement et de ses pertes internes.[19]

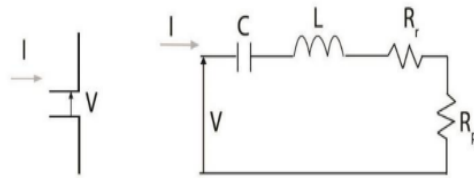


Figure I.6 : Modèle électrique d'une antenne

I.5.6. Polarisation

La polarisation d'une antenne correspond à l'orientation du champ électrique \vec{E} de l'onde électromagnétique qu'elle rayonne ou reçoit dans le champ lointain. Elle décrit plus précisément la direction dans laquelle l'intensité du champ électrique est maximale.[20]

On distingue généralement trois types de polarisation : linéaire, circulaire et elliptique.

La polarisation linéaire se produit lorsque la direction du vecteur \vec{E} reste constante dans le temps ; sa trajectoire est alors une ligne droite. Un exemple typique d'antenne linéairement polarisée est l'antenne dipôle.

En revanche, la polarisation est dite circulaire lorsque le vecteur \vec{E} décrit un cercle au fil du temps, et elliptique lorsqu'il trace une ellipse. Ces cas se présentent lorsque les composantes orthogonales du champ électrique présentent un déphasage.

La connaissance du type de polarisation est essentielle pour garantir une transmission efficace entre antennes, car une mauvaise correspondance de polarisation peut entraîner des pertes importantes de signal.

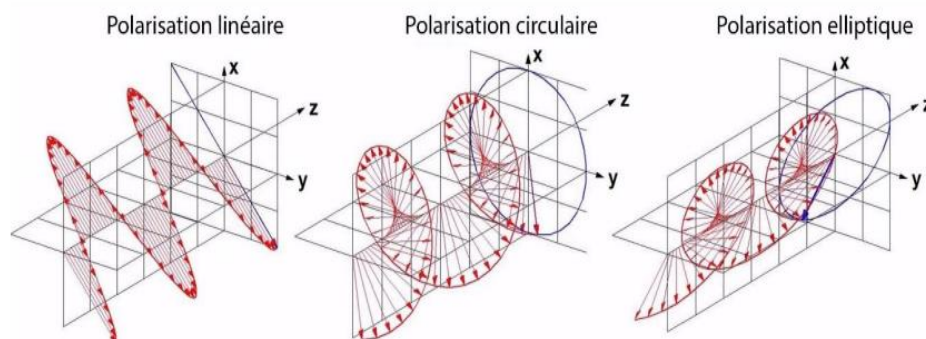


Figure I.7 : Les trois types de polarisation

I.5.7. Coefficient de réflexion et rapport d'onde stationnaire

De manière générale, lorsqu'une onde incidente passe d'un milieu de propagation à un autre ou rencontre une nouvelle interface, elle se divise en deux composantes : une partie est réfléchiée, tandis que l'autre est transmise dans le second milieu. Le coefficient de réflexion d'une antenne correspond au rapport entre l'amplitude de l'onde réfléchiée et celle de l'onde incidente. Lorsqu'une antenne est connectée au port 1 d'un analyseur de réseau, ce coefficient est équivalent au paramètre S_{11} [21]

Lorsqu'une antenne d'impédance Z_a est reliée à une source à travers une ligne de transmission d'impédance caractéristique Z_c (généralement égale à 50Ω), le coefficient de réflexion peut être exprimé par la relation suivante :

$$\Gamma = \frac{Z_A - Z_c}{Z_A + Z_c} \quad .XII$$

- $|\Gamma| = 0$: adaptation parfaite (aucune onde réfléchiée)
- $|\Gamma| = 1$: onde entièrement réfléchiée (mauvaise adaptation)

Un faible coefficient de réflexion indique une meilleure adaptation de l'antenne à la ligne. Par exemple, un coefficient de réflexion de -10 dB signifie qu'environ 90 % de la puissance est transmise à l'antenne, ce qui implique des pertes réduites[1]. Ce coefficient est souvent exprimé en décibels (dB) et noté $|S_{11}|$, défini par :

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

- $S_{11} = -10\text{dB}$ signifie que 90 % de la puissance est transmise à l'antenne.

Le rapport d'ondes stationnaires (ROS), ou SWR en anglais, représente le rapport entre les tensions maximale et minimale de l'onde stationnaire mesurées à l'entrée de l'antenne. Il est donné par la formule :

$$ROS = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad .XIV$$

- $ROS = 1$: adaptation parfaite
- Plus le ROS est élevé, plus les pertes par réflexion sont importantes.[1][22]

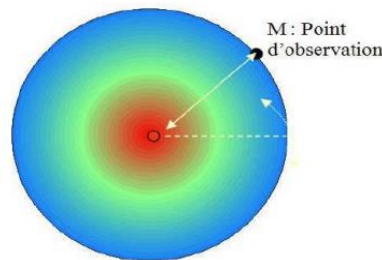
I.6. Différents types d'antennes

Il existe une grande variété de types d'antennes, mais dans cette section, nous nous contenterons de présenter quelques-unes des principales, classées par ordre croissant de directivité des moins directives aux plus directives.[23]

I.6.1. Antenne isotrope

L'antenne isotrope est un modèle théorique idéal qui ne peut pas être réalisé physiquement. Elle émet la même densité de puissance dans toutes les directions de l'espace, sans privilégier aucun axe de rayonnement. De ce fait, elle est dite non directive. Bien qu'irréaliste, cette antenne fictive est utilisée comme référence de base pour comparer les performances (notamment le gain) des antennes réelles.

Figure I.8 : Rayonnement d'une antenne isotrope



I.6.2. Antenne Monopôle

I.6.2.1. Quart d'onde

L'antenne monopôle, également appelée antenne quart d'onde ou antenne de Marconi, est constituée d'un seul brin rayonnant associé à un plan de masse. Comme son nom l'indique, la longueur de l'élément rayonnant est égale à un quart de la longueur d'onde de fonctionnement.[24]

Ce type d'antenne est généralement installé au-dessus d'un plan de masse, qui joue un rôle essentiel dans le rayonnement, comme illustré dans la figure ci-dessous.

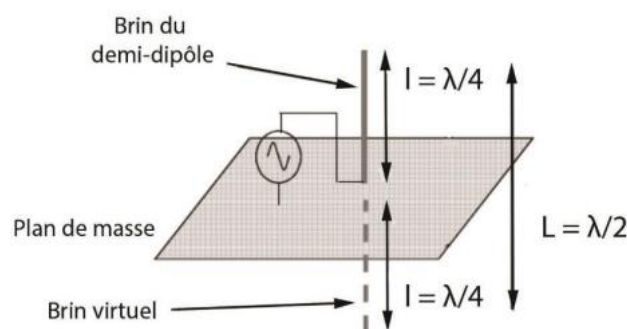


Figure I.9 : Antenne monopôle quart d'onde.

Le **plan de masse** joue un rôle fondamental dans le fonctionnement de l'antenne quart d'onde. En réalité, cette antenne représente seulement la **moitié supérieure** d'un dipôle, le plan de masse agissant comme un **miroir** qui crée une **image virtuelle** de l'antenne, complétant ainsi la structure rayonnante.

L'antenne quart d'onde est **omnidirectionnelle** dans le plan horizontal, ce qui signifie qu'elle rayonne uniformément dans toutes les directions sur ce plan. Son **gain** typique varie entre **1,3 et 1,6** (soit environ **1,14 à 2 dBi**), comparable à celui d'un dipôle.[24]

I.6.2.2. Ground Plane

L'antenne **ground plane** est une variante de l'antenne quart d'onde, dans laquelle le **plan de masse** est subtilement remplacé par **trois ou quatre brins inclinés**, appelés **radiaux** ou **radiants**[24]. Ces brins jouent le rôle de plan de masse artificiel. Le **gain** de ce type d'antenne reste équivalent à celui de l'antenne quart d'onde.

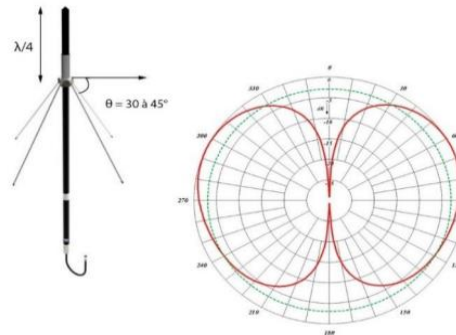


Figure I.10 : L'antenne ground plane et le diagramme associé

L'**inclinaison des radiants** vers le bas, généralement entre **30° et 45°**, permet d'**adapter l'impédance** de l'antenne à environ **50 Ω**, ce qui facilite son adaptation à la plupart des lignes de transmission standards.

I.6.3. Antenne Dipôle

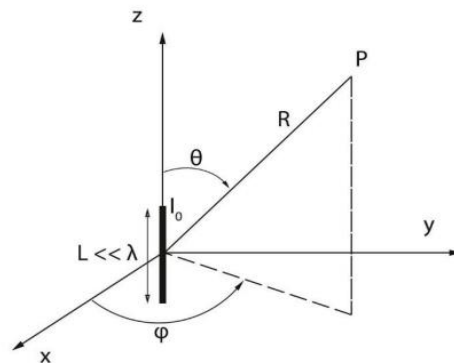
Le dipôle est l'un des types d'antennes les plus couramment utilisés. En fonction de sa longueur, on distingue principalement trois variantes : le dipôle très court, le dipôle court, et le dipôle demi-onde[25]. Ce type d'antenne est largement employé dans de nombreuses applications, notamment sur les bandes VHF (Very High Frequency) et UHF (Ultra High Frequency).

I.6.3.1. Dipôle très court

Aussi appelé doublet de Hertz, le dipôle très court est constitué d'un fil rectiligne de longueur **L** très inférieure à la longueur d'onde ($L \ll \lambda$), généralement orienté selon l'axe vertical (Oz) et parcouru par un courant d'excitation **I₀**. On considère que ce courant a une amplitude constante le long de toute la longueur du fil.

On parle de dipôle ou de doublet, car des charges électriques de signes opposés se forment aux extrémités du conducteur, créant ainsi le rayonnement électromagnétique caractéristique de ce type d'antenne.[19]

Figure I.11 : Antenne doublets d'Hertz.



I.6.3.2. Dipôle court

Lorsque la longueur du dipôle L est telle que $\lambda/50 < L < \lambda/10$, il est nécessaire de prendre en compte une distribution de courant non uniforme, généralement triangulaire, le long de l'antenne.

Les principales caractéristiques de ce type de dipôle incluent une directivité donnée par :

$$D(\theta) = 1,5 \cdot \sin^2(\theta) \quad .XV$$

Son diagramme de rayonnement est similaire à celui du doublet d'Hertz, avec un rayonnement maximal dans le plan perpendiculaire à l'antenne.[19]

I.6.3.3. Dipôle demi-onde

Le **dipôle demi-onde** est l'antenne résonante la plus couramment utilisée dans les **systèmes de télécommunication modernes**. Dans ce cas, la longueur de l'antenne est égale à la **moitié de la longueur d'onde**. La distribution du **courant efficace** le long de l'antenne est supposée être **sinusoïdale**, ce qui permet d'obtenir une bonne efficacité de rayonnement et une adaptation facilitée.

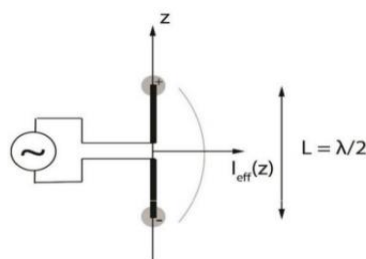


Figure I.12 : Antenne demi-onde.

Une **antenne dipôle**, et plus précisément le **dipôle demi-onde**, est composé de **deux brins conducteurs** (ou tiges, ou tubes métalliques), dont **chacun mesure un quart de la longueur d'onde** de la fréquence émise. Ainsi, la longueur totale de l'antenne correspond à **une demi-longueur d'onde**. [19]

I.6.3.4. Dipôle replié

Le **dipôle replié**, également connu sous le nom de **dipôle trombone**, est une variante du dipôle classique. Cette configuration est fréquemment utilisée afin d'**améliorer la bande passante** de l'antenne. [24]

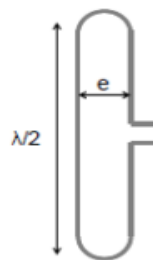


Figure I.13 : Antenne dipôle replié.

Le **diagramme de rayonnement** du dipôle replié est **identique** à celui d'un dipôle classique. Toutefois, sa **résistance d'entrée** est environ **quatre fois plus élevée**, atteignant généralement **environ 300 Ω**.



Figure I.14 : L'antenne dipôle et son diagramme de rayonnement.

I.6.4. Antenne Hélicoïdale (Hélice)

L'**antenne hélicoïdale** est une variante particulière de l'antenne monopôle, dont le conducteur rayonnant est **enroulé en forme d'hélice**. Elle peut fonctionner selon **deux modes principaux** : le **mode normal** et le **mode axial**. [26] [19]

Cette antenne est conçue pour fonctionner dans une large **plage de fréquences**, généralement comprise entre **30 MHz et 3 GHz**, ce qui la rend adaptée aux bandes **VHF** et **UHF**.

I.6.4.1. Antenne hélice radiale

Il s'agit d'une hélice dont le diamètre est inférieur à la longueur d'onde, ce qui favorise le rayonnement dans le plan perpendiculaire à l'axe de l'antenne. Son diagramme de rayonnement ressemble à celui d'une antenne demi-onde, et son gain est d'environ -3 dB.

I.6.4.2. Antenne hélice axiale

L'hélice axiale est utilisée lorsque l'on nécessite un gain élevé et une polarisation circulaire. Elle émet un rayonnement dans la direction de son axe avec une polarisation circulaire. Le rayonnement est maximal le long de l'axe de l'hélice lorsque le diamètre est proche de la longueur d'onde. De plus, pour un diamètre et un pas d'enroulement donnés, c'est le nombre de tours qui permet d'augmenter la directivité de l'hélice.[26]

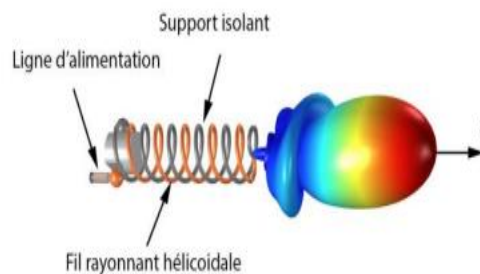


Figure I.15 : Antenne hélice en mode de rayonnement axial.

I.6.5. Antenne Yagi

L'antenne Yagi, également connue sous le nom de Yagi-Uda, a été conçue pour la première fois par Shintaro Uda et Hidetsudo Yagi. Elle est l'une des antennes les plus populaires auprès du grand public, en particulier pour les courtes longueurs d'onde allant jusqu'à la bande UHF. L'antenne Yagi fait partie d'un réseau linéaire composé d'un élément alimenté (ou élément principal), d'un élément réflecteur et d'un ou plusieurs éléments directeurs.

Cette antenne est largement utilisée en raison de sa simplicité de conception et de son gain directionnel élevé. Le gain et la directivité de l'antenne sont liés au nombre d'éléments, et donc à sa longueur. En théorie, pour améliorer le gain de l'antenne, il suffirait d'ajouter davantage d'éléments directeurs. Cependant, cette approche présente des limites : la longueur accrue de l'antenne peut compliquer sa réalisation et son installation. De plus, le gain n'augmente pas proportionnellement au nombre d'éléments et atteint rapidement un plafond.

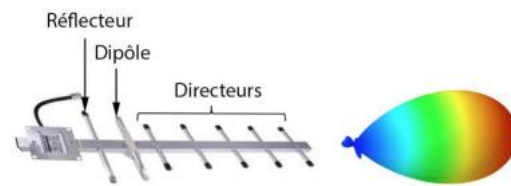


Figure I.16 : L'antenne Yagi et son diagramme de rayonnement.

L'antenne Yagi est illustrée dans la Figure 1.16, où un dipôle est combiné avec des éléments passifs (réflecteur et directeurs) pour améliorer la directivité du diagramme de rayonnement. La directivité de l'antenne Yagi est directement liée à son gain. Par exemple, une Yagi à 7 éléments, avec un gain de 12 dBi, présente un angle d'ouverture en polarisation horizontale d'environ 40 degrés à -3 dB.[19]

I.6.6. Antenne cornet

Les antennes cornets sont des antennes à ouverture, généralement alimentées par un guide d'onde métallique, qui peut être de section rectangulaire, circulaire ou elliptique. Elles représentent la terminaison naturelle d'un guide d'onde, ce qui en fait une solution idéale pour les applications en hyperfréquences [27], grâce aux excellentes propriétés de propagation de ce type de ligne.

Leur structure entièrement métallique leur confère des pertes très faibles. Par ailleurs, leur forme géométrique particulière leur permet d'atteindre une directivité élevée. En pratique, le gain maximal d'une antenne cornet est généralement de l'ordre de 20 dBi.

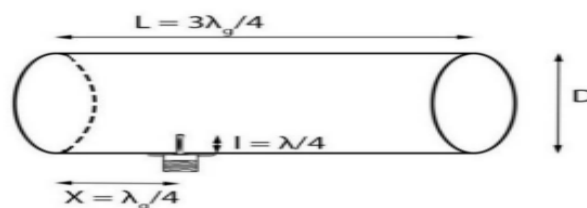


Figure I.17 : Schéma de principe d'un guide d'onde.

Le principe du guide d'onde consiste à accroître la directivité d'une antenne quart d'onde en l'installant à l'intérieur d'une section de guide d'onde, comme le montre la Figure I.17.

Selon la géométrie du cornet utilisé, il est possible de concentrer le rayonnement dans le plan **E**, dans le plan **H**, ou simultanément dans les deux, permettant ainsi d'ajuster la finesse du diagramme de rayonnement en fonction des besoins de l'application.

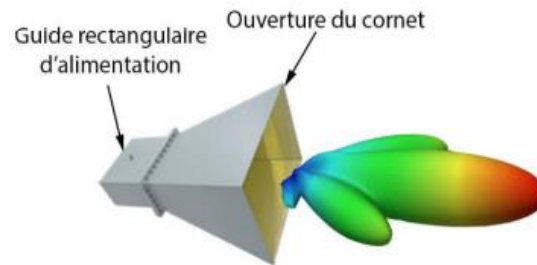


Figure I.18 : Antenne cornet rectangulaire et son diagramme de rayonnement.

I.6.7. Réflecteur

La directivité et le gain d'une antenne cornet peuvent être sensiblement améliorés en l'associant à un réflecteur parabolique. L'antenne ainsi obtenue, communément appelée **antenne parabolique**, est l'une des antennes les plus directives, ce qui la rend particulièrement adaptée aux applications au-delà de 1 GHz.

Une antenne à réflecteur se compose d'une source rayonnante — généralement un dipôle ou un cornet — placée au foyer d'un réflecteur parabolique. Ce dernier concentre les ondes électromagnétiques reçues ou émises, renforçant ainsi la directivité de l'ensemble. La **forme** du réflecteur influe sur la directivité de la source, tandis que sa **position** par rapport à celle-ci affecte l'adaptation d'impédance.[24]

Les antennes paraboliques se distinguent par leur **très forte directivité**, avec un gain typique variant entre **10 et 60 dB**. Le gain de ce type d'antenne croît avec le diamètre **D** du réflecteur selon la relation suivante :

$$G = 6 \left(\frac{D}{\lambda} \right)^2 \quad .XVI$$

Par ailleurs, l'**angle d'ouverture** diminue à mesure que le gain augmente, selon :

$$\theta = \frac{70\lambda}{D} \quad .XVII$$

Où λ est la longueur d'onde.

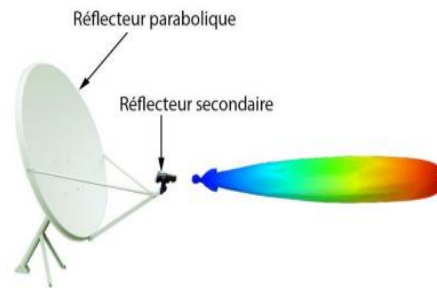


Figure I.19 : L'antenne parabole et son diagramme de rayonnement.

I.6.8. Antenne patch

Une antenne patch, également appelée antenne micro-ruban, est une antenne plane composée d'une fine plaque métallique, appelée **élément rayonnant**, déposée sur un **substrat diélectrique** caractérisé par sa **permittivité relative ϵ_r** . La face inférieure du substrat est généralement entièrement recouverte d'un **plan de masse** métallique. Cette configuration est illustrée dans la figure I.20 [28].

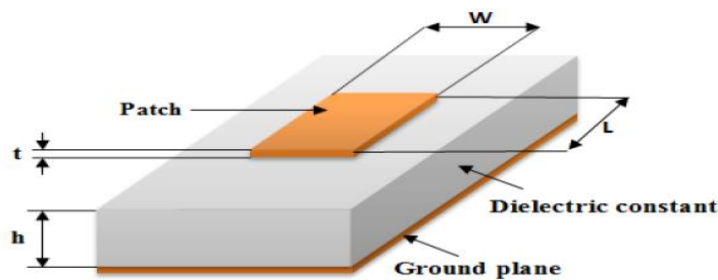


Figure I.20 : Le schéma d'une antenne imprimée rectangulaire.

Les principaux paramètres physiques et géométriques associés à cette structure sont les suivants :

- Les dimensions de l'élément rayonnant, à savoir sa longueur (L) et sa largeur (W) ;
- L'épaisseur du substrat diélectrique (h), généralement choisie suffisamment fine par rapport à la longueur d'onde à transmettre ;
- La tangente de pertes ($\tan \delta$) du substrat, où les pertes sont principalement dues à l'effet Joule ;
- La permittivité relative du substrat (ϵ_r)[29].

I.6.8.1. L'élément rayonnant

L'élément rayonnant, également appelé patch, est généralement réalisé à partir de matériaux conducteurs tels que le cuivre, l'argent ou l'or. Sa forme peut varier en fonction des besoins, et son choix est déterminé par l'application visée ainsi que par les paramètres à optimiser, tels que la bande passante, la puissance rayonnée ou encore le gain [30].

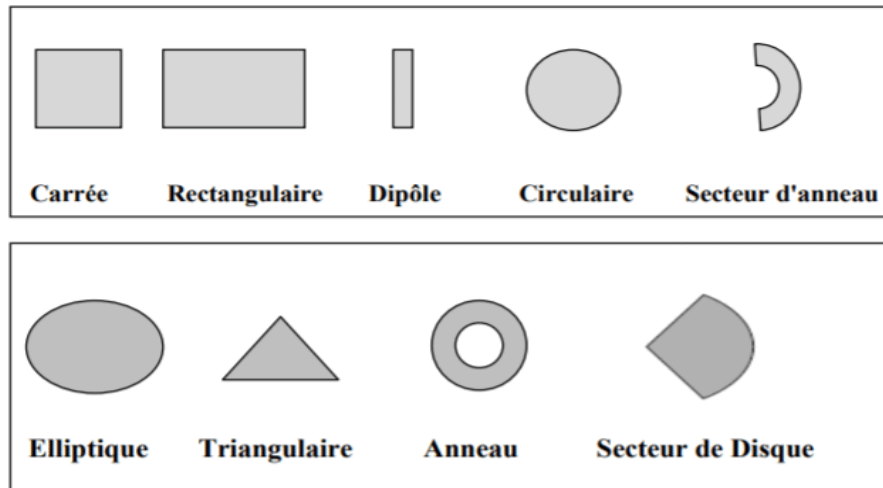


Figure I.21: Différentes formes d'antennes microbandes.

I.6.8.2. Le substrat

Le **substrat diélectrique**, positionné entre l'élément rayonnant (patch) et le plan de masse, joue un rôle déterminant dans le comportement électromagnétique et les performances globales de l'antenne. Constitué d'un matériau isolant, il est généralement caractérisé par une **épaisseur faible** par rapport à la longueur d'onde et une **permittivité relative ϵ_r** comprise entre 2,2 et 12.

Les propriétés du substrat influencent directement des paramètres clés tels que la **puissance rayonnée**, les **pertes par effet Joule** et la **bande passante** de l'antenne. Pour améliorer la bande passante et l'efficacité de rayonnement, il est souvent recommandé d'utiliser des substrats d'**épaisseur importante** et de **faible permittivité**. Cependant, cette configuration peut entraîner une augmentation des **ondes de surface**, susceptibles de provoquer des radiations non désirées et de perturber les circuits micro-ondes. Pour minimiser ces effets, l'emploi de substrats **minces** avec une **permittivité élevée** est parfois privilégié[31].

Les matériaux couramment utilisés pour la fabrication des substrats comprennent :

- Les **céramiques** (par exemple, l'alumine) ;
- Les **semi-conducteurs** (tels que le silicium ou l'arséniure de gallium) ;

- Les matériaux ferromagnétiques ;
- Les matériaux synthétiques (comme le PTFE ou le FR4)

I.6.8.2.1. Les types de substrats

Il existe deux catégories principales de substrats utilisés pour les antennes microbandes : les substrats souples "soft" et les substrats rigides "hard".

- Les substrats "soft" se distinguent par leur flexibilité, leur faible coût et leur facilité de fabrication. Cependant, ils présentent un coefficient d'expansion thermique élevé, ce qui peut limiter leurs performances dans certaines applications sensibles [30].

Le tableau suivant présente quelques exemples de substrats de type "soft" :

Tableau I.1 : Les substrats soft

Substrat	Constante diélectrique relative (ϵ_r)	Constante diélectrique effective (ϵ_{eff})	Pertes diélectriques $\tan \delta$
RT-Duroid-5880	2.2	2.1144	0.0009
RT-Duroid-5870	2.33	2.2352	0.0011
Neltec NX 9240	2.4	2.3002	0.0010
Arlon Di clad 522	2.5	2.3931	0.0010
Benzocyclobu-Ten	2.6	2.4859	0.0010

À l'inverse, les substrats "hard" offrent une grande fiabilité et présentent de faibles coefficients d'expansion thermique, ce qui les rend adaptés aux applications exigeant une stabilité élevée. Toutefois, ils sont plus coûteux et moins flexibles que les substrats "soft" [30].

Le tableau suivant présente quelques exemples de substrats de type "hard" :

Tableau I.2 : Les substrats hard

Substrat	La constante diélectrique relative (ϵ_r)
Quartz	3.78
Saphir	11.7
GaAs	12.3

I.6.8.2.2. Critères de sélection du substrat

Les propriétés du substrat ont une influence directe sur les performances de l'antenne. En général, on privilégie un matériau diélectrique de faible épaisseur par rapport à la longueur d'onde utilisée (λ), avec une permittivité relative faible ($\epsilon_r \leq 3$) afin de favoriser le rayonnement de l'antenne tout en limitant le confinement des champs électromagnétiques entre le patch et le plan de masse [29].

Un bon substrat se caractérise principalement par sa permittivité relative ϵ_r , son épaisseur h , ainsi que son facteur de perte tangentielle $\tan \delta$. Il doit répondre à plusieurs exigences :

- Conserver sa forme d'origine ;
- Permettre l'excitation par onde de surface ;
- Présenter une bonne stabilité thermique (notamment pour la soudure) et une résistance aux conditions atmosphériques ;
- Afficher de faibles pertes diélectriques ($\tan \delta \leq 3 \times 10^{-3}$) afin d'optimiser le rendement
- Résister aux produits chimiques utilisés lors du processus de photolithographie ;
- Posséder une faible rugosité de surface ;
- Être facile à usiner [32].

I.6.8.3. Le plan de masse

Le **plan de masse** est une surface conductrice, généralement réalisée en cuivre, qui recouvre la face inférieure du substrat diélectrique.

Il joue un rôle fondamental dans le fonctionnement de l'antenne en servant de référence électrique et en contribuant à la réflexion des ondes électromagnétiques émises par l'élément rayonnant situé sur la partie supérieure du substrat[33].

I.6.8.4. Les techniques d'alimentation de l'élément rayonnant

L'alimentation d'une antenne dépend du mode d'intégration de celle-ci au sein du dispositif[34].

Pour les antennes patch, plusieurs méthodes d'alimentation sont disponibles. Celles-ci peuvent être regroupées en deux grandes catégories [35]:

- **Alimentation avec contact** : la connexion physique est réalisée directement entre la ligne d'alimentation et l'élément rayonnant.
- **Alimentation sans contact** : l'énergie est transférée par couplage électromagnétique sans connexion directe.

I.6.8.4.1. Alimentation avec contact

Cette méthode consiste à connecter une ligne de transmission plane (micro-ruban) directement au bord du patch. La ligne micro-ruban est généralement gravée sur le même substrat que le patch, ce qui facilite la fabrication. Cette technique est simple à concevoir et offre une bonne adaptation d'impédance, notamment en ajustant la position du point d'alimentation pour correspondre à l'impédance caractéristique de la ligne, souvent de 50Ω [36].

I.6.8.4.1.1. Alimentation par câble coaxial (sonde)

L'alimentation par câble coaxial, également appelée alimentation par sonde, est une méthode largement utilisée pour exciter les antennes patch. Dans cette technique, le conducteur central du câble coaxial traverse le substrat diélectrique pour être soudé directement à l'élément rayonnant, tandis que le conducteur externe est connecté au plan de masse. Ce type d'alimentation est particulièrement adapté aux patches de forme circulaire ou annulaire.

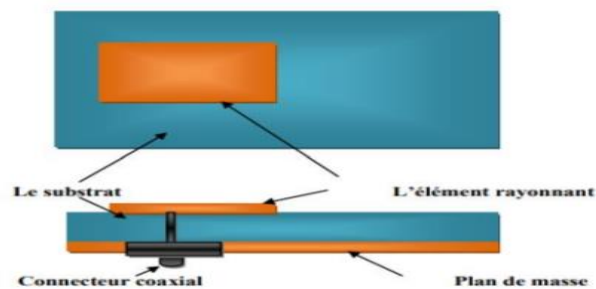


Figure I.22 : Une antenne patch alimentée par sonde coaxial.

L'avantage principal de ce mode d'alimentation réside dans la possibilité de placer la sonde à n'importe quel point du patch pour optimiser l'adaptation d'impédance. De plus, cette technique est simple à réaliser et génère peu de rayonnement parasite. Toutefois, elle présente des inconvénients : la bande passante obtenue est relativement étroite et la modélisation est complexe, car elle nécessite de percer un trou dans le substrat et d'intégrer un connecteur dépassant du plan de masse [37][38].

I.6.8.4.1.2. Alimentation par ligne micro-ruban

Dans cette méthode, la ligne micro-ruban est directement connectée à l'élément rayonnant du patch.

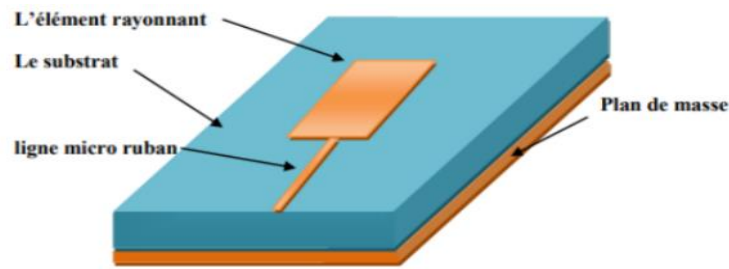


Figure I.23 : Une antenne patch alimentée par micro-ruban

L'avantage principal de cette technique est sa facilité de fabrication, son coût réduit et sa simplicité d'adaptation à la fréquence de résonance. Cependant, elle présente comme principal inconvénient un rayonnement parasite relativement important, ce qui la rend adaptée uniquement aux applications ne nécessitant pas des performances élevées. Pour assurer une bonne adaptation, il est nécessaire de jouer sur les dimensions ainsi que sur la position de la ligne d'alimentation [38][39].

I.6.8.4.2. Alimentation sans contact

Dans les méthodes d'alimentation sans contact, le transfert de puissance entre la ligne micro-ruban et l'élément rayonnant s'effectue par couplage électromagnétique. Contrairement aux techniques d'alimentation avec contact, ces méthodes permettent de surmonter plusieurs inconvénients, notamment en améliorant les performances globales de l'antenne [38].

I.6.8.4.2.1. Alimentation couplée par ouverture

Dans ce système d'alimentation, l'élément rayonnant et la ligne micro-ruban sont séparés par le plan de masse, comme illustré dans la figure. Le couplage entre le patch et la ligne d'alimentation est réalisé à travers une fente ou une ouverture dans le plan de masse.

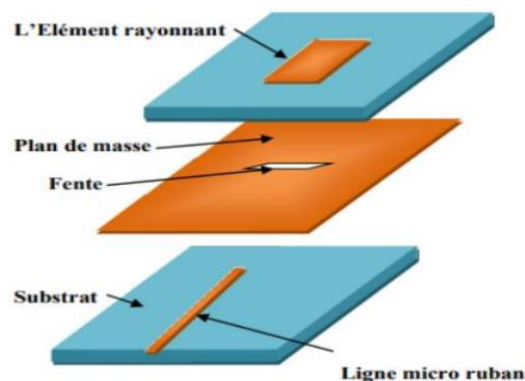


Figure I.24 : Une antenne patch alimentée par fente.

L'ouverture de couplage est généralement placée sous le centre du patch. Le niveau de couplage entre la ligne d'alimentation et le patch dépend de la forme, de la taille et de la position de l'ouverture. Dans ce type d'alimentation, le rayonnement parasite est réduit, car la ligne d'alimentation et le patch sont séparés par le plan de masse. En règle générale, un matériau à constante diélectrique élevée est utilisé pour le substrat inférieur, tandis qu'un matériau épais et à constante diélectrique faible est utilisé pour le substrat supérieur, afin d'optimiser le rayonnement du patch. Le principal inconvénient de cette méthode réside dans sa complexité de fabrication, due aux multiples couches, ce qui augmente également l'épaisseur de l'antenne. De plus, elle offre une bande passante étroite. Pour obtenir une adaptation d'impédance, il est nécessaire de contrôler la taille de la fente, de la ligne d'alimentation, ou des deux simultanément [38][39].

I.6.8.4.2.2. Alimentation par couplage de proximité

Également appelée couplage électromagnétique, cette méthode utilise deux substrats disposés de manière à ce que la ligne d'alimentation soit insérée entre les deux, tandis que le patch est situé sur le substrat supérieur, comme illustré dans la figure I.25.

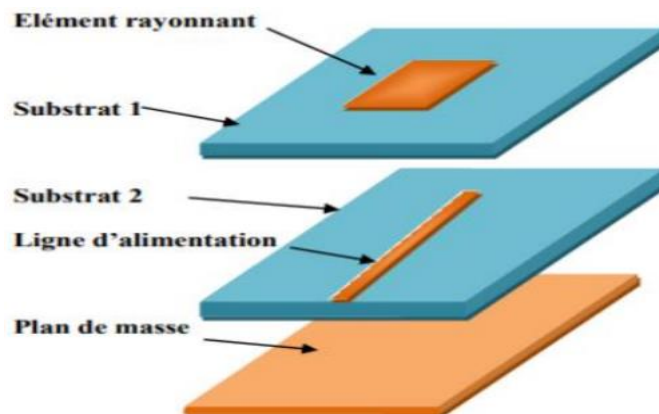


Figure I.25 : Une antenne patch alimentée par proximité.

Le principal avantage de cette technique est qu'elle supprime le rayonnement parasite lié à l'alimentation et permet d'obtenir une bande passante très large (supérieure à 13 %) grâce à l'augmentation de l'épaisseur totale de l'antenne. Cette méthode offre également la possibilité d'optimiser les performances de l'antenne en sélectionnant différents matériaux diélectriques. En revanche, elle présente certains inconvénients, notamment une complexité de conception liée à l'utilisation de deux couches diélectriques nécessitant un alignement précis. L'adaptation d'impédance peut être obtenue en ajustant la longueur de la ligne d'alimentation.

I.6.8.4.3. Comparaison entre les différentes techniques d'alimentation

Le tableau ci-dessous récapitule les caractéristiques des différentes techniques d'alimentation.

Tableau I.3 : Comparaison entre les différentes techniques d'alimentation

Caractéristiques	Alimentation par câble coaxial(sonde)	Alimentation par ligne micro ruban	Alimentation par ouverture de fente	Alimentation couplée par proximité
Rayonnement Parasite de l'alimentation	Plus	Plus	Moins	Minimum
Fiabilité	Meilleure	Moins, à cause de la soudure	Bon	Bon
Facilité de fabrication	Facile	Soudure et ouverture	Alignement requis	Alignement requis
Adaptation d'impédance	Facile	Facile	Facile	Facile
Bande passante	2-5%	2-5%	2-5%	13 %

I.6.8.5. Les techniques d'adaptation des antennes imprimées

L'adaptation d'impédance joue un rôle essentiel dans l'alimentation d'une antenne, quelle que soit la méthode utilisée, car elle permet d'assurer un transfert maximal de la puissance de la ligne d'alimentation vers le patch [40]. Plusieurs techniques sont employées pour adapter la ligne d'alimentation à l'entrée d'une antenne patch, chacune ayant une influence spécifique sur les performances de l'antenne. Le choix de la méthode d'adaptation dépend également du type d'alimentation adopté.

I.6.8.5.1. Adaptation par ligne quart d'onde

La ligne quart d'onde peut être utilisée comme transformateur d'impédance pour assurer l'adaptation entre la ligne d'alimentation et l'antenne. Cette technique consiste à insérer une section de ligne de longueur $\lambda/4$ entre la ligne d'alimentation et le patch de l'antenne.

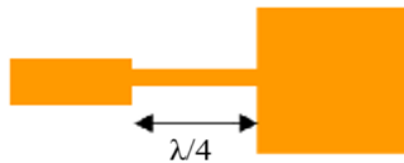


Figure I.26: Adaptation par ligne quart d'onde.

I.6.8.5.2. Adaptation avec encoche

L'adaptation par encoche consiste à réaliser une entaille dans le patch et à insérer la ligne d'alimentation, ayant une impédance caractéristique de 50 ohms, à une profondeur où l'impédance du patch correspond également à 50 Ohms[41].

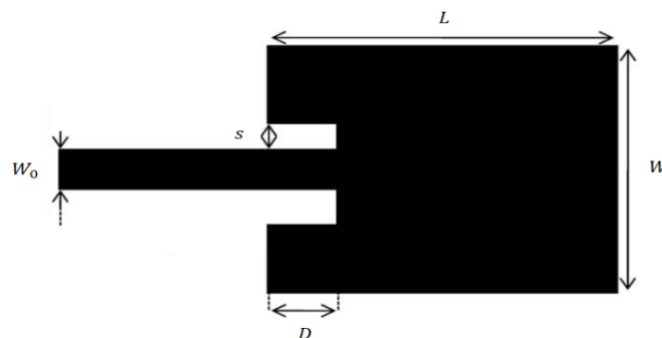


Figure I.27 : Adaptation par encoche.

I.6.8.6. Avantages et inconvénients des antennes patches

Grâce à leur structure plane, les antennes patch tirent pleinement parti des avantages offerts par la technologie des circuits imprimés. Comparées aux antennes traditionnelles, elles présentent de nombreux atouts. Nous nous limiterons ici à mentionner les plus remarquables [42] :

- Poids réduit
- Faible encombrement
- Épaisseur minimale
- Facilité de fabrication et de reproduction
- Rendement d'ouverture élevé
- Possibilité de varier la polarisation simplement en modifiant la position du point d'alimentation
- Intégration aisée avec des composants actifs ou passifs tels que des amplificateurs, modulateurs, déphaseurs, etc.
- Adaptabilité à des surfaces non planes

Bien que les antennes microbandes présentent de nombreux avantages, elles possèdent également certains inconvénients lorsqu'on les compare aux antennes micro-ondes classiques[42]:

- Bande passante très réduite
- Faible gain en raison des pertes
- Rendement limité, dû à la concentration des champs électromagnétiques sur les surfaces métalliques
- Couplages parasites indésirables entre les éléments
- Difficulté à obtenir une polarisation pure
- Capacité limitée à supporter de fortes puissances
- Rayonnement parasite provenant du système d'alimentation

I.7. Conclusions

Ce premier chapitre a permis d'établir les fondements théoriques essentiels relatifs aux antennes, en mettant en lumière leur rôle central dans les systèmes de communication modernes. Nous avons débuté par une introduction générale, soulignant l'importance des antennes dans la conversion des signaux électriques en ondes électromagnétiques et vice versa, ainsi que leur diversité d'applications, des télécommunications mobiles aux systèmes satellitaires.

Ensuite, nous avons défini une antenne comme un dispositif clé assurant la transmission et la réception des informations sans fil, tout en détaillant ses deux fonctions fondamentales : l'émission et la réception. L'étude des caractéristiques des antennes, telles que le diagramme de rayonnement, la directivité, le gain, la bande passante, l'impédance et la polarisation, a fourni une compréhension approfondie des paramètres qui influencent leurs performances.

Un aperçu historique a illustré l'évolution des antennes, des premières expérimentations aux technologies avancées comme la 5G et la 6G, tout en soulignant les défis futurs, notamment l'intégration dans les villes intelligentes et les réseaux IoT. Enfin, nous avons passé en revue les différents types d'antennes, des plus simples comme le dipôle aux plus complexes comme les antennes patch, en mettant l'accent sur leurs avantages, leurs inconvénients et leurs techniques d'alimentation.

Bibliographie

- [1] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, Hoboken: Wiley, 2016.
- [2] R. J. M. J. D. Kraus, *Antennas for All Applications*, New York: McGraw-Hill, 2002.
- [3] Y. Z. e. al., «Compact 5G MIMO antennas for IoT applications,» *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, n° 14, pp. 3456-3468, 2021.
- [4] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, Hoboken, NJ: Wiley, 2020.
- [5] M. L. P. & B. G. Fleury, *Radiocommunications : des concepts de base aux systèmes*, Paris: Dunod, 2007.
- [6] T. S. e. a. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002.
- [7] I. 8. W. Group, «IEEE Standard for Wireless LAN, IEEE Std 802.11-2020,» IEEE, New York, 2021.
- [8] ITU-R, «Broadcasting Standards for Digital Television, ITU-R BS.1194,» ITU, Genève, 2022.
- [9] E. D. & H. C. J. Kaplan, *Understanding GPS: Principles and Applications*, Boston, MA: Artech House, 2017.
- [10] M. & W. L. D. Richharia, *Satellite Systems for Personal Applications*, Chichester, U.K.: Wiley, 2013.
- [11] Y. e. a. Zhang, «5G Antenna Design: Challenges and Solutions,» *IEEE Access*, p. 156974–156992, 25 Août 2020.
- [12] H. Hertz, «Über sehr schnelle elektrische Schwingungen,» *Annalen der Physik*, 1887.
- [13] M. P. A. R. D. C. M. Z. M. Giordani, «Towards 6G Networks: Use Cases and Technologies,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, n° 13, p. 55–61, 2020.
- [14] R. R. C. M. K. S. S. Bhardwaj, «Energy-Efficient Antenna Design for Wireless Communication Systems,» *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, vol. 3, n° 12, pp. 456-464, 2019.

- [15] S. S. e. al., «Propagation Models and Performance Evaluation for 5G Millimeter-Wave Bands,» *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, n° 19, p. 8422–8439, 2018.
- [16] J. D. Kraus, *Antennas*, New York: McGraw-Hil, 1988.
- [17] I.-S. S. Board, « IEEE Standard for Definitions of Terms for Antennas,» Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014.
- [18] L. MOUSTAFA, *Conception d'antennes à Bande Interdite Electromagnétique large bande et multi bandes à base de méta surfaces*, Limoges: Université de Limoges, 2009.
- [19] S. A. Fandresena, *ANALYSES ET PERFORMANCES DES ALGORITHMES ADAPTATIFS DE BEAMFORMING POUR LES ANTENNES INTELLIGENTES*, UNIVERSITE D'ANTANANARIVO, 2023.
- [20] M. S. A. R. Harish, *Antennas and Wave Propagation*, New Delhi: Oxford University Press, 2016.
- [21] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, Hoboken, NJ: Wiley, 2011.
- [22] IEEE, «IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas,» IEEE, 1997.
- [23] Terry, «Les différents visages des antennes de télécommunication,» CommentOuvrir , 31 Mars 2023. [En ligne]. Available: <https://commentouvrir.com/conn/les-differents-visages-des-antennes-de-telecommunication/>.
- [24] J. P. Muller, *Les antennes*, 2013.
- [25] B. Fayçal, *Propagation d'ondes et antennes*, Jijel: Université Mohamed Seddik Benyahia de Jijel, 2017.
- [26] T. Forrister, « Analyzing Operating Mode Options for Helical Antennas,» COMSOL, 2023. [En ligne]. Available: <https://www.comsol.de/blogs/analyzing-operating-mode-options-for-helical-antennas/>.
- [27] J. Roger, «Antenne : Techniques,» *Techniques de l'Ingénieur – Traité d'Électronique*, p. pp. 45–62, Juin 1998.
- [28] H. Mourad, *Modélisation d'une antenne patch réalisée sur substrat à tenseurs de permittivité et de perméabilité diagonaux*, Batna: Université de Batna, 2009.

- [29] S. Boussaha, *Contribution à l'étude et la modélisation des antennes imprimées rectangulaires – Applications aux systèmes de communication*, Guelma: Université 8 Mai 1945 – Guelma, 2012.
- [30] S. Z. e. R. R. Sahraoui, *Influence de substrat sur les performances des antennes imprimées*, Aïn Témouchent: Université Belhadj Bouchaïb d'Aïn Témouchent, 2020.
- [31] F. P. Rakotomamonjy, *Étude et conception d'une antenne patch pour la bande de 2.4 GHz*, Antananarivo: Université d'Antananarivo, 2017.
- [32] M. B. e. E. S. Salemi, *Étude et simulation des paramètres d'une antenne patch rectangulaire 2.45 GHz sous l'effet de la température*, Médéa: Université Dr. Yahia Fares de Médéa, 2021.
- [33] N. E. H. K. e. H. S. Ben, *Conception d'une antenne UHF pour la réception de la Télévision*, Ouargla: Université Kasdi Merbah Ouargla, 2020.
- [34] W. A. e. F. Chergui, *Étude de l'antenne patch rectangulaire par le modèle de la cavité*, Tizi Ouzou: Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2012.
- [35] B. O. e. R. Abdelati, «Étude paramétrique des antennes patchs rectangulaires alimentées par proximité,» *Mediterranean Telecommunications Jo*, p. pp. 2–3, 2016.
- [36] K. E. Abdelouahab, *Étude et conception d'une antenne microruban*, Alger: École Nationale Polytechnique d'Alger, 2015.
- [37] Y. W. S. e. B. B. Khatir, *Conception d'un réseau d'antennes patch pour les applications satellitaires en bande C*, Ain Temouchent: Université Belhadj Bouchaïb – Ain Temouchent, 2021.
- [38] A. Belguessoum, *Conception et réalisation d'une antenne multibandes alimentée par un guide d'onde coplanaire CPW*, Ottawa: Université d'Ottawa, 2008.
- [39] A. Chaima, *Étude et conception d'une antenne reconfigurable pour les applications WLAN*, M'Sila: Université Mohamed Boudiaf – M'Sila, 2018.
- [40] H. M. Y. e. G. Ndlovu, *Antennes imprimées à polarisation circulaire alimentées par couplage par fente pour des applications 5G*, Mostaganem: Université de Mostaganem, 2022.
- [41] Y. B. e. F. Bouguenina, *Réseaux d'antenne patch pour application spatiale*, Ain Temouchent: Université Belhadj Bouchaïb – Ain Temouchent, 2021.

- [42] H. Lasselat, *Étude d'antennes imprimées rectangulaires en tenant compte de l'effet de couplage*, Biskra: Université Mohamed Khider Biskra, 2012.
- [43] E. D. & H. C. J. Kaplan, *Understanding GPS: Principles and Applications*, Norwood: Artech House, 2006.

Chapitre II :
Les réseaux d'antennes et
leurs applications dans le
domaine de la 5G

II.1.Introduction

L'évolution rapide des technologies de télécommunication a conduit à une transformation majeure des réseaux sans fil, marquée notamment par l'avènement de la 5G. Cette nouvelle génération de réseaux mobiles se distingue non seulement par ses performances accrues en termes de débit, de latence et de connectivité massive, mais aussi par l'utilisation intensive de technologies avancées telles que les réseaux d'antennes intelligentes, et en particulier les antennes **MIMO (Multiple Input Multiple Output)**[1], [2].

Dans ce contexte, les antennes ne sont plus de simples éléments de transmission, mais deviennent des composants critiques pour assurer l'efficacité spectrale, l'efficacité énergétique et la couverture des réseaux[3]. Les structures comme les antennes patch, les réseaux d'antennes directionnelles et adaptatives sont désormais au cœur des systèmes 5G, et leur conception doit répondre à des exigences de miniaturisation, de gain élevé et de bande passante étendue[4].

Ce chapitre explore les concepts clés de la 5G, les fondements des réseaux MIMO, leurs différentes typologies, les calculs associés à leur mise en œuvre, ainsi que leurs applications pratiques dans l'environnement 5G. Une ouverture sera également proposée sur les perspectives qu'offre cette technologie dans le cadre de l'évolution vers la 6G[5].

II.2. Historique

Les technologies de communication mobile [6] sont développées et standardisées par des organismes internationaux tels que le **3GPP (3rd Generation Partnership Project)**, qui assurent la compatibilité et l'évolution harmonisée des réseaux à l'échelle mondiale. Ces technologies sont traditionnellement classées par **générations**, chacune marquant une avancée significative par rapport à la précédente.

- La **1G**, introduite dans les années 1980, représente la première génération de téléphonie mobile utilisant une transmission **analogique**, principalement destinée aux communications vocales.
- La **2G** inaugure l'ère **numérique**, permettant une meilleure qualité de transmission et l'introduction des **SMS**.
- La **3G** constitue une révolution en apportant le **haut débit mobile**, autorisant le transfert efficace de données, la navigation sur Internet et la visiophonie.
- L'évolution **LTE (Long Term Evolution)**, souvent appelée **4G**, marque une nouvelle étape avec des vitesses de transmission largement supérieures. La version initiale

(release 8) est parfois qualifiée de **3.9G**, tandis que **LTE-Advanced** représente la véritable 4G au sens des spécifications techniques internationales.

- Enfin, la **5G** apporte une rupture technologique en termes de débits, de latence, de densité de connexions et d'efficacité énergétique.

Comme le montre le tableau II.1, un **intervalle d'environ 10 ans** sépare l'apparition de chaque génération, soulignant le rythme régulier de l'innovation dans ce domaine. Ce tableau présente également les **caractéristiques distinctives** de chaque génération, mettant en évidence leur impact respectif sur les usages et les performances des réseaux mobiles.

Tableau II.1 : Tableau comparatif des générations de réseaux mobiles.

Génération	Années de déploiement	Technologie principale	Débit maximal théorique	Latence estimée	Caractéristiques clés
1G	1980s	Analogique (AMPS, TACS)	~2,4 kbps	Élevée (>300 ms)	Voix uniquement, faible qualité audio, sécurité limitée
2G	1990s	Numérique (GSM, CDMA)	~64 kbps à 384 kbps	Moyenne	SMS, MMS, meilleure qualité vocale, chiffrement des communications
3G	2000s	UMTS, CDMA2000	Jusqu'à 2 Mbps	~ 100ms	Internet mobile, visioconférence, streaming audio/vidéo
4G	2010s	LTE, LTE-Advanced	Jusqu'à 1 Gbps	~ 50ms	Haut débit mobile, VoIP, applications en temps réel
5G	2020s	NR (New Radio), mmWave	Jusqu'à 10 Gbps	< 10ms	IoT massif, véhicules autonomes, réalité augmentée/virtuelle, faible latence

II.3. La cinquième génération

La 5G, ou cinquième génération des technologies de communication sans fil, a été **standardisée en 2018** par le **3GPP** (*3rd Generation Partnership Project*) dans le cadre des **spécifications de la Release 15**[7]. Cette nouvelle norme marque une véritable révolution par rapport aux générations précédentes.

Elle offre des **débits pouvant atteindre 1 Gbps**, une **latence extrêmement faible**, de l'ordre de **1 à 10 millisecondes**, et la capacité de gérer **un nombre massif de connexions simultanées** [1]. Ces performances permettent d'envisager de nouveaux usages dans des domaines tels que les véhicules autonomes, la télémédecine, l'industrie 4.0 ou encore les villes intelligentes [8].

Contrairement à la 4G, qui représentait une évolution du système existant, la 5G s'appuie sur une **nouvelle architecture réseau**. Le changement le plus significatif concerne la couche radio avec l'introduction de la **5G New Radio (5G NR)**, conçue pour fonctionner sur de nouvelles bandes de fréquences, notamment les ondes millimétriques [3].

En parallèle, le **cœur de réseau** a également été entièrement repensé avec le déploiement du **5G Next Generation Core (5G NG-Core)**. Cette infrastructure permet d'assurer une **expérience utilisateur fluide**, en s'adaptant aux exigences élevées en matière de **débit, de latence, de scalabilité** et d'interopérabilité entre les différents types d'accès, qu'ils soient fixes ou mobiles [9].

Ainsi, la 5G dépasse largement le cadre de la téléphonie mobile classique et constitue un **pilier essentiel de la transformation numérique** à l'échelle mondiale [10].

II.4. Objectifs de la 5G

La technologie 5G poursuit plusieurs objectifs stratégiques qui visent à répondre aux défis posés par la croissance exponentielle des besoins en connectivité :

- **Augmentation des débits et de la capacité réseau :**

L'un des objectifs majeurs de la 5G est de multiplier les **débits de transmission** et la **capacité globale du réseau** par rapport à la 4G. Elle est conçue pour gérer des volumes de données jusqu'à **1 000 fois supérieurs**, permettant ainsi une densité de trafic sans précédent [8].

- **Support massif de l'Internet des Objets (IoT) :**

La 5G est conçue pour accompagner le développement rapide de l'**Internet des Objets**, en permettant la **connexion simultanée d'un grand nombre d'appareils** sur une zone donnée, tout en maintenant une **couverture réseau étendue** et stable [9].

- **Amélioration significative des débits de transmission :**

Avec des vitesses théoriques pouvant atteindre **jusqu'à 1 Gbps**, la 5G offre des performances comparables à celles des **connexions fibre optique** dans certaines conditions, bien supérieures à celles de la 4G[1].

- **Réduction drastique de la latence :**

La 5G ambitionne de **réduire la latence réseau à 1 milliseconde**, ce qui est essentiel pour des applications en **temps réel**, telles que la **réalité virtuelle**, la **télémédecine**, ou encore les **véhicules autonomes** [3].

- **Optimisation de l'efficacité énergétique**

Grâce à une gestion plus intelligente des ressources réseau, la 5G permet une **meilleure autonomie des terminaux connectés**, avec une **réduction de la consommation d'énergie**. Cela pourrait permettre à certains appareils une **durée de vie de batterie jusqu'à dix fois plus longue** [10].

En résumé, la 5G vise à fournir une connectivité **plus rapide, plus réactive, plus dense et plus économe en énergie**, en réponse aux besoins croissants des **usages numériques modernes** et des **applications industrielles de demain** [5].

II.5. Catégories d'usages de la 5G

La 5G se distingue fondamentalement des générations précédentes de réseaux mobiles par sa **capacité à prendre en charge une grande diversité de cas d'usage**, bien au-delà des simples appels vocaux et de la navigation Internet. Elle a été spécifiquement conçue pour répondre aux besoins variés des **utilisateurs individuels, des entreprises et des infrastructures critiques** [1],[9]. Ces usages se regroupent en trois grandes catégories :

II.5.1.eMBB (Enhanced Mobile Broadband)

Cette catégorie concerne l'amélioration du **haut débit mobile**. Elle vise à offrir des vitesses de transmission plus élevées et une meilleure capacité réseau pour répondre à la demande croissante en **contenus multimédias**. Les applications typiques incluent :

- Le **streaming vidéo** en haute définition (HD, 4K, 8K),
- La **réalité virtuelle (VR) et augmentée (AR)**,
- Le **télétravail collaboratif** et les **jeux en ligne** à faible latence.

L'objectif principal est de garantir une **expérience utilisateur fluide et immersive**, même dans des environnements à forte densité de population, comme les stades ou les gares [12].

II.5.2. mMTC (Massive Machine Type Communications)

Cette catégorie concerne les communications entre **machines et objets connectés**, avec un accent sur la **connectivité massive**. La 5G est conçue pour supporter **jusqu'à un million de connexions par kilomètre carré**, tout en conservant une consommation d'énergie minimale. Les principales applications incluent :

- Les **réseaux de capteurs** pour les **villes intelligentes**,
- La **gestion intelligente de l'énergie**, de l'eau ou des déchets,
- La **logistique connectée** et les **infrastructures industrielles**.

Bien que chaque appareil ne transfère que peu de données, la gestion fiable de **millions de connexions simultanées** est un défi que la 5G permet de relever [5], [9].

II.5.3. uRLLC (Ultra-Reliable and Low Latency Communications)

Ce domaine cible les applications nécessitant **une très faible latence** et une **fiabilité quasi absolue**. Il s'agit de cas critiques où une **réaction en temps réel** est indispensable. Parmi les exemples notables :

- Les **véhicules autonomes**,
- Les **interventions d'urgence** et systèmes de sécurité,
- La **chirurgie à distance** et la **robotique industrielle**.

Dans ces situations, la 5G doit garantir des **délais de transmission inférieurs à une milliseconde**, avec un taux d'échec de communication proche de zéro [3], [12], [13]. Ces trois grandes catégories – **eMBB**, **mMTC** et **uRLLC** – démontrent la polyvalence de la 5G et sa capacité à **s'adapter à des besoins hétérogènes** en termes de débit, de latence, de densité de connexions et de fiabilité. Cette flexibilité fait de la 5G un pilier fondamental des technologies numériques émergentes [1], [8].

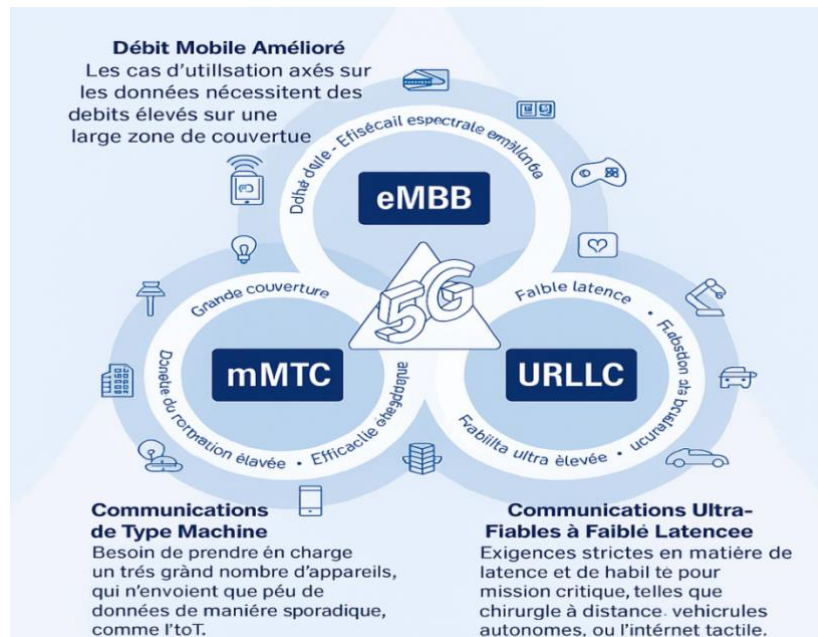


Figure II.1 : Catégories d'usages de la 5G.

II.6. Applications visées pour le réseau 5G

La technologie 5G propose un éventail étendu d'applications, touchant à la fois les utilisateurs particuliers, les entreprises, les collectivités locales et les entités gouvernementales. Grâce à ses performances accrues notamment en termes de vitesse, de latence réduite et de connectivité massive la 5G dépasse le cadre traditionnel de la téléphonie mobile pour devenir une plateforme d'innovation multisectorielle [1], [8].

En prenant en charge des cas d'usage variés, elle permet aux opérateurs de télécommunication de diversifier leurs sources de revenus. L'un des exemples les plus significatifs est l'**utilisation de réseaux 5G privés (Private Wireless)**, qui permet aux entreprises de déployer leur propre infrastructure de communication mobile, indépendante des réseaux publics. Ce type de déploiement offre aux organisations une meilleure sécurité, un contrôle accru sur leurs données, et une personnalisation optimale de leur réseau selon leurs besoins spécifiques. Ainsi, certaines entreprises peuvent elles-mêmes agir comme fournisseurs de services mobiles au sein de leurs sites industriels, logistiques ou administratifs [5].

Cette capacité d'adaptation et de personnalisation rend la 5G particulièrement pertinente pour des secteurs tels que :

- **L'industrie 4.0**, avec la connectivité en temps réel des machines ;
- **La santé**, via la télémédecine et la chirurgie assistée à distance ;
- **Le transport**, notamment pour les véhicules connectés et autonomes ;
- **Les villes intelligentes**, avec une gestion optimisée des ressources urbaines ;

- **Le divertissement immersif**, grâce à la réalité augmentée et virtuelle.

En somme, la 5G s'impose comme une technologie clé du numérique, catalyseur de transformation dans de nombreux domaines, bien au-delà de la simple évolution des réseaux mobiles traditionnels [1].

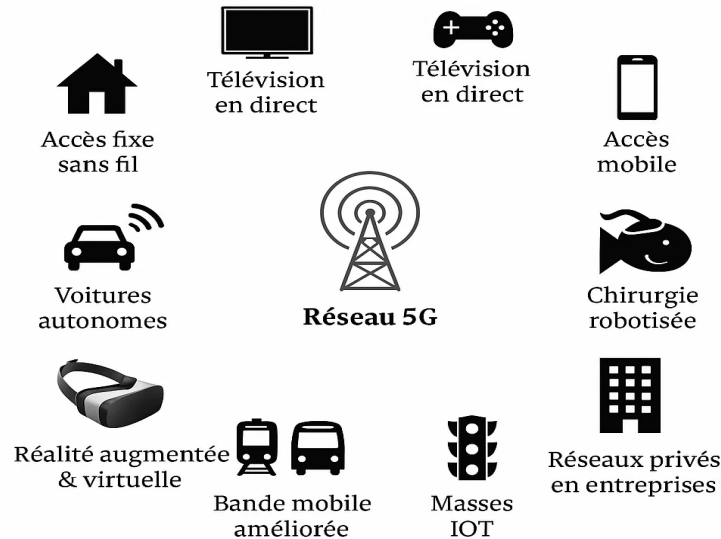


Figure II.2 : Applications visées pour le réseau 5G.

II.7. Les technologies clés de la 5G

La 5G repose sur plusieurs technologies avancées qui permettent d'atteindre de nouveaux niveaux de performance en matière de vitesse, de latence, de capacité et de connectivité. Ces technologies sont les piliers du réseau 5G :

- **Millimeter Waves** : Les ondes millimétriques (30 à 300 GHz) offrent de très hauts débits mais ont une portée limitée. Elles sont particulièrement adaptées aux environnements urbains denses [3].
- **Small Cells** : Ce sont des stations de base à faible puissance, installées en grand nombre pour améliorer la couverture et la capacité dans des zones spécifiques, notamment en intérieur ou en milieu urbain [1].
- **Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output)** : Cette technologie utilise un grand nombre d'antennes pour envoyer et recevoir plusieurs signaux simultanément, augmentant ainsi la capacité et la qualité du réseau [2].

- **Beamforming** : Technique qui permet de concentrer les signaux radio vers les utilisateurs plutôt que de les diffuser dans toutes les directions, ce qui améliore l'efficacité et la précision de la transmission [2].
- **Full Duplex** : Permet l'envoi et la réception simultanés de données sur une même fréquence, doublant ainsi le potentiel de transmission des réseaux [1].

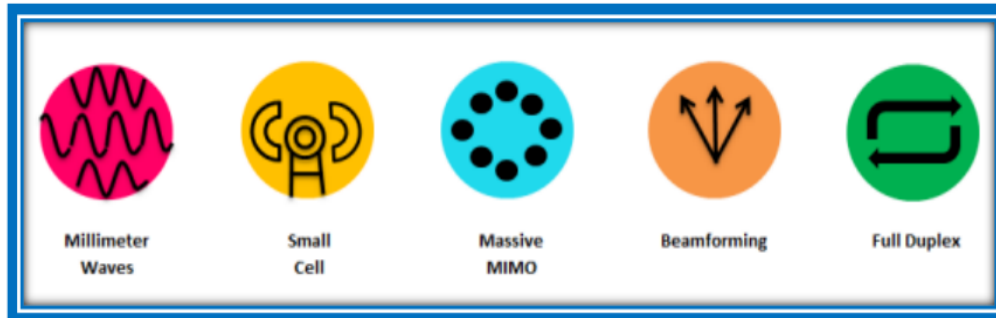


Figure II.3 : Technique utilisée dans la technologie 5.

II.7.1. Les ondes millimétriques

Les ondes millimétriques [14] correspondent aux ondes radioélectriques dont les fréquences s'étendent de 30 à 300 GHz (Figure II.4). Actuellement, nos appareils électroniques utilisent principalement des bandes de fréquences situées en dessous de 6 GHz. Cependant, cette plage de fréquences devient de plus en plus saturée en raison de la multiplication des objets connectés, ce qui entraîne une dégradation des services. Pour répondre à une demande croissante en volume de données, notamment dans les applications de commande à distance, il devient nécessaire de recourir à des fréquences plus élevées et à un spectre plus large. D'une part, les hautes fréquences permettent de transmettre un plus grand volume d'informations par seconde ; d'autre part, l'élargissement du spectre autorise la création de davantage de canaux de transmission. Ces deux éléments contribuent à désengorger les réseaux. Néanmoins, les ondes millimétriques présentent certaines limites, notamment une faible capacité de pénétration. Elles traversent difficilement les obstacles, ont une portée réduite, et peuvent être fortement atténuées par la végétation ou les intempéries (comme la pluie). Pour pallier ces limitations, il est nécessaire d'intégrer une seconde technologie : un réseau de petites antennes [14].

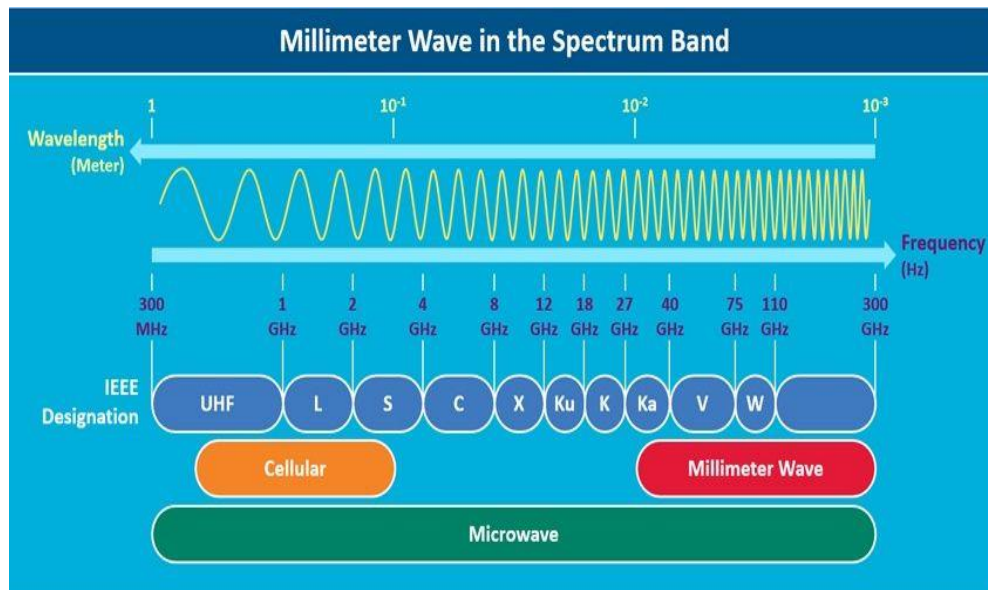


Figure II.4 : Technique utilisée dans la technologie 5G.

II.7.2. Les Micro-cellules

Aujourd'hui, les réseaux hétérogènes intègrent fréquemment des cellules appelées *smallcells* [15]. Ces cellules se distinguent par leur faible rayon de couverture, ce qui leur permet d'offrir un débit élevé à leurs utilisateurs. En effet, la réduction du nombre de terminaux connectés à une même cellule limite le partage des ressources en temps et en fréquence, améliorant ainsi les performances. Les *smallcells* sont conçues pour compléter les *macro-cells*, qui couvrent de plus grandes zones mais offrent un débit moindre. Ce transfert de charge des *macro-cells* vers les *smallcells* est appelé *offloading*.

La densification des réseaux à l'aide de ces *smallcells* constitue un élément clé du développement de la 5G. Elle permet non seulement de répondre à la demande croissante en débit, mais aussi d'améliorer l'efficacité énergétique, notamment en réduisant la taille des cellules [15].

Toutefois, cette densification implique également la mise en place d'un *backhaul* (liaison de raccordement) capable de supporter des débits élevés. Une solution prometteuse consiste à utiliser le MIMO massif pour assurer un *backhaul* sans fil (*Wireless Backhaul*). À terme, la station de base (SB) de la *macro-cell* pourrait se concentrer exclusivement sur le *signaling* et la gestion du *backhaul*, tandis que la transmission des données serait assurée par les *smallcells* [15].

II.7.3. Beamforming

Le *Beamforming* [16] est une technologie permettant de diriger de manière dynamique le diagramme de rayonnement d'un réseau d'antennes selon un schéma prédéfini. Elle consiste à concentrer les ondes radio dans la direction de chaque utilisateur ou objet ciblé, plutôt que de les diffuser uniformément dans toutes les directions. Cette focalisation améliore la qualité du signal, réduit les interférences, et optimise ainsi l'efficacité énergétique tout en économisant la bande passante. En outre, la fréquence de chaque faisceau peut être ajustée en fonction des besoins spécifiques des applications, permettant une utilisation plus intelligente et efficace du spectre.

II.7.4. Full-Duplex

Le *Full-Duplex* [17] désigne une technologie de communication dans laquelle l'émission et la réception de données peuvent s'effectuer simultanément sur une même fréquence. Testée lors des premières phases d'expérimentation de la 5G, cette technologie a montré des résultats prometteurs, notamment au niveau des stations de base. Elle repose sur une cascade de techniques d'annulation d'interférences, incluant l'annulation analogique passive.

Les essais ont démontré que le *Full-Duplex* peut réduire les auto-interférences de plus de 113 dB dans des conditions réelles, ce qui se traduit par une amélioration de près de 90 % du débit système.

Aussi appelée *duplex intégral*, cette technologie pourrait potentiellement doubler la capacité des réseaux sans fil au niveau physique. Pour illustrer cela, on peut comparer le fonctionnement à deux personnes parlant en même temps, tout en se comprenant parfaitement. Leur conversation prendrait alors deux fois moins de temps, ce qui permettrait d'enchaîner plus rapidement avec une nouvelle communication.

II.7.5. Massive MIMO

Le *Massive MIMO* (Multiple Input - Multiple Output) est une technologie de communication sans fil multiutilisateur qui a suscité un fort intérêt dans la recherche ces dernières années. Elle repose sur l'utilisation, par chaque station de base (BS), d'un grand nombre d'antennes permettant de desservir simultanément plusieurs dizaines d'utilisateurs au sein d'une même cellule [18]. À ce titre, le *Massive MIMO* constitue l'une des technologies clés de la prochaine génération des réseaux sans fil, notamment pour la 5G.

Le principe de cette technologie consiste à multiplier les canaux de communication entre la station de base et les terminaux connectés. Les futures antennes 5G seront capables de gérer

plusieurs centaines de canaux, permettant ainsi la connexion simultanée de milliers d'objets. Toutefois, cette densité de communication peut engendrer des interférences, bien plus problématiques que dans les générations précédentes, comme la 4G.

Pour y remédier, le *Massive MIMO* repose sur l'utilisation d'un grand nombre de micro-antennes dites "intelligentes", regroupées sur un même panneau (de 8 à 128 antennes actuellement, avec des perspectives d'augmentation grâce à l'exploitation des fréquences supérieures à 30 GHz, dites ondes millimétriques ou *mmWave*).

Cette technologie présente deux avantages majeurs :

- **L'augmentation significative des débits** grâce au *multiplexage spatio-temporel*, qui permet de transmettre plusieurs flux de données simultanément via le même canal.
- **L'amélioration de la qualité du lien radio**, grâce à la focalisation de l'énergie vers un terminal spécifique via le *beamforming*.

Enfin, le *Massive MIMO* permet également une augmentation considérable du nombre d'antennes d'émission sur une station de base, atteignant plusieurs dizaines, voire plus d'une centaine d'éléments (voir Figure II.5).

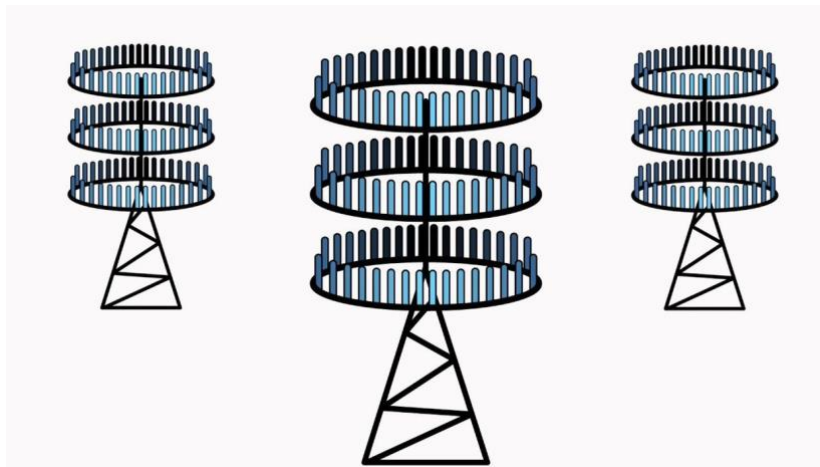


Figure II.5 : Illustration de MIMO massive.

II.8. Systèmes MIMO traditionnels

La technologie **MIMO** (Multiple-Input Multiple-Output) est une méthode de communication sans fil qui repose sur l'utilisation simultanée de plusieurs antennes à l'émission et à la réception afin de transmettre un volume de données plus important. Elle exploite un phénomène appelé **propagation multi-trajets**, dans lequel les ondes radio rebondissent sur les obstacles tels que les murs et les plafonds, atteignant le récepteur selon différents angles et à des moments légèrement décalés [2], [6].

MIMO transforme cette complexité en avantage en utilisant ces trajets multiples pour créer des **flux spatiaux indépendants**, ce qui améliore significativement les performances du système ainsi que la portée du signal [2] [18]. En combinant intelligemment les signaux issus de différents chemins, le récepteur peut capter une plus grande quantité d'information de manière efficace.

Les antennes utilisées dans les systèmes MIMO s'appuient sur le principe de **diversité spatiale**, qui permet d'exploiter la présence d'antennes supplémentaires. Lorsque le nombre d'antennes dépasse celui des flux spatiaux transmis, ces antennes excédentaires contribuent à renforcer la robustesse du signal reçu et à étendre la couverture du réseau. Ainsi, MIMO représente une avancée technologique majeure dans l'optimisation des communications sans fil [6].

II.8.1. Principes du MIMO

Comme mentionné précédemment, le principal facteur de perturbation d'un signal radio lors de sa transmission est le **canal de propagation**. En raison des phénomènes de **multi-trajets**, le signal peut subir divers effets indésirables tels que des **évanouissements**, des **décalages en fréquence** ou encore des **retards temporels** [2], [6].

Contrairement aux systèmes de communication classiques qui cherchent à atténuer ces effets, les systèmes MIMO tirent **parti de ces perturbations** pour améliorer les performances globales du réseau. Pour ce faire, ils mettent en œuvre différentes formes de **diversité**, à savoir :

- **La diversité spatiale** : Aussi appelée **diversité d'antenne**, elle consiste à utiliser plusieurs antennes à l'émission et/ou à la réception pour exploiter les différentes versions du signal reçues via des trajets distincts [2], [6].
- **La diversité fréquentielle** : Elle repose sur la transmission du **même signal sur des fréquences différentes**, permettant de contourner les effets de fading sélectif en fréquence. Cette technique nécessite toutefois une attention particulière à la **bande cohérente** du canal et à la **dispersion fréquentielle** introduite par les trajets multiples [6].
- **La diversité temporelle** : Elle consiste à envoyer le **même signal à des instants différents**, en tirant parti de la variation du canal dans le temps. L'efficacité de cette approche dépend notamment de la **cohérence temporelle du canal**, de la **vitesse de déplacement du terminal mobile**, et de la **fréquence porteuse utilisée** [6].

Ainsi, en combinant intelligemment ces types de diversité, les systèmes MIMO permettent d'améliorer la fiabilité, le débit et la portée des communications sans fil [2], [6], [18].

II.8.2. Architectures des systèmes MIMO

Les systèmes MIMO peuvent adopter plusieurs configurations selon le nombre d'antennes utilisées à l'émission et à la réception. Quatre architectures de base sont couramment identifiées [2], [6], [12] :

- **SISO (Single Input Single Output) :**

C'est la configuration la plus simple, avec une seule antenne à l'émetteur et une seule à la réception. Ce système ne bénéficie pas des avantages de la diversité spatiale, mais reste utilisé dans des environnements à faible complexité.

- **SIMO (Single Input Multiple Output) :**

Ce modèle comporte une seule antenne à l'émission et plusieurs à la réception. Il permet d'exploiter la diversité de réception pour améliorer la qualité du signal en utilisant différentes trajectoires de propagation [6].

- **MISO (Multiple Input Single Output) :**

Ici, plusieurs antennes sont utilisées à l'émission, tandis qu'une seule est présente à la réception. Cela permet d'exploiter la diversité à l'émission, ce qui peut améliorer la fiabilité de la transmission, surtout dans des environnements sujets à l'évanouissement [6], [12].

- **MIMO (Multiple Input Multiple Output) :**

Cette configuration combine plusieurs antennes à la fois à l'émission et à la réception. Elle permet non seulement une meilleure fiabilité par diversité, mais aussi une **augmentation significative du débit** grâce au multiplexage spatial [2], [6], [12].

II.8.2.1. Système SISO

Le système **SISO (Single Input Single Output)** représente l'architecture la plus simple des communications sans fil. Il repose sur l'utilisation d'une seule antenne à l'émetteur et d'une seule antenne à la réception, comme illustré dans la Figure II.6. [6]

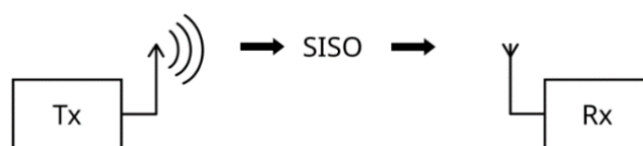


Figure II.6 : Schéma d'un système SISO.

L'un des principaux atouts du système SISO réside dans sa **simplicité de mise en œuvre**. Il ne nécessite aucun traitement complexe relatif aux techniques de diversité (spatiale, fréquentielle ou temporelle), ce qui le rend facile à intégrer et peu coûteux. [6]

Cependant, cette architecture présente des **limitations importantes** :

- Elle est plus sensible aux **interférences** et aux **évanouissements** du signal (fading), car elle ne peut pas exploiter plusieurs chemins de propagation comme les systèmes MIMO.[6]
- La **capacité du canal** reste limitée et est directement régie par la **loi de Shannon**, exprimée par la formule suivante [19]:

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

Où :

- **C** : la capacité du canal,
- **B** : la largeur de bande,
- **SNR** : le rapport signal sur bruit.

Ainsi, avec une bande passante donnée, l'augmentation du débit nécessite une amélioration du SNR, ce qui peut être difficile à atteindre dans des environnements bruités [19].

II.8.2.2. Système SIMO

Le système **SIMO (Single Input Multiple Output)** repose sur une seule antenne à l'émission et plusieurs antennes à la réception, comme illustré dans la Figure II.7[6][16]. Cette configuration est conçue pour **améliorer la qualité du signal reçu** en exploitant la diversité de réception.

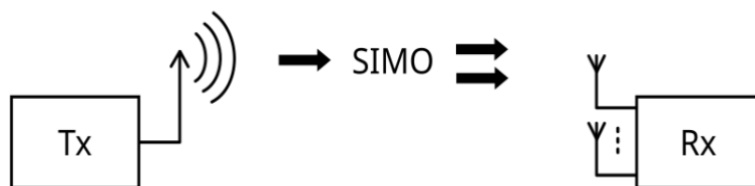


Figure II.7 : Schéma d'un système SIMO.

Grâce à la présence de plusieurs antennes réceptrices, cette architecture permet de **lutter efficacement contre les effets de l'évanouissement** (fading) induits par le canal de propagation [6]. Les signaux reçus par les différentes antennes, bien que légèrement décalés ou atténués, sont **combinés intelligemment** afin d'obtenir une version plus robuste du signal d'origine [16].

Le **rapport signal sur bruit total (SNR)** du système est amélioré, car il correspond à **la somme des SNR individuels** mesurés à chaque antenne réceptrice. Cela permet une réception plus fiable, même dans des environnements difficiles [6].

Historiquement, cette configuration a été utilisée dans les **stations d'écoute à ondes courtes**, notamment pour **atténuer les interférences ionosphériques** et les évanouissements, offrant ainsi une meilleure stabilité des communications à longue distance [16].

II.8.2.3. Système MISO

Le système **MISO (Multiple Input Single Output)**, également connu sous le nom de **diversité de transmission**, repose sur **plusieurs antennes à l'émission** et une seule antenne à la réception, comme représenté dans la Figure II.8. [6]

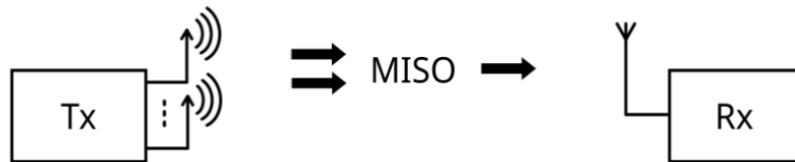


Figure II.8: Schéma d'un système MISO.

Dans cette architecture, **les mêmes données sont transmises de manière redondante** depuis plusieurs antennes émettrices. Le récepteur, doté d'une seule antenne, reçoit alors plusieurs versions du signal via différents chemins de propagation. Il peut ensuite **sélectionner ou combiner les signaux** pour en extraire la meilleure qualité possible, améliorant ainsi la fiabilité de la transmission [6][16].

L'un des principaux **avantages du MISO** est que la complexité liée au traitement des signaux et à la diversité est **déplacée du récepteur vers l'émetteur**. Cela est particulièrement utile dans le cas des équipements utilisateurs comme les smartphones, où l'espace disponible pour les antennes est limité et où la **réduction de la consommation énergétique est cruciale** [6].

Ainsi, en allégeant la charge de traitement côté récepteur, le système MISO contribue à **réduire la taille, le coût et la consommation d'énergie** des dispositifs utilisateurs, ce qui prolonge la durée de vie de leur batterie tout en maintenant une bonne qualité de réception [16].

II.8.2.4. Système MIMO

Le système **MIMO (Multiple Input Multiple Output)** repose sur l'utilisation de **plusieurs antennes à la fois à l'émission et à la réception**, comme illustré dans la Figure II.9.

Contrairement aux systèmes précédents, les antennes MIMO **n'émettent pas des copies identiques du signal**, mais **des flux de données distincts**, transmis **simultanément** sur la même fréquence via **différents chemins de propagation** [2], [6].

L'un des principes fondamentaux du MIMO est le **traitement spatio-temporel du signal** : au-delà de la dimension temporelle, le système exploite **la diversité spatiale** apportée par la présence d'antennes réparties à différents emplacements. Cela permet d'améliorer la robustesse du signal et d'augmenter significativement les performances globales du réseau sans fil [12] [16].



Figure II.9 : Schéma d'un système MIMO.

Le MIMO constitue ainsi une **évolution naturelle des antennes intelligentes**, longtemps utilisées pour renforcer la qualité des transmissions sans fil [16].

Deux principales approches caractérisent les systèmes MIMO :

- ➤ **Diversité spatiale** : Cette technique consiste à transmettre ou recevoir des copies du signal sur plusieurs antennes, ce qui permet **d'améliorer la fiabilité du lien de communication** face aux évanouissements et aux interférences, en augmentant le **rapport signal sur bruit**[6], [16].
- ➤ **Multiplexage spatial** : Ici, le but est **d'augmenter la capacité de transmission**. Des flux de données distincts sont envoyés simultanément via plusieurs antennes, exploitant les chemins indépendants pour **transmettre plus d'informations en parallèle**, et donc **augmenter le débit** sans élargir la bande passante [2], [12].

II.8.3.Capacité d'un canal MIMO

La notion de capacité de canal, introduite dans les années 1940, désigne la quantité maximale d'information qui peut être transmise par unité de temps et de bande de fréquence à travers un canal donné [19].

Dans le cas des systèmes MIMO, la capacité constitue un sujet d'étude central dans la littérature récente [6], [2]. On suppose que la puissance moyenne totale transmise, notée P , reste constante. Lorsque le nombre d'antennes à l'émetteur N_t varie, la puissance est répartie équitablement entre elles de sorte que la somme des puissances transmises reste égale à P . Si l'émetteur ne

dispose d'aucune information sur l'état du canal, une répartition uniforme de la puissance est optimale du point de vue de la capacité. Ainsi, chaque antenne émet une puissance de $\frac{P}{N_t}$.

Le calcul de la capacité dépend principalement de deux facteurs : le modèle du canal MIMO considéré, et la manière dont la puissance est répartie entre les antennes émettrices. La capacité s'exprime alors par la formule suivante [6], [2] :

$$C = \log_2 \left(\det \left[I_{N_r} + \frac{P}{N_t} \cdot HH^* \right] \right) \text{ bps/Hz} \quad .\text{II}$$

Où :

I_{N_r} : la matrice identité de dimension N_r (nombre d'antennes de réception), et H représente la matrice du canal MIMO de dimensions $N_r \times N_t$.

II.8.4. Avantages et limitations de la technologie MIMO

La technologie **MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)** apporte des bénéfices considérables aux systèmes de communication sans fil modernes [6], [12], [2]. Parmi ses principaux avantages, on peut citer :

- **Augmentation du débit de données** : Grâce au **multiplexage spatial**, MIMO permet la transmission simultanée de plusieurs flux de données via différentes antennes, sans augmentation de la bande passante. Par exemple, un système MIMO 2x2 peut transmettre deux flux en parallèle, doublant ainsi la capacité de transmission [6], [2].
- **Amélioration de la fiabilité** : En exploitant les différentes trajectoires de propagation du signal, MIMO réduit les effets de **fading**. Si l'un des chemins devient atténué ou obstrué, les autres trajets assurent la continuité du signal, garantissant ainsi une meilleure stabilité de la communication [16], [12].
- **Optimisation de l'efficacité spectrale** : La technologie maximise l'utilisation du spectre disponible, permettant la transmission de plus d'informations sur une même bande de fréquence [2], [12].
- **Extension de la couverture** : En améliorant la qualité du signal sans nécessiter une puissance d'émission accrue, MIMO contribue à une couverture réseau plus étendue [6].
- **Support des communications multi-utilisateurs** : MIMO peut prendre en charge plusieurs utilisateurs simultanément, ce qui optimise la gestion des ressources et améliore l'efficacité globale du réseau [12], [2].

Limitations et défis

Malgré ses nombreux atouts, MIMO présente aussi certaines limitations techniques [6], [16] :

- **Complexité d'intégration** : L'intégration de plusieurs antennes est souvent difficile dans des appareils compacts comme les smartphones, en raison des contraintes d'espace.
- **Dépendance à la configuration** : Les performances du système dépendent fortement de la **disposition correcte des antennes** et de leur environnement, ce qui requiert une conception soignée.
- **Nécessité de canaux indépendants** : Pour profiter pleinement de la diversité spatiale, il est important que les signaux transmis suivent des canaux suffisamment **indépendants**. Or, cela n'est pas toujours réalisable, notamment dans des environnements où la propagation est limitée.
- **Consommation énergétique accrue** : L'utilisation simultanée de plusieurs antennes peut entraîner une augmentation de la consommation énergétique, ce qui pose problème pour les dispositifs mobiles alimentés par batterie.

II.9. Évolution vers la sixième génération (6G)

L'évolution des systèmes de télécommunications et des communications sans fil s'est caractérisée par des progrès technologiques constants à travers les différentes générations[9], [7]. Tout a commencé avec la 2G, qui a introduit la téléphonie mobile numérique, avant de s'élargir à la transmission de données avec la 3G, ouvrant la voie à des services plus diversifiés et interactifs. L'adoption de normes comme le GSM (Global System for Mobile Communications) a permis de dépasser les limites des technologies analogiques.

L'accélération de cette évolution s'est poursuivie avec l'arrivée de la 4G, puis de la 5G, chacune répondant à des besoins spécifiques en termes de débits, de latence, de capacité et d'usages [1], [8], [11]. Ces générations ont transformé la connectivité sans fil, en facilitant le développement d'applications dans des domaines variés comme l'Internet mobile, les médias, le commerce en ligne et les services numériques.

En se tournant vers l'avenir, la **6G** représente la prochaine étape majeure [5]. Elle promet des débits encore plus élevés, une latence ultra-faible, une prise en charge massive d'appareils connectés et une connectivité plus fiable. L'objectif est de répondre aux exigences des technologies émergentes telles que la réalité étendue (XR), l'intelligence artificielle avancée et

les communications holographiques. La 6G ambitionne ainsi d'être une technologie de rupture, conçue pour relever les défis de la connectivité de demain.

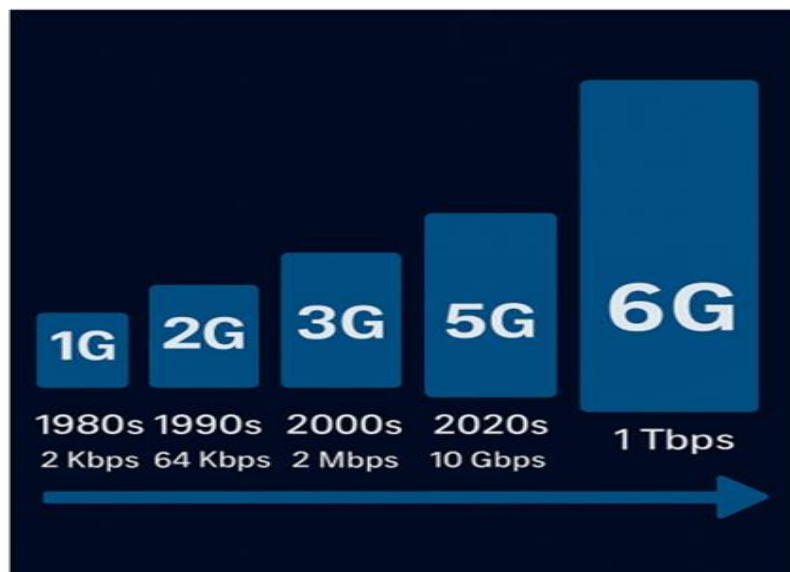


Figure II.10: L'évolution du 1G à 6G.

II.9.1. Objectifs des réseaux sans fil 6G

Bien que la 6G soit encore au stade préliminaire de son développement, ses objectifs font déjà l'objet de nombreuses études et réflexions au sein des communautés scientifiques et industrielles [5], [1]. Même si les spécifications officielles restent à définir, plusieurs orientations majeures se dégagent des premières recherches et anticipations [5], [13], [8]:

- **Débits de données ultra-élevés** : La 6G ambitionne de dépasser largement les performances de la 5G en termes de vitesse de transmission, ouvrant la voie à de nouvelles expériences immersives comme les environnements virtuels avancés ou les communications holographiques [5].
- **Latence extrêmement faible** : L'un des objectifs phares est de réduire la latence à moins d'une milliseconde, ce qui est essentiel pour des applications critiques telles que la chirurgie à distance, la conduite autonome et la réalité augmentée ou virtuelle [13].
- **Réseaux intelligents et autonomes** : La 6G intégrera de manière plus poussée l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique, permettant aux réseaux de s'auto-optimiser, de s'adapter en temps réel aux conditions variables et de fournir des services personnalisés et dynamiques [5].
- **Efficacité énergétique et durabilité** : Une attention particulière sera portée à la consommation énergétique des réseaux, avec pour objectif de minimiser leur empreinte environnementale tout en assurant une performance optimale [5].

- **Renforcement de la sécurité et de la confidentialité** : Face aux enjeux croissants de cybersécurité, la 6G cherchera à intégrer des protocoles de chiffrement avancés et des technologies axées sur la protection des données personnelles, afin de garantir la confiance des utilisateurs [5], [13].

En somme, les objectifs de la 6G visent à repousser les limites actuelles de la connectivité sans fil, tout en répondant aux besoins futurs d'un monde de plus en plus numérique, intelligent et connecté. Ces objectifs continueront d'évoluer au rythme des avancées technologiques et des travaux de recherche [5].

II.10. Conclusion

Ce chapitre a présenté les fondements et les évolutions des réseaux d'antennes dans le contexte de la 5G. En mettant l'accent sur les objectifs, les usages, les technologies clés et l'architecture des systèmes MIMO, il a souligné le rôle essentiel des antennes multiples dans l'amélioration des performances des réseaux. La 5G marque une étape majeure, mais ouvre également la voie à la 6G, qui promet de répondre à de nouveaux défis en matière de connectivité, de capacité et d'intelligence réseau.

Bibliographie

- [1] A. Gupta and R. K. Jha, "A survey of 5G network: Architecture and emerging technologies," *IEEE Access*, vol. 3, pp. 1206–1232, 2015.
- [2] E. G. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson, and T. L. Marzetta, "Massive MIMO for next generation wireless systems," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 186–195, Feb. 2014.
- [3] T. S. Rappaport et al., "Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!," *IEEE Access*, vol. 1, pp. 335–349, 2013.
- [4] Y. Li, C. Wang, and J. Wang, "The design and analysis of a high-gain patch antenna for 5G applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 915–918, 2017.
- [5] N. H. Mahmood et al., "White paper on critical and massive machine type communication towards 6G," *6G Research Visions*, no. 12, University of Oulu, 2020.
- [6] A. J. Paulraj; D. A. Gore; R. U. Nabar and H. Bölcskei . «An Overview of MIMO Communications-A Key to Gigabit wireless». PROCEEDINGS OF THE IEEE, VOL. 92, NO. 2, Février 2004.
- [7] 3GPP, "Release 15 - Description; Summary of Rel-15 Work Items," 3rd Generation Partnership Project, Sep. 2019.
- [8] M. Agiwal, A. Roy, and N. Saxena, "Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 3, pp. 1617–1655, 2016.
- [9] NGMN Alliance, "5G White Paper," Feb. 2015.
- [10] I. F. Akyildiz, P. Wang, and S. C. Lin, "SoftAir: A software defined networking architecture for 5G wireless systems," *Computer Networks*, vol. 85, pp. 1–18, 2015.
- [11] ITU-R, "IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond," Recommendation ITU-R M.2083-0, Sept. 2015.
- [12] F. Boccardi, R. W. Heath, A. Lozano, T. L. Marzetta, and P. Popovski, "Five disruptive technology directions for 5G," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 74–80, Feb. 2014.
- [13] P. Popovski, K. F. Trillingsgaard, O. Simeone, and G. Durisi, "5G Wireless Network Slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: A Communication-Theoretic View," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 55765–55779, 2018.

- [14] F. Magne, "Télécommunications haut débit en ondes millimétriques," 10 mai 1998.
- [15] T. Nakamura, S. Nagata, A. Benjebbour, Y. Kishiyama, T. Hai, S. Xiaodong, Y. Ning, and L. Nan, "Trends in small cell enhancements in LTE advanced," *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 2, pp. 98–105, Feb. 2013.
- [16] S. ShahbazPanahi and Y. Jing, in *Academic Press Library in Signal Processing*, vol. 7, Academic Press, 2018.
- [17] N. H. Mahmood, M. Gatnau, G. Berardinelli, and P. E. Mogensen, "Full Duplex Communications in 5G Small Cells," *International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*, pp. 1665–1670, 2017.
- [18] N. Hassan and X. Fernando, "Massive MIMO Wireless Networks: An Overview," *Electronics*, vol. 6, no. 3, p. 63, 5 Sept. 2017.
- [19] C. E. Shannon, "A mathematical theory of communication," *Bell System Technical Journal*, vol. 27, no. 3, pp. 379–423, 1948.

Chapitre III :

Résultats et Simulations

III.1. Introduction

Dans le contexte du développement rapide des technologies de communication mobile, notamment avec l'avènement de la 5G et les perspectives ouvertes par la 6G, les antennes doivent répondre à des exigences de plus en plus strictes en termes de compacité, de performance, de multifonctionnalité et d'intégration [1]. La miniaturisation des antennes constitue ainsi un enjeu majeur, notamment pour les dispositifs embarqués, les objets connectés (IoT) et les terminaux mobiles de nouvelle génération.

Parmi les différentes techniques de miniaturisation disponibles, l'utilisation de substrats à haute permittivité représente une méthode efficace et largement étudiée [2]. En effet, l'augmentation de la permittivité relative du substrat permet de réduire la longueur d'onde guidée dans le milieu, entraînant ainsi une réduction significative des dimensions physiques de l'antenne. Toutefois, cette approche doit être soigneusement analysée, car elle peut également influencer d'autres paramètres fondamentaux tels que la bande passante, le gain et l'efficacité de rayonnement [3].

Les substrats à haute permittivité se déclinent en plusieurs matériaux, parmi lesquels on peut citer le silicone, ainsi que divers matériaux céramiques [4]. Ces matériaux présentent chacun des caractéristiques électromagnétiques et mécaniques spécifiques, qui influencent de manière significative le comportement de l'antenne.

Dans ce chapitre, une étude comparative est menée entre deux substrats : le FR-4, qui représente une solution économique mais avec des limitations en haute fréquence, et le silicone, un matériau à plus forte permittivité, plus adapté aux applications avancées. Cette comparaison vise à analyser l'impact de la permittivité du substrat sur les performances globales de l'antenne, notamment en termes de taille, d'impédance, de bande passante et de diagramme de rayonnement, dans le cadre d'une conception destinée aux futures générations de réseaux mobiles.

III.2. Principe de la miniaturisation par substrat à haute permittivité

III.2.1. Effet de la permittivité sur la taille de l'antenne

La permittivité relative (ϵ_r) d'un substrat joue un rôle fondamental dans la taille physique d'une antenne. En augmentant la permittivité du matériau diélectrique, la longueur d'onde dans le substrat diminue, ce qui permet de réduire les dimensions de l'antenne tout en conservant la même fréquence de résonance [2]. Cette technique de miniaturisation est

particulièrement efficace pour les applications où l'espace est limité, comme dans les dispositifs portables ou embarqués.

III.2.2. Choix des matériaux (FR-4 vs Silicone)

Deux substrats ont été considérés pour cette étude : le FR-4 et le silicone. Le FR-4 est un matériau largement utilisé, économique et facile à usiner, avec une permittivité relative moyenne ($\epsilon_r \approx 4.3$). En revanche, la silicone présente une permittivité plus élevée ($\epsilon_r > 11$), ce qui le rend plus adapté à la miniaturisation, bien qu'il soit plus coûteux et plus délicat à manipuler [4]. Le choix entre ces deux substrats dépend donc d'un compromis entre la compacité recherchée, les performances électromagnétiques et les contraintes de fabrication.

III.2.3. Avantages et inconvénients des substrats à haute permittivité

L'utilisation de substrats à haute permittivité permet de réduire significativement les dimensions de l'antenne. Cependant, cela peut entraîner certaines limitations, tels que:

- Une réduction du gain,
- Une augmentation des pertes diélectriques,
- Une détérioration du diagramme de rayonnement,
- Une sensibilité accrue à la fabrication [5].

Ainsi, bien que la miniaturisation soit un avantage majeur, elle doit être équilibrée par une analyse rigoureuse des performances globales de l'antenne.

III.3. Description du Logiciel de Simulation CST

La société allemande CST (Computer Simulation Technology), fondée en 1992, a introduit en 1998 la première version de son logiciel CST Microwave Studio. Ce programme est spécialement conçu pour résoudre les équations des champs électromagnétiques à l'aide de la méthode des intégrales finies (FIT), élaborée par Tomas Weiland en 1977 dans le cadre de sa thèse à Darmstadt [6].

La méthode FIT consiste à discrétiser les équations intégrales de Maxwell afin de les adapter aux capacités de calcul numérique, tout en permettant le traitement de structures géométriques complexes. Elle repose sur une représentation des équations sur une grille spatiale, en veillant à conserver les lois de conservation de l'énergie. Elle utilise notamment des équations différentielles comme l'équation de Poisson ou l'équation d'onde.

Cette approche avancée peut être utilisée aussi bien dans le domaine temporel que fréquentiel [6]. Une fois la structure modélisée, l'utilisateur peut accéder à l'interface du logiciel CST.

III.4.Étude comparative de différents types d'antennes avec différents types d'alimentations utilisant les substrats FR-4 et silicone

Dans cette section, nous comparons les performances de différentes configurations d'antennes en utilisant deux substrats diélectriques couramment employés : le FR-4 et le silicone. Le choix du substrat influence fortement les caractéristiques électromagnétiques de l'antenne, notamment la fréquence de résonance, la bande passante, le gain et l'efficacité.

III.4.1.Conception et simulation d'une antenne patch alimentée par une ligne micro-ruban

III.4.1.1.Une antenne patch initiale (sans fente)

- **Spécifications techniques**

Nous proposons la conception d'une antenne patch circulaire simple, sans aucune fente, fonctionnant à la fréquence de 3,5 GHz. Deux types de substrats sont considérés : le FR-4, caractérisé par une permittivité relative $\epsilon_r = 4,3$, une tangente de pertes $\delta = 0,035$ et une épaisseur $h = 1,6$ mm ; ainsi que le silicone, possédant une permittivité relative $\epsilon_r = 11,9$, une tangente de pertes $\delta = 0,38$ et une épaisseur identique de $h = 1,6$ mm. { refer }

a) En utilisant le substrat FR-4

Pour déterminer les paramètres géométriques de l'antenne, en particulier le rayon du patch, on utilise des formules simplifiées basées sur les propriétés du substrat, notamment sa permittivité relative (constante diélectrique) et son épaisseur. Le rayon du patch peut être calculé à l'aide de l'expression suivante [3] :

$$r = \frac{F}{\left[1 + \frac{2 \cdot h}{\pi \cdot \epsilon_r \cdot F} \left(\ln \left(\frac{\pi \cdot F}{2 \cdot h} + 1,7726\right)\right)\right]^{1/2}} \quad .I$$

$$F = \frac{8,791 \cdot 10^9}{f_r \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \quad .II$$

Où :

f_r : Fréquence du travail

ϵ_r : Permittivité du substrat

h : Epaisseur du substrat

TABLEAU III.1 : Dimensions de l'antenne patch initiale silicone.

Paramètres	Formule de calcul
GW	$6*h+2*r$
GL	$6*h+2*r+LL$
LL	$\lambda/2$

Où :

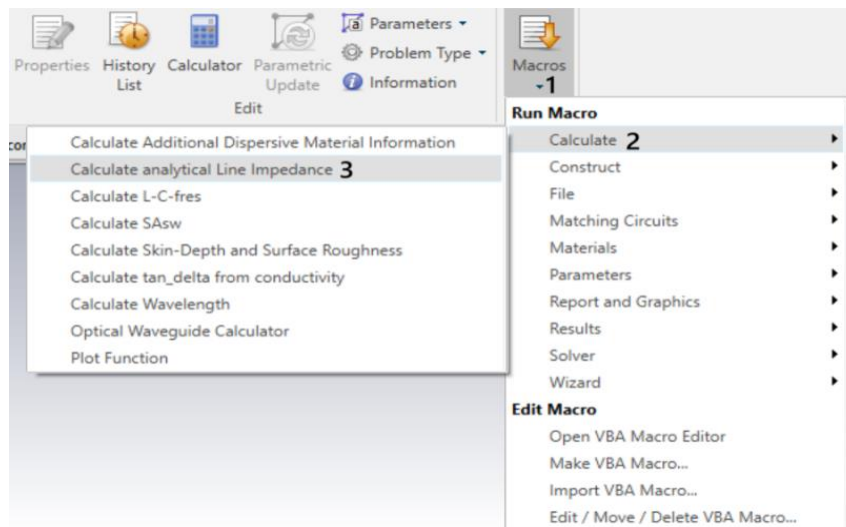
GW : largeur de plan de masse et substrat

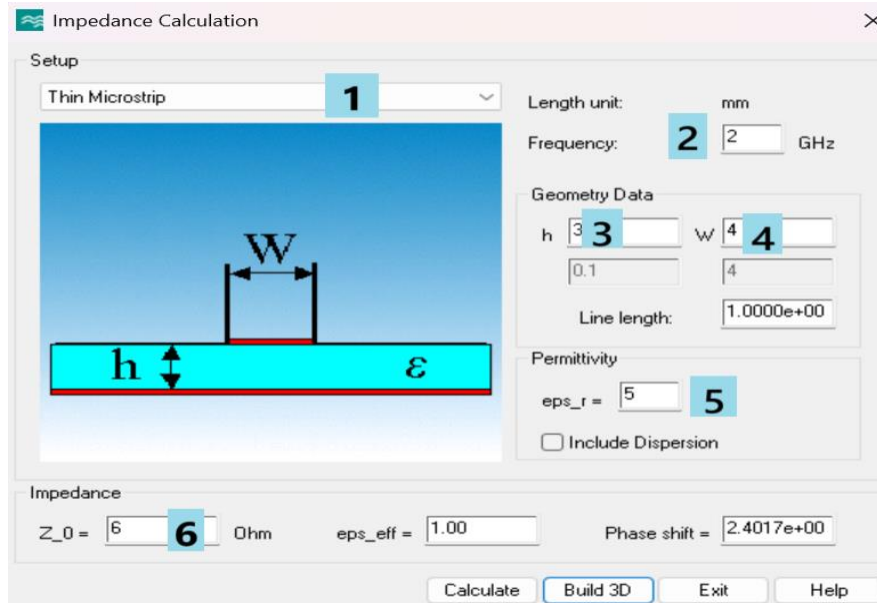
GL : longueur de plan de masse et substrat

LL : La longueur de la ligne micro-ruban

λ : la longueur d'onde $\lambda = c/f$

Pour calculer la largeur de la ligne d'alimentation (LW), on utilise le logiciel CST Studio. Les étapes à suivre sont les suivantes:





1. Type d'alimentation
2. Fréquence de travail
3. Épaisseur du substrat
4. Largeur de la ligne d'alimentation (LW)
5. Permittivité du substrat
6. Impédance

L'antenne est alimentée par une ligne micro-ruban de largeur LW et de longueur LL. La face arrière du substrat est entièrement recouverte par un plan de masse, comme illustré à la **Figure III.1**.

L'ensemble des dimensions de cette structure est récapitulé dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.2 : Dimensions de l'antenne initial avant l'adaptation.

Les paramètres	GW	GL	r	LW	LL
Les dimensions (mm)	32.876	75.733	11.638	3.137	42.857

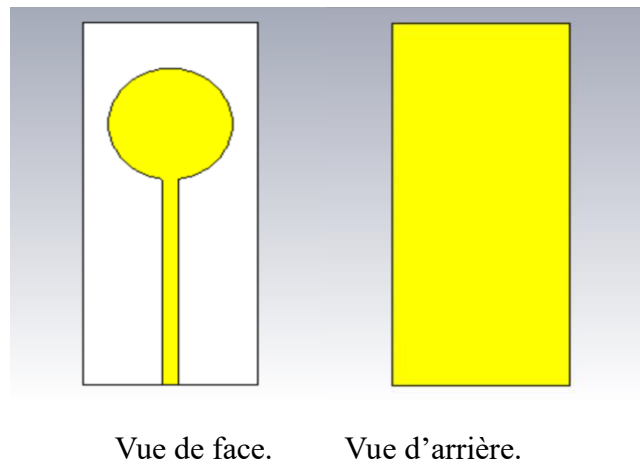


Figure III.1 : L'antenne initiale avant l'adaptation.

La simulation de cette configuration initiale a été effectuée sous environnement CST Microwave Studio. Le coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence sur un intervalle qui s'étale de 1 à 6 GHz est illustré par la figure III.2.

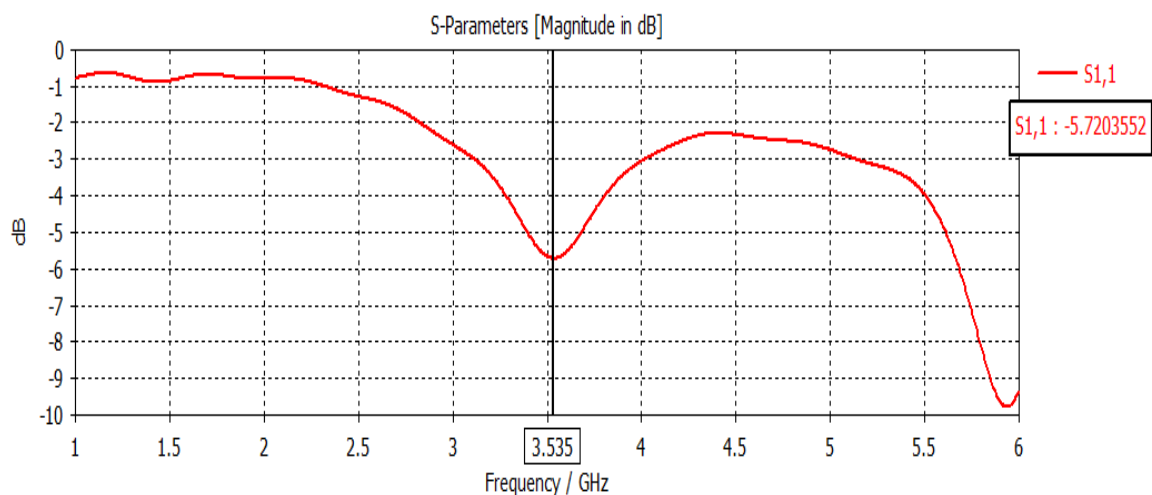


Figure III.2 : Coefficient de réflexion.

On observe que l'antenne présente un coefficient de réflexion de -5,684 dB à la fréquence de 3,535 GHz. Afin de l'adapter à notre fréquence de fonctionnement cible, une ligne d'adaptation a été ajoutée, de longueur LL_2 et de largeur LW_2 (voir Figure III.3). Cette ligne a pour rôle d'optimiser l'adaptation d'impédance, ce qui permet d'améliorer l'efficacité de l'antenne en réduisant les pertes et en assurant un fonctionnement optimal dans la bande de fréquence souhaitée.

Les paramètres géométriques de l'antenne, incluant cette ligne d'adaptation, sont récapitulés dans le tableau ci-dessous (**Tableau III.3**). Ces dimensions ont été ajustées de manière à garantir une bonne adaptation à la fréquence de travail visée.

Tableau III.3 : Dimensions de l'antenne initiale adapter avec FR-4.

Les paramètres	GW	GL	r	LW	LL1	LW2	LL2
Les dimensions (mm)	32.502	61.049	11.451	3.137	18.274	0.705	10.374

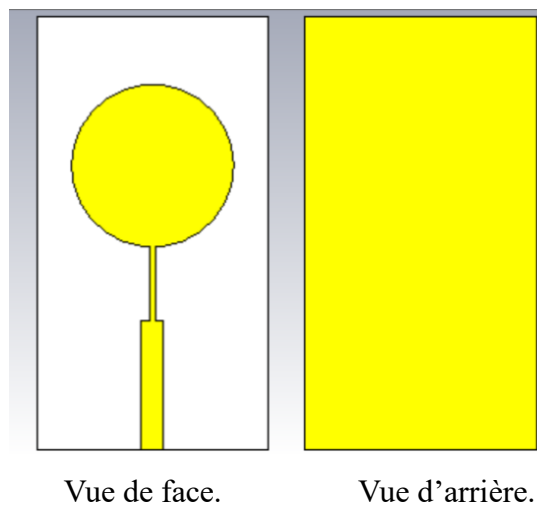


Figure III.3 : Antenne initiale avec FR-4 alimentée par une ligne micro-ruban.

La Figure III.4 illustre la variation du paramètre S_{11} en fonction de la fréquence. D'après cette courbe, on constate que l'antenne présente une excellente adaptation à l'impédance, avec une valeur de S_{11} atteignant -72,311 dB à la fréquence de résonance. La bande passante définie à -10 dB est de 134,06 MHz, s'étendant de 3,43 GHz à 3,57 GHz.

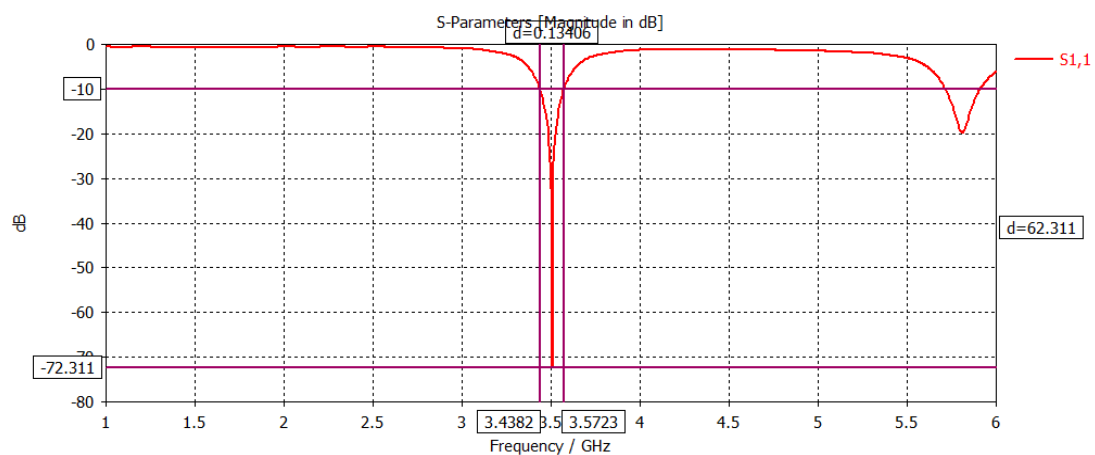


Figure III.4 : Coefficient de réflexion.

La Figure III.5 présente le **Rapport d'Onde Stationnaire (VSWR)** sur une plage de fréquences de 1 à 6 GHz. La valeur de **1.05 à 3.5 GHz** révèle une **adaptation d'impédance quasi-parfaite**, synonyme d'efficacité énergétique /et de faibles pertes par réflexion.

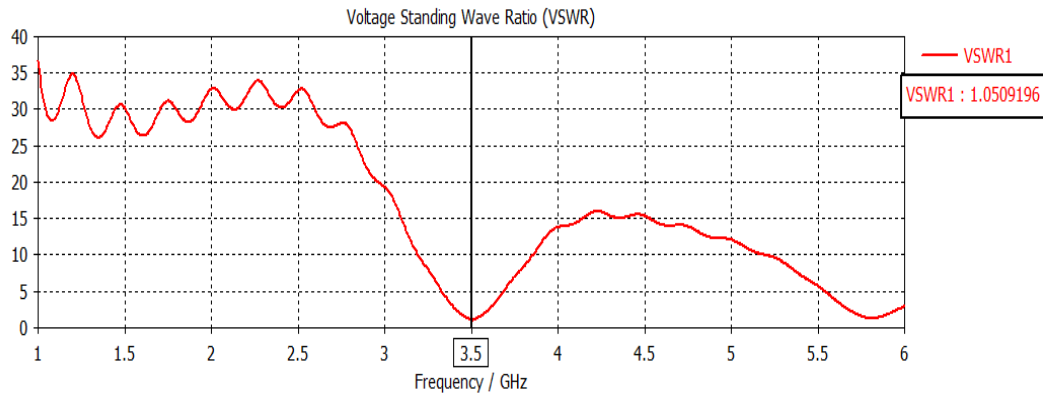


Figure III.5 : Le Rapport d'Onde Stationnaire (VSWR).

Le diagramme de rayonnement en deux et trois dimensions de cette antenne est représenté dans la Figure III.6. Un gain maximal de 2.69 dB est réalisé avec cette antenne.

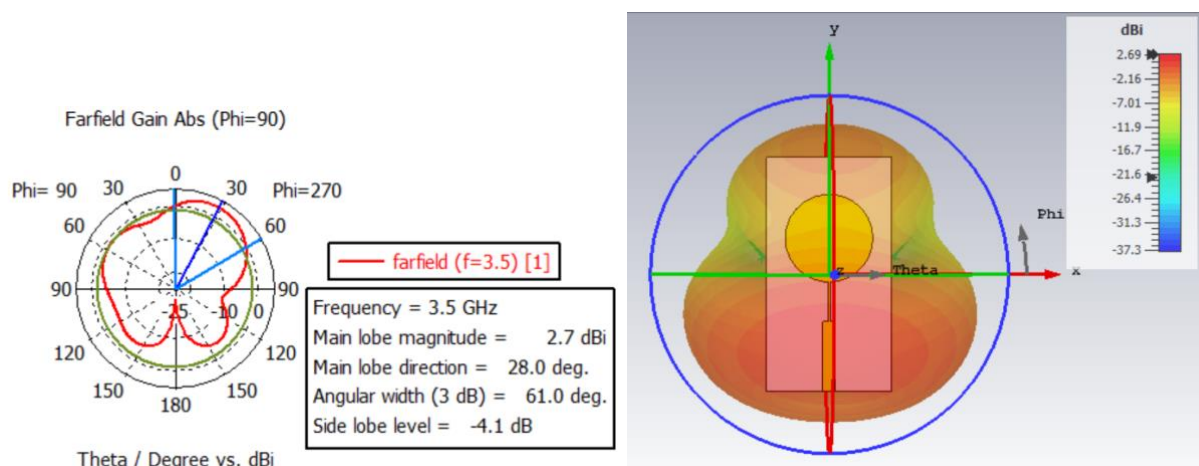


Figure III.6 : Diagramme de rayonnement en 2 et 3D de l'antenne initiale avec FR-4 alimentée par une ligne micro-ruban.

b) En utilisant le substrat en silicone

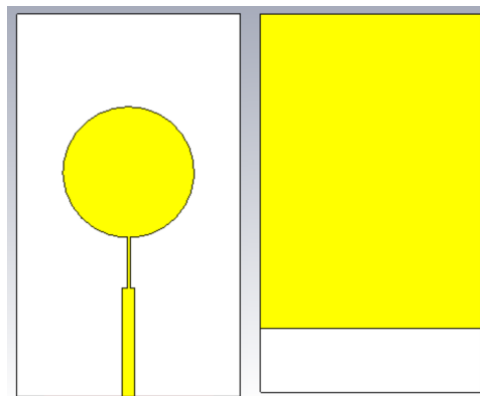
La figure ci-dessus illustre une version modifiée d'une antenne monopolaire, réalisée cette fois-ci sur un substrat en silicone. La vue de face montre un élément rayonnant de forme circulaire, alimenté par une ligne micro-ruban, sans aucune fente ou modification géométrique particulière. Cette structure simple permet une fabrication facilitée tout en conservant des performances de base

acceptables. La vue d'arrière met en évidence un plan de masse plein, occupant une grande partie de la face inférieure, avec une hauteur définie par la technique DGS (Defected Ground Structure) à 6,728 mm. L'utilisation du silicone comme matériau diélectrique contribue à une meilleure miniaturisation de l'antenne

L'ensemble des dimensions de cette structure se résumant dans le tableau suivant :

TABLEAU III.4 : Dimensions de l'antenne patch initiale silicone.

Les paramètres	GW	GL	r	LW	LL1	LW2	LL2
Les dimensions (mm)	23.209	39.694	6.804	1.27	11.242	0.282	5.342



Vue de face.

Vue d'arrière.

Figure III.7 : Antenne sans fente en silicone alimentée par une ligne micro-ruban.

La **figure III.8** présente l'évolution du paramètre S11 en fonction de la fréquence. Il en ressort que l'antenne offre une excellente adaptation d'impédance, avec une valeur de S11 -88,6 dB à la fréquence de résonance. La bande passante, définie pour un seuil de -10 dB, est de 386,17 MHz, s'étendant de 3,219 GHz à 3,605 GHz.

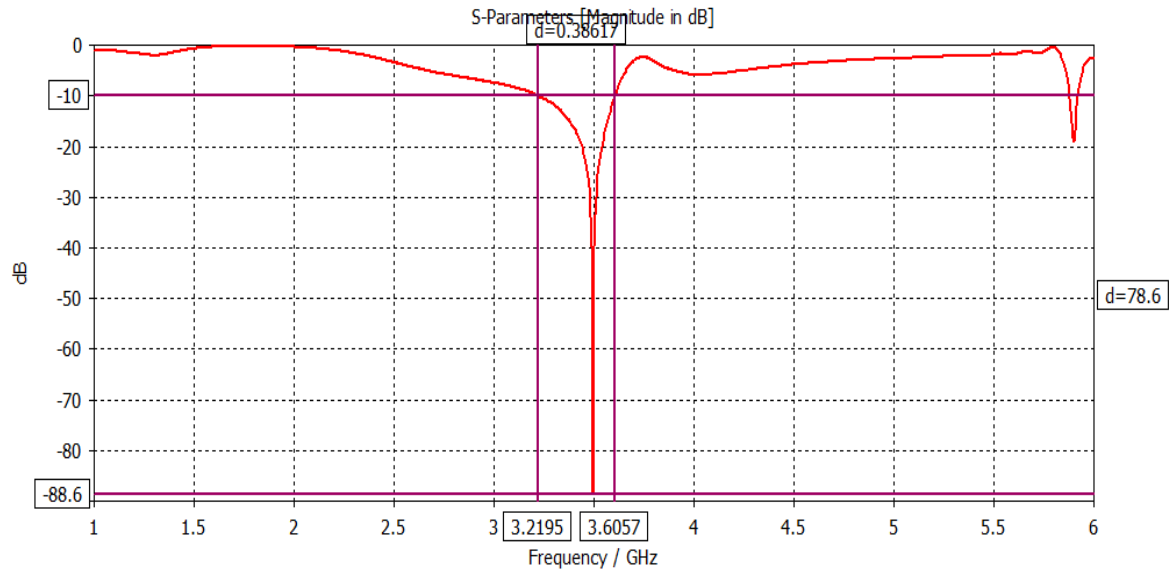


Figure III.8 : Coefficient de réflexion.

La figure ci-dessus représente la courbe du **rapport d'ondes stationnaires (VSWR)** en fonction de la fréquence, dans la plage de 1 à 6 GHz. On observe que le **minimum de VSWR est atteint à 3,5 GHz**, avec une valeur très proche de l'unité ($VSWR \approx 1.02$), ce qui indique une excellente adaptation d'impédance à cette fréquence. Cela signifie que presque toute la puissance transmise est rayonnée par l'antenne, avec très peu de réflexion. En revanche, aux autres fréquences, notamment autour de 1,8 GHz et 5,8 GHz, on note des pics de VSWR élevés, traduisant une mauvaise adaptation et donc une réflexion importante. Cette courbe permet donc d'identifier clairement la fréquence de résonance de l'antenne et d'évaluer sa bande de fonctionnement efficace.

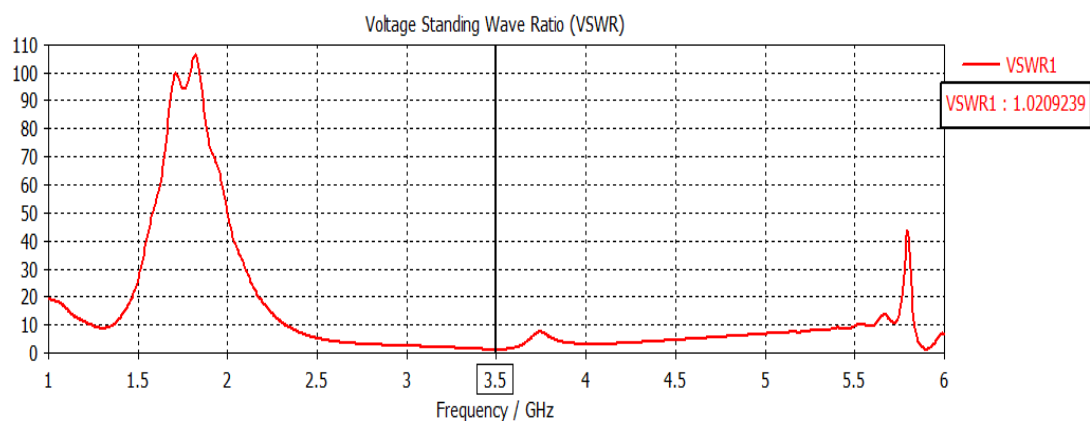


Figure III.9 : Le rapport d'Onde Stationnaire (VSWR).

Le rayonnement à trois dimensions de cette antenne est représenté dans la Figure III.10. Un gain maximal de 3.67 dB est réalisé avec cette antenne.

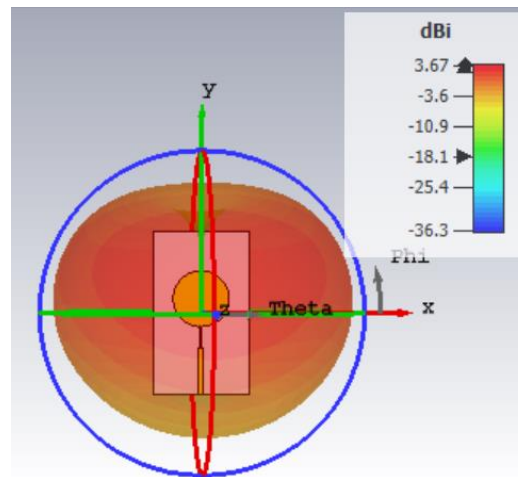


Figure III.10 : Diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne initiale avec silicone.

Le **tableau III.5** présente une comparaison détaillée entre deux antennes patch circulaires fonctionnant à **3.5 GHz**, conçues respectivement sur des substrats **FR-4** et **silicone**, cette dernière intégrant une structure **DGS (Defected Ground Structure)** pour optimiser ses performances. Voici les observations clés :

1. Dimensions du Patch:

- Le patch en **FR-4** a un rayon de **11.451 mm**, tandis que celui en silicone (avec DGS) est nettement plus compact (**6.82 mm**). Cette réduction de taille est attribuable à la constante diélectrique plus élevée du silicone ($\epsilon_r=11.9$), permettant une miniaturisation significative.

2. Coefficient de Réflexion (S11):

- Les deux antennes présentent d'excellentes performances d'adaptation, avec un **S11** très bas (**-72.3 dB pour le FR-4** et **-88.6 dB pour le silicone**). Le DGS sur le substrat silicone améliore encore l'adaptation d'impédance, réduisant les réflexions.

3. Bande Passante :

- L'antenne en **silicone avec DGS** offre une **bande passante bien plus large (386 MHz)** contre **134 MHz pour le FR-4**. Le DGS élargit efficacement la plage de fréquences utilisables, couvrant **3.21–3.60 GHz** (contre **3.43–3.57 GHz** pour le FR-4).

4. VSWR (Taux d'Ondes Stationnaires):

- Les deux antennes atteignent des valeurs quasi-parfaites (**1.05 pour le FR-4, 1.02 pour le silicone**), confirmant une excellente adaptation à la fréquence centrale de **3.5 GHz**.

5. Gain:

- Le silicone avec DGS génère un **gain légèrement supérieur (3.67 dB)** comparé au FR-4 (**3.15 dB**), grâce à une meilleure efficacité radiative et à la réduction des pertes diélectriques.

Tableau III.5: Comparaison entre deux antennes sans fente, alimentées par une ligne micro-ruban.

Paramètres	FR-4	Silicone
Rayon de patch	11.451	6.82
S11 (dB)	-72.311	-88.6
Bande passante a -10 dB	134,06 MHz, [3,43 - 3,57]	386.17 MHz [3.21-3.60]
VSWR	1.05	1.02
Gain (dB)	2.69	3.67

III.4.1.2. Réseau MIMO à deux éléments d'une antenne sans fente alimentée par une ligne micro-ruban

a) En utilisant le substrat FR-4

L'antenne initiale (sans fente) MIMO est composée de deux éléments rayonnants circulaires, chacun étant alimenté par une ligne micro-ruban. Ces deux lignes sont disposées de manière symétrique pour assurer une distribution homogène du champ. La face inférieure du substrat comporte un plan de masse partiellement évidé, présentant une ouverture en forme de « I », comme illustré à la Figure III.11. Cette découpe permet d'améliorer l'isolation entre les deux ports de l'antenne, tout en influençant favorablement les performances en termes de bande passante et d'adaptation d'impédance.

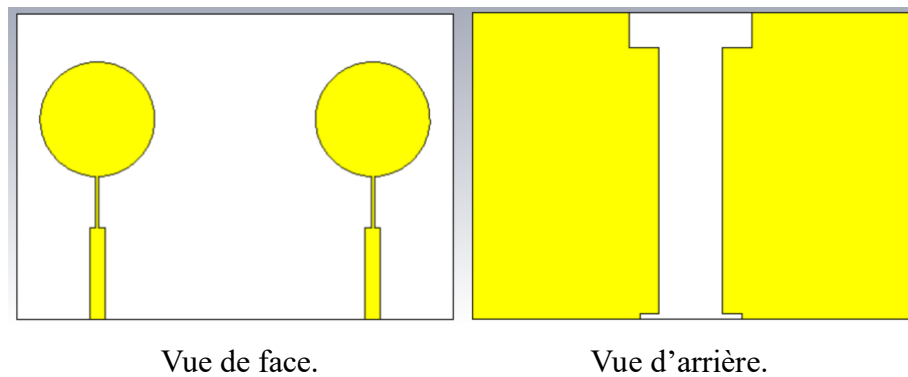


Figure III.11 : Réseau MIMO à deux éléments d'antenne initiale (sans fente) avec FR-4 alimentée par une ligne micro-ruban.

La **figure III.12** présente la réponse en fréquence des paramètres S de l'antenne MIMO initiale. Les coefficients de réflexion S_{11} et S_{22} , représentés respectivement en rouge et orange, montrent une bonne adaptation autour de 3,5 GHz, avec des valeurs atteignant environ -28,8 dB, ce qui indique une faible réflexion et donc une bonne adaptation d'impédance à cette fréquence. Les coefficients de transmission croisée S_{12} et S_{21} , représentés en bleu et vert, présentent des niveaux très faibles (inférieurs à -82 dB), traduisant une excellente isolation entre les deux ports. Ces résultats confirment le bon fonctionnement de la structure initiale en termes d'adaptation et d'isolation, ce qui est essentiel pour garantir les performances d'un système MIMO.

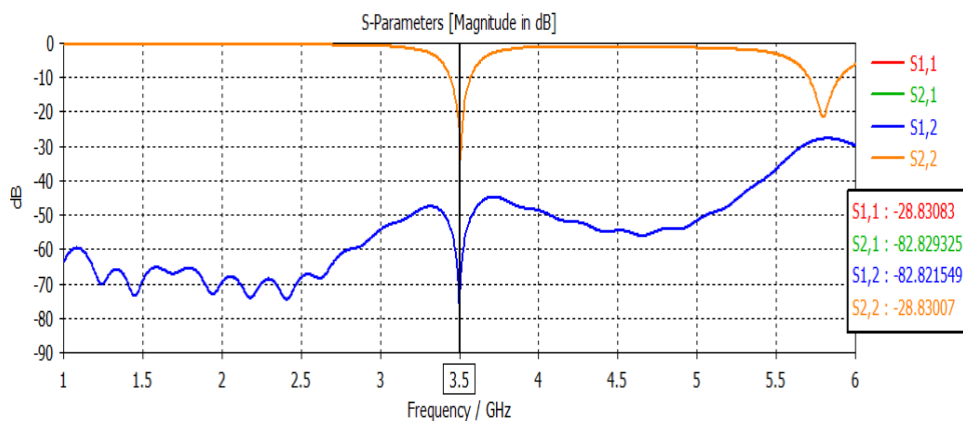


Figure III.12 : Paramètres S.

La **Figure III.13** illustre le diagramme de rayonnement en 2 et 3D de la structure MIMO initiale à la fréquence de 3,5 GHz. On observe une répartition relativement uniforme de l'énergie autour de l'antenne, avec un maximum de gain dirigé principalement selon l'axe +Z, ce qui indique un rayonnement préférentiel en direction normale au plan du substrat. Le gain maximal atteint environ 3,11 dBi, ce qui est acceptable pour une antenne compacte. La forme du lobe principal montre un rayonnement quasi omnidirectionnel dans le plan XY, ce qui est

favorable pour des applications sans fil nécessitant une bonne couverture spatiale. Les faibles valeurs de rayonnement dans les directions opposées (zones en bleu) traduisent une directivité modérée et un bon confinement de l'énergie.

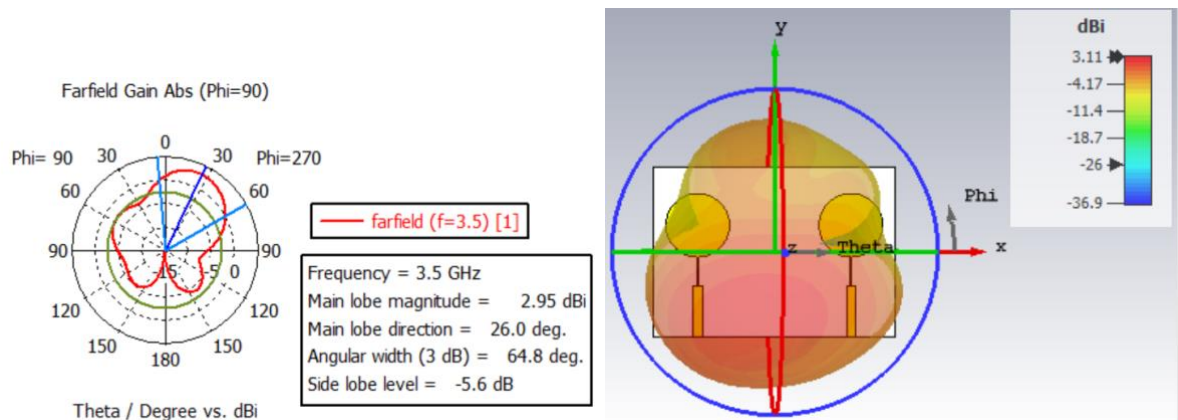


Figure III.13 : Diagramme de rayonnement en 2 et 3D.

La figure III.4 présente le facteur d'onde stationnaire (VSWR) des deux ports de l'antenne. À 3,5 GHz, le VSWR est proche de 1,07 pour les deux ports, indiquant une excellente adaptation d'impédance et donc un minimum de pertes par réflexion.

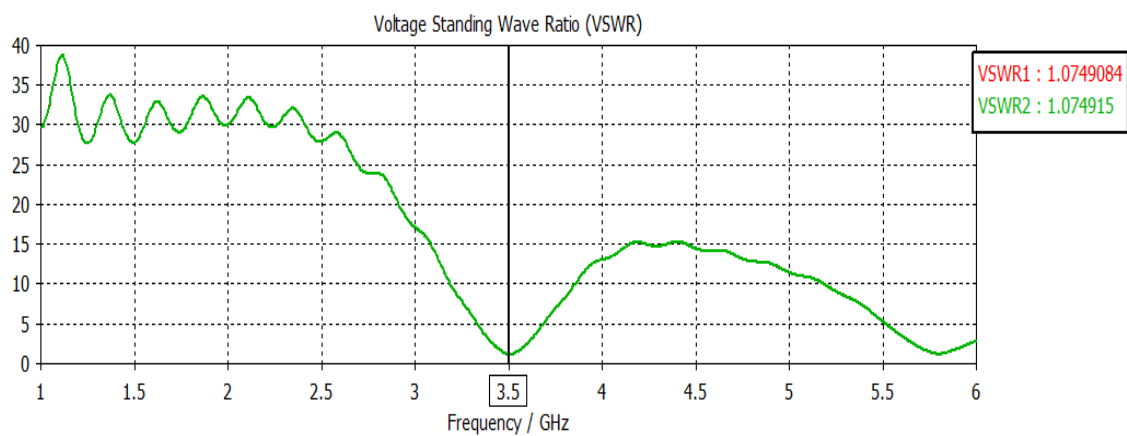


Figure III.14 : Rapport d'Onde Stationnaire (VSWR).

La Figure III.5 présente, le gain de diversité (Diversity Gain) de l'antenne MIMO en fonction de la fréquence. On observe que ce gain reste très proche de la valeur maximale théorique de 10 dB sur l'ensemble de la bande étudiée, ce qui témoigne d'une excellente efficacité de diversité.

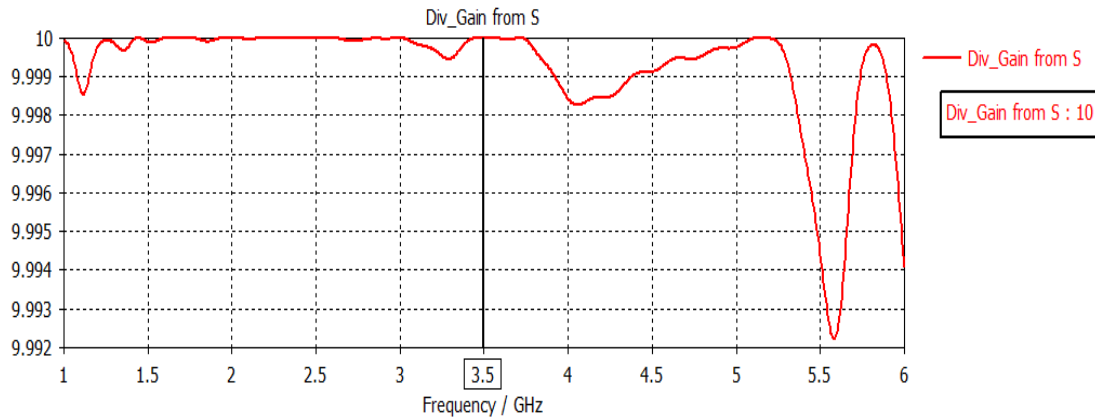


Figure III.15 : Le gain de diversité.

En bas, la courbe de l'ECC (Envelope Correlation Coefficient) montre des valeurs extrêmement faibles, de l'ordre de 10^{-12} à la fréquence de 3,5 GHz. Cette très faible corrélation entre les deux éléments rayonnants garantit un fonctionnement optimal du système MIMO, assurant une bonne isolation et des performances élevées en transmission multi-antenne.

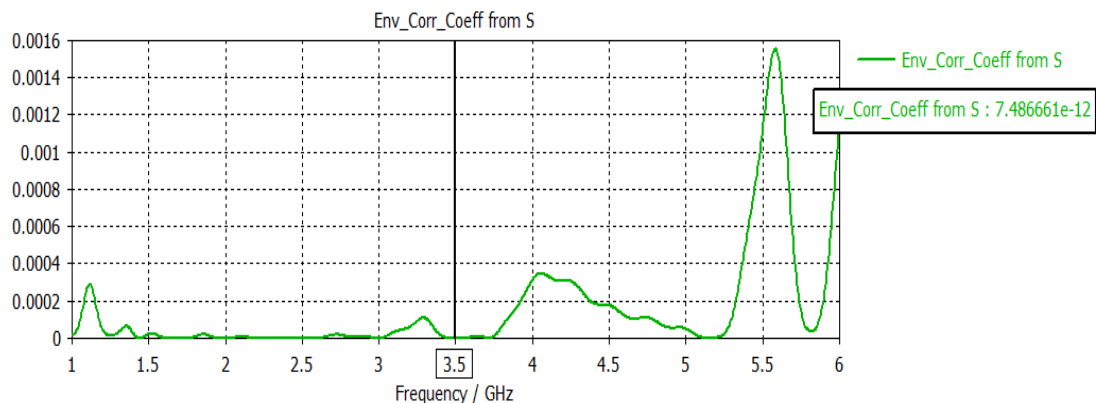


Figure III.16 : Le coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC).

b) En utilisant le substrat en silicone

La figure ci-dessus illustre une conception modifiée d'une antenne MIMO à deux ports, réalisée cette fois-ci sur un substrat en silicone. La vue de gauche montre deux éléments rayonnants circulaires, chacun alimenté par une ligne micro-ruban dans une disposition parfaitement symétrique, assurant une bonne distribution du champ électromagnétique et une amélioration des performances de rayonnement. La vue de droite correspond au plan de masse, où une découpe centrale modifiée est introduite, différente de la forme en « I » classique. Cette structure vise à réduire le couplage mutuel entre les deux éléments rayonnants tout en maintenant une adaptation d'impédance satisfaisante. L'utilisation du silicone, matériau à haute

permittivité, favorise la miniaturisation de l'antenne et influe positivement sur ses performances électromagnétiques.

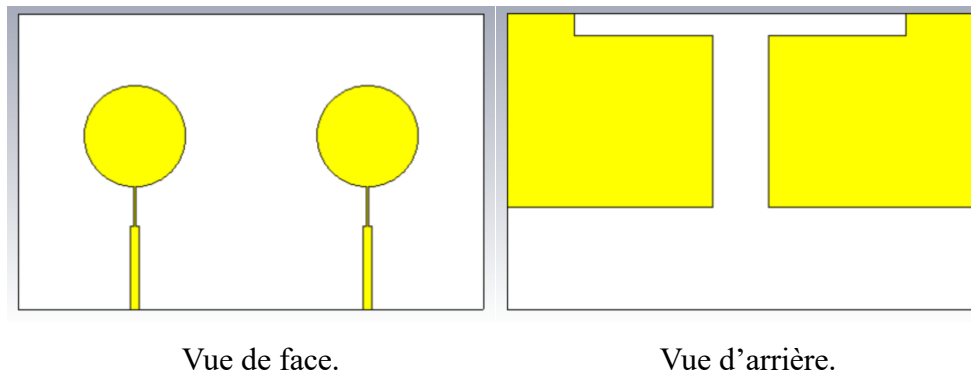


Figure III.17 : Réseau MIMO à deux éléments d'antenne initiale (sans fente) avec Silicone alimentée par une ligne micro-ruban.

Cette figure montre la courbe des paramètres S en fonction de la fréquence, de 1 GHz à 6 GHz, pour une antenne MIMO à deux éléments sans fente, sur substrat silicone.

- Les courbes **S11 (rouge)** et **S22 (orange)** représentent les coefficients de réflexion pour les ports 1 et 2. À 3.5 GHz, **S11 = -14.22 dB** et **S22 = -14.21 dB**, indiquant une **bonne adaptation** de l'antenne (les valeurs inférieures à -10 dB sont considérées comme acceptables).
- Les courbes **S21 (vert)** et **S12 (bleu)** représentent la transmission croisée (ou isolement) entre les deux ports. À 3.5 GHz, **S21 ≈ S12 ≈ -14.26 dB**, ce qui indique un **isolement raisonnable**. Pour les antennes MIMO, un isolement supérieur à -15 dB est généralement recherché, donc cette antenne se situe à la limite acceptable.
- L'affichage en dB permet d'observer les minima des réflexions, ce qui montre que **la fréquence de résonance principale est à 3.5 GHz**.

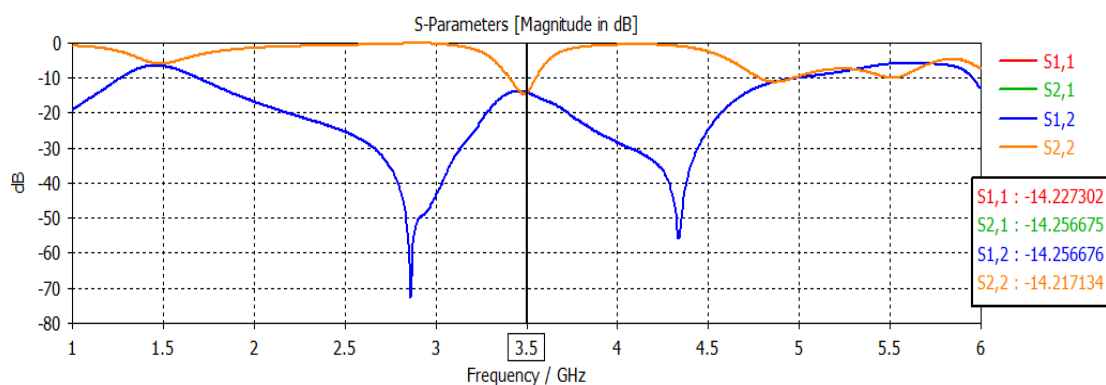


Figure III.18 : Paramètres S.

Cette figure présente le rapport d'onde stationnaire (VSWR) pour les deux ports. À la fréquence de résonance de 3.5 GHz, les deux ports affichent un VSWR proche de 1.48, ce qui confirme une adaptation efficace avec peu de puissance réfléchie. En dehors de cette bande, notamment autour de 3 GHz, des pics élevés indiquent une mauvaise adaptation, ce qui limite la bande passante utile de l'antenne à une plage centrée autour de 3.5 GHz.

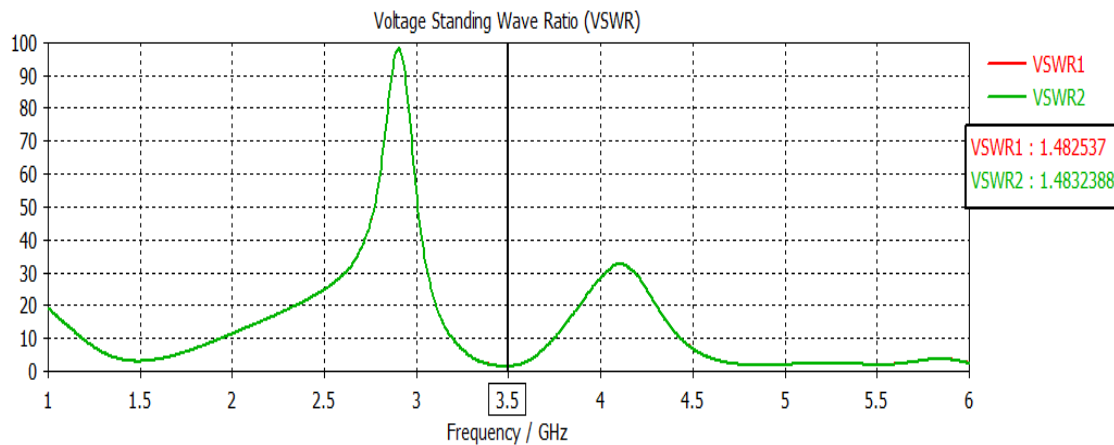


Figure III.19 : Rapport d'Onde Stationnaire (VSWR).

La **Figure III.20** montre le diagramme de rayonnement en 2 et 3D de l'antenne. Le gain maximal atteint environ 4.2 dBi, ce qui est satisfaisant pour une antenne compacte. La distribution du champ électromagnétique est globalement omnidirectionnelle autour de l'axe vertical (z), ce qui est bénéfique pour une couverture uniforme. On y distingue clairement les deux éléments rayonnants, implantés symétriquement sur le substrat, renforçant ainsi la capacité MIMO.

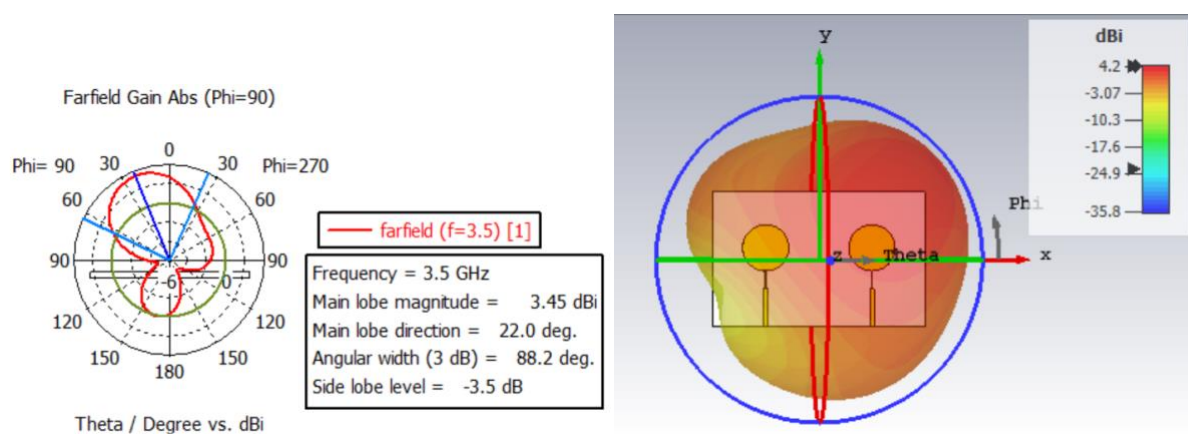


Figure III.20 : Diagramme de rayonnement en 2 et 3D.

La **Figure III.21** montre le **coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC)** entre les deux éléments de l'antenne MIMO, calculé à partir des paramètres S. À la fréquence de 3.5

GHz, l'ECC est extrêmement faible, avec une valeur de **0.0057**, ce qui est très favorable. Un ECC inférieur à 0.5 (et idéalement < 0.01) est généralement requis pour assurer une **bonne diversité spatiale** dans les systèmes MIMO. Cela signifie que les deux antennes rayonnent de manière suffisamment indépendante, ce qui améliore les performances globales du système de communication (réduction de l'interférence et amélioration du débit).

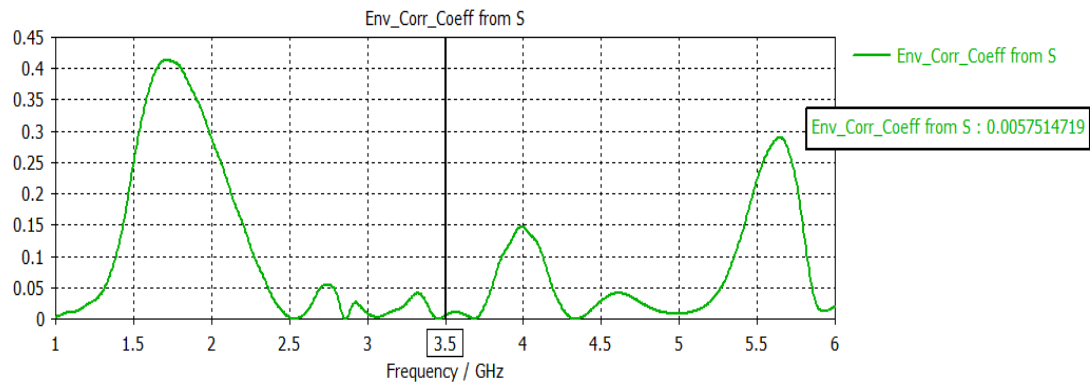


Figure III.21 : Le coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC).

Cette figure (**Figure III.22**) présente le gain de diversité (Diversity Gain) également calculé à partir des paramètres S. À la fréquence de 3.5 GHz, la valeur du gain de diversité atteint 9.97 dB, ce qui est très proche de la valeur maximale théorique (10 dB), indiquant un excellent fonctionnement MIMO. Un tel gain confirme que le système bénéficie pleinement des avantages de la diversité, notamment en environnement multi-trajet, ce qui se traduit par une meilleure fiabilité du lien sans fil.

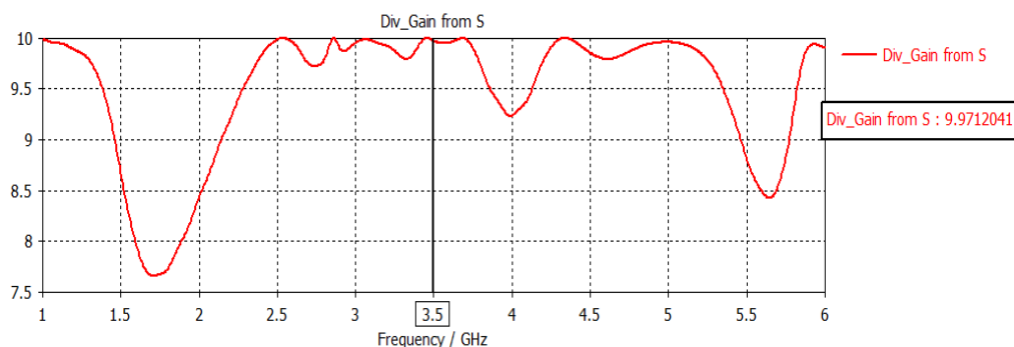


Figure III.22 : Le gain de diversité.

Le **Tableau III.6** compare les performances de deux antennes MIMO circulaires sans fente, l'une utilisant un substrat en FR-4 et l'autre en silicone. Les paramètres clés évalués incluent les coefficients de réflexion (S_{11} , S_{22}), l'isolation entre les ports (S_{12} , S_{21}), le taux

d'onde stationnaire (VSWR), le gain, l'ECC (Envelope Correlation Coefficient), et le gain de diversité :

1. Coefficients de réflexion (S11 et S22)

- **Substrat FR-4** : Les valeurs de S11 et S22 sont de -28.83 dB, ce qui indique une excellente adaptation d'impédance (réflexion très faible). Cela signifie que la majeure partie de la puissance est transmise efficacement.
- **Substrat silicone** : Les valeurs de S11 et S22 sont de -14.21 dB à -14.22 dB, ce qui est acceptable mais moins performant que le FR-4. Cela suggère une réflexion légèrement plus importante, donc une adaptation d'impédance moins optimale.

Conclusion : Le FR-4 offre une meilleure adaptation d'impédance que le silicone.

2. Isolation entre les ports (S12 et S21)

- **Substrat FR-4** : Les valeurs de S12 et S21 sont très faibles (-82.82 dB), ce qui indique une isolation exceptionnelle entre les ports. Cela est crucial pour les systèmes MIMO pour éviter les interférences entre les antennes.
- **Substrat silicone** : Les valeurs de S12 et S21 sont nettement plus élevées (-14.25 dB), ce qui indique une isolation bien moindre. Cela pourrait entraîner des interférences entre les antennes dans un système MIMO.

Conclusion : Le FR-4 est bien supérieur en termes d'isolation entre les ports, ce qui est un avantage significatif pour les applications MIMO.

3. Taux d'onde stationnaire (VSWR)

- **Substrat FR-4** : Les valeurs de VSWR sont de 1.07, très proches de l'idéal (1.0), ce qui confirme une excellente adaptation d'impédance.
- **Substrat silicone** : Les valeurs de VSWR sont de 1.48, ce qui est acceptable mais moins performant que le FR-4. Une valeur supérieure à 1.5 est généralement considérée comme moins optimale.

Conclusion : Le FR-4 présente des performances supérieures en termes de VSWR.

4. Gain de l'antenne

- **Substrat FR-4** : Le gain est de 3.11 dB.

- **Substrat silicone** : Le gain est légèrement plus élevé à 4.2 dB.

Conclusion : Le silicone offre un gain légèrement supérieur, ce qui pourrait être avantageux pour certaines applications nécessitant une meilleure directivité ou portée.

5. Envelope Correlation Coefficient (ECC)

- **Substrat FR-4** : L'ECC est extrêmement faible (7.48×10^{-12} à 127.48×10^{-12}), ce qui indique une corrélation quasi nulle entre les antennes. C'est idéal pour les systèmes MIMO, car cela permet une diversité de signal optimale.
- **Substrat silicone** : L'ECC est de 0.0057, ce qui reste faible mais significativement plus élevé que pour le FR-4. Cela pourrait réduire légèrement l'efficacité de la diversité.

Conclusion : Le FR-4 est bien meilleur pour minimiser la corrélation entre les antennes, ce qui est critique pour les performances MIMO.

6. Gain de diversité

- **Substrat FR-4** : Le gain de diversité est de 10 dB.
- **Substrat silicone** : Le gain de diversité est légèrement inférieur à 9.97 dB.

Les deux substrats offrent des gains de diversité très similaires, avec un léger avantage pour le FR-4.

Synthèse des performances

- **Substrat FR-4** :
 - Excellente adaptation d'impédance (S_{11}/S_{22} très faibles, VSWR proche de 1).
 - Isolation exceptionnelle entre les ports (S_{12}/S_{21} très faibles).
 - ECC extrêmement faible, idéal pour les systèmes MIMO.
 - Gain légèrement inférieur mais compensé par d'autres paramètres.
- **Substrat silicone** :
 - Adaptation d'impédance et isolation moins bonnes.
 - Gain légèrement supérieur.
 - ECC plus élevé, ce qui pourrait limiter les performances MIMO.

Tableau III.6 : Comparaison des performances entre deux réseaux MIMO à deux éléments d'antennes sans fente, alimentées par ligne micro-ruban.

Paramètres	Antenne avec substrat en FR-4	Antenne avec substrat en silicone
S11 (dB)	-28.83	-14.22
S12 (dB)	-82.82	-14.25
S21 (dB)	-82.82	-14.25
S22 (dB)	-28.83	-14.21
VSWR1	1.07	1.48
VSWR2	1.07	1.48
Gain (dB)	3.11	4.2
ECC	7.48×10^{-12}	0.0057
Gain de diversité	10	9.97

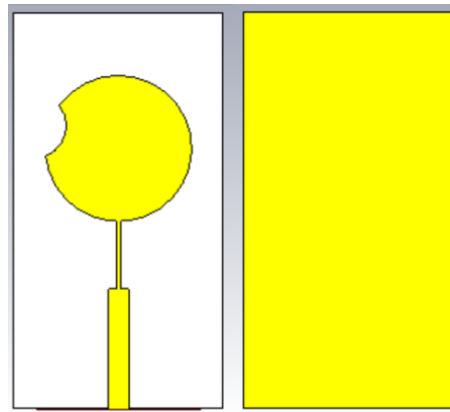
III.4.1.3. Une antenne patch avec fente alimentée par une ligne micro-ruban

a) En utilisant le substrat FR-4

La figure ci-dessus **figure III.23** montre une antenne patch avec fente réalisée sur un substrat FR-4. La vue de face présente un patch circulaire comportant une fente latérale en forme d'arc, destinée à ajuster la fréquence de résonance et à améliorer l'adaptation d'impédance. L'antenne est alimentée par une ligne micro-ruban en position centrale. La vue d'arrière montre un plan de masse totalement métallisé, sans aucune découpe, assurant une structure simple et stable. Les dimensions complètes de cette antenne sont résumées dans le Tableau III.5.

Tableau III.7 : Dimensions de l'antenne patch initiale silicone.

Les paramètres	GW	GL	r	LW	LL1	LW2	LL2
Les dimensions (mm)	32.04	60.84	11.22	3.137	18.4	0.756	10.5



Vue de face. Vue d'arrière.

Figure III.23 : Antenne avec fente en utilisant le substrat FR-4 alimentée par une ligne micro-ruban.

La figure ci-dessus illustre la courbe du paramètre de rétrodiffusion S_{11} , exprimé en décibels (dB), en fonction de la fréquence, pour l'antenne simulée. À la fréquence centrale de **3,5 GHz**, correspondant à la bande cible, on observe une valeur de S_{11} égale à $-46,31$ dB, ce qui indique une excellente adaptation d'impédance et un faible taux de réflexion à cette fréquence. Dans notre cas, la valeur très basse montre que plus de 99,99 % de la puissance est transmise dans l'antenne, ce qui reflète une performance optimale en termes de couplage entre la ligne d'alimentation et le dispositif rayonnant. De plus, la bande passante, définie par les points où $S_{11} \leq -10$ dB, s'étend de 3,4371 GHz à 3,5668 GHz, soit une bande utile d'environ 129,7 MHz, couvrant efficacement les besoins de communication dans la bande 3.5 GHz utilisée pour la 5G. Cette performance valide la pertinence du design proposé pour une application à haut débit.

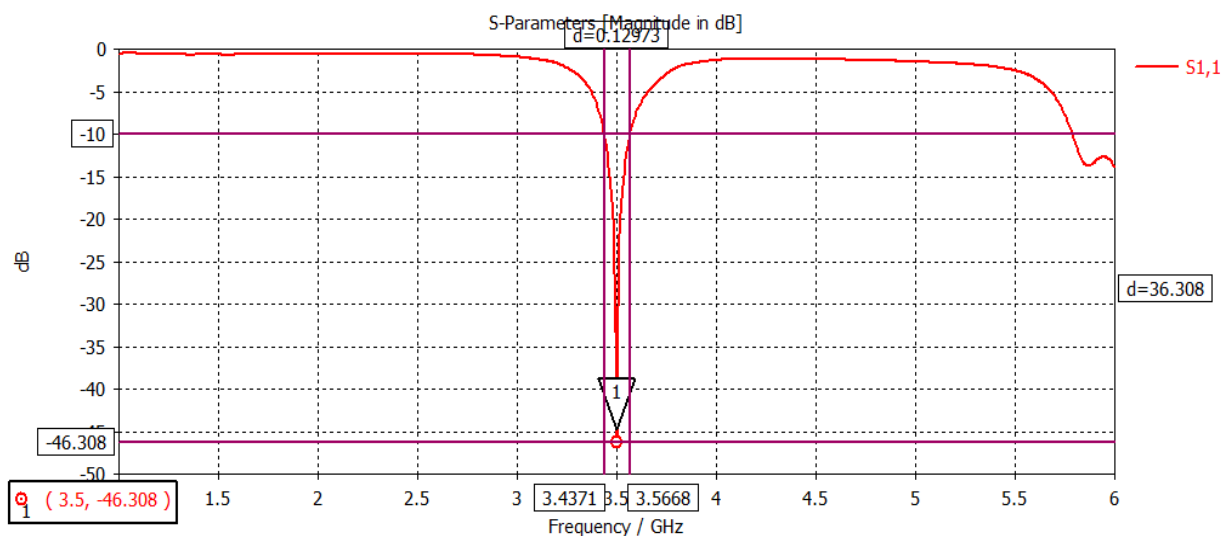


Figure III.24 : Coefficient de réflexion.

La **figure III.25** représente le diagramme de rayonnement 3D, montrant une directivité marquée le long de l'axe vertical avec une intensité maximale d'environ 2,5 dBi.

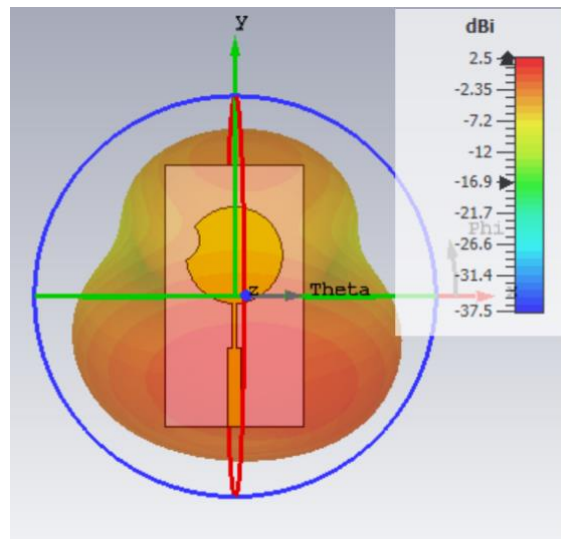


Figure III.25 : Diagramme de rayonnement en 2 et 3D.

La courbe du VSWR montre un excellent accord d'impédance à la fréquence de 3.5 GHz, avec une valeur minimale de 1.009, proche de l'idéal (1). Cela signifie que très peu de puissance est réfléchi, ce qui garantit un fonctionnement efficace de l'antenne dans cette bande de fréquence.

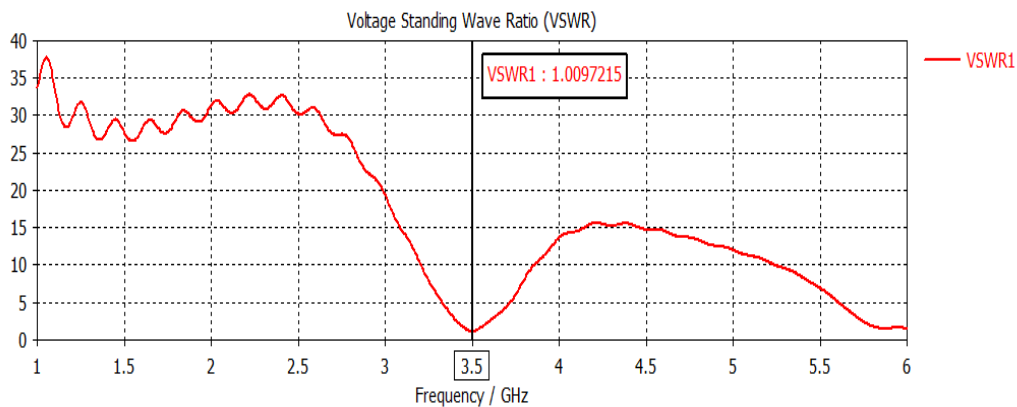


Figure III.26 : Rapport d'Onde Stationnaire (VSWR).

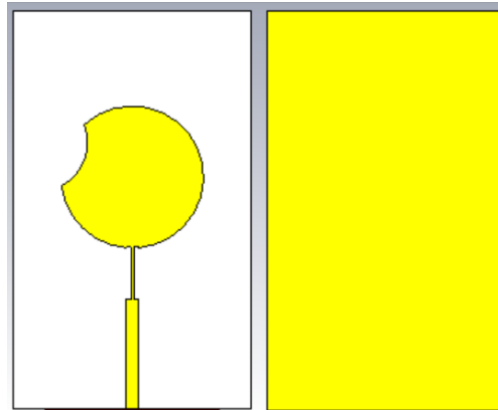
b) En utilisant le substrat en silicone

La figure ci-dessus illustre une antenne patch avec fente, conçue cette fois sur un substrat en silicone. La vue de face présente un patch circulaire modifié par une fente latérale en forme d'arc, utilisée pour ajuster la fréquence de résonance et optimiser l'adaptation d'impédance. À l'arrière, le plan de masse est entièrement métallisé, sans aucune découpe, conservant ainsi une

topologie simple. Les dimensions géométriques de cette antenne sont détaillées dans le Tableau III.8.

Tableau III.8 : Dimensions de l'antenne patch initiale silicone.

Les paramètres	GW	GL	r	LW	LL1	LW2	LL2
Les dimensions (mm)	23.974	40.281	7.187	1.27	11.154	0.282	5.254



Vue de face.

Vue d'arrière.

Figure III.27 : Antenne avec fente en utilisant le substrat en silicone alimentée par une ligne micro-ruban.

La figure présente la variation du paramètre S11 en fonction de la fréquence (1 à 6 GHz). On observe une résonance profonde à **3.5 GHz** avec un **S11 minimal de -43.434 dB**, ce qui indique une excellente adaptation d'impédance à cette fréquence. La bande passante à -10 dB couvre approximativement **3.482 GHz à 3.5175 GHz (soit ~35 MHz)**, suggérant une bande étroite mais très bien adaptée. En dehors de cette plage, le S11 remonte rapidement, ce qui limite l'utilisation de l'antenne à des applications spécifiques nécessitant une fréquence précise.

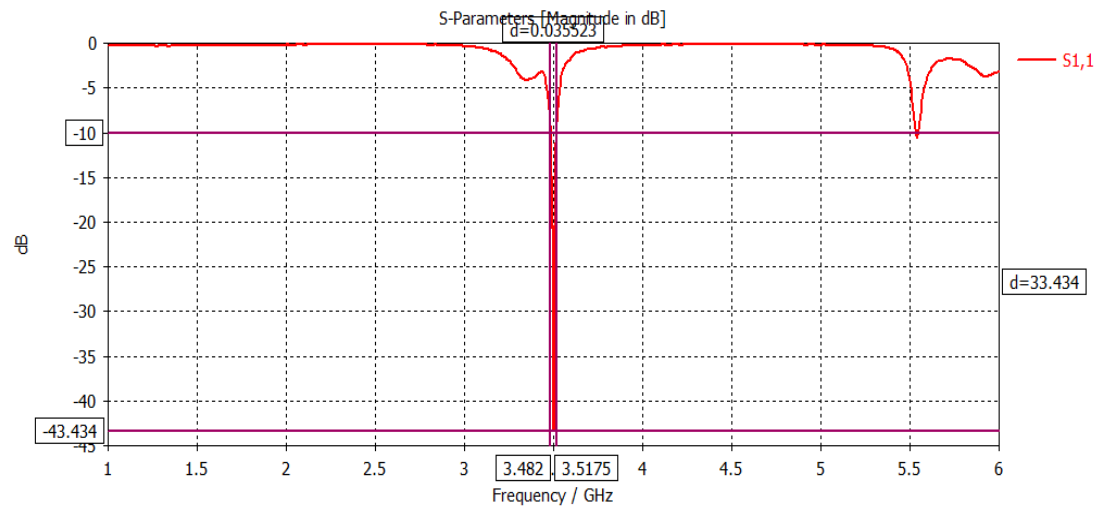


Figure III.28 : Coefficient de réflexion.

Le diagramme de rayonnement montre un gain maximal de **4.46 dBi**, avec une décroissance progressive du gain en fonction de l'angle Theta. Les valeurs négatives aux angles éloignés indiquent une atténuation significative du rayonnement hors axe, ce qui confirme une directivité modérée mais bien marquée.

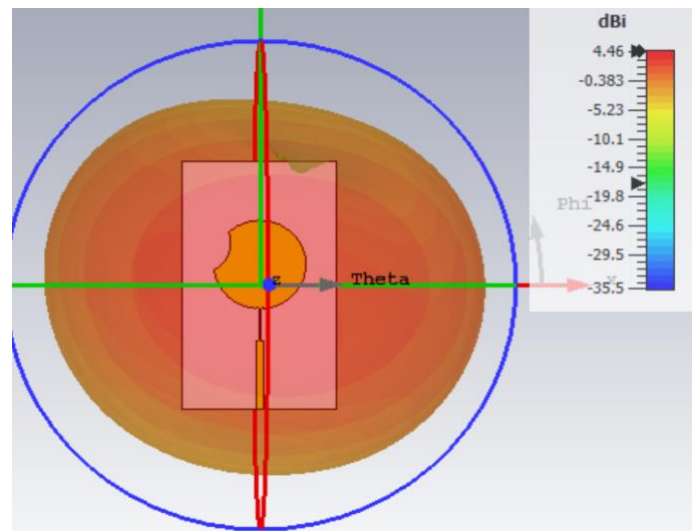


Figure III.29 : Diagramme de rayonnement en 3D.

La **Figure III.30** illustre l'évolution du rapport d'ondes stationnaires en tension (VSWR) en fonction de la fréquence. On y observe une excellente adaptation autour de 3,5 GHz avec une valeur minimale de VSWR égale à 1,013, traduisant une très faible réflexion du signal.

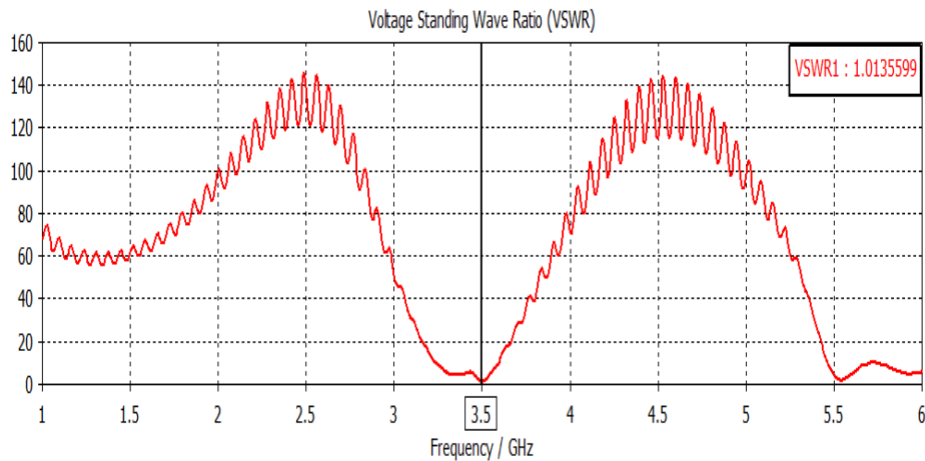


Figure III.30 : Rapport d'Onde Stationnaire (VSWR).

Le Tableau III.7 présente une analyse comparative des caractéristiques clés de deux antennes patch circulaires à fente, utilisant respectivement un substrat en FR-4 et en silicone. Les paramètres évalués incluent les dimensions physiques (rayon du patch), les performances électriques (S11, VSWR, bande passante), et le gain.

1. Rayon du patch :

- Le substrat **FR-4** requiert un rayon plus grand (**11.22 mm**) contre **7.187 mm** pour le silicone, reflétant l'impact de la constante diélectrique sur la taille de l'antenne.

2. S11 :

- Les deux antennes montrent une excellente adaptation (FR-4 : **-46.308 dB** ; Silicone : **-43.434 dB**), avec un léger avantage pour le FR-4.

3. VSWR : Proche de l'idéal (1.0) pour les deux (FR-4 : **1.009** ; Silicone : **1.013**), confirmant une faible réflexion.

4. Bande passante

- **FR-4** : Bande passante plus large (**129.73 MHz**), couvrant **3.437–3.566 GHz**, adaptée aux applications nécessitant une plage fréquentielle étendue.
- **Silicone** : Bande très étroite (**35.52 MHz**, **3.482–3.517 GHz**), idéale pour des systèmes ciblant une fréquence précise.

5. Gain

- Le **silicone** offre un gain supérieur (**4.46 dB**) contre **2.5 dB** pour le FR-4, grâce à ses propriétés matérielles réduisant les pertes diélectriques.

- **FR-4** : Meilleure bande passante et compatibilité avec des applications large bande (ex. Wi-Fi, IoT).
- **Silicone** : Gain élevé et compacité, adapté aux systèmes haute fréquence et miniaturisés (ex. dispositifs médicaux, capteurs).

Tableau III.9 : Comparaison entre deux antennes avec fente, alimentées par une ligne micro-ruban.

Paramètres	FR-4	Silicone
Rayon de patch	11.22	7.187
S11 (dB)	-46.308	-43.434
Bande passante a -10 dB	129.73 MHz, [3,437 - 3,566]	35.52 MHz [3.482-3.517]
VSWR	1.009	1.013
Gain (dB)	2.5	4.46

III.4.1.4. Réseau MIMO à deux éléments de l'antenne patch avec fente

a) En utilisant le substrat FR-4

La **figure III.31** présente la conception d'une antenne MIMO à deux éléments avec fente, réalisée sur un substrat FR-4. La vue de face montre deux patches circulaires, chacun comportant une fente latérale en forme d'arc. Chaque élément est alimenté par une ligne micro-ruban, dans une configuration symétrique pour garantir une répartition équilibrée du champ. La vue d'arrière révèle un plan de masse modifié par l'introduction d'une découpe centrale en forme de « T », une structure DGS (Defected Ground Structure) visant à améliorer l'isolation entre les deux éléments rayonnants en réduisant les couplages mutuels.

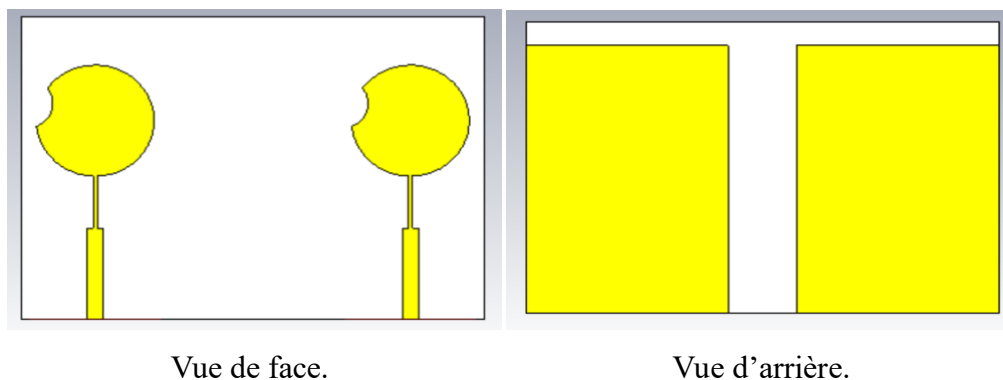


Figure III.31 : Réseau MIMO à deux éléments d'antenne avec fente en utilisant le substrat FR-4 alimentée par une ligne micro-ruban.

Le graphe des paramètres S (**Figure III.32**) montre que les coefficients de réflexion S_{11} et S_{22} atteignent respectivement -25,57 dB et -23,72 dB à la fréquence de 3,5 GHz, indiquant une bonne adaptation d'impédance pour les deux ports. Les coefficients de transmission croisée S_{12} et S_{21} sont très faibles (environ -42 dB), ce qui traduit une excellente isolation entre les deux éléments de l'antenne MIMO. Ces résultats confirment que le couplage mutuel est bien maîtrisé, notamment grâce à l'utilisation du DGS dans le plan de masse.

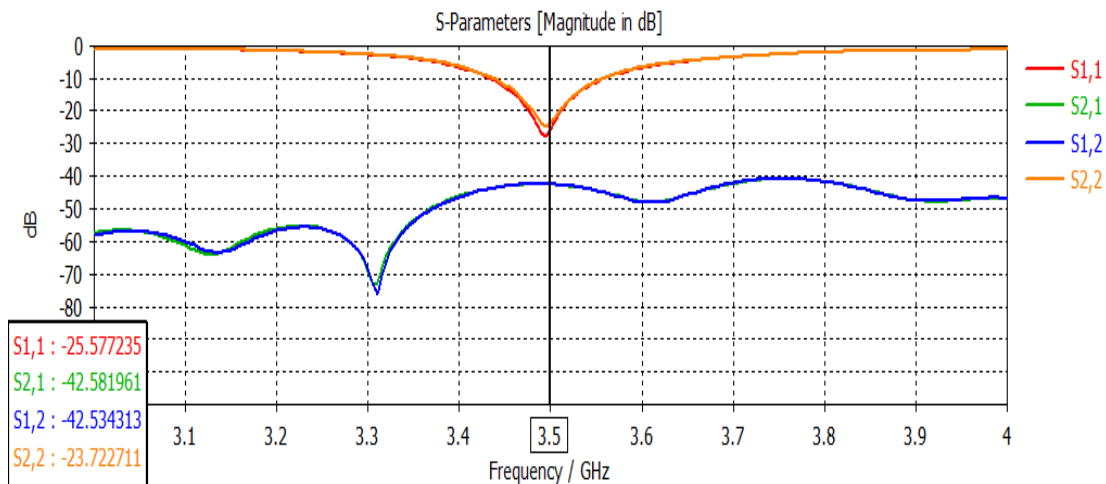


Figure III.32 : Paramètres S.

Le graphe VSWR montre des valeurs proches de 1 à la fréquence de 3,5 GHz pour les deux ports (1,11 pour le port 1 et 1,13 pour le port 2). Ces valeurs indiquent un excellent appariement d'impédance, avec un minimum de réflexion d'énergie vers la source. Ce résultat est en accord avec les faibles valeurs de S_{11} et S_{22} observées dans le graphe précédent.

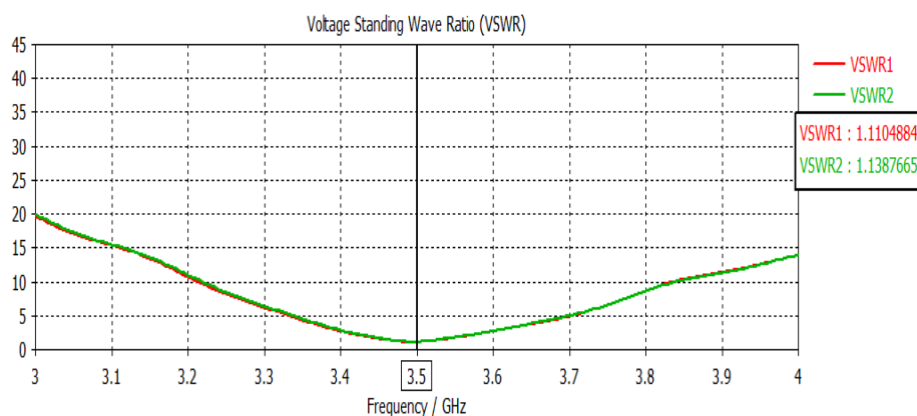


Figure III.33 : Rapport d'Onde Stationnaire (VSWR).

Le diagramme tridimensionnel montre la distribution spatiale du rayonnement électromagnétique généré par les deux éléments de l'antenne. Le gain maximal atteint environ 2,56 dBi, ce qui est satisfaisant pour une antenne compacte. La symétrie du rayonnement et la

directivité modérée confirment une bonne performance en termes de couverture, avec une répartition homogène du champ.

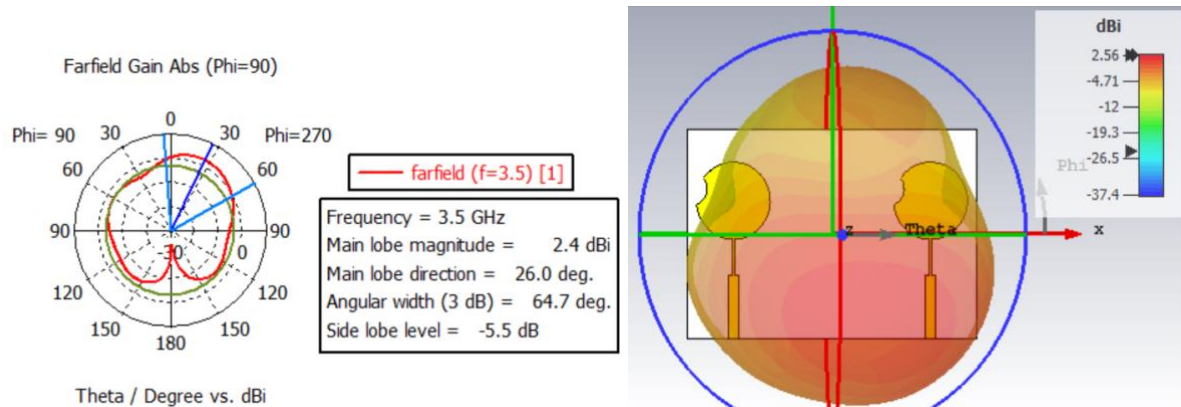


Figure III.34 : Diagramme de rayonnement en 2 et 3D.

La Figure III.35 montre que l'ECC reste extrêmement faible sur toute la bande étudiée, avec une valeur de $5,29 \times 10^{-7}$ à 3,5 GHz. Cette très faible corrélation indique une excellente décorrélation des signaux entre les deux éléments de l'antenne MIMO, ce qui favorise une bonne performance en multiplexage spatial.

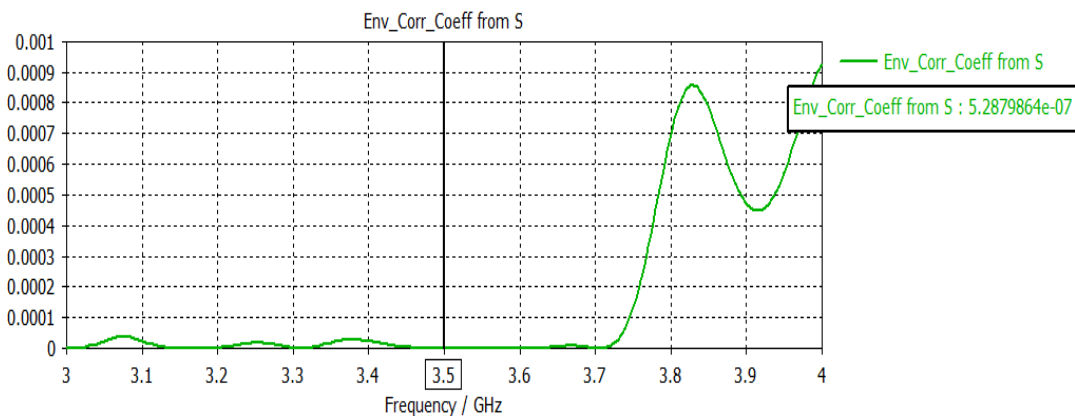


Figure III.35 : Le coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC).

Le gain de diversité (Figure III.36) atteint une valeur maximale de 9,9999974 à 3,5 GHz, très proche du seuil théorique de 10. Cela confirme que l'antenne offre une forte capacité à compenser les effets du fading, assurant ainsi une transmission plus fiable dans des environnements à trajets multiples.

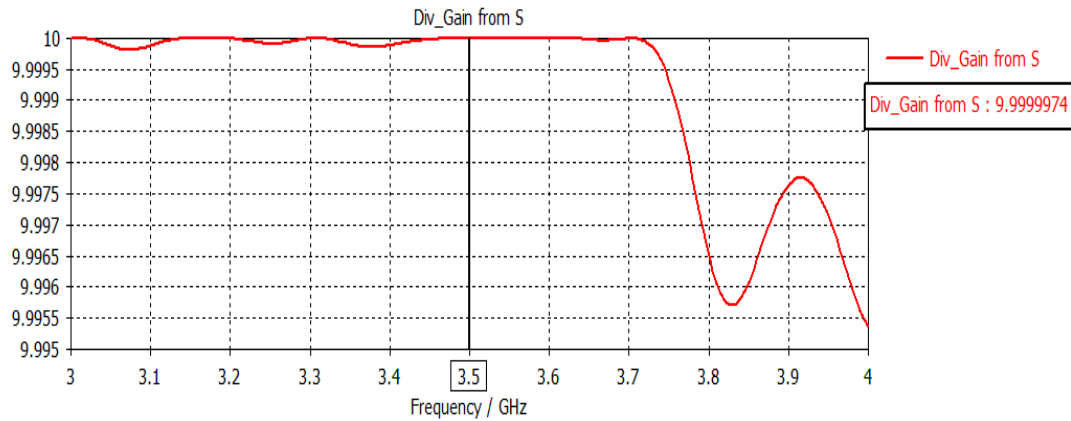
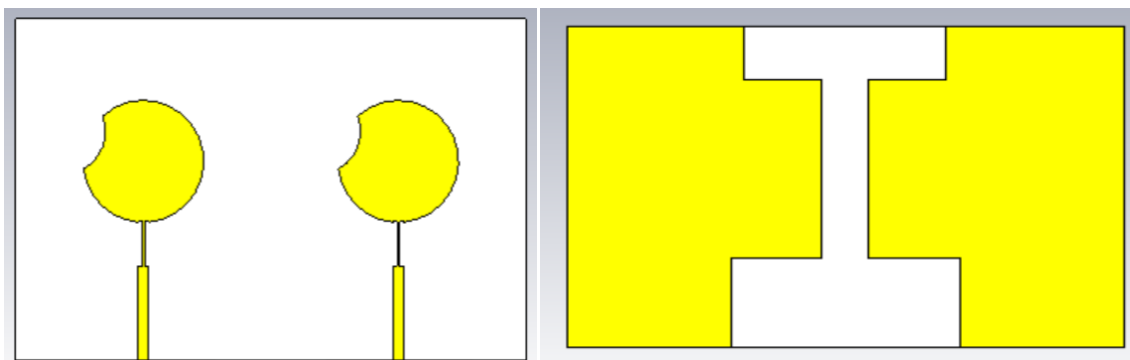


Figure III.36 : Le gain de diversité.

b) En utilisant le substrat en silicône

La **figure III.37** montre la structure d'une antenne MIMO à deux éléments avec fente, réalisée sur un substrat en silicône. La vue de face révèle deux patches circulaires, chacun comportant une fente latérale en forme d'arc, permettant de régler la fréquence de résonance et d'améliorer l'adaptation d'impédance. Chaque élément est alimenté par une ligne micro-ruban dans une disposition symétrique. La vue d'arrière présente un plan de masse modifié par une découpe centrale en forme de « I », une structure DGS (Defected Ground Structure) conçue pour réduire le couplage mutuel et améliorer l'isolation entre les deux éléments rayonnants.



Vue de face.

Vue d'arrière.

Figure III.37 : Réseau MIMO à deux éléments d'antenne avec fente En utilisant le substrat en silicône alimentée par une ligne micro-ruban.

La **figure III.38** montre les paramètres S de l'antenne MIMO. Les coefficients de réflexion S_{11} et S_{22} affichent des minima de -14,99 dB et -10,18 dB à 3,5 GHz, traduisant une adaptation d'impédance acceptable aux deux ports. Les coefficients de transmission croisée S_{12} et S_{21} sont proches de -18 dB, ce qui indique un couplage modéré entre les éléments rayonnants.

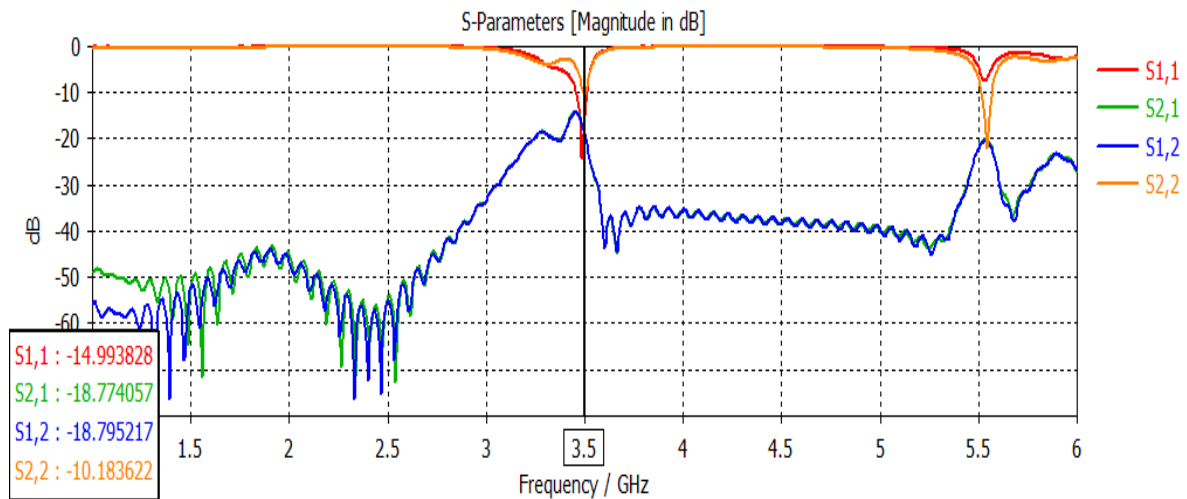


Figure III.38 : Paramètres S.

La **figure III.39** présente le taux d'ondes stationnaires (VSWR) pour les deux ports. À 3,5 GHz, les valeurs obtenues sont de 1,43 pour le port 1 et de 1,89 pour le port 2, confirmant un niveau de réflexion faible et une adaptation relativement correcte. Ces performances indiquent que l'antenne est bien adaptée à la fréquence cible tout en maintenant une isolation fonctionnelle entre les éléments.

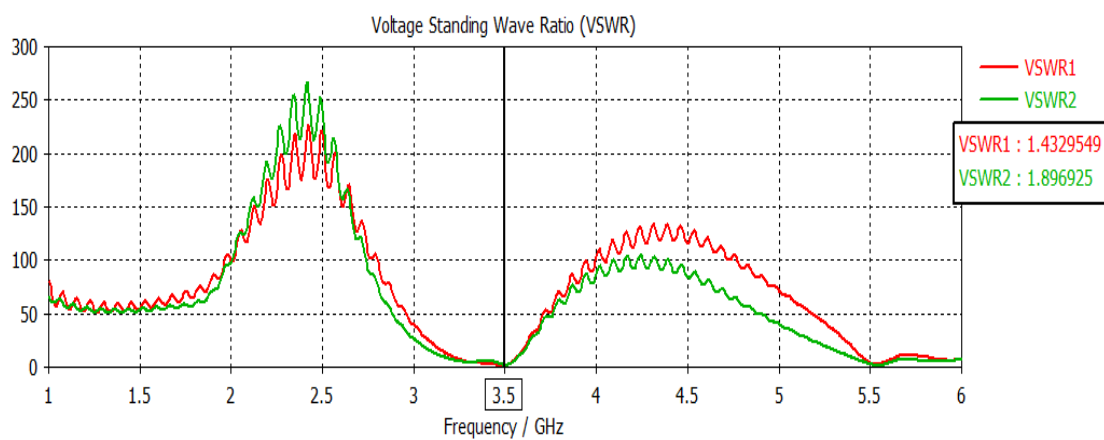


Figure III.39 : Rapport d'Onde Stationnaire (VSWR).

La **Figure III.40** montre le diagramme de rayonnement avec un gain maximal de 4.54 dBi et une atténuation jusqu'à -35.5 dBi, révélant une directivité prononcée.

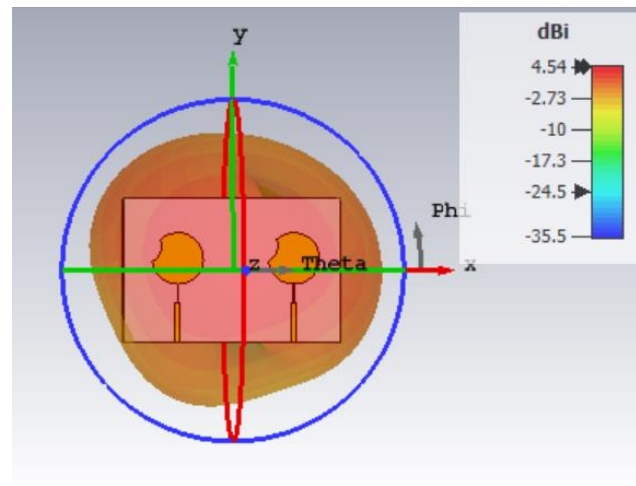


Figure III.40 : Diagramme de rayonnement en 2 et 3D.

La **Figure III.41** illustre le coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC) calculé à partir des paramètres S. La valeur extrêmement faible de 0.003 à 3.5 GHz (et sur l'ensemble de la bande 1–6 GHz) confirme une corrélation quasi-nulle entre les éléments rayonnants. Un ECC < 0.01 , comme observé ici, est idéal pour les systèmes MIMO, garantissant une diversité spatiale optimale et minimisant les interférences entre les voies de transmission. Ces résultats valident la robustesse du design pour les environnements à multi-trajets.

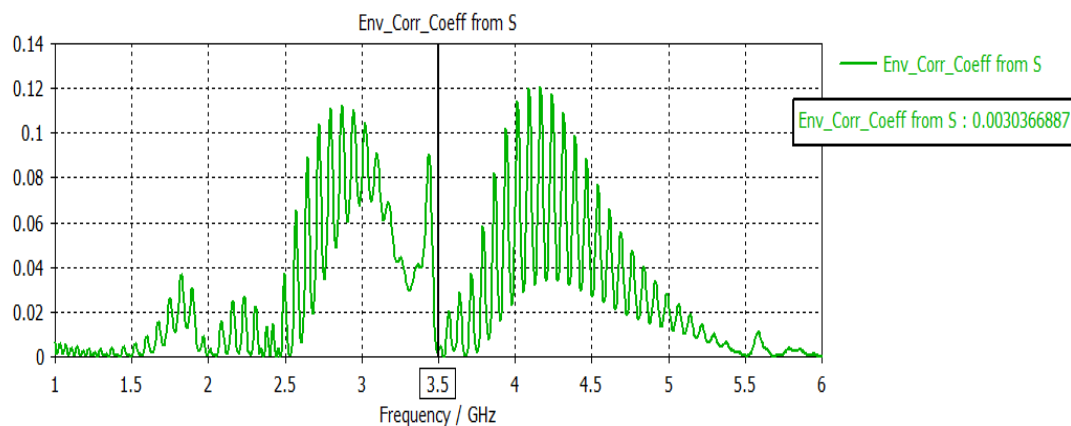


Figure III.41 : Le coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC).

La **figure III.42** montre le gain de diversité (DG) dérivé des paramètres S, avec une valeur proche de 10 dB (9.98 dB) à 3.5 GHz. Cette performance, atteignant presque le maximum théorique, démontre l'efficacité du système MIMO à exploiter la diversité spatiale. Un gain élevé (> 9 dB) est critique pour améliorer la fiabilité des communications dans des conditions de canal défavorables, comme les environnements urbains ou intérieurs, où les trajets multiples dominent.

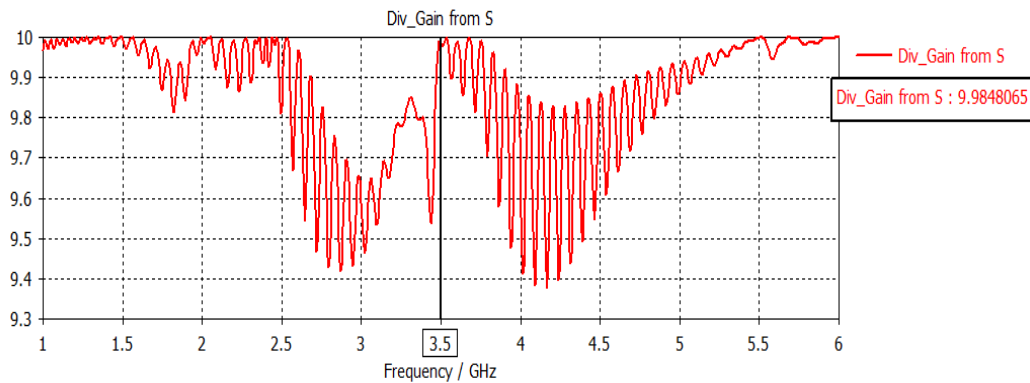


Figure III.42 : Le gain de diversité.

Le **tableau III.10** compare les performances de deux antennes MIMO à deux éléments avec fente en arc, fabriquées sur des substrats différents : FR-4 (classique) et silicone (flexible). Les paramètres clés analysés incluent les coefficients de réflexion (S_{11} , S_{22}), l'isolation entre éléments (S_{12} , S_{21}), le TOS (VSWR), le gain, le coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC) et le gain de diversité.

1. Adaptation d'impédance (S_{11}/S_{22} & VSWR)

- **FR-4** : Meilleure adaptation ($S_{11} = -25.57$ dB, $S_{22} = -23.72$ dB, VSWR ≈ 1.1).
- **Silicone** : Adaptation acceptable mais moins optimale ($S_{11} = -14.99$ dB, $S_{22} = -10.18$ dB, VSWR jusqu'à 1.89).

2. Isolation entre éléments (S_{12}/S_{21})

- **FR-4** : Isolation excellente (< -42 dB), réduisant les interférences.
- **Silicone** : Isolation plus faible (≈ -18 dB), pouvant affecter les performances MIMO.

3. Gain de rayonnement

- **FR-4** : Gain modéré (2.56 dB).
- **Silicone** : Gain nettement supérieur (4.54 dB), avantageux pour la couverture.

4. Diversité MIMO (ECC & Gain de diversité)

- **FR-4** : ECC quasi-nul (5.28×10^{-7}) et gain de diversité maximal (9.99 dB), idéal pour les systèmes MIMO.
- **Silicone** : ECC légèrement plus élevé (0.003) mais gain de diversité conservé (9.98 dB), restant performant.

Le substrat **FR-4** offre des performances MIMO stables (faible ECC, excellente isolation), tandis que le **silicone** permet un gain accru au détriment de l'adaptation et de l'isolation. Le choix dépend des priorités : stabilité (FR-4) ou gain et flexibilité (silicone).

Tableau III.10 : Comparaison des performances entre deux réseaux MIMO à deux éléments d'antennes avec fente, alimentées par ligne micro-ruban.

Paramètres	Antenne avec substrat FR-4	Antenne avec substrat en silicone
S11 (dB)	-25.57	-14.99
S12 (dB)	-42.58	-18.77
S21 (dB)	-42.53	-18.79
S22 (dB)	-23.72	-10.18
VSWR1	1.11	1.43
VSWR2	1.13	1.89
Gain (dB)	2.56	4.54
ECC	5.28×10^{-7}	0.0030
Gain de diversité	9.99	9.98

III.4.2. Conception d'une antenne patch alimentée par un câble coaxial

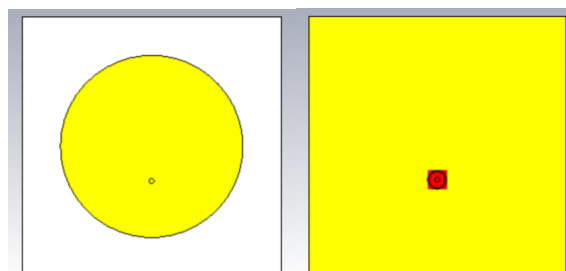
III.4.2.1 Conception et simulation de l'antenne initiale sans fente

En utilisant le substrat FR-4

Dans cette section, nous allons procéder à la conception de l'antenne étudiée précédemment, en utilisant un autre type d'alimentation, à la fréquence 3.5 GHz. Un plan de masse total recouvre toute la face arrière du substrat telle que le montre la **FigureIII.43**.

Tableau III.11 : Dimensions de l'antenne patch initiale silicone.

Les paramètres	GW	GL	r	X	Y
Les dimensions (mm)	32.36	32.36	11.38	0	11.86



Vue de face.

Vue d'arrière.

Figure III.43 : Antenne sans fente en utilisant le substrat FR-4 alimentée par un câble coaxial.

L'antenne conçue est alimentée par un câble coaxial à impédance caractéristique de 50Ω , placée à une distance $Y = 11.86 \text{ mm}$ du centre de GW afin d'assurer une bonne adaptation d'impédance. La figure ci-dessous illustre les trois couches qui composent notre antenne imprimée.

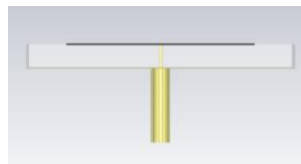


Figure III.44 : Représentation des trois couches de l'antenne : patch, plan de masse et substrat.

La **figure III.45** représente le paramètre S_{11} en dB en fonction de la fréquence. On observe une valeur minimale de S_{11} d'environ $-46,25 \text{ dB}$ à la fréquence centrale, ce qui indique une très bonne adaptation avec très peu de puissance réfléchie. La bande passante utile, délimitée par le seuil de -10 dB , s'étend de $3,4279 \text{ GHz}$ à $3,5723 \text{ GHz}$, soit une largeur de $144,4 \text{ MHz}$. Cela signifie que dans cette plage, le dispositif fonctionne efficacement en transmettant la majorité de la puissance sans perte significative par réflexion.

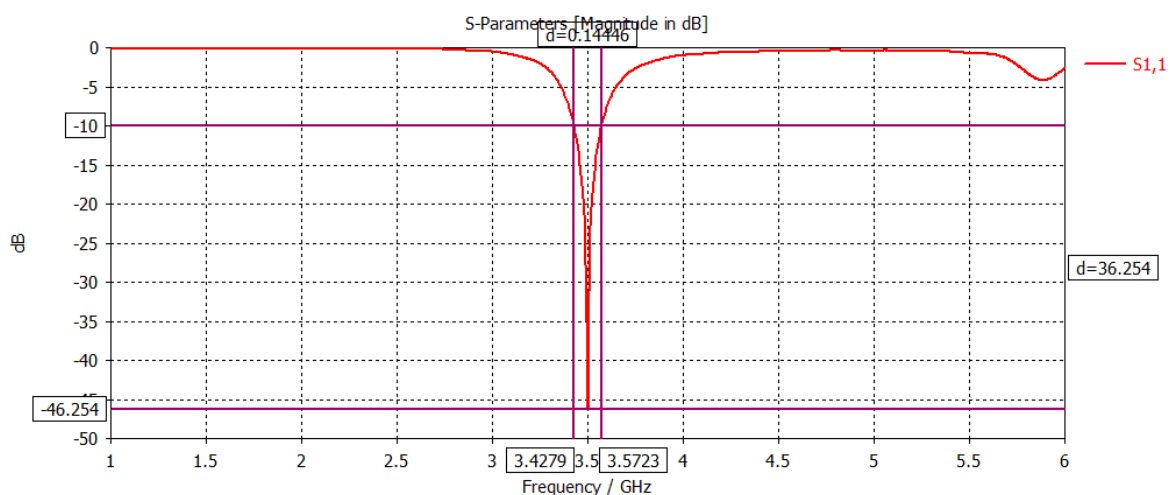


Figure III.45 : Coefficient de réflexion.

La **figure III.46** présente le rapport d'onde stationnaire (VSWR) en fonction de la fréquence. On remarque que la valeur minimale du VSWR est $1,009$ à $3,5 \text{ GHz}$, ce qui est extrêmement

proche de la valeur idéale de 1. Cela confirme que l'impédance du dispositif est quasiment parfaitement adaptée à celle de la source (typiquement 50 ohms), réduisant au maximum les pertes par réflexion. Ce bon résultat complète et renforce l'analyse de la figure précédente, prouvant que le dispositif est optimisé pour fonctionner autour de 3,5 GHz.

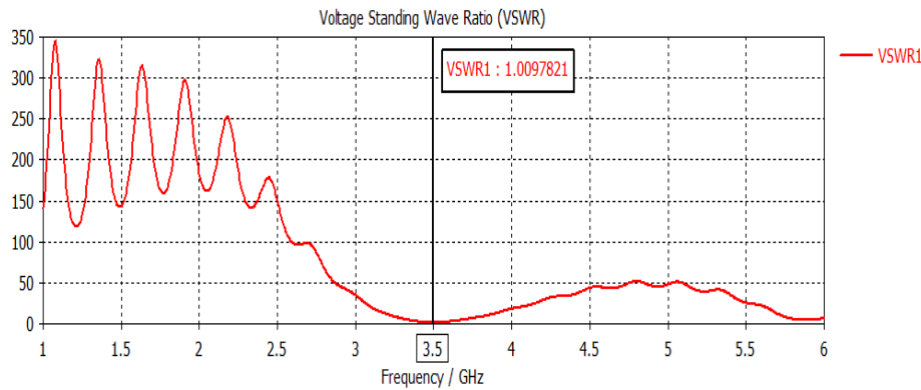


Figure III.46 : Rapport d'Onde Stationnaire (VSWR).

La figure III.47 montre une représentation tridimensionnelle du diagramme de rayonnement de l'antenne, conçue pour fonctionner à une fréquence de 3,5 GHz, avec un gain maximal atteint de 3,64 dB.

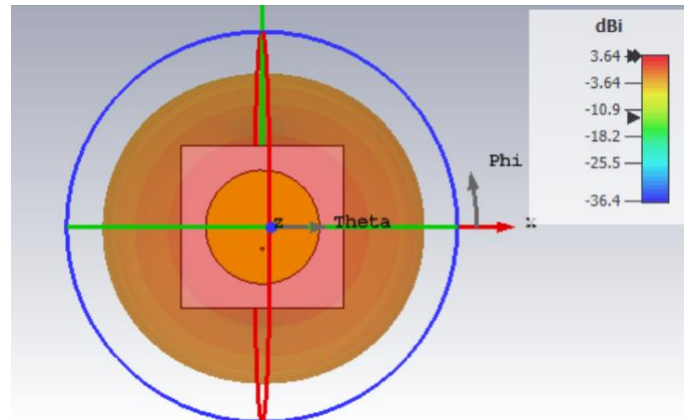


Figure III.47 : Diagramme de rayonnement en 3D.

a) En utilisant le substrat en silicone

Dans cette section, nous reprenons la conception de l'antenne précédemment étudiée, mais en utilisant cette fois un substrat en silicone. Comme le montre la **figure III.48**, un plan de masse complet recouvre toute la face arrière du substrat. Les dimensions de l'antenne réalisée avec le substrat en silicone sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau III.12 : Dimensions de l'antenne patch initiale silicone.

Les paramètres	GW	GL	r	X	Y
Les dimensions (mm)	23.1	23.1	6.75	1.329	11.55

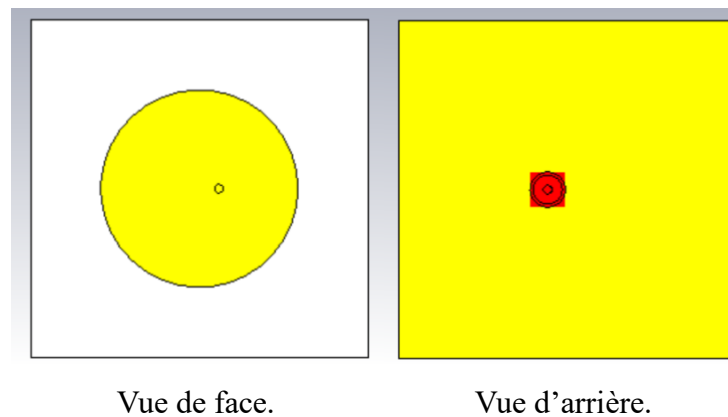


Figure III.48 : Antenne sansfenteEn utilisant le substrat en siliconealimentée par un câble coaxial.

La figure III.49 présente le paramètre de réflexion S11 de l'antenne réalisée sur substrat en silicone. La courbe montre une fréquence centrale de résonance à 3,5 GHz avec une valeur minimale de S11 atteignant -49,059 dB, ce qui indique une excellente adaptation d'impédance et une très faible réflexion du signal. La bande passante, définie par le seuil de -10 dB, s'étend de 3,4802 GHz à 3,5206 GHz, soit une largeur de 40,37 MHz. Cette faible bande passante traduit un comportement très sélectif, rendant l'antenne bien adaptée pour des applications ciblées mais sensible aux variations de fréquence.

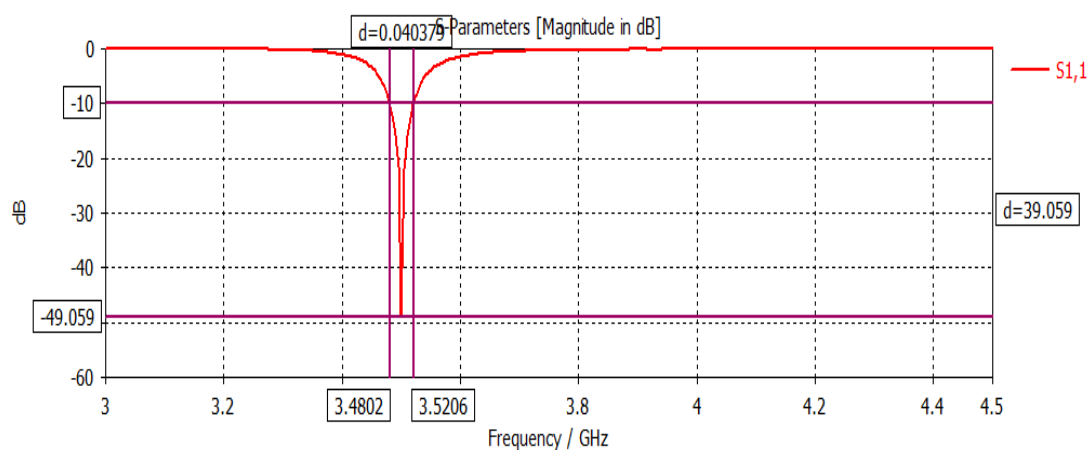


Figure III.49 : Coefficient de réflexion.

La figure III.50 illustre le rapport d'onde stationnaire (VSWR) en fonction de la fréquence. Le minimum du VSWR est observé à 3,5 GHz, avec une valeur de 1,007073, ce qui est très proche de la valeur idéale de 1, confirmant ainsi une correspondance d'impédance quasi parfaite entre l'antenne et la ligne de transmission. Ce résultat est cohérent avec le S11 très faible observé

dans la figure précédente, et garantit une très bonne efficacité de transmission à la fréquence de résonance.

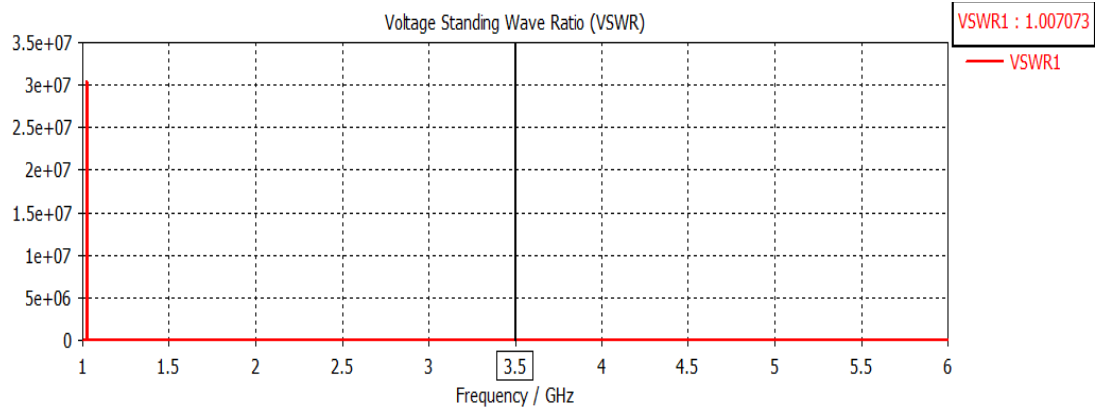


Figure III.50 : Rapport d'Onde Stationnaire (VSWR).

La figure III.51 montre le diagramme de rayonnement avec un gain maximal de 4.04 dBi et une atténuation jusqu'à -36 dBi. La forme caractéristique révèle un lobe principal directionnel et des lobes secondaires bien atténués, typique d'une antenne à rayonnement focalisé.

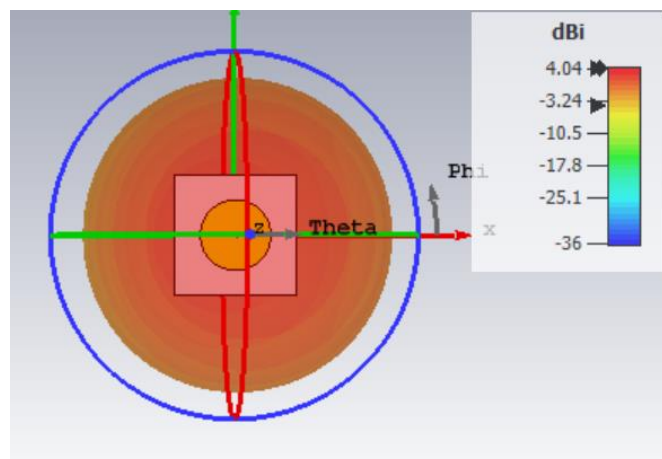


Figure III.51 : Diagramme de rayonnement en 3D.

Le **Tableau III.13** compare les performances de deux antennes initiales sans fente alimentées par un câble coaxial, fabriquées avec des substrats différents : FR-4 et Silicone.

1. Rayon de patch:

- L'antenne en FR-4 a un rayon plus grand (11.38) que celle en Silicone (6.75), ce qui suggère que le FR-4 nécessite une taille physique plus importante pour fonctionner efficacement.

2. Coefficient de réflexion (S11):

- Les deux antennes présentent des valeurs de S11 très faibles (FR-4 : -46.254 dB, Silicone : -49.059 dB), indiquant une excellente adaptation d'impédance. La Silicone offre une légère amélioration.

3. Bande passante à -10 dB:

- L'antenne en FR-4 a une bande passante plus large (144.46 MHz) que celle en Silicone (40.37 MHz). Cela signifie que le FR-4 couvre une plage de fréquences plus étendue, ce qui peut être avantageux pour certaines applications.

4. Rapport d'onde stationnaire (VSWR):

- Les deux antennes ont des valeurs de VSWR très proches de 1 (FR-4 : 1.009, Silicone : 1.007), confirmant une bonne adaptation et des pertes minimales.

5. Gain:

- L'antenne en Silicone a un gain légèrement supérieur (4.04 dB) par rapport à celle en FR-4 (3.64 dB), ce qui indique une meilleure directivité ou efficacité.

Le choix entre les deux substrats dépend des exigences de l'application. Le FR-4 offre une bande passante plus large, tandis que la Silicone présente un gain légèrement supérieur et une meilleure adaptation d'impédance. La Silicone pourrait être préférée pour des applications nécessitant un gain élevé, tandis que le FR-4 serait plus adapté pour des applications nécessitant une large bande passante.

Tableau III.13 : Comparaison des performances entre deux antennes sans fente, alimentées par un câble coaxial.

Paramètres	FR-4	Silicone
Rayon de patch	11.38	6.75
S11 (dB)	-46.254	-49.059
Bande passante a -10 dB	144,46 MHz, [3,427 - 3,572]	40.37 MHz, [3.48-3.52]
VSWR	1.009	1.007
Gain (dB)	3.64	4.04

III.4.2.2 Conception et simulation d'un Réseau MIMO à deux éléments d'antenne sans fente alimentée par un câble coaxial

a) En utilisant le substrat FR-4

La figure III.52 illustre la structure d'une antenne MIMO à deux éléments, conçue sur un substrat de type FR-4 et alimentée par câble coaxial. La vue de face montre deux patches circulaires identiques, positionnés de manière symétrique, sans fente particulière sur leur surface, ce qui indique une conception simple optimisée pour un rayonnement uniforme. La vue d'arrière met en évidence un plan de masse complet, à l'exception d'une découpe centrale étroite qui sépare les deux parties du plan de masse. Cette configuration vise à limiter le couplage mutuel entre les deux éléments tout en maintenant une bonne isolation. Les points d'alimentation coaxiaux sont clairement visibles au centre de chaque patch, assurant une excitation efficace et indépendante des deux éléments de l'antenne.

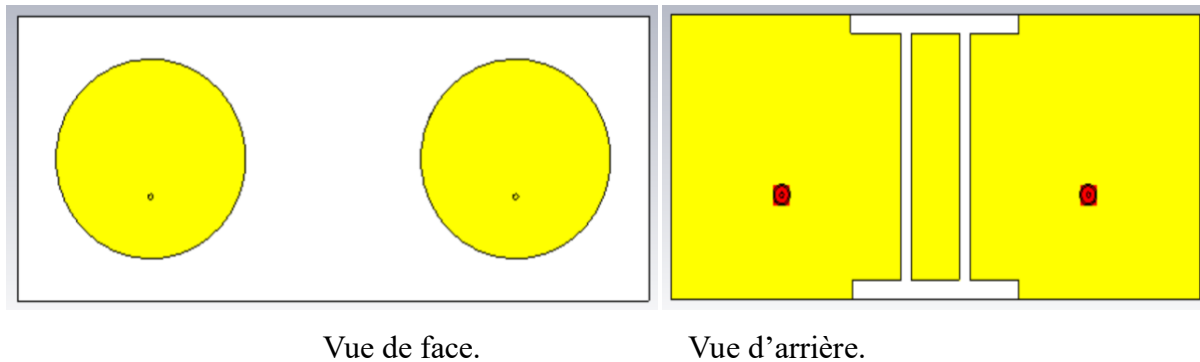


Figure III.52 : Réseau MIMO à deux éléments d'antenne sans fente en utilisant le substrat FR-4 alimentée par un câble coaxial.

La **figure III.53** montre les courbes des paramètres S (S_{11} , S_{21} , S_{12} , S_{22}) en fonction de la fréquence. L'axe des abscisses représente la fréquence (en GHz), tandis que l'axe des ordonnées indique le niveau en décibels (dB). Une ligne verticale marque la fréquence de 3.5 GHz. Les courbes montrent que les valeurs de S_{11} et S_{22} sont très faibles (en dessous de -40 dB), indiquant une bonne adaptation. Les courbes S_{21} et S_{12} sont également très faibles (environ -34 dB), traduisant un bon isolement entre les deux ports.

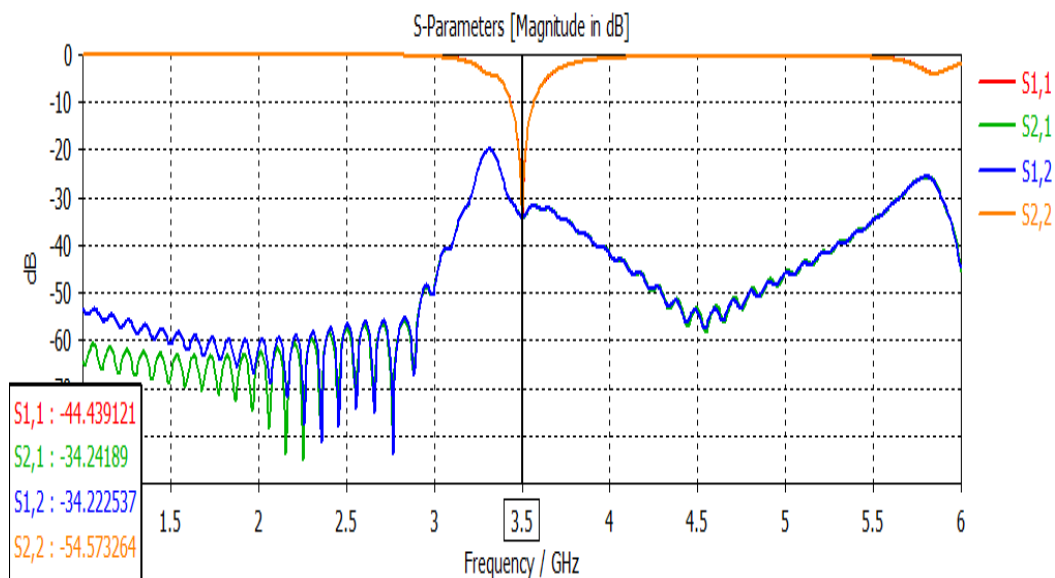
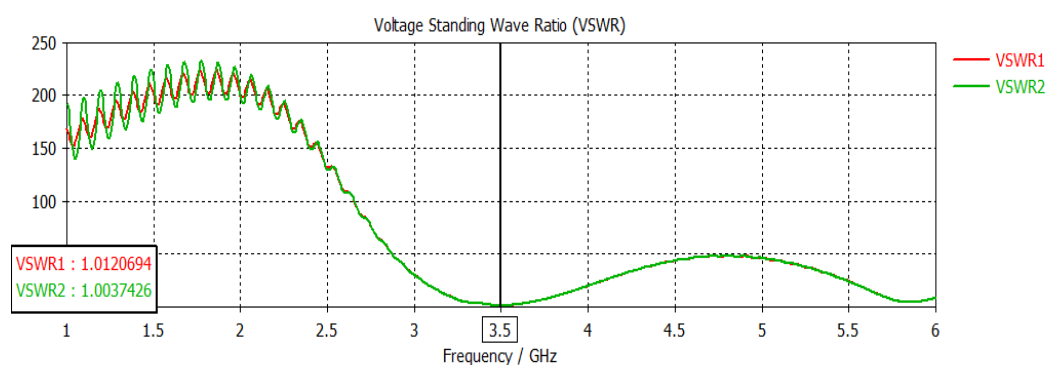


Figure III.53 : Paramètres S.

Les valeurs de VSWR1 (1,012) et VSWR2 (1,003) indiquent une excellente adaptation d'impédance, proche de l'idéal (VSWR=1).

Figure III.54 : Rapport d'Onde Stationnaire (VSWR).



Le diagramme de rayonnement en 2 et 3D montre une bonne directivité avec un lobe principal bien défini. La répartition symétrique indique un bon comportement du réseau MIMO dans l'espace.

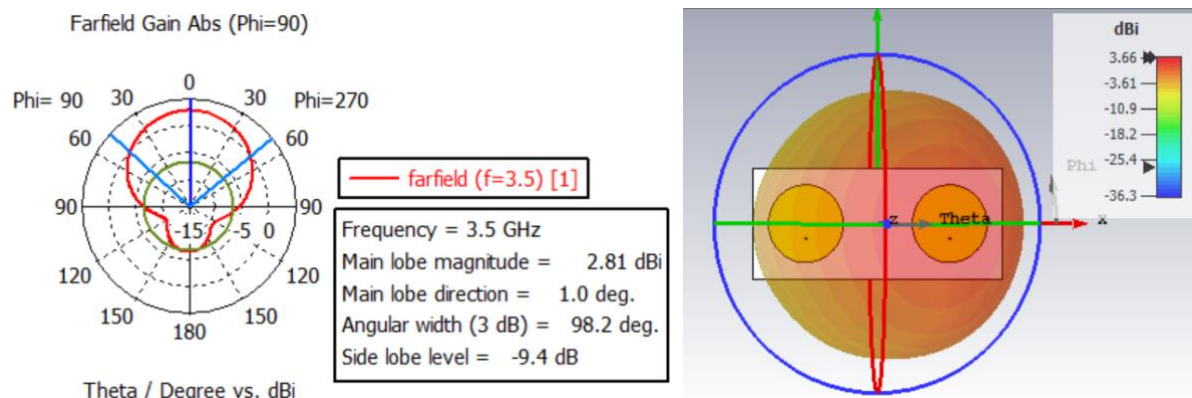
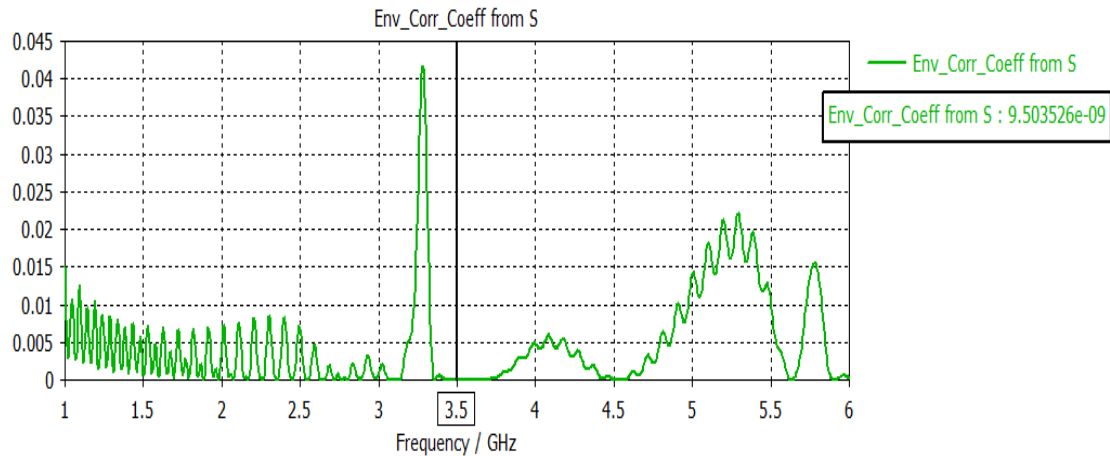
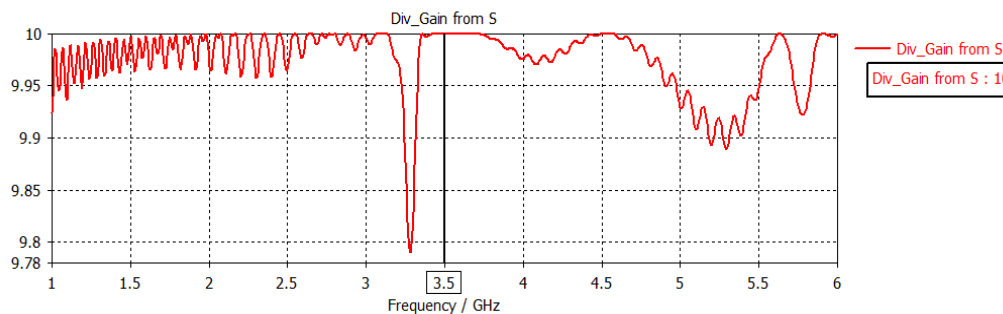


Figure III.55 : Diagramme de rayonnement en 2 et 3D.

Le coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC) reste très faible sur l'ensemble de la bande, avec une valeur quasi nulle à 3,5 GHz. Cela traduit un excellent découplage entre les deux antennes.

**Figure III.56** : Le coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC).

Le gain de diversité est proche de 10 sur presque toute la bande, indiquant une bonne performance en conditions de propagation multi-trajets. Il confirme la complémentarité des deux antennes du réseau MIMO.

**Figure III.57** : Le gain de diversité.

b) En utilisant le substrat en silicone

La Figure III.58 illustre une antenne MIMO à deux éléments, similaire à celle présentée dans la Figure III.52, mais réalisée cette fois sur un substrat en silicone. La vue de face montre deux patchs circulaires identiques. En vue d'arrière, on observe un plan de masse partiellement évidé, présentant une découpe centrale en forme de « I » élargi, qui sépare les deux moitiés du plan de masse.

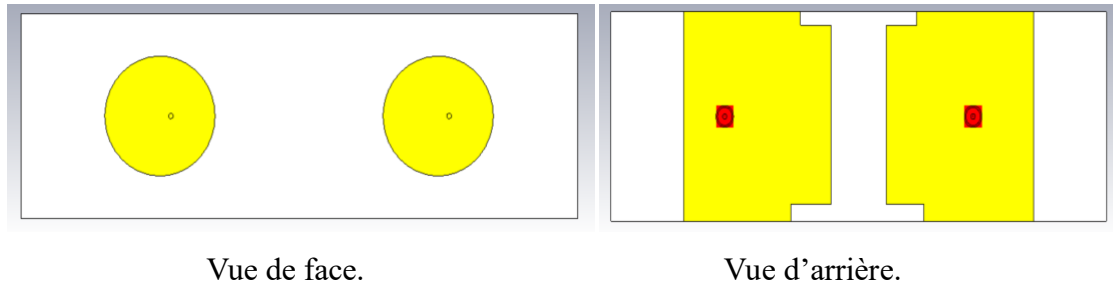


Figure III.58 : Réseau MIMO à deux éléments d'antenne sans fente En utilisant le substrat en silicone alimentée par un câble coaxial.

La **figure III.59** montre les courbes des paramètres S en fonction de la fréquence. L'axe horizontal représente la fréquence en GHz et l'axe vertical l'amplitude des paramètres S en dB. À la fréquence de 3.5 GHz, le paramètre S11 atteint environ -13 dB. Les autres paramètres (S21, S12, S22) se situent aux alentours de -10 à -15 dB. Ces valeurs indiquent une réponse modérée du système à cette fréquence, avec un niveau de réflexion et de transmission significatif.

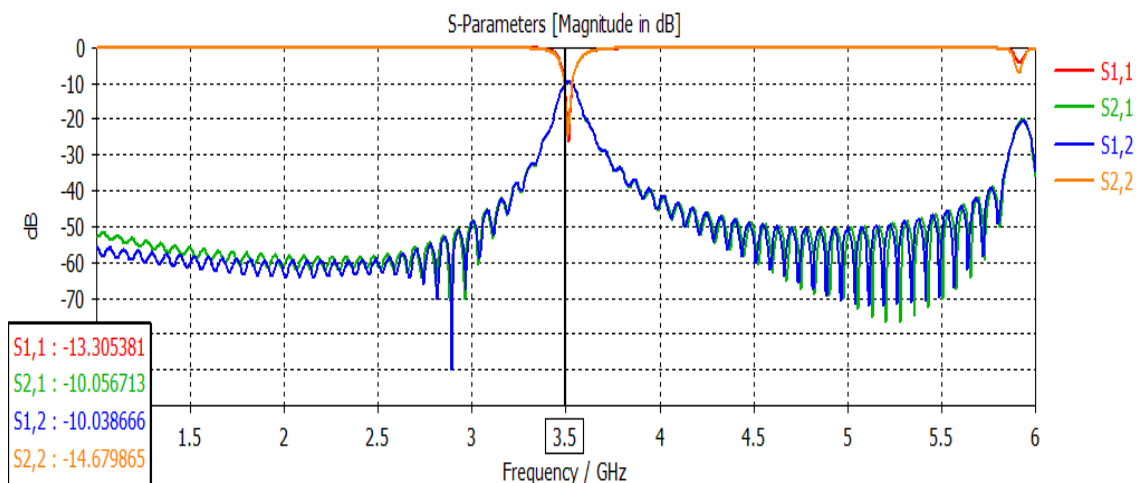


Figure III.59 : Paramètres S.

Le VSWR pour les deux ports reste inférieur à 2 sur la bande, avec des valeurs de 1,55 et 1,45 à 3,5 GHz. Cela indique une bonne adaptation d'impédance et un faible taux de réflexion aux entrées de l'antenne.

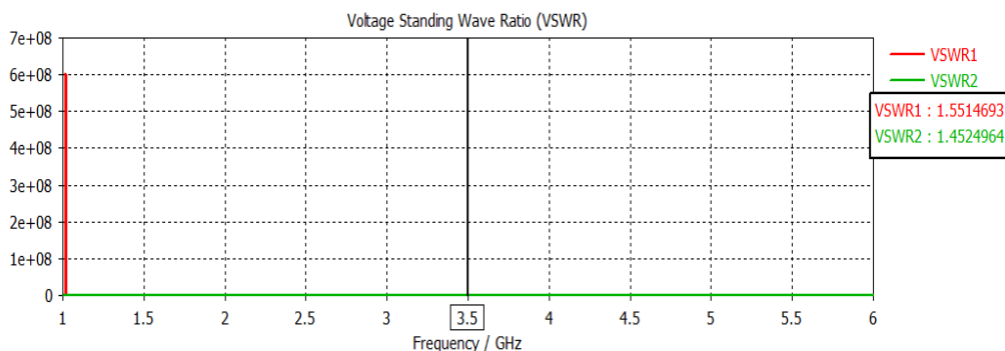


Figure III.60 : Rapport d'Onde Stationnaire (VSWR).

La Figure III.61 montre un gain d'antenne variant de 4.13 dBi (maximum) à -25 dBi, avec un lobe principal orienté à -35.9° (Theta), indiquant une directivité marquée mais avec des lobes secondaires significatifs.

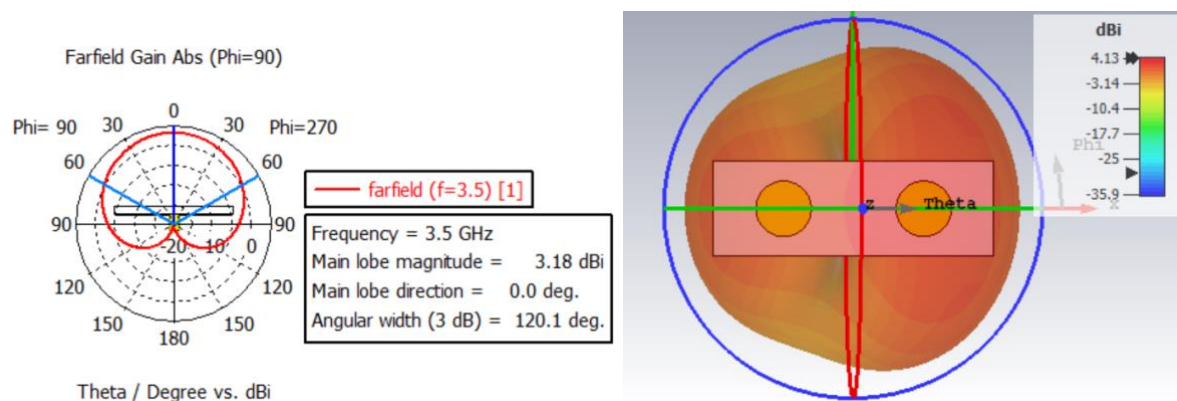


Figure III.61 : Diagramme de rayonnement en 2 et 3D.

La Figure III.62 montre un ECC très faible (0,0094) à 3,5 GHz, indiquant un bon isolement entre les éléments et une bonne compatibilité avec les systèmes MIMO.

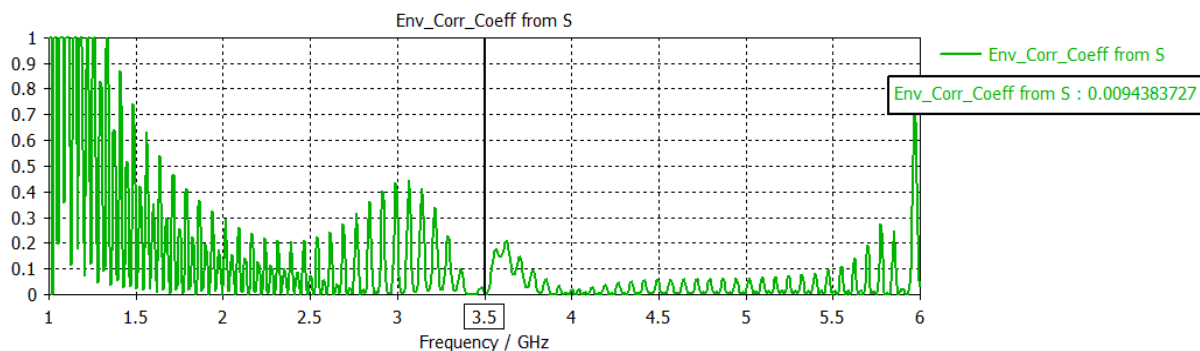


Figure III.62 : Le coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC).

Le gain de diversité est présenté dans la Figure III.63. Il atteint une valeur élevée de 9,95 à 3,5 GHz, ce qui reflète une bonne efficacité du système en conditions de propagation multi-trajets et une excellente capacité de diversité.

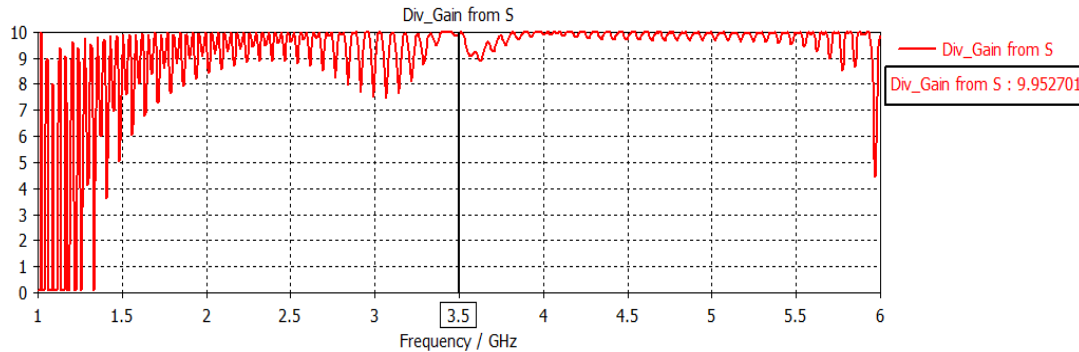


Figure III.63 : Le gain de diversité.

Le **tableau III.14** compare les performances de deux antennes MIMO sans fente, alimentées par câble coaxial et utilisant des substrats différents (FR-4 et silicone). Les paramètres clés tels que les coefficients S, le VSWR, le gain, l'ECC et le gain de diversité sont analysés pour évaluer leur efficacité dans des applications multi-antennes.

- **Antenne FR-4** : Excellentes performances avec un S11/S22 très bas (-44.43/-54.57 dB) et un VSWR proche de 1 (1,01/1,003), indiquant une adaptation d'impédance quasi parfaite. L'ECC extrêmement faible ($9,5 \times 10^{-9}$) garantit une isolation optimale entre les éléments, idéale pour les systèmes MIMO.
- **Antenne en silicone** : Performances moins bonnes en adaptation (S11/S22 autour de -13/-14 dB, VSWR $\sim 1,5$) mais avec un gain légèrement supérieur (4,13 dB). L'ECC (0,009) reste acceptable pour des applications MIMO, bien que moins performant que le FR-4. Le gain de diversité est similaire (~ 10 dB), confirmant une bonne résilience en environnement multi-trajets.

Le substrat FR-4 est meilleur pour l'adaptation et l'isolation, tandis que le silicone offre un gain légèrement accru au détriment de la réflexion et de la corrélation. Choix dépendant des priorités.

Tableau III.14 : Comparaison des performances entre deux réseaux MIMO à deux éléments d'antennes sans fente, alimentée par un câble coaxial.

Paramètres	Antenne avec substrat FR-4	Antenne avec substrat en silicone
S11 (dB)	-44.43	-13.30
S12 (dB)	-34.24	-10.03
S21 (dB)	-34.22	-10.05
S22 (dB)	-54.57	-14.67
VSWR1	1.01	1.55
VSWR2	1.003	1.45
Gain (dB)	3.66	4.13
ECC	9.50×10^{-9}	0.009
Gain de diversité	10	9.95

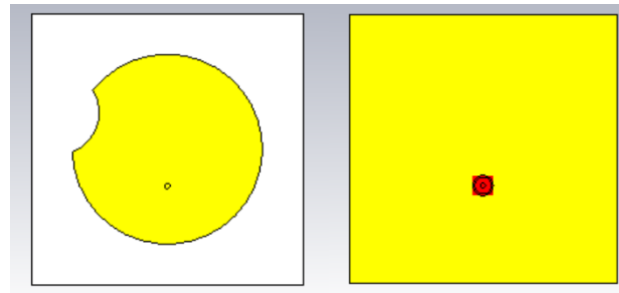
III.4.2.3. Conception et simulation d'une antenne avec fente alimentée par un câble coaxial

a) En utilisant le substrat FR-4

La figure III.64 illustre la structure de l'antenne patch avec fente, réalisée sur un substrat FR-4 et alimentée par câble coaxial. La vue de face montre un patch circulaire comportant une fente en forme d'arc sur son bord, conçue pour ajuster la fréquence de résonance et améliorer l'adaptation d'impédance. Le point d'alimentation coaxial est placé légèrement en décalé par rapport au centre du patch, selon les coordonnées spécifiées. La vue d'arrière présente un plan de masse complet, recouvrant entièrement la face inférieure du substrat, sans découpe ou structure particulière. Les dimensions géométriques de cette antenne avec fente sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau III.15 : Dimensions de l'antenne patch initiale silicone.

Les paramètres	GW	GL	r	X	Y
Les dimensions (mm)	31.95	31.95	11.175	0	11.62



Vue de face.

Vue d'arrière.

Figure III.64 : Antenne à fente utilisant un substrat FR-4, alimentée par un câble coaxial.

La figure III.65 présente le coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne. Une atténuation maximale de $-41,6$ dB est observée à la fréquence centrale de $3,5$ GHz, indiquant une excellente adaptation d'impédance. La bande passante effective, définie par le seuil de -10 dB, s'étend de $3,4338$ GHz à $3,5785$ GHz, soit environ 145 MHz. Cela montre que l'antenne est bien accordée pour la bande visée.

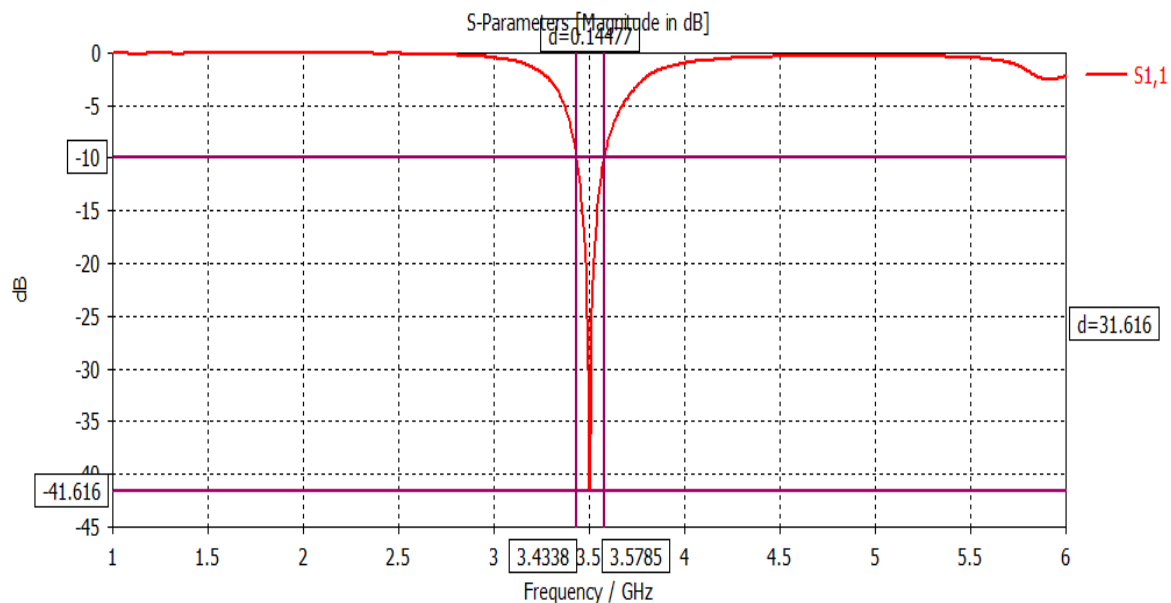


Figure III.65 : Coefficient de réflexion.

La figure III.66 illustre le rapport d'onde stationnaire (VSWR) correspondant. Une valeur minimale de $1,0167$ est atteinte à $3,5$ GHz, confirmant une adaptation optimale. La stabilité du VSWR autour de cette fréquence reflète un bon comportement de l'antenne sur la bande passante définie.

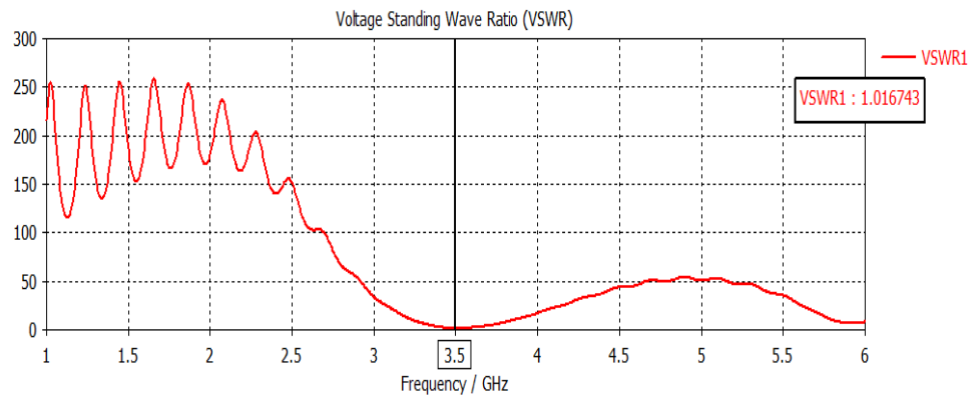


Figure III.66 : Rapport d'Onde Stationnaire (VSWR).

La figure III.67 présente le diagramme de rayonnement 3D de l'antenne, affichant un gain maximal de 3.52 dBi

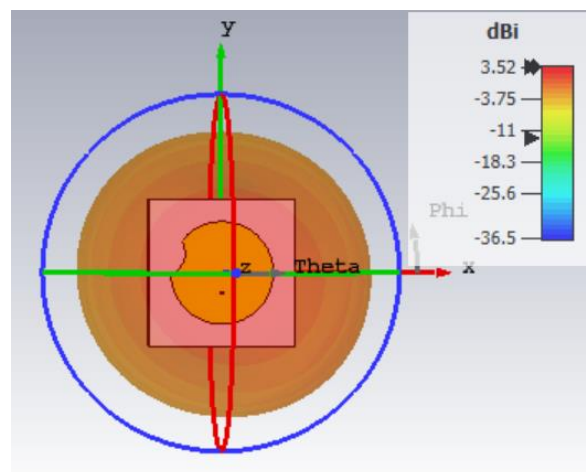


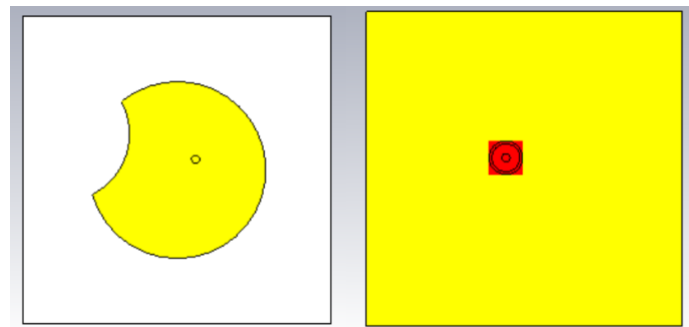
Figure III.67 : Diagramme de rayonnement en 3D.

b) En utilisant le substrat en silicone

La figure III.68 présentée illustre la conception d'une antenne patch utilisant un substrat en silicone, accompagnée des dimensions détaillées dans le Tableau III.16. L'antenne se caractérise par une forme de patch circulaire partiellement découpée. La vue de face montre clairement la forme du patch ainsi que le point d'alimentation centré, tandis que la vue arrière met en évidence le plan de masse recouvrant entièrement le substrat, avec une zone de soudure marquée pour le connecteur coaxial.

Tableau III.16 : Dimensions de l'antenne patch initiale silicone.

Les paramètres	GW	GL	r	X	Y
Les dimensions (mm)	22.58	22.58	6.49	1.329	12.08



Vue de face.

Vue d'arrière.

Figure III.68 : Antenne à fente utilisant un substrat Silicone, alimentée par un câble coaxial.

La figure III.69 montre le coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne. Une valeur minimale de -32,6 dB est observée à 3,5 GHz, traduisant une très bonne adaptation d'impédance. La bande passante définie par le seuil de -10 dB s'étend de 3,4822 GHz à 3,5158 GHz, soit une largeur de 33,54 MHz. Cette performance est satisfaisante pour une application ciblée et étroite.

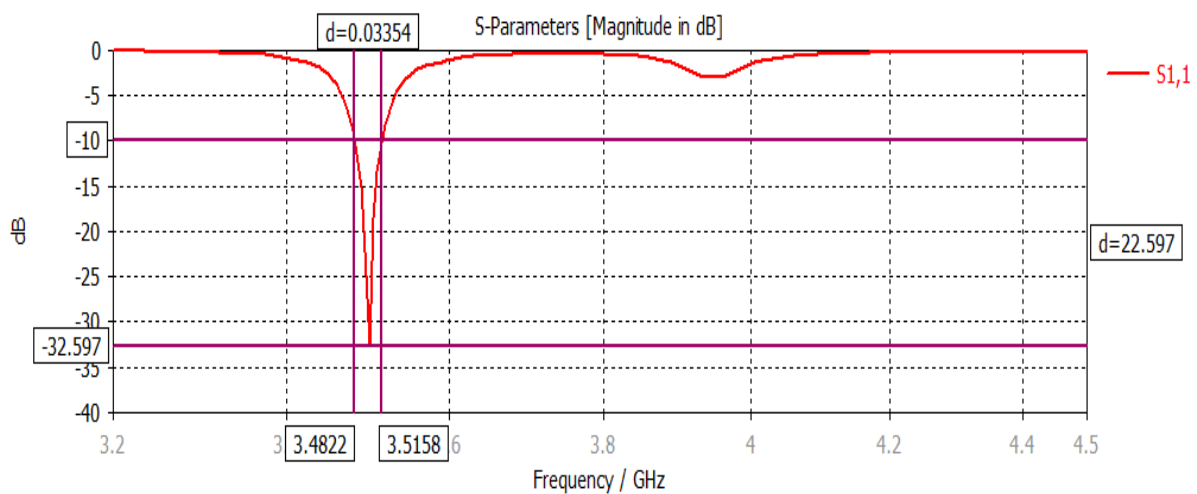


Figure III.69 : Coefficient de réflexion.

Le rayonnement à trois dimensions de cette antenne est représenté dans la **Figure III.70**. Un gain maximal d'environ **3,86 dB** est obtenu, illustrant une bonne directivité et une répartition homogène du rayonnement.

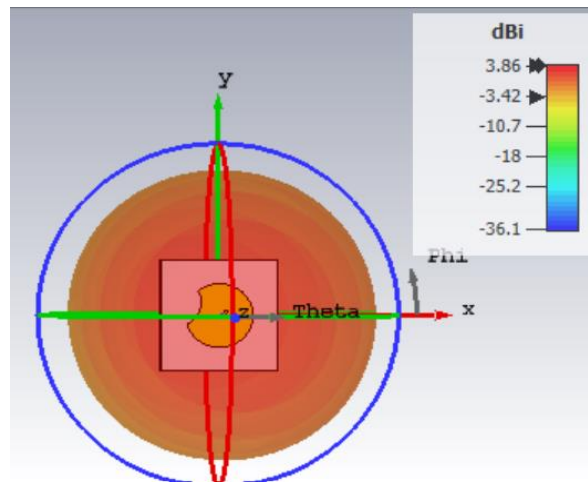


Figure III.70 : Diagramme de rayonnement en 3D.

La Figure III.71 montre que le VSWR atteint une valeur de **1,048** à 3,5 GHz, indiquant une très bonne adaptation d'impédance. Cela signifie que la majorité de la puissance est transmise sans réflexion significative.

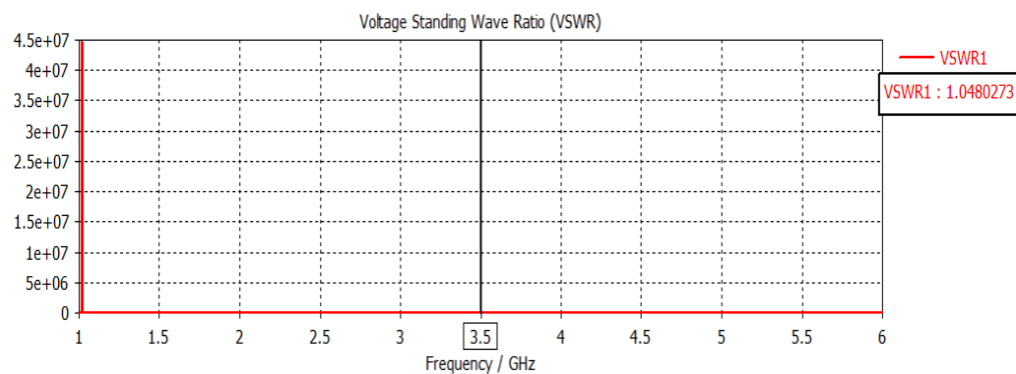


Figure III.71 : Rapport d'Onde Stationnaire (VSWR).

Le tableau suivant compare les caractéristiques de deux antennes à fente alimentées par câble coaxial, utilisant respectivement des substrats FR-4 et Silicone. Les paramètres techniques révèlent des compromis intéressants entre taille, bande passante et performance.

1. Dimensions et adaptation :

- L'antenne FR-4 présente un rayon de patch plus grand (11.175 mm vs 6.49 mm) mais offre une meilleure adaptation ($S_{11} = -41.6$ dB vs -32.6 dB)
- Les deux configurations maintiennent un excellent VSWR (1.01 et 1.04), proche de la valeur idéale de 1

2. Performances fréquentielles :

- La version FR-4 démontre une bande passante 4.3 fois plus large (144.77 MHz) que le Silicone (33.54 MHz)
- L'antenne Silicone présente un gain légèrement supérieur (3.86 dB vs 3.52 dB), probablement dû à ses dimensions réduites

Le substrat FR-4 offre des avantages significatifs en termes de bande passante et d'adaptation d'impédance, tandis que le Silicone permet une miniaturisation importante avec un gain légèrement amélioré. Le choix entre ces solutions dépendra des contraintes d'espace et des exigences de bande passante pour l'application cible. La bonne adaptation des deux configurations ($VSWR \approx 1$) garantit dans les deux cas une transmission efficace de la puissance.

Tableau III.17 : Comparaison des performances entre deux antennes avec fente, alimentées par un câble coaxial.

Paramètres	FR-4	Silicone
Rayon de patch	11.175	6.49
S11 (dB)	-41.616	-32.597
Bande passante a - 10 dB	144,77 MHz, [3,433 - 3,578]	33.54 MHz [3.482-3.515]
VSWR	1.01	1.04
Gain (dB)	3.52	3.86

III.4.2.4. Conception et simulation d'un Réseau MIMO à deux éléments d'antenne avec fente alimentée par un câble coaxial

a) En utilisant le substrat FR-4

La **figure III.72** représente une configuration MIMO à 2 éléments utilisant un substrat de type FR-4, un matériau largement utilisé en électronique pour sa rigidité et son faible coût. La vue de face montre deux patches circulaires, chacun avec une découpe similaire à celle observée dans le cas précédent. La vue arrière illustre le plan de masse, séparé en deux zones avec une bande étroite au centre. Chaque élément est alimenté individuellement par un connecteur coaxial.

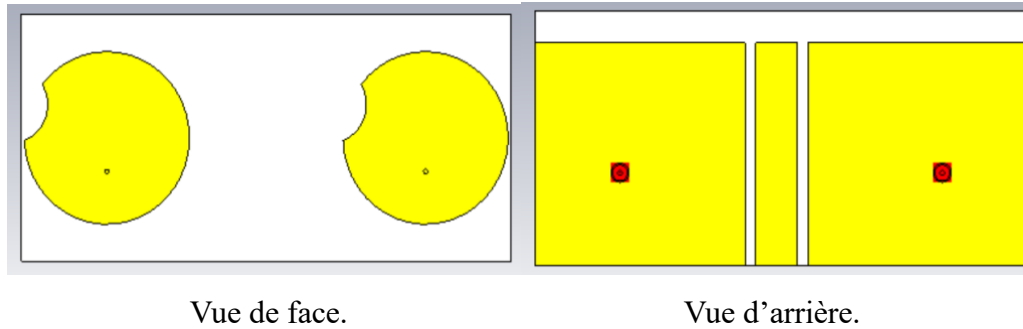


Figure III.72 : Réseau MIMO à deux éléments d'antenne avec fente en utilisant le substrat FR-4 alimentée par un câble coaxial.

La **Figure III.73** illustre les paramètres S du réseau MIMO à deux ports. À 3,5 GHz, les coefficients de réflexion S_{11} et S_{22} atteignent respectivement $-25,06$ dB et $-36,91$ dB, indiquant une excellente adaptation. Les coefficients de transmission croisés S_{12} et S_{21} sont très faibles (inférieurs à -57 dB), traduisant un bon isolement entre les deux antennes.

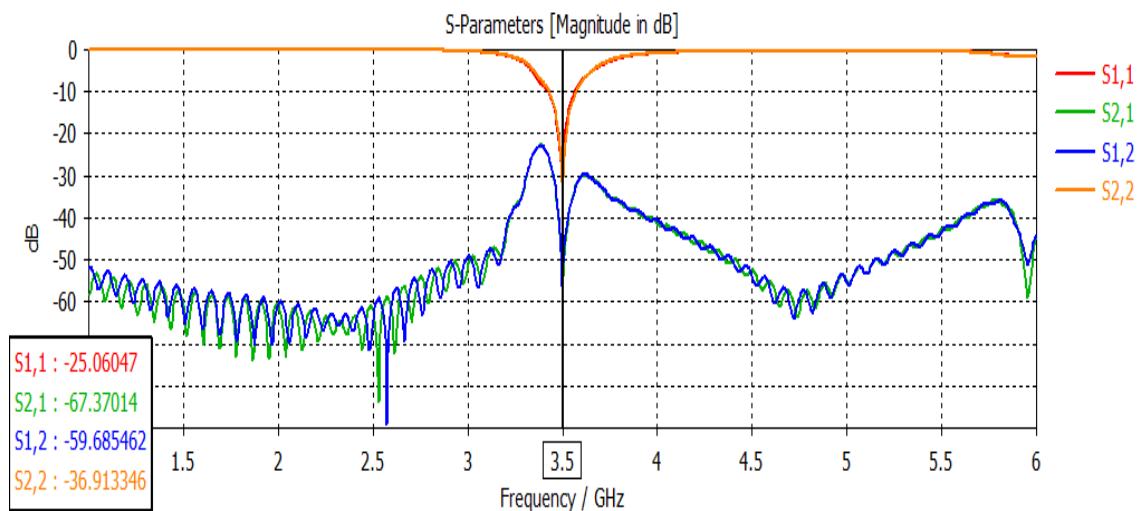
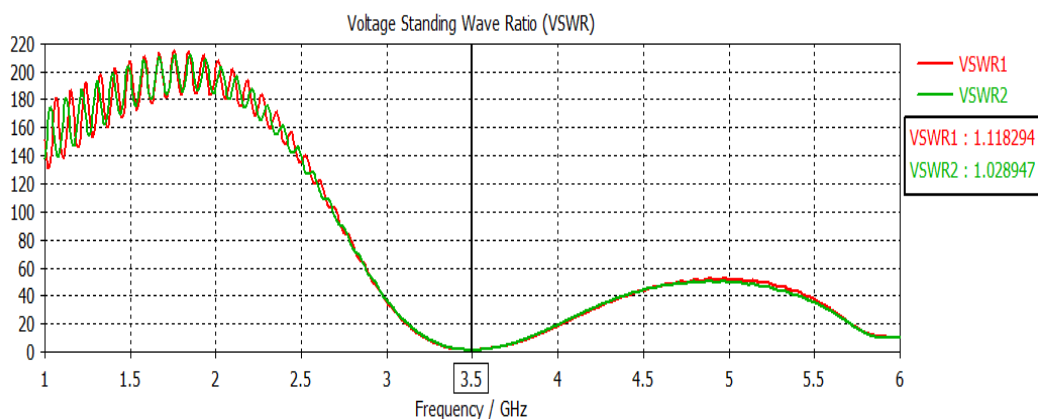


Figure III.73: Paramètres S.

La **figure III.74** montre le VSWR pour les deux ports, avec des valeurs proches de 1 à 3,5 GHz (1,118 pour le port 1 et 1,029 pour le port 2). Ces résultats confirment une adaptation



d'impédance optimale sur la fréquence centrale. Le bon accord est maintenu sur une large portion de la bande analysée.

Figure III.74 : Rapport d'Onde Stationnaire (VSWR).

La **Figure III.75** illustre le diagramme de rayonnement en 2 et 3D de l'antenne. Un gain maximal d'environ **3,25 dBi** est observé, indiquant une directivité correcte et une bonne répartition de l'énergie dans l'espace.

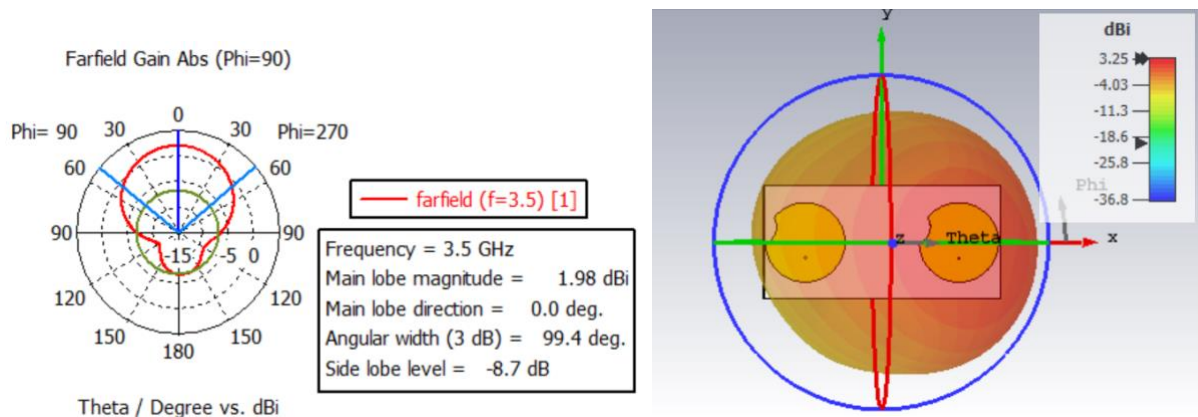


Figure III.75 : Diagramme de rayonnement en 2 et 3D.

Le coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC) est représenté dans la **Figure III.76**. À 3,5 GHz, il atteint une valeur extrêmement faible de $2,71 \times 10^{-9}$, ce qui traduit un excellent isolement entre les deux antennes et de très bonnes performances MIMO.

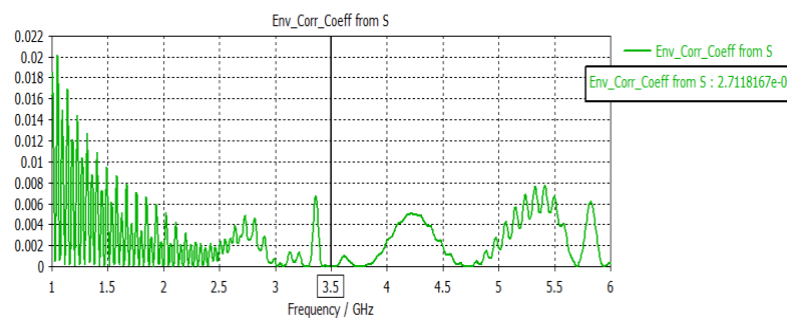


Figure III.76 : Le coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC).

La **Figure III.77** montre que le gain de diversité atteint sa valeur maximale de **10** à 3,5 GHz. Ce résultat confirme une efficacité optimale en environnement multi-trajets, avec une forte capacité de diversité du système.

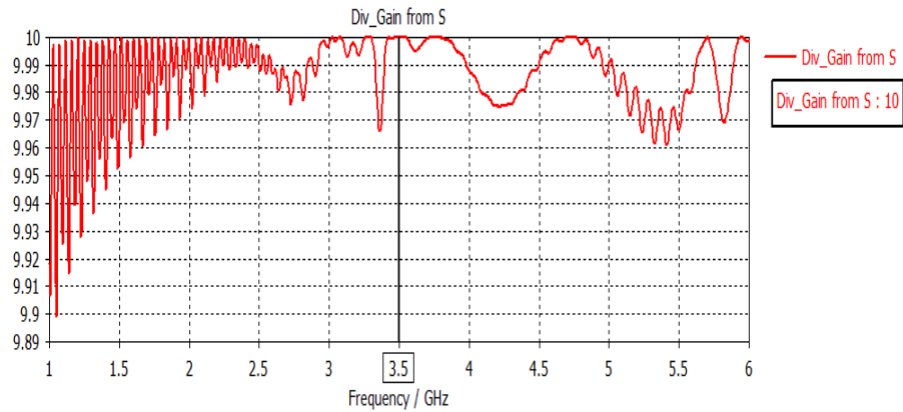


Figure III.77 : Le gain de diversité.

b) En utilisant le substrat en Silicone

La **figure III.78** illustre une antenne MIMO à 2 éléments utilisant un substrat en silicone. En vue de face, on observe deux patches circulaires, chacun comportant une encoche identique. Les deux patches sont positionnés côte à côte sur un même substrat, avec des points d'alimentation visibles au centre de chaque élément. En vue arrière, le plan de masse est partiellement découpé de manière à réduire le couplage entre les deux éléments MIMO, tout en maintenant une bonne surface conductrice. La présence de connecteurs coaxiaux visibles en rouge indique l'alimentation individuelle de chaque élément.

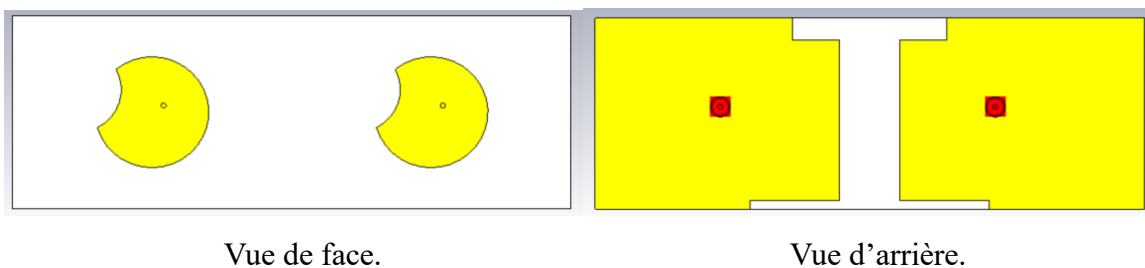


Figure III.78 : Réseau MIMO à deux éléments d'antenne avec fente En utilisant le substrat en silicone alimentée par un câble coaxial.

La **figure III.79** présente les paramètres S du réseau MIMO. À 3,5 GHz, les coefficients de réflexion S11 et S22 atteignent respectivement $-13,79$ dB et $-14,52$ dB, ce qui indique une adaptation correcte. Les paramètres de transmission S12 et S21 sont également faibles (environ -20 dB), suggérant un isolement modéré entre les deux ports.

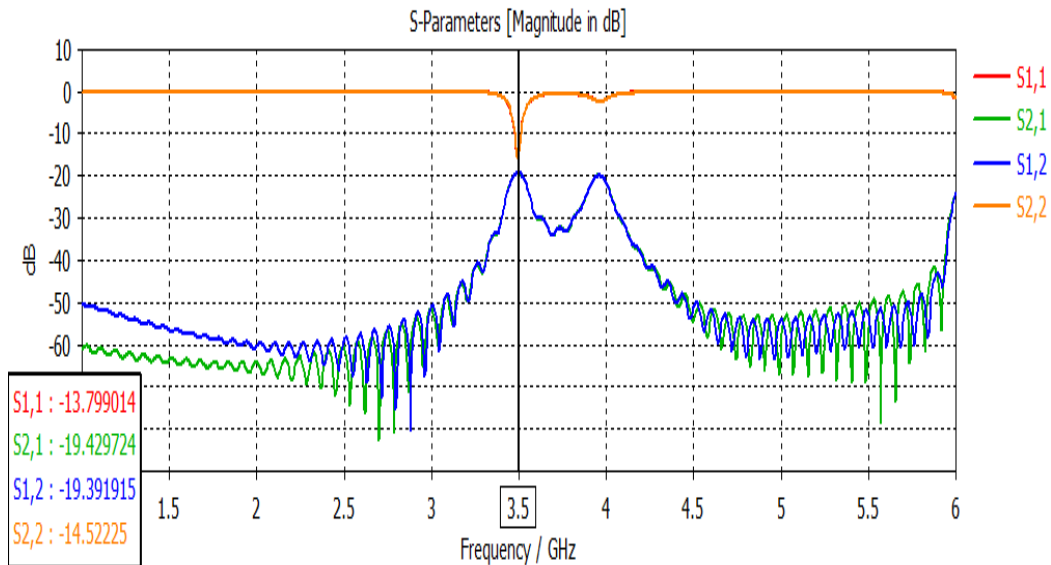


Figure III.79 : Paramètres S.

La figure III.80 montre le VSWR des deux ports. À 3,5 GHz, les valeurs sont de **1,51** pour le port 1 et **1,46** pour le port 2, indiquant une adaptation acceptable. Ces valeurs confirment une bonne transmission avec peu de puissance réfléchie.

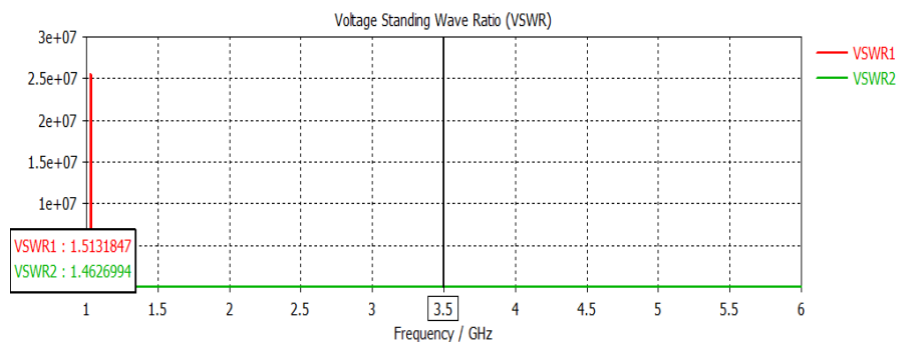


Figure III.80 : Rapport d'Onde Stationnaire (VSWR).

Le rayonnement tridimensionnel de l'antenne est représenté dans la Figure III.81. Un gain maximal d'environ **3,4 dBi** est observé. La forme du lobe principal montre une directivité convenable et une bonne stabilité de rayonnement autour de l'axe θ .

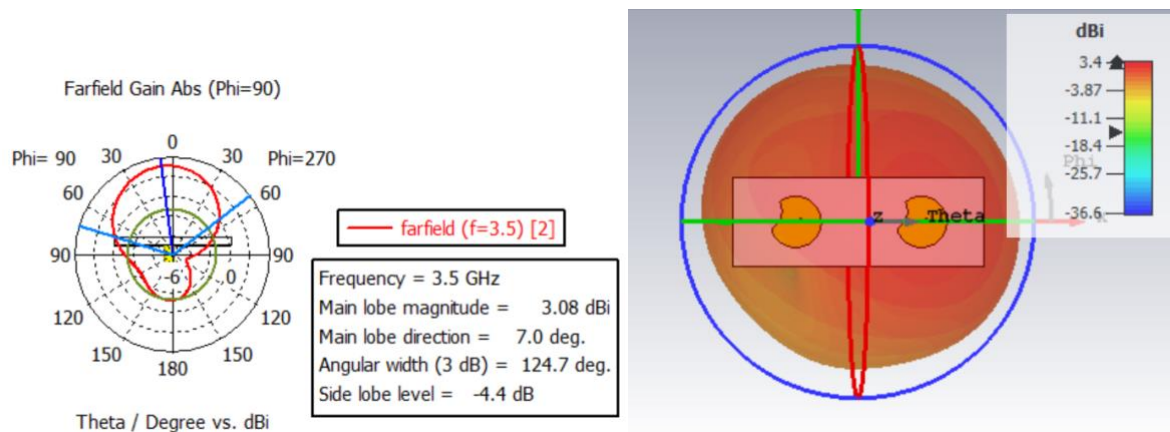


Figure III.81 : Diagramme de rayonnement en 2 et 3D.

Le coefficient de corrélation d'enveloppe est représenté dans la **figure III.82**. Une valeur très faible de 0,00189 est obtenue à 3,5 GHz, indiquant un excellent isolement entre les deux antennes. Cela garantit de bonnes performances MIMO.

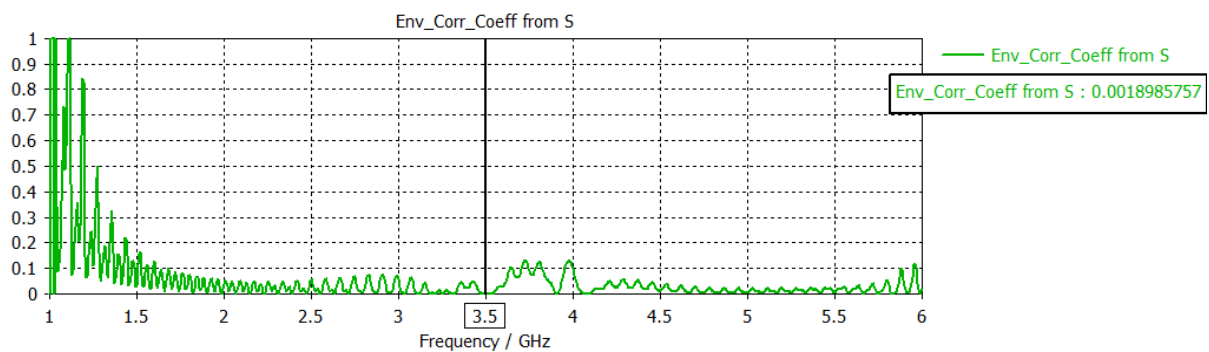


Figure III.82 : Le coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC).

La **figure III.83** montre que le gain de diversité atteint 9,99 à 3,5 GHz. Cette valeur proche du maximum confirme une bonne diversité spatiale et une forte efficacité en environnement multi-trajets.

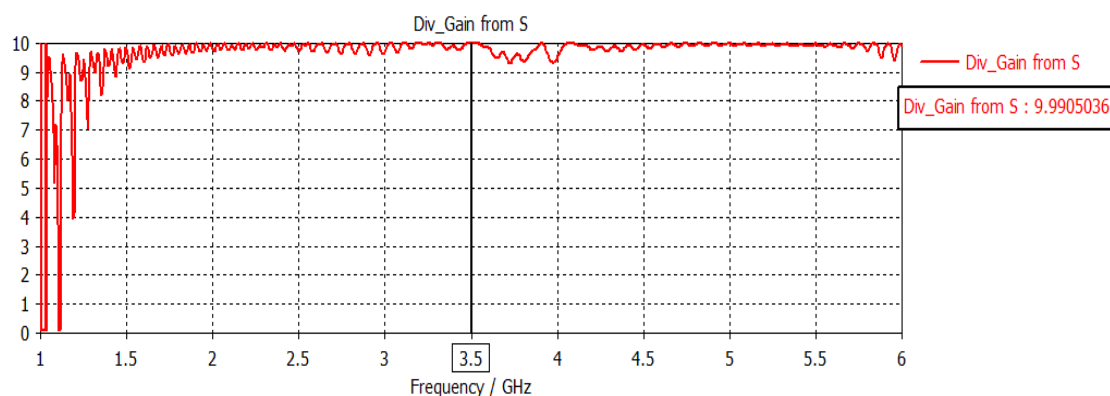


Figure III.83 : Le gain de diversité.

Le **tableau III.18** compare les performances de deux configurations MIMO 2x1 avec antennes à fente, mettant en évidence l'impact du choix du substrat (FR-4 vs Silicone) sur les paramètres clés des systèmes multi-antennes.

1. Performance d'isolation et couplage :

- L'antenne FR-4 montre une isolation exceptionnelle ($S_{12}=-59.7\text{dB}$, $S_{21}=-67.4\text{dB}$) contre seulement -19.4dB pour le Silicone
- Le FR-4 maintient un ECC ultra-faible (2.7×10^{-9}) comparé au Silicone (0.001), garantissant une meilleure indépendance des canaux

2. Adaptation et efficacité :

- Meilleure adaptation pour le FR-4 ($S_{11}=-25.1\text{dB}$, $VSWR_1=1.11$) vs Silicone ($S_{11}=-13.8\text{dB}$, $VSWR_1=1.51$)
- Les deux configurations atteignent un gain de diversité quasi-identique ($\sim 10\text{ dB}$)

3. Compromis performance/gain :

- Le Silicone offre un gain légèrement supérieur (3.4dB vs 3.25dB)
- Le FR-4 présente des paramètres S_{22} bien meilleurs (-36.9dB vs -14.5dB)

La configuration FR-4 domine nettement en termes d'isolation et d'adaptation, crucial pour les systèmes MIMO, tandis que le Silicone montre des performances correctes avec un avantage marginal en gain. Pour des applications exigeantes en termes de qualité de liaison et d'interférences, le FR-4 s'impose comme le choix optimal malgré son gain légèrement inférieur. La différence d'ECC (3 ordres de grandeur) est particulièrement significative pour les débits élevés en environnement encombré.

Tableau III.18 : Comparaison des performances entre deux réseaux MIMO à deux éléments d'antennes avec fente, alimentée par un câble coaxial.

Paramètres	Antenne avec substrat FR-4	Antenne avec substrat en silicone
S11 (dB)	-25.06	-13.79
S12 (dB)	-59.68	-19.39
S21 (dB)	-67.37	-19.42
S22 (dB)	-36.91	-14.52
VSWR1	1.11	1.51

VSWR2	1.02	1.46
Gain (dB)	3.25	3.4
ECC	2.71×10^{-9}	0.001
Gain de diversité	10	9.99

III.5. REALISATION ET MESURES

La réalisation expérimentale du réseau MIMO a été effectuée en se basant sur les dimensions issues des simulations optimisées, exclusivement sur un substrat de type FR-4, choisi pour sa disponibilité, son coût réduit et sa facilité de fabrication. La fabrication des réseaux d'antennes MIMO a été effectuée au niveau du Centre de Développement et de Recherche d'Alger **ALMITECH**. Les mesures des résultats des différentes antennes ont été effectuées au niveau du Laboratoire de Télécommunications et De Traitement du Signal Numérique au niveau de l'Université Djillali El Yabes de Sidi Belabbes, en respectant scrupuleusement les dimensions et les matériaux définis lors des simulations. Les prototypes d'antennes, incluant les deux types étudiés (antenne simple et antenne avec fente), ont été fabriqués avec leurs deux configurations d'alimentation : par ligne micro-ruban et par sonde coaxiale. Afin de caractériser les performances de ces antennes, des mesures ont été réalisées à l'aide de l'analyseur de réseau vectoriel E5071C. Cet appareil permet de mesurer les paramètres S, notamment S11 et S21, essentiels pour évaluer l'adaptation d'impédance, le couplage mutuel et les performances globales du réseau MIMO. La procédure de calibration, de connexion des antennes, et d'acquisition des données est décrite dans les étapes suivantes.

- **PROCEDURE DE CALIBRATION**

- 1- Montrer les câbles de raccordement aux ports de l'analyseur
- 2- Montrer le kit de calibration (Ecal) entre les ports des câbles de raccordement.
Attention : Pendant le raccordement il ne faut pas forcer les têtes entières, vous risquez de causer le cœur de la tête.
- 3- Raccorder l'Ecal à l'analyseur via le câble USB.
- 4- Allumer l'analyseur de réseau E5071C.
- 5- Attendre jusqu'à ce que le programme mesure soit exécuté.
- 6- Attendre jusqu'à ce que la lumière rouge (qui signifie attendre) devienne verte (qui signifie prêt) et le kit de calibration.

7- Régler canal avant e.a.d le nombre de canaux et de traces (Chamel/traces) sur Bloc TINSTR STATE® appuyer sur System ensuite appuyer sur Mise Setup sur le menu et ensuite sur Channel/trace Setup et choisir le nombre de canaux et de traces (ex : 2 channel + traces).

8- Sur le menu principal appuyer sur calibration → Ecal → 2-port Cal ou 1-port Cal selon les mesures à faire.

9- Attendre la procédure d'exécution en cours de calibration des deux ports ou du port.

10- Après la calibration on choisit le nombre des traces avec leur positionnement en appuyant sur « Display » puis « Num of Traces » et on choisit le nombre des traces (ex : 3) puis dans le même menu on appuie sur « Allocate Traces » et on choisit le nombre des plans (il doit convenir avec le nombre des traces).

11- Puis on va associer à chaque graphe un paramètre à afficher en utilisant l'option « Mesurment » dans le menu principal ensuite en appuie sur chaque graphe avec la souris et on choisit à chaque fois l'inverse des paramètres à afficher (S1 ou S2 ou S3 ou S4).

12- Pour le réglage de la bande de fréquences de test (si existe deux méthodes : dans en choisissant la fréquence de début de bande en appuyant sur « Stimulus » puis « Start » et rédiger la fréquence avec les moyens d'accès (clavier ou souffle), si la fréquence de fin de bande en appuyant sur « Stop » dans le même menu, pour être utilisée la fréquence centrale f_c de la bande en appuyant sur « Stimulus » puis « Center » et rédiger la fréquence centrale et puis appuyer sur « Sign » et régler la bande de fréquence B avec la condition : $\frac{1}{2} B < f_c$.

13- Dans la suite la bande de fréquence intermédiaire (F1) en appuyant « Average » puis « IF - Bandwidth » et on rédige la bande en KHz (plus faible est la bande, meilleurs seront les résultats affichés et plus le rendement deviendra lent ex : 10 KHz), puis on active l'option de moyenne en appuyant sur « Averaging » sur le même menu puis basculer sur « OK » et régler le facteur de moyenne en appuyant « Avg Factor » et on rédige le facteur (ex : 16).

14- Sur le menu principal appuyer sur « Sweep Setup » ensuite sur « Points » pour régler le nombre de points d'échantillons.

15- Appuyer sur « Marker » et puis sur « Marker 1 » pour varier la position du manqueur avec le voieur (modifier de réglages) sur le panneau avant, en plaçant la flèche au-dessus de vouloir ; on peut utiliser jusqu'à quatre manqueurs et plus à l'aide de cette option.

16- Sur une principal choisir « trigger » et l'option « hold » pour mettre en arrêt le générateur de l'analyseur.

17- Débrancher l'Ecal.

18- Pour vérifier l'efficacité du calibrage raccorder les câbles directement entre eux.

19- Remettre en marche le générateur en choisissant cette fois l'option « continous » de « trigger » (les résultats doivent être de 0 dB pour S1 et S2, et avoisinant les -50 dB pour S1 et S2).

20- L'analyseur est maintenant prêt pour effectuer les mesures en plaçant le dispositif à mesurer entre les câbles et avant toute manipulation de branchement ou de débranchement arrêter le générateur avec l'option « hold » ensuite remettre le générateur en marche avec l'option « continous ».

- **PROCEDURE DE SAUVEGARDE**

1 – Sauvegarde des courbes visualisées :

- Appuyer sur "PrintScreen" du clavier
- Appuyer sur "Paint" de l'écran de l'analyseur et faire CTRL V sur le clavier pour sauvegarder le fichier image sous format JPEG sur le disque dur de l'analyseur.

2 – Sauvegarde des fichiers textes (données) des courbes visualisées :

- Appuyer sur "Save/Recall" du bloc Instr State de l'analyseur
- Appuyer sur "Save Trace Data" du menu de l'écran de l'analyseur et sauvegarder sous le format CSV.

III.5.1. Réalisation et mesures du réseau MIMO à deux éléments d'une antenne sans fente alimentée par une ligne micro-ruban

Les résultats obtenus seront désormais présentés et comparés aux mesures réelles effectuées à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel.

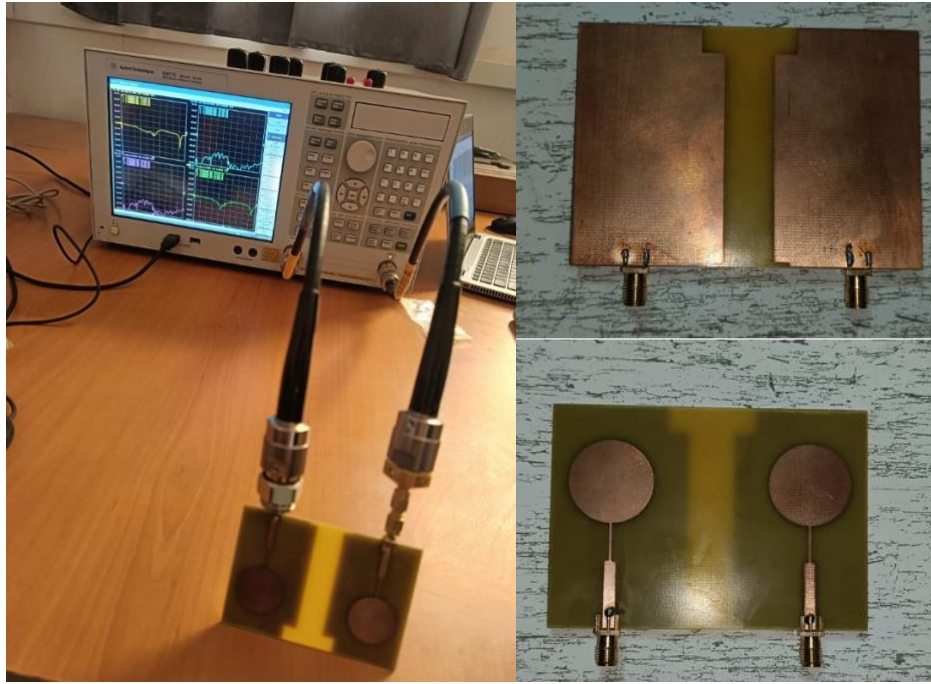


Figure III.84 : Prototype du réseau MIMO à 2 éléments d'une antenne sans fente alimentée par une ligne micro-ruban.

Les résultats de mesures par l'analyseur de spectre, ainsi que les courbes tracées avec Origin à partir des fichiers CSV (S11, S12, S21 et S22), sont indiqués sur les figures suivantes. Les valeurs sont présentées sous forme de coordonnées (X, Y), où X représente la fréquence en Hz (par exemple, $3.5E9 = 3.5 \text{ GHz}$) et Y représente l'amplitude des paramètres S exprimée en décibels (dB).

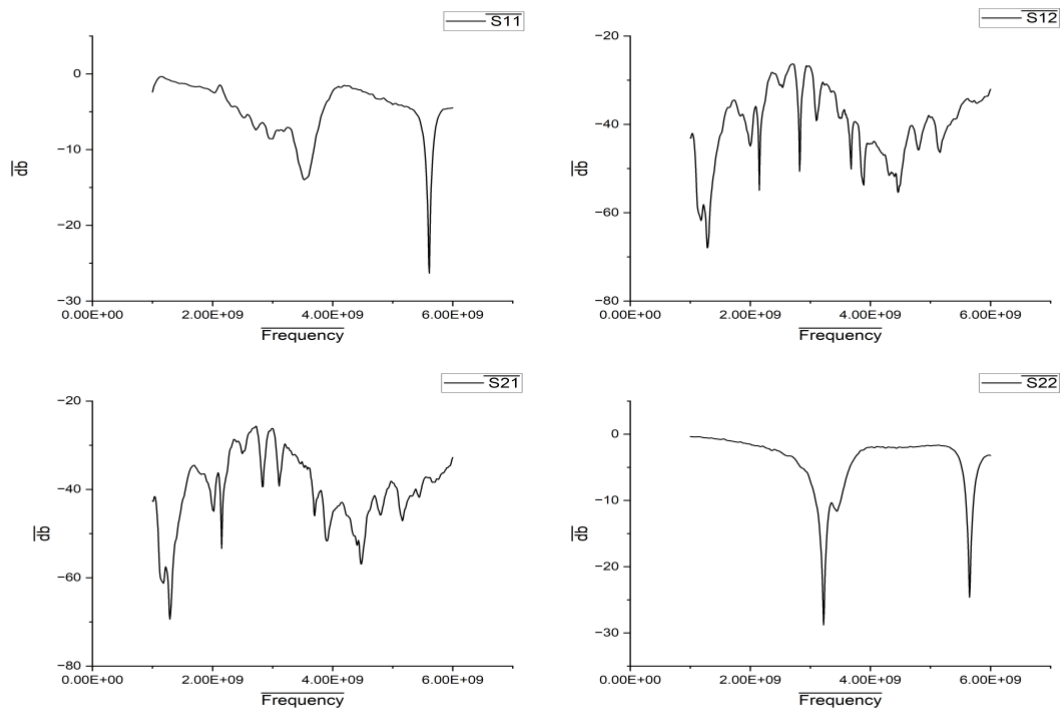


Figure III.85 : Les paramètres S mesuré du réseau MIMO à 2 éléments d'une antenne sans fente alimentée par une ligne micro-ruban.

S11: $X = 3.5E9$, $Y = -13.6072865$ | S12: $X = 3.5E9$, $Y = -38.6524707$ | S21: $X = 3.5E9$, $Y = -34.1501946$ | S22: $X = 3.5E9$, $Y = -10.1721742$

Les mesures montrent des performances dégradées par rapport à la simulation, surtout pour les paramètres d'isolement (S21/S12) et de réflexions (S11/S22).

Tableau III.19 : Comparaison des performances entre les résultats de simulation et ceux obtenus par analyseur de réseau.

Paramètres	Les mesures par simulation	Les mesures par l'analyseur
S11 (dB)	-28.83	-13.60
S12 (dB)	-82.82	-38.65
S21 (dB)	-82.82	-34.15
S22 (dB)	-28.83	-10.17

III.5.2. Réalisation et mesures du réseau MIMO à deux éléments d'une antenne avec fente alimentée par une ligne micro-ruban

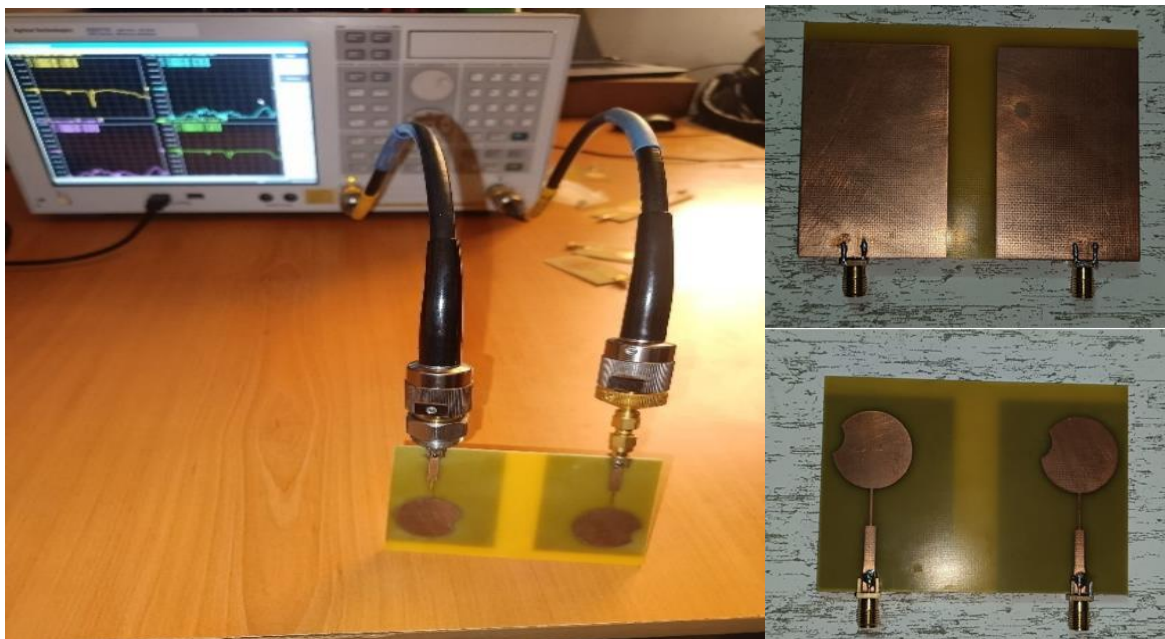


Figure III.86 : Prototypage du réseau MIMO à 2 éléments d'une antenne avec fente alimentée par une ligne micro-ruban.

Les résultats de mesures par l'analyseur de spectre, ainsi que les courbes tracées avec Origin à partir des fichiers CSV (S11, S12, S21 et S22), sont indiqués sur les figures suivantes :

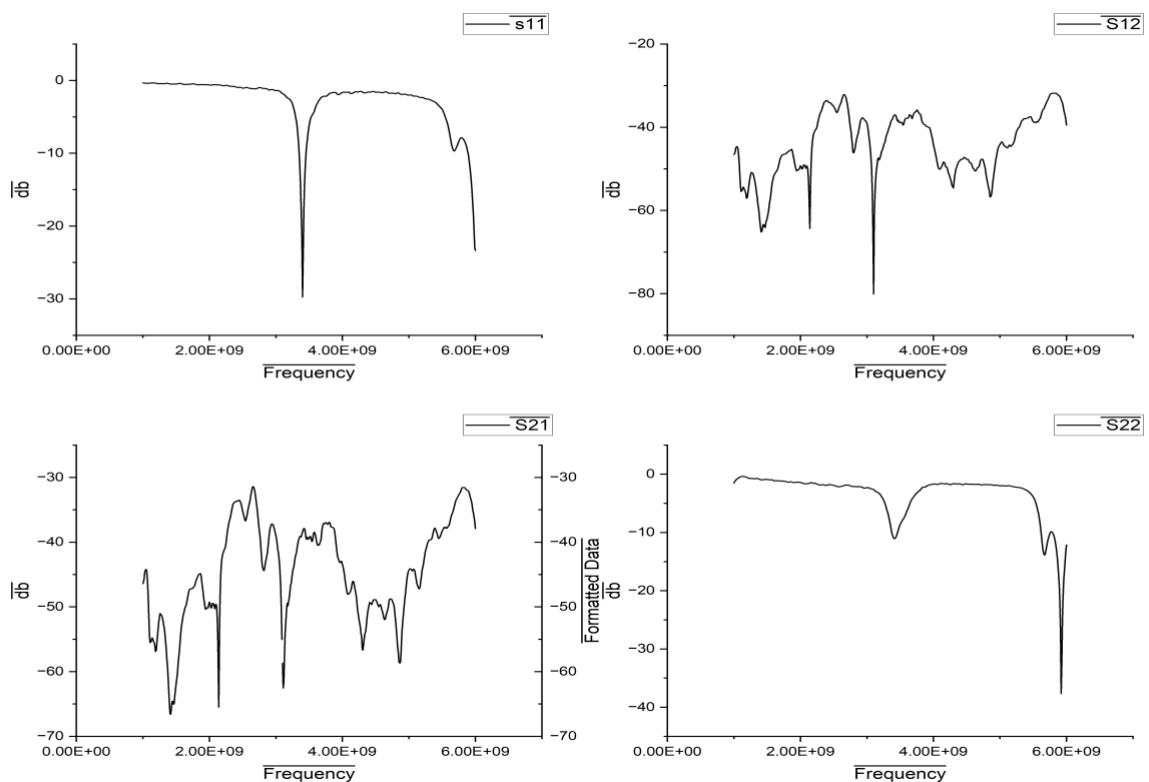
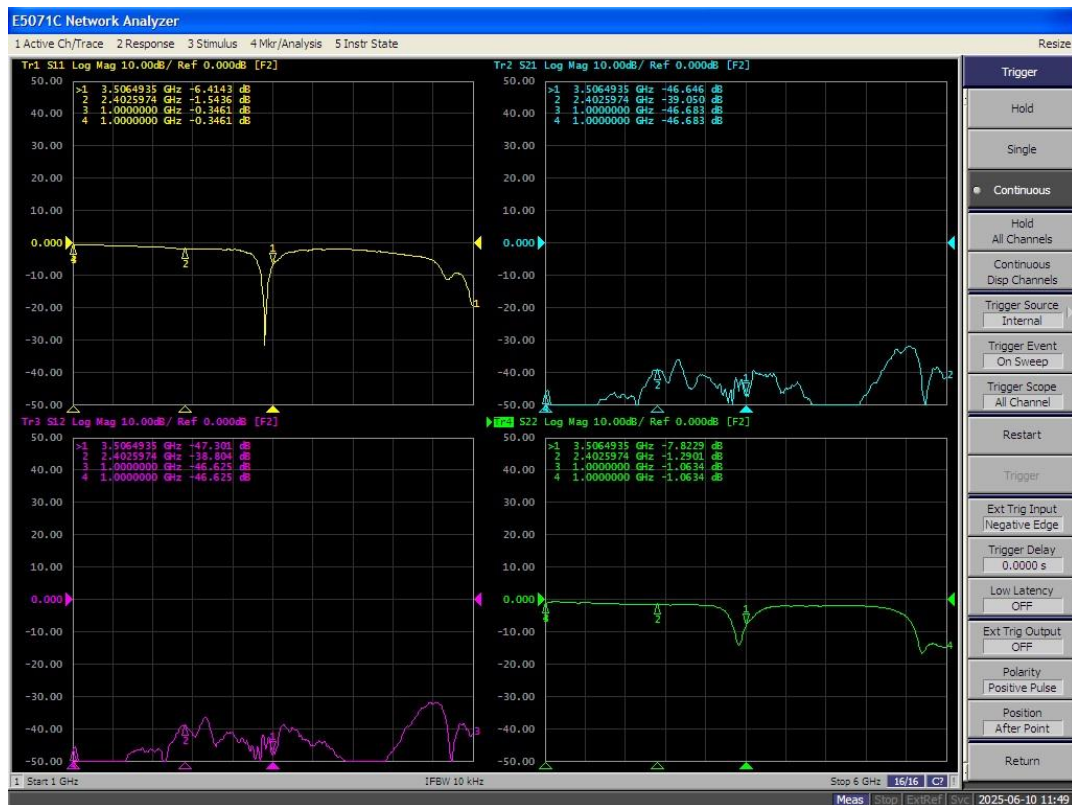


Figure III.87 : Les paramètres S mesuré du réseau MIMO à 2 éléments d'une antenne avec fente alimentée par une ligne micro-ruban.

S11: X = 3.5E9, Y = -6.16571954 | S12: X = 3.5E9, Y = -38.8641315 | S21: X = 3.5E9, Y = -39.3341832 | S22: X = 3.5E9, Y = -8.63202345.

- **S11/S22** : Les réflexions sont nettement plus élevées en mesure, ce qui indique une mauvaise adaptation à l'entrée et à la sortie.
- **S21/S12** : Les résultats sont proches entre simulation et mesure, ce qui montre une cohérence pour les transmissions.

Tableau III.20 : Comparaison des performances entre les résultats de simulation et ceux obtenus par analyseur de réseau.

Paramètres	Les mesures par simulation	Les mesures par l'analyseur
S11 (dB)	-25.57	-6.16
S12 (dB)	-42.58	-38.86
S21 (dB)	-42.53	-39.33
S22 (dB)	-23.72	-8.63

III.5.3. Réalisation et mesures du réseau MIMO à deux éléments d'une antenne sans fente alimentée par un câble coaxial

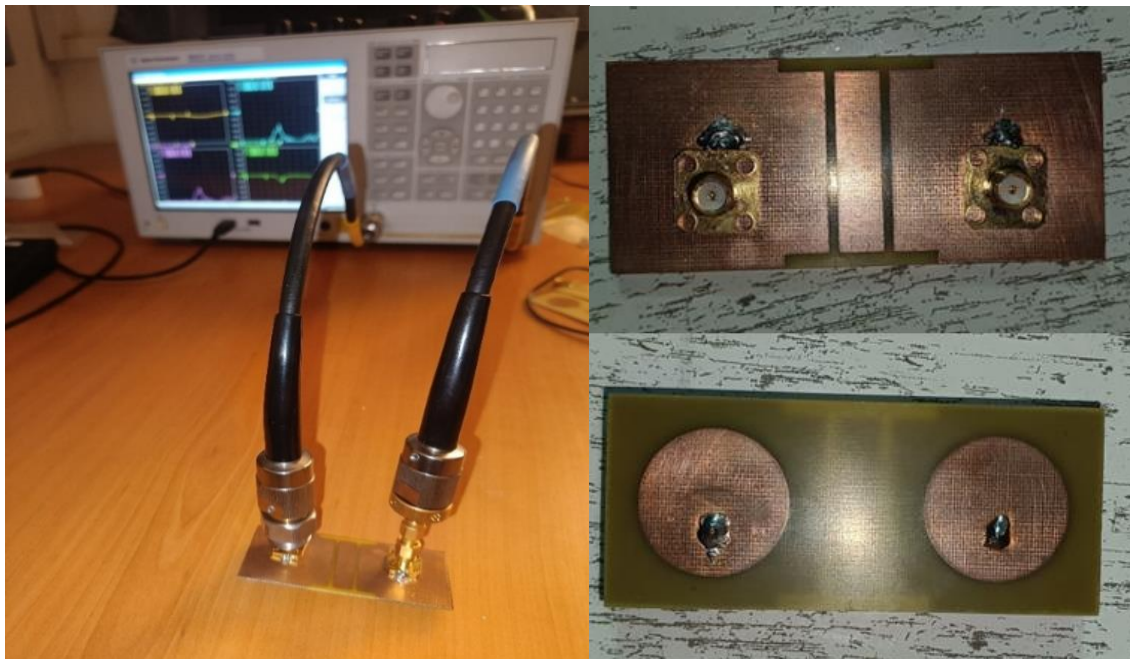


Figure III.88 : Prototype du réseau MIMO à 2 éléments d'une antenne sans fente alimentée par un câble coaxial.

Les résultats de mesures par l'analyseur de spectre, ainsi que les courbes tracées avec Origin sont indiqués sur les figures suivantes :

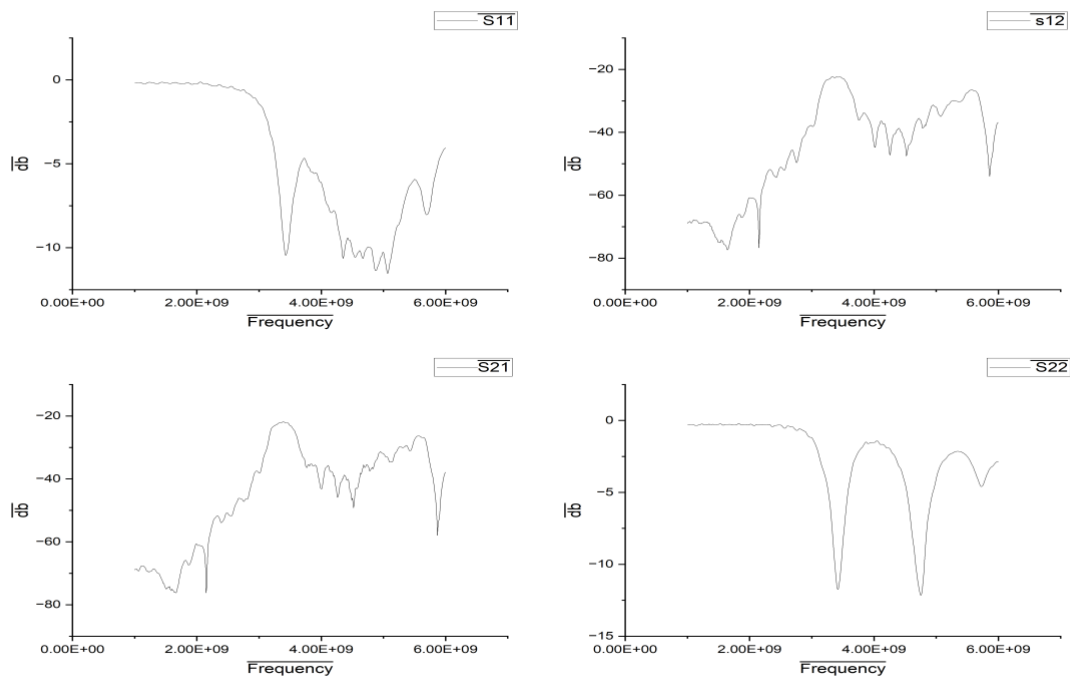
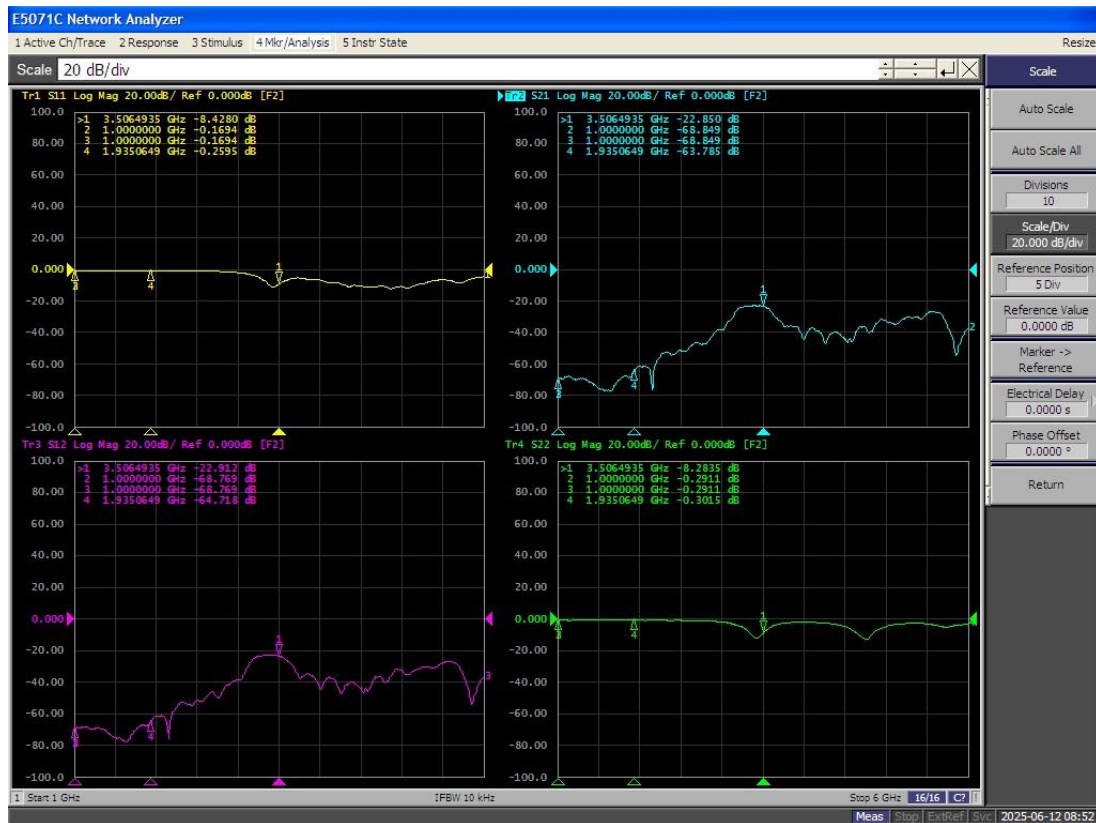


Figure III.89 : Les paramètres S mesuré du réseau MIMO à 2 éléments d'une antenne sans fente alimentée par un câble coaxial.

S11: X = 3.5E9, Y = -8.81814919 | S12: X = 3.5E9, Y = -22.8678535 | S21: X = 3.5E9, Y = -23.1002774 | S22: X = 3.5E9, Y = -8.51390568

Le coefficient de réflexion à l'entrée (**S11**) est d'environ **-44,43 dB** en simulation, contre **-8,82 dB** en mesure. De même, les paramètres de transmission (**S21** et **S12**) présentent une atténuation plus importante en simulation (\approx **-34 dB**) comparée aux valeurs mesurées (\approx **-23 dB**). Enfin, le paramètre **S22**, représentant la réflexion à la sortie, atteint **-54,57 dB** en simulation, alors qu'il est de **-8,51 dB** en mesure. Ces écarts peuvent être dus à plusieurs facteurs tels que les pertes réelles dans les matériaux, les tolérances de fabrication ou les imperfections de l'environnement de mesure, qui ne sont pas entièrement prises en compte dans le modèle simulé.

Tableau III.21 : Comparaison des performances entre les résultats de simulation et ceux obtenus par analyseur de réseau.

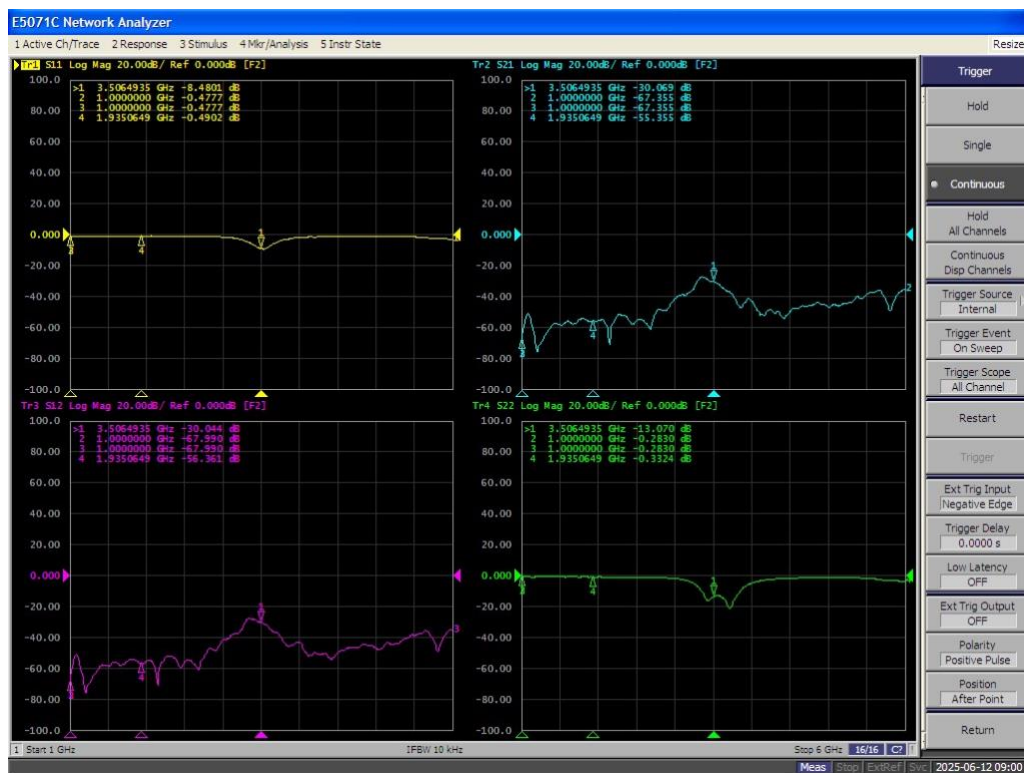
Paramètres	Les mesures par simulation	Les mesures par l'analyseur
S11 (dB)	-44.43	-8.81
S12 (dB)	-34.24	-22.86
S21 (dB)	-34.22	-23.10
S22 (dB)	-54.57	-8.51

III.5.4. Réalisation et mesures du réseau MIMO à deux éléments d'une antenne avec fente alimentée par un câble coaxial



Figure III.90 : Prototype du réseau MIMO à 2 éléments d’une antenne avec fente alimentée par un câble coaxial.

Les résultats de mesures par l’analyseur de spectre, ainsi que les courbes tracées avec Origin sont indiqués sur les figures suivantes :



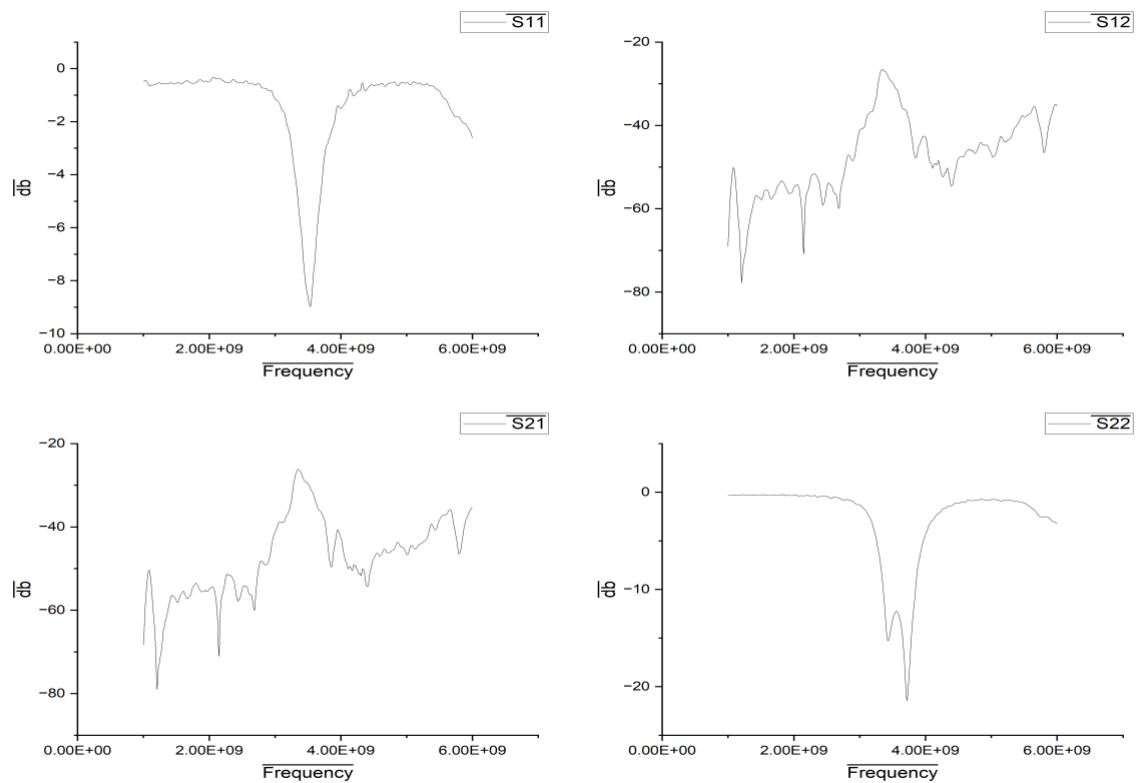


Figure III.91 : Les paramètres S mesuré du réseau MIMO à 2 éléments d'une antenne avec fente alimentée par un câble coaxial.

S11: X = 3.5E9, Y = -8.60104526 |||| S12: X = 3.5E9, Y = -29.7751622

S21: X = 3.5E9, Y = -29.5865635 |||| S22: X = 3.5E9, Y = -13.1

La simulation montre un coefficient de réflexion à l'entrée (**S11**) d'environ **-25,06 dB**, traduisant une bonne adaptation. En revanche, la mesure révèle une valeur de **-8,60 dB**, signalant une adaptation moins performante en pratique. Pour les paramètres de transmission, les résultats simulés indiquent des pertes très faibles avec **S21** \approx **-67,37 dB** et **S12** \approx **-59,69 dB**, alors que les mesures montrent des valeurs plus élevées, à **-29,59 dB** et **-29,77 dB**, respectivement. Enfin, **S22** atteint **-36,91 dB** en simulation, contre **-13,10 dB** en mesure. Ces écarts s'expliquent principalement par des imperfections réelles telles que les pertes diélectriques, les tolérances de fabrication, les effets de rayonnement non modélisés ou les limitations de l'équipement de mesure. Malgré ces différences, la tendance générale des courbes reste cohérente entre simulation et expérimentation.

Tableau III.22 : Comparaison des performances entre les résultats de simulation et ceux obtenus par analyseur de réseau.

Paramètres	Les mesures par simulation	Les mesures par l'analyseur
S11 (dB)	-25.06	-8.60
S12 (dB)	-67.37	-29.77
S21 (dB)	-59.68	-29.58
S22 (dB)	-36.91	-13.1

III.5.5. Conclusion

Ce chapitre a présenté une étude comparative détaillée entre deux types de substrats diélectriques, le FR-4 et le silicone, en analysant leurs performances à travers plusieurs structures d'antennes : simples (avec et sans fente) et réseaux MIMO à deux éléments, alimentés soit par une ligne micro-ruban, soit par un câble coaxial. Les résultats obtenus montrent que l'utilisation du silicone, grâce à sa permittivité élevée, permet une miniaturisation plus importante des antennes, tout en offrant dans plusieurs cas de meilleures performances en termes de gain et d'adaptation. Sur les antennes sans fente, le silicone permet une bande passante nettement plus large, alors que le FR-4 se montre plus stable pour les structures à fente, notamment en coaxial. Dans les configurations MIMO, les deux substrats présentent une bonne isolation et un gain de diversité élevé, mais le FR-4 garde un léger avantage en termes de corrélation (ECC plus faible), tandis que le silicone offre un meilleur gain global. En ce qui concerne les méthodes d'alimentation, la ligne micro-ruban s'est révélée plus efficace que le câble coaxial en termes d'adaptation et de performances globales. Par ailleurs, les résultats de mesure obtenus après calibration ne sont pas parfaitement identiques aux simulations, ce qui s'explique par plusieurs facteurs pratiques tels que les imprécisions de la procédure de calibration (point de référence, connecteurs), la qualité des soudures des antennes, ainsi que les variations de température ambiante qui peuvent affecter les caractéristiques des matériaux, notamment du silicone. Ces écarts restent toutefois acceptables et cohérents avec les attentes expérimentales, confirmant la validité générale des conceptions proposées.

Bibliographie

- [1] A. Osseiran, F. Boccardi, V. Braun, *et al.*, “Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the METIS project,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 5, pp. 26–35, May 2014.
- [2] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th ed., Wiley, 2016.
- [3] R. Garg, P. Bhartia, I. Bahl, and A. Ittipiboon, *Microstrip Antenna Design Handbook*, Artech House, 2001.
- [4] R. Waterhouse, “Printed antennas for wireless communications,” Wiley, 2007.
- [5] D. M. Pozar, “Considerations for choosing high-dielectric substrates in microstrip antenna design,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 53, no. 1, pp. 242–247, Jan. 2005.
- [6] CST Studio Suite – 3D EM simulation and analysis software. Dassault Systèmes, <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/> (consulté en 2024).

CONCLUSION GENERALE

L'évolution rapide des technologies de télécommunications, notamment avec l'émergence de la 5G et les perspectives offertes par la 6G, impose des exigences accrues en matière de performances, de compacité et d'efficacité des dispositifs de communication. Les antennes, éléments fondamentaux de tout système de communication sans fil, se trouvent ainsi au cœur de ces enjeux. Ce mémoire a permis d'explorer en profondeur les différentes approches de conception, de miniaturisation et d'optimisation des antennes, en mettant particulièrement l'accent sur les antennes patch et l'usage de substrats à haute permittivité.

Dans un premier temps, nous avons rappelé les principes de base des antennes, leurs principales caractéristiques (gain, directivité, impédance, polarisation...) ainsi que les différents types d'antennes utilisées dans les systèmes modernes. Ensuite, nous avons étudié les réseaux d'antennes dans le contexte des technologies 5G, en insistant sur l'apport des architectures MIMO, du beamforming et des réseaux intelligents, qui permettent d'accroître la capacité, la couverture et la robustesse des liaisons sans fil.

Enfin, à travers des simulations réalisées sous CST Studio Suite, nous avons analysé les performances de plusieurs configurations d'antennes patch en utilisant différents types de substrats (FR-4 et silicone). Les résultats ont mis en évidence les avantages des matériaux à haute permittivité pour la miniaturisation, tout en soulignant leurs limites en termes de bande passante et de pertes. Des techniques complémentaires comme les structures à sol défectueux (DGS) ont été évoquées pour pallier ces contraintes et améliorer l'adaptation d'impédance.

Ainsi, ce travail met en lumière les compromis nécessaires entre compacité, performance et intégration, et ouvre des perspectives intéressantes pour la conception d'antennes adaptées aux dispositifs mobiles de prochaine génération. Les recherches futures pourront se concentrer sur l'intégration de nouveaux matériaux, la reconfiguration dynamique des antennes ou encore l'exploitation de techniques d'intelligence artificielle pour optimiser automatiquement leur conception.

Annexe



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abou BekrBelkaid Tlemcen

Business Model Canvas

BMC

N° de projet : FT-047

Faculté/Institut : Faculté de TECHNOLOGIE

Département : TLC

Nom du projet : Antennes miniatures pour les futures générations mobiles

Encadrant 1 : BOUSALAH FAYZA

Etudiants : -BELLAHCENE HAYAT

Année universitaire : 2024/2025

1- Proposition de valeur (Value Proposition) القيمة المقترحة

- a. Quels problèmes résolvons-nous pour nos clients ?
 - Les problèmes de connectivité instable dans des environnements à haute densité d'appareils connectés.
 - Les coûts élevés des antennes importées ou spécialisées.
 - Le manque d'alternatives locales pour des antennes miniatures optimisées pour l'IoT et la 5G.
 - La complexité de l'intégration dans des systèmes embarqués miniaturisés.
- b. Quels besoins de nos clients satisfont nos produits ou services ?
 - Besoin d'une connectivité fiable dans les réseaux de télécommunication modernes.
 - Besoin d'un produit durable et de haute performance avec une bonne longévité.
 - Besoin de réduire les coûts d'exploitation et d'entretien.
 - Besoin de solutions locales adaptées au contexte industriel algérien.
- c. En quoi notre offre est-elle différente de celle de nos concurrents ?
 - Fabrication locale = réduction des coûts et délais de livraison.
 - Intégration de matériaux optimisés (FR4, Cuivre, Sn97Ag3) = meilleure efficacité et performance.
 - Personnalisation des antennes selon l'environnement d'utilisation.
 - Service après-vente gratuit et personnalisé, ce qui est rarement offert par les concurrents.
- d. Quelles est notre proposition unique de valeur ?

Des antennes miniatures localement développées, économiques, fiables, avec un support technique intégré, spécialement conçues pour les réseaux à haute densité (IoT, 5G, environnements industriels).

2- Segments de clients (Customer Segment) شرائح العملاء :

- a. Quels sont nos clients principaux?
 - Entreprises de télécommunications.
 - Fabricants d'équipements de télécom.
 - Centres de recherche en télécom.
 - Opérateurs télécoms en Algérie (ex. : Mobilis, Djezzy, Ooredoo).

- b. Quels sont les différents segments de clients que nous visons ?
- Grands opérateurs de réseaux.
 - PME technologiques spécialisées en IoT.
 - Universités et laboratoires de recherche.
 - Fournisseursd'infrastructures de télécom.
- c. Quels sont les besoins spécifiques de chaque segment de clients?
- Opérateurs** : fiabilité du signal, longévité, facilité d'intégration.
 - Chercheurs** : flexibilité du design, testabilité, innovation.
 - **Fabricants** : compatibilité avec leurs systèmes, faible coût.
 - Startups** : personnalisation, assistance technique.
- d. Comment pouvons-nous catégoriser nos clients en groupes distincts?
- Par type d'activité : recherche, production, exploitation.
 - Par taille : grands groupes vs. petites entreprises.
 - Par zone géographique : clients nationaux vs. Internationaux.

3- Relation avec les clients (Consumer Relationships) علاقة مع العملاء :

- a. Quel type de relation chaque segment de clients attend il de nous ?
- Assistance technique continue.
 - Garantie de satisfaction.
 - Accès à des mises à jour ou innovations.
 - Services de personnalisation de produit.
- b. Comment entretenons-nous actuellement les relations avec nos clients ?
- Support après-vente.
 - Réseautage communautaire avec partenaires techniques.
 - Montage gratuit et participation aux événements techniques.
- c. Comment pouvons-nous améliorer ou personnaliser nos interactions avec nos clients ?
- Mise en place d'un portail client.
 - Ajout de tutoriels et fiches techniques interactives.
 - Suivi client personnalisé via CRM.
 - Maintenance à distance ou sur site.

4-Canaux de distribution (Channels) : قنوات التوزيع :

- a- Par quels canaux nos clients veulent-ils être atteints ?
 - Commandes via site web.
 - Contact direct par salon/exposition.
 - Présence sur les réseaux professionnels (LinkedIn, salons).
- b- Quels canaux sont les plus efficaces pour atteindre chaque segment de clients ?
 - Vente directe B2B.
 - Réseaux professionnels.
 - Revendeurs spécialisés en équipement télécom.
- c- Comment pouvons-nous intégrer différents canaux pour améliorer l'expérience clients ?
 - Intégration e-commerce sur le site web.
 - Promotion multicanale (web, salon, réseaux).
 - Interface de commande + espace client + support en ligne.

5-Partenaires clés (Key Partnerships) : الشراكة الرئيسية :

- a. Qui sont nos partenaires clés ?
 - Almitech (gravure).
 - ANADE (aide au financement et lancement).
 - CDS (centre satellite pour tests).
 - Fournisseurs de test, matériaux et production.
 - Incubateurs¢res de télécom.
- b. Quels sont les partenariats qui nous aident à réduire les coûts, à accéder à de nouvelles ressources ou à améliorer notre proposition de valeur ?
 - Almitech : gravure à bas coût.
 - CDS : accès à des équipements de test professionnels.
 - ANADE : accompagnement et subventions.
 - Fournisseurs : matériaux de qualité à bon prix.
- c. Comment pouvons-nous aligner nos intérêts avec ceux de nos partenaires ?
 - Création de conventions de partenariat.

- Collaboration sur des projets communs (R&D).
- Intégration dans les chaînes de valeur locales.

6-Activités clés (Key Activities): الأنشطة الرئيسية:

- Quelles sont les actions principales que nous devons entreprendre pour livrer notre proposition de valeur ?
 - Étude des besoins du marché.
 - Conception et simulation (via CST).
 - Fabrication, test, validation, mise en production.
- Quelles sont les opérations essentielles pour notre entreprise ?
 - Modélisation et optimisation.
 - Fabrication de prototypes.
 - Test RF (avec analyseur réseau 100kHz – 18GHz).
 - Mise à jour de design selon retour client.
- Quelles sont les activités qui créent le plus de valeur pour nos clients ?
 - Design miniaturisé haute performance.
 - Adaptation à des contraintes environnementales spécifiques.
 - Rapidité de prototypage et d'itération.

7- Ressources clés (Key resources): الموارد الرئيسية:

- Quels sont nos actifs matériels, immatériels et humains essentiels ?
 - Logiciel CST.
 - Équipements : graveur LPKF, analyseur réseau.
 - Matériaux : FR4, cuivre, connecteurs SMA, fil Sn97Ag3.
 - Ressources humaines : ingénieurs, techniciens.
- Quels sont les outils, les technologies ou les partenariats dont nous avons besoin pour réussir ?
 - Simulation CST.
 - Gravure Almitech.
 - Support de partenaires académiques (TTL, CDS).
- Quels sont les principaux avantages concurrentiels de nos ressources ?
 - Infrastructure locale pour tests et production.
 - Connaissance du marché algérien.

- Capacité à personnaliser les produits rapidement.

8- Charges et coûts (Coste structure) : التكاليف

- Quels sont les coûts fixes et variables associés à notre modèle économique ?
 - Fixes : salaires (ingénieur 50 000 DA/mois, technicien 25 000 DA/mois), location.
 - Variables : composants, soudure, gravure, antennes.
- Quels sont les coûts les plus importants pour notre entreprise ?
 - Achat et entretien d'équipements de test (analyseur réseau).
 - Salaires de l'équipe technique.
 - Fourniture des composants spécialisés.
- Comment pouvons-nous réduire les coûts ou améliorer l'efficacité de nos opérations ?
 - Mutualisation des ressources avec des centres partenaires.
 - Réduction des pertes via l'automatisation.
 - Achatgroupé de composants.

9- Revenus (Revenue) : مصادر الدخل

- Quels produits ou services nos clients sont-ils prêts à payer ?
 - Vente d'antennes (directe & indirecte).
 - Contrat de maintenance (service technique).
 - Vente de pièces complémentaires (connecteurs, câbles).
- Quels sont les différents moyens par lesquels nous pouvons générer des revenus ?
 - B2B (entreprises Télécoms).
 - B2R (Business to Research).
 - Contrats à long terme pour maintenance.
- Quel est notre modèle de tarification ?
 - Prix unitaire selon le type d'antenne.
 - Forfait mensuel pour services techniques.
 - Remises pour commandes en volume.

Business Model Canvas : BMC

Partenaires clés Key Partnerships

الشراكة الرئيسية

- Les incubateurs
- Les fournisseurs de matériaux
- Fournisseurs d'équipements de test et de validation
- Fournisseurs d'équipements de production
- Almitex
- ANADE
- CDS (centre de développement satellitaire)
- Le centre d'exploitation des systèmes des télécommunications

Activités clés Key Activities

الأنشطة الرئيسية

- Diagnostic de besoin (marché ciblé)
- Fabrication des antennes - Test et validation - créer un schéma de circuit dans logiciel (CST), désigne fichier gbr

Ressources clés Key resources

الموارد الرئيسية

- Logiciel de simulation CST
- Maître de recherche et développement en TTL
- Graveur lpkf
- Analyseur de réseau 100khz-18ghz
- Fr4 / Copper
- Câble RF SMA femelle to ipex
- Fil de soudure Sn97Ag3
- Fer à souder - Pièces éponge

Proposition de valeur Value Proposition

القيمة المقترحة

- Innovation technologie
- Performances améliorées.
- Durabilité et longévité
- Réduction des coûts opérationnels.
- Amélioration de la fiabilité et de la connectivité pour les appareils IoT (Internet des objets) à grande échelle.
- Prise en charge de la densité élevée des appareils connectés dans les environnements urbains et industriels.

Relation clients Consumer Relationship

علاقة مع العملاء

- Service après-vente - Montage gratuit - Réseautage et développements communautaires - Garantisse la satisfaction et la confiance des clients

Canaux de distribution Channels

قنوات التوزيع

- Vente direct.
- Revendeurs.
- Site web de la société pour les commandes en lignes.
- Réseaux sociaux professionnels.
- Participation à des événements de l'industrie, des conférences, et des salons professionnels.

Segment client Customer Segment

شريحة العملاء

- Entreprises de télécommunications.
- Fabricants d'équipements de télécommunications
- Entreprises de recherche et développement en télécommunications
- Opérateurs télécoms algériens

Revenus (Revenue) :

مصادر الدخل

- Vente directe et indirecte d'antenne
- Contrat de service de maintenance

Coûts
Coste structure

التكاليف

- Graveur lpkf (Almitech)
- Les antennes 5970.00DA
- Analyseur de réseau 100khz-8ghz
- Fil de soudure Sn97Ag3 2917.42DA
- Fer à souder 865.00DA
- Connecteur SMA femelle droit bride 4 trous 1280.00DA
- Connecteur coaxial SMA femelle droit à bride 4 trous 1280.00DA
- L'ingénieur 50 000DA /mois- Le technicien 25 000 DA/mois