

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 et Télécommunications

Par :

Yazid Wahiba

Belyagoubi Ibtissem

NOUVELLE TECHNOLOGIE D'INNOVATION D'UN RESEAU MIMO POUR LES SYSTEMES INTELLIGENTS EN 5G ET IOT

Soutenu publiquement, le **22/06/2025**, devant le jury composé de :

Mme. F. BOUSALAH	MCA	Univ. Tlemcen	Directrice
Mr. M.Z. BABA AHMED	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
Mr.M.Y. BENDIMERAD	Professeur	Univ. Tlemcen	Examineur

Année universitaire :2025/2026

REMERCIEMENTS

Avant toute chose, nous rendons grâce à Allah, le Tout-Puissant, pour Ses innombrables bienfaits, Sa miséricorde et Son soutien tout au long de notre parcours. Nous Le remercions de nous avoir accordé la santé, la détermination, la patience et la persévérance nécessaires pour surmonter les difficultés rencontrées et mener ce travail à son accomplissement.

C'est avec une profonde reconnaissance que nous adressons nos plus sincères remerciements à notre encadrante, Madame **BOUSALAH Fayza**, Maître de conférences classe A à l'Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen. Nous lui sommes infiniment reconnaissantes pour la confiance qu'elle nous a témoignée, pour son accompagnement précieux, sa disponibilité constante, ses conseils avisés et son soutien indéfectible tout au long de l'élaboration de ce mémoire. Son exigence scientifique, sa patience et sa bienveillance ont constitué une source d'inspiration et un encouragement permanent dans la réalisation de ce travail.

Nous exprimons également notre profonde gratitude à Monsieur **BABA AHMED Mohammed Zakariya**, Professeur à l'Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen, pour l'honneur qu'il nous fait en acceptant de présider le jury de ce mémoire. Nous lui témoignons notre respect et notre reconnaissance pour l'intérêt porté à notre travail.

Nos remerciements les plus respectueux s'adressent également à Monsieur **BENDIMERAD Mohammed Yassine**, Professeur à l'Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen, qui a bien voulu examiner ce mémoire. Nous lui sommes reconnaissantes pour le temps consacré à l'évaluation de ce travail ainsi que pour ses remarques et observations constructives.

Nous tenons aussi à remercier chaleureusement l'ensemble des enseignants et du personnel du Département des Télécommunications de la Faculté de Technologie de l'Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen. Grâce à leur dévouement, leur disponibilité et la qualité de leur enseignement, nous avons pu acquérir les connaissances et les compétences qui ont contribué à notre formation académique et professionnelle.

Enfin, nous adressons une pensée toute particulière à nos familles, dont l'amour, le soutien moral, les encouragements et les sacrifices ont été une source inestimable de motivation. Nous remercions également nos amis ainsi que toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation et à l'aboutissement de ce modeste travail.

À tous, nous exprimons notre profonde gratitude et notre sincère reconnaissance.

Dédicace

À Allah, le Tout-Puissant,

Louange à Allah qui m'a guidée, soutenue et accordé la force nécessaire pour accomplir ce travail. À Lui reviennent toute ma gratitude et ma reconnaissance.

À moi-même,

Pour ma patience, ma persévérance et tous les efforts qui m'ont permis d'arriver jusqu'ici.

A mes très chers parents, Belyagoubi Ibrahim et Belyagoubi Fatiha,

À ceux qui ont toujours été mon refuge, ma force et mon plus grand soutien. À mon père pour ses sacrifices et son encouragement constant, et à ma mère, ce cœur qui m'a aimée avant même de me voir et dont les prières ont accompagné chacun de mes pas. Aucun mot ne saurait exprimer toute ma gratitude et mon amour envers vous. Que ce travail soit le témoignage de ma profonde reconnaissance.

À ma chère sœur, Roumaïssa,

À une partie de mon cœur et à la compagne de mes plus beaux souvenirs. Ta présence dans ma vie est une véritable bénédiction. Merci pour ton amour et ton soutien ; je te souhaite tout le bonheur et la réussite que tu mérites.

À mon amie de toujours et ma binôme, Wahiba,

À celle qui a partagé avec moi les joies, les défis et les plus beaux souvenirs de ce parcours. Tu as été bien plus qu'une amie, une véritable sœur de cœur. Merci pour ton soutien, ta fidélité et tous les moments inoubliables que nous avons vécus ensemble.

À mon mari M.M,

À celle dont la présence a été un précieux soutien tout au long de ce parcours. Merci pour ta confiance, tes encouragements et ta présence constante qui m'ont aidée à avancer avec sérénité.

À tous ceux qui m'ont aimée sincèrement, soutenue par une parole bienveillante ou une prière venue du cœur, je dédie humblement ce modeste travail avec toute mon affection et ma reconnaissance.

Belyagoubi ibtissem

Dédicace

Avant toute chose, je rends grâce à Dieu, le Tout-Puissant, qui m'a accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail. Grâce à Sa bénédiction et à Sa protection, ce mémoire a pu voir le jour.

À mes très chers parents, avec tout mon amour et ma profonde reconnaissance, je vous dédie ce travail. Merci pour tous les sacrifices que vous avez consentis, pour votre amour inconditionnel, vos prières et votre soutien qui ne m'ont jamais fait défaut. Vous avez toujours été ma force dans les moments difficiles et ma joie dans les moments de réussite.

Si j'ai pu arriver jusqu'ici aujourd'hui, c'est grâce à vous. Que Dieu vous protège, vous accorde santé, bonheur et une longue vie. Je vous aime plus que les mots ne peuvent l'exprimer.

À ma chère sœur Ilham et à mon cher frère Salah, merci pour votre affection, votre présence et votre soutien précieux tout au long de mon parcours. Vos encouragements ont toujours été une source de motivation pour avancer.

À ma chère Ibtissem, mon binôme, mon amie et ma sœur de cœur. Avant même de partager ce parcours académique, nous étions déjà liées par une belle amitié construite au fil des années, remplie de complicité, de confiance et de précieux souvenirs. Ensemble, nous avons grandi, partagé les moments de joie comme les moments difficiles. Merci pour ton soutien sincère, ta présence, ton écoute et tous les souvenirs inoubliables que nous avons construits ensemble. Je suis reconnaissante d'avoir parcouru ce chemin à tes côtés et je te souhaite tout le bonheur, la réussite et les belles choses que tu mérites.

À mes adorables neveux, Chahine et Rislane, qui apportent tant de joie et de lumière dans ma vie par leurs sourires et leur innocence. Je vous souhaite un avenir rempli de réussite, de bonheur et de belles réalisations.

Enfin, j'adresse ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à ma formation et à l'accomplissement de ce travail.

Je dédie ce mémoire à toutes les personnes qui occupent une place précieuse dans mon cœur.

Yazid wahiba

Résumé

Ce travail explore les nouvelles technologies d'innovation des réseaux MIMO (Multiple Input Multiple Output) destinées aux systèmes intelligents dans le contexte des réseaux 5G et de l'Internet des Objets (IoT). L'étude se concentre sur le développement et l'évaluation de solutions avancées, notamment le MIMO, qui utilise des plusieurs antennes aux stations de base pour augmenter le débit, améliorer l'efficacité spectrale, et augmenter le gain et la directivité sans nécessiter une augmentation significative de la bande passante. La miniaturisation des antennes à base de cellules CSRR (Complementary Split Ring Resonators) permet de réduire la taille des antennes afin de les intégrer dans des boîtiers compacts. L'utilisation de trois substrats différents FR4, silicon et Rogers TMM5880 est étudiée pour optimiser le gain et l'adaptation d'impédance des antennes. La combinaison des technologies 5G et IoT permet d'atteindre une capacité réseau élevée, une latence faible essentielle pour les applications IoT en temps réel, et le support d'un nombre très élevé d'appareils connectés. Les applications couvrent les villes intelligentes, l'industrie 4.0, la santé connectée et les transports intelligents, positionnant le MIMO comme une technologie fondamentale pour les réseaux 5G actuels et les futures générations beyond-5G et 6G. Les résultats de comparaison des différentes structures proposées sont satisfaisants et démontrent la viabilité de ces solutions innovantes.

Mots clés : Réseau MIMO, 5G, IOT, Silicon, Roger RT5080, FR-4.

Abstract

This work explores innovative technologies for Multiple Input Multiple Output (MIMO) networks designed for intelligent systems in the context of 5G networks and the Internet of Things (IoT). The study focuses on the development and evaluation of advanced MIMO solutions, which employ multiple antennas at base stations to increase data throughput, improve spectral efficiency, and enhance antenna gain and directivity without requiring a significant increase in bandwidth. The miniaturization of antennas based on Complementary Split Ring Resonator (CSRR) cells enables a reduction in antenna size, facilitating their integration into compact devices. The use of three different substrates, namely FR4, silicon, and Rogers TMM5880, is investigated to optimize antenna gain and impedance matching. The integration of 5G and IoT technologies provides high network capacity, low latency essential for real-time IoT applications, and support for a very large number of connected devices. Applications include smart cities, Industry 4.0, connected healthcare, and intelligent transportation systems, positioning MIMO as a key enabling technology for current 5G networks and future Beyond-5G (B5G) and 6G wireless systems. The comparative results of the different proposed antenna structures are satisfactory and demonstrate the feasibility of these innovative solutions.

Keywords : MIMO Network, 5G, Internet of Things (IoT), Silicon, Rogers RT5880, FR-4.

ملخص

يستكشف هذا العمل التقنيات المبتكرة لشبكات الهوائيات المتعددة الإرسال والاستقبال (MIMO — Multiple Input Multiple Output) الموجهة للأنظمة الذكية في سياق شبكات الجيل الخامس (5G) وإنترنت الأشياء (IoT). تنصبُّ الدراسة على تطوير حلول متقدمة وتقييمها، ولا سيما تقنية الـ MIMO التي تعتمد مئات الهوائيات في المحطات الأساسية لزيادة معدل نقل البيانات، وتحسين الكفاءة الطيفية، وتعزيز الكسب الهوائي والاتجاهية دون الحاجة إلى توسيع ملحوظ في عرض النطاق الترددي. كما تُتيح تصغير الهوائيات المبنية على خلايا CSRR (Complementary Split Ring Resonators) تقليل حجمها بشكل كبير لدمجها في هياكل مضغوطة. ويُدرَس استخدام ثلاثة ركائز مختلفة — FR4 وSilicone Rogers TMM5880 — بهدف تحسين كسب الهوائيات والتكيف مع الممانعة. ويُمكن الجمع بين تقنيتي 5G وIoT من تحقيق طاقة شبكية عالية، وزمن استجابة منخفض ضروري للتطبيقات الأنوية لإنترنت الأشياء، ودعم عدد كبير جداً من الأجهزة المتصلة. وتشمل التطبيقات المدن الذكية والصناعة 4.0 والرعاية الصحية المتصلة وأنظمة النقل الذكي، مما يُرسِّخ مكانة MIMO بوصفها تقنية أساسية لشبكات الجيل الخامس الحالية والأجيال المستقبلية من-beyond 5G. وقد جاءت نتائج مقارنة الهياكل المقترحة المختلفة مُرضية، مُثبتةً جدوى هذه الحلول المبتكرة وقابليتها للتطبيق.

الكلمات المفتاحية: شبكة MIMO، الجيل الخامس (5G)، إنترنت الأشياء (IoT)، السيليكون، Rogers RT5880،

FR-4.

Table des matières

REMERCIEMENTS.....	I
Dédicace	II
Dédicace	III
Résumé	IV
Abstract	V
ملخص	VI
CHAPITRE I	
INTRODUCTION GENERALE	1
I.1 INTRODUCTION.....	5
I.2 LA 5 EME GENERATION	5
I.2.1 Qu'est-ce que la 5 -ème génération ?.....	5
I.2.2 Objectif et principe de la 5G	6
I.2.3 L'architecture de la 5eme génération	6
I.2.4 Technologies clés de la 5G	10
I.2.5 Fréquences utilisées pour la 5G	14
I.3 INTERNET DES OBJETS (IOT)	15
1.3.1 Qu'est-ce que l'Internet des objets (IoT) ?.....	15
I.3.2 Domaines d'application de l'Internet des objets.....	16
I.3.2.1 Domaine du transport.....	16
I.3.2.2 Domaine de l'industrie.....	16
I.3.2.3 Domaine de la santé.....	16
I.3.2.4 Domaine de l'agriculture.....	17
I.3.2.5 Domaine de la domotique.....	17
I.3.2.6 Smart cities (Les villes intelligentes).....	17
I.3.3 Comment fonctionne l'IoT ?.....	17
I.3.4 Architecture de l'IOT	18
I.3.4.1 Couche de perception	18
I.3.4.2 Couche de réseau	19

I.3.4.3 Couche d'application	19
I.3.5 Comparaisons entre IOT et le réseau traditionnel.....	20
I.4 DEFINITION D'UNE ANTENNE	21
I.5 HISTORIQUE DES ANTENNES IMPRIMEES	22
I.6 PRINCIPE DE FONCTIONEMENT D'ANTENNE.....	23
I.7 ROLE DES ANTENNES.....	23
I.7.1 Antenne d'émission	23
I.7.2 Antenne de réception	23
I.7.3 Réciprocité.....	23
I.8 CARACTERISTIQUE DES ANTENNES	24
I.8.1 Impédance d'entrée	24
I.8.2 Coefficient de réflexion	24
I.8.3 Directivité	25
I.8.4 Rendement	25
I.8.5 Gain	25
I.8.6 Rapport d'onde stationnaire (ROS)	26
I.8.7 La fréquence de résonance et la bande passante	26
I.8.8 Diagramme de rayonnement	26
I.8.9 Polarisation	27
I.9 APPLICATIONS DES ANTENNES IMPRIMEES.....	28
I.9.1 Télécommunications par satellite.....	28
I.9.2 Commande et contrôle.....	28
I.9.3 Télémessure par missile.....	28
I.9.4 Equipements portatifs	28
I.9.5 Utilisation des antennes d'émission en médecine	28
I.9.6 Récepteurs de navigation par satellite	28
I.10 DIFFIRENTS TYPES D'ANTENNES.....	29
I.10.1 Antennes dipolaires.....	29
I.10.2 Antennes cornet.....	29
I.10.3 Antennes paraboliques	30
I.10.4 Antennes Yagi-Uda	30
I.10.5 Antennes réseau.....	31

I.10.6 Antennes patch	31
I.11 LA STRUCTURE D'UNE ANTENNE PATCH	32
I.12 LES BENEFICES ET LES INCONVENIENTS DES ANTENNES PATCH	33
I.12.1 Les bénéfices	33
I.12.2 Inconvénient	34
I.13 TECHNIQUES D'ALIMENTATION	34
1.13.1 Couplage par contact	34
I.13.1.1 Alimentation par ligne micro-ruban	34
I.13.1.2 Alimentation par sonde coaxiale	34
I.13.2 Alimentation par couplage sans contact	35
I.13.2.1 Alimentation par couplage a fonte (ouverture)	35
I.13.2.2 Alimentation par couplage proximité	35
I.14 TECHNIQUES D'ADAPTATION	36
I.14.1 Adaptation par ligne quart d'onde	36
I.14.2 Adaptation par encoche	36
I.14.3 Adaptation par STUB	37
I.15 CONCLUSION	37
CHAPITRE II	
II.1 INTRODUCTION	43
II.2 MINIATURISATION	43
II.2.1 Définition d'une antenne miniature	43
II.2.2 Techniques de miniaturisation des antennes	44
II.2.2.1 Insertion de court-circuit	44
II.2.2.2 Utilisation des matériaux	45
II.2.2.3 Modification de la géométrie	45
II.3 METAMATERIEUX	46
II.3.1 L'origine des métamatériaux	46
II.3.2 Définition métamatériaux	47
II.3.3 Classifications des métamatériaux	48
II.3.3.1 Matériaux doublement positifs (DPS)	49
II.3.3.2 Matériaux à perméabilité négative (MNG)	49
II.3.3.3 Matériaux à permittivité négative (ENG)	49

II.3.3.4 Les Matériaux doublement négatifs (DNG)	50
II.3.4 Structure des métamatériaux SRR et CSRR	50
II.3.4.1 Structure métamatériaux SRR.....	50
II.3.4.2 Structure métamatériaux CSRR	51
II.3.5 Applications des métamatériaux.....	52
II.4 SYSTEME MIMO TRADITIONNELLE.....	53
II.4.1 Principe du MIMO	53
II.4.2 Architecture des systèmes MIMO.....	54
II.4.2.1 Système SISO	55
II.4.2.2 Système SIMO.....	55
II.4.2.3 Système MISO.....	56
II.4.2.4 Système MIMO	57
II.4.3 Capacité d'un canal MIMO	58
II.4.4 Avantages et limitations de la technologie MIMO	58
II.4.4.1 les avantages.....	58
II.4.4.2 Limitations et défis.....	59
II.5 CONCLUSION.....	59
CHAPITRE III	
III.1 INTRODUCTION	66
III.2 PRESENTATION DE L'ENVIRONNEMENT DE SIMULATION	66
III.2.1 Présentation du logiciel CST Studio Suite	66
III.2.2 Description générale du logiciel	67
III.2.3 Interface du CST	70
III.3 CHOIX DES SUBSTRATS.....	70
III.4 CONCEPTION ET SIMULATION D'UNE ANTENNE PATCH RECTANGULAIRE.....	71
III.5 ETUDE DE L'ANTENNE	72
III.5.1 Antenne rectangulaire.....	72
III.5.1.1 Antenne rectangulaire initiale.....	72
III.5.1.2 Antenne rectangulaire adaptée.....	80
III.5.2 Antenne rectangulaire (nouveau modèle).....	98
III.5.2.1 Antenne rectangulaire nouveau modèle initiale	98

III.5.2.2 Antenne rectangulaire nouveau modèle adaptée.....	106
III.5.3 Antenne rectangulaire (nouveau modèle) avec DGS.....	123
III.6 MINIATURISATION	130
III.6.1 Etude de la cellule SRR	131
III.6.2 Etude de la cellule CSRR	132
III.6.3 Avant l'adaptations (intégrations des cellules).....	137
III.6.4 Après l'adaptations	140
III.7 Réseau MIMO a deux éléments d'une antenne alimentée par une ligne micro-ruban (FR4).....	147
III.8 CONCLUSION	151
CONCLUSION GENERALE.....	153
ملخص	155

La liste des tableaux

Tableau I.1: Description des fonctions du réseau 5G.	10
Tableau I.2:La différence entre l'Internet et la technologie IoT.....	21
Tableau III. 1: Cahier de charge de l'antenne proposée.	71
Tableau III. 2 : Paramètres de l'antenne patch rectangulaire.....	72
Tableau III. 3: Dimensions de l'antenne rectangulaire initiale alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).	73
Tableau III. 4: Dimensions de l'antenne rectangulaire initiale alimentée par la ligne micro-ruban (Roger).	74
Tableau III. 5: Dimensions de l'antenne rectangulaire initiale alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).	76
Tableau III. 6 : Dimensions de l'antenne rectangulaire initiale alimentée par un câble coaxial (FR4).	77
Tableau III. 7 : Dimensions de l'antenne rectangulaire initiale alimentée par un câble coaxial (Roger).....	78
Tableau III. 8: Dimensions de l'antenne rectangulaire initiale alimentée par un câble coaxial (Silicon).....	79
Tableau III. 9 : Dimensions de l'antenne rectangulaire adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).	81
Tableau III. 10 : Dimensions de l'antenne rectangulaire adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (Roger)	84
Tableau III. 11 : Dimensions de l'antenne rectangulaire adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).	87
Tableau III. 12 : Dimensions de l'antenne rectangulaire adaptée alimentée par un câble coaxial (FR4).	90
Tableau III.13 : Dimensions de l'antenne rectangulaire adaptée alimentée par un câble coaxial (Roger).....	92
Tableau III. 14: Dimensions de l'antenne rectangulaire adaptée alimentée par un câble coaxial (Silicon).....	96
Tableau III.15: Dimensions de l'antenne nouveau modèle initiale alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).	99
Tableau III.16: Dimensions de l'antenne nouveau modèle initiale alimentée par la ligne micro-ruban (Roger).	100

Tableau III.17: Dimensions de l'antenne nouveau modèle initiale alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).	102
Tableau III. 18 : Dimensions de l'antenne nouveau modèle initiale alimentée par un câble coaxial (FR4).	103
Tableau III.19 : Dimensions de l'antenne nouveau modèle initiale alimentée par un câble coaxial (Roger).	104
Tableau III.20 : Dimensions de l'antenne nouveau modèle initiale alimentée par un câble coaxial (Silicon).	105
Tableau III.21 : Dimensions de l'antenne nouveau modèle adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).	107
Tableau III.22: Dimensions de l'antenne nouveau modèle adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (Roger).	110
Tableau III.23: Dimensions de l'antenne nouveau modèle adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).	113
Tableau III.24: Dimensions de l'antenne nouveau modèle adaptée alimentée par un câble coaxial (FR4).	116
Tableau III. 25 : Dimensions de l'antenne nouveau modèle adaptée alimentée par un câble coaxial (Roger).	118
Tableau III. 26 : Dimensions de l'antenne nouveau modèle adaptée alimentée par un câble coaxial (Silicon).	121
Tableau III.27 : Dimensions de l'antenne nouveau modèle adaptée avec DGS alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).	124
Tableau III.28 : Dimensions de l'antenne nouveau modèle adaptée avec DGS alimentée par la ligne micro-ruban (Roger).	126
Tableau III.29: Dimensions de l'antenne nouveau modèle adaptée avec DGS alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).	129
Tableau III.30: Dimensions de la cellule CSRR en FR4.	133
Tableau III.31: Dimensions de la cellule CSRR en Silicon.	135
Tableau III.32: Dimensions de la cellule CSRR en Roger.	136
Tableau III. 33: Comparaison des dimensions avant et après l'adaptation.	146

La liste des figures

Figure I.1 : Exemple d'architecture fronthaul 5G [3].	7
Figure I.2 : RRH 4G typique [3].	8
Figure I.3: EF 5G typique [3].	8
Figure I.4: L'Architecture fonctionnelle du cœur de 5G [4].	9
Figure I.5: Techniques utilisées dans la technologie 5G[5].	11
Figure I.6: Spectres des fréquences (ondes millimétriques)[5].	12
Figure I.7 : Massive MIMO [10].	14
Figure I.8: Fréquences utilisées pour la 5G [13].	15
Figure I.9: Internet des objets [17].	16
Figure I.10: Vue schématique sur l'architecture de l'IoT [22].	19
Figure I.11: Protocoles de IoT et l'Internet selon modèle OSI [23].	20
Figure I.12: Le fonctionnement d'antenne [25].	23
Figure I.13: a bande passante [29].	26
Figure I.14: L'antenne bidirectionnelle [32].	27
Figure I.15: L'antenne directionnelle [33].	27
Figure I.16: La polarisation de l'onde électromagnétique [29].	28
Figure I.17: L'antenne dipolaire [34].	29
Figure I.18: L'antenne cornet [35].	30
Figure I.19: Antenne parabolique [36].	30
Figure I.20: Antenne Yagi-Uda [37].	31
Figure I.21: Antenne réseau 5G [38].	31
Figure I.22: Antenne patch [39].	32
Figure I.23: Structure typique d'une antenne microbande [41].	32
Figure I.24: Diverses formes d'éléments rayonnants dans une antenne patch [42].	33
Figure I.25: Patch avec la ligne d'alimentation [45].	34
Figure I.26: alimentation de la sonde coaxiale [45].	35
Figure I.27: Alimentation par couplage d'ouverture [45].	35
Figure I.28: Alimentation par couplage à proximité [45].	36
Figure I.29: Adaptation par ligne quart d'onde [47].	36
Figure I.30 : Adaptation par encoche [48].	37
Figure I.31: Adaptation par STUB [48].	37
 Figure II.1: Sphère de Chu d'une antenne	 43
Figure II.2 : Géométrie d'une antenne imprimée à encoches (a) Et son effet sur les courants surfaciques (b)	45
Figure II.3 : Antenne repliée (a) Bow-tie, (b) repliement vertical	46
Figure II.4 : Miniaturisation à l'aide de métamatériaux.	46

Figure II 5 : Classification des métamatériaux électromagnétiques selon les signes ϵ et μ .	48
Figure II.6 : Structure SRR (a) et perméabilité effective associée (b).	49
Figure II.7 : réseau de fils conducteurs minces (a), des tracés d'un réseau de fils (b)...	50
Figure II.8: Combinaison de fils minces et SRR pour former des métamatériaux DNG .	50
Figure II.9: Représentation schématique des différents types de cellules élémentaires de la structures SRR : En 2D a) Double SRR-rond, b) Double SRR-carré et c) Multi SRR-carré ; en 3D d) SRR-rond simple et d) SRR-rond double	51
Figure II.10 : Configuration de la cellule unitaire CSRR dans sa boîte de calcul [43].	51
Figure II.11 : Schéma d'un système SISO.	55
Figure II.12: Schéma d'un système SIMO	56
Figure II.13: Schéma d'un système MISO	56
Figure II.14 : Schéma d'un système MIMO	57
Figure III.1 : Création d'un nouveau projet.	68
Figure III. 2 : Choix du type d'antenne.	68
Figure III.3 : Choix de la technique de simulation.	68
Figure III. 4: Choix des unités de différents paramètres.	69
Figure III.5: Définir la fréquence.	69
Figure III.6: Finalisation de création.	69
Figure III. 7 : Interface principale de logiciel CST.	70
Figure III.8: Géométrie de l'antenne rectangulaire alimentée par ligne micro-ruban...	71
Figure III. 9: Géométrie de l'antenne rectangulaire alimentée par ligne coaxial.	72
Figure III. 10: Antenne rectangulaire initiale alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).	73
Figure III. 11: Coefficient de réflexion de l'antenne initiale alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).	73
Figure III.12: Antenne rectangulaire initiale alimentée par la ligne micro-ruban (Roger).	74
Figure III. 13 : Coefficient de réflexion de l'antenne initiale alimentée par la ligne micro-ruban (Roger).	75
Figure III. 14: Antenne rectangulaire initiale alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).	75
Figure III. 15: Coefficient de réflexion de l'antenne initiale alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).	76
Figure III. 16: Antenne rectangulaire initiale alimentée par un câble coaxial (FR4).	77
Figure III. 17: Coefficient de réflexion de l'antenne initiale alimentée par un câble coaxial (FR4).	77
Figure III. 18: Antenne rectangulaire initiale alimentée par un câble coaxial (Roger).	78

Figure III. 19: Coefficient de réflexion de l'antenne initiale alimentée par un câble coaxial (Roger).....	78
Figure III. 20: Antenne rectangulaire initiale alimentée par un câble coaxial (Silicon). 79	
Figure III. 21: Coefficient de réflexion de l'antenne initiale alimentée par un câble coaxial (Silicon).....	80
Figure III. 22: Antenne rectangulaire adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).	81
Figure III. 23: Coefficient de réflexion de l'antenne adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).	82
Figure III. 24: Diagramme de rayonnement en 2D et 3D de l'antenne adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).....	82
Figure III. 25: Variation du VSWR de l'antenne adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).....	83
Figure III. 26: Antenne rectangulaire adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (Roger).	84
Figure III.27: Coefficient de réflexion de l'antenne adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (Roger).	84
Figure III. 28: Diagramme de rayonnement en 2D et 3D de l'antenne adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (Roger).	85
Figure III. 29: Variation du VSWR de l'antenne adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (Roger).	86
Figure III. 30: Antenne rectangulaire adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).	87
Figure III. 31: Coefficient de réflexion de l'antenne adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).	87
Figure III. 32: Diagramme de rayonnement en 2D et 3D de l'antenne adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).	88
Figure III. 33: Variation du VSWR de l'antenne adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).	89
Figure III.34: Antenne rectangulaire adaptée alimentée par un câble coaxial (FR4). ...	90
Figure III.35 : Coefficient de réflexion de l'antenne adaptée alimentée par un câble coaxial (FR4).	90
Figure III.36 : Diagramme de rayonnement en 2D et 3D de l'antenne adaptée alimentée par un câble coaxial (FR4).	91
Figure III.37: Variation du VSWR de l'antenne adaptée alimentée par un câble coaxial (FR4).....	91
Figure III. 38: Antenne rectangulaire adaptée alimentée par un câble coaxial (Roger). 92	
Figure III. 39 : Coefficient de réflexion de l'antenne adaptée alimentée par un câble coaxial (Roger).....	93
Figure III. 40: Diagramme de rayonnement en 2D et 3D de l'antenne adaptée alimentée par un câble coaxial (Roger).....	94

Figure III.41: Variation du VSWR de l'antenne adaptée alimentée par un câble coaxial (Roger).	95
Figure III. 42: Antenne rectangulaire adaptée alimentée par un câble coaxial (Silicon).	95
Figure III.43: Coefficient de réflexion de l'antenne adaptée alimentée par un câble coaxial (Silicon).	96
Figure III.44 : Diagramme de rayonnement en 2D et 3D de l'antenne adaptée alimentée par un câble coaxial (Silicon).	96
Figure III.45: Variation du VSWR de l'antenne adaptée alimentée par un câble coaxial (Silicon).	97
Figure III.46: Géométrie de l'antenne nouveau modèle alimentée par ligne micro-ruban.	98
Figure III.47: Géométrie de l'antenne nouveau modèle alimentée par un câble coaxial.	98
Figure III.48: Antenne nouveau modèle initiale alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).	99
Figure III. 49: Coefficient de réflexion de l'antenne nouveau modèle initiale alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).	99
Figure III.50: Antenne nouveau modèle initiale alimentée par la ligne micro-ruban (Roger).	100
Figure III.51: Coefficient de réflexion de l'antenne nouveau modèle initiale alimentée par la ligne micro-ruban (Roger).	101
Figure III.52 : Antenne nouveau modèle initiale alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).	102
Figure III.53: Coefficient de réflexion de l'antenne nouveau modèle initiale alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).	102
Figure III. 54: Antenne nouveau modèle initiale alimentée par un câble coaxial (FR4).	103
Figure III.55: Coefficient de réflexion de l'antenne nouveau modèle initiale alimentée par un câble coaxial (FR4).	103
Figure III.56: Antenne nouveau modèle initiale alimentée par un câble coaxial (Roger).	104
Figure III.57: Coefficient de réflexion de l'antenne nouveau modèle initiale alimentée par un câble coaxial (Roger).	104
Figure III.58: Antenne nouveau modèle initiale alimentée par un câble coaxial (Silicon).	105
Figure III.59: Coefficient de réflexion de l'antenne nouveau modèle initiale alimentée par un câble coaxial (Silicon).	106
Figure III.60: Antenne nouveau modèle adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).	107
Figure III.61: Coefficient de réflexion de l'antenne nouveau modèle adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).	107
Figure III.62: La Bande passante de l'antenne nouveau modèle adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).	108

Figure III.63: Diagramme de rayonnement en 2D et 3D de l'antenne adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).	108
Figure III.64: Variation du VSWR de l'antenne adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).	109
Figure III.65: Antenne nouveau modèle adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (Roger).	110
Figure III.66: Coefficient de réflexion de l'antenne nouveau modèle adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (Roger).	110
Figure III.67: La Bande passante de l'antenne nouveau modèle adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (Roger).	111
Figure III.68: Diagramme de rayonnement en 2D et 3D de l'antenne adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (Roger).	111
Figure III.69: Variation du VSWR de l'antenne adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (Roger).	112
Figure III.70: Antenne nouveau modèle adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).	113
Figure III.71: Coefficient de réflexion de l'antenne nouveau modèle adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).	113
Figure III.72: La Bande passante de l'antenne nouveau modèle adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).	114
Figure III.73: Diagramme de rayonnement en 2D et 3D de l'antenne adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).	114
Figure III.74: Variation du VSWR de l'antenne adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).	115
Figure III.75: Antenne nouveau modèle adaptée alimentée par un câble coaxial (FR4).	116
Figure III. 76: Coefficient de réflexion de l'antenne nouveau modèle adaptée alimentée par un câble coaxial (FR4).	116
Figure III.77: Diagramme de rayonnement en 2D et 3D de l'antenne adaptée alimentée par un câble coaxial (FR4).	117
Figure III.78: Variation du VSWR de l'antenne adaptée alimentée par un câble coaxial (FR4).	117
Figure III.79: Antenne nouveau modèle adaptée alimentée par un câble coaxial (Roger).	118
Figure III.80: Coefficient de réflexion de l'antenne nouveau modèle adaptée alimentée par un câble coaxial (Roger).	119
Figure III.81: Diagramme de rayonnement en 2D et 3D de l'antenne adaptée alimentée par un câble coaxial (Roger).	119
Figure III.82 : Variation du VSWR de l'antenne adaptée alimentée par un câble coaxial (Roger).	120
Figure III.83: Antenne nouveau modèle adaptée alimentée par un câble coaxial (Silicon).	121

Figure III.84: Coefficient de réflexion de l'antenne nouveau modèle adaptée alimentée par un câble coaxial (Silicon).....	121
Figure III.85: Diagramme de rayonnement en 2D et 3D de l'antenne adaptée alimentée par un câble coaxial (Silicon).....	122
Figure III.86: Variation du VSWR de l'antenne adaptée alimentée par un câble coaxial (Silicon).	122
Figure III.87: Antenne nouveau modèle adaptée avec DGS alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).....	123
Figure III.88: Coefficient de réflexion de l'antenne nouveau modèle adaptée avec DGS alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).....	124
Figure III.89: La Bande passante de l'antenne nouveau modèle adaptée avec DGS alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).....	124
Figure III.90: Diagramme de rayonnement en 2D et 3D de l'antenne adaptée avec DGS alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).....	125
Figure III.91: Variation du VSWR de l'antenne adaptée avec DGS alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).	125
Figure III.92: Antenne nouveau modèle adaptée avec DGS alimentée par la ligne micro-ruban (Roger).	126
Figure III.93: Coefficient de réflexion de l'antenne nouveau modèle adaptée avec DGS alimentée par la ligne micro-ruban (Roger).....	126
Figure III.94: La Bande passante de l'antenne nouveau modèle adaptée avec DGS alimentée par la ligne micro-ruban (Roger).....	127
Figure III.95: Diagramme de rayonnement en 2D et 3D de l'antenne adaptée avec DGS alimentée par la ligne micro-ruban (Roger).....	127
Figure III.96: Variation du VSWR de l'antenne adaptée avec DGS alimentée par la ligne micro-ruban (Roger).	128
Figure III.97 : Antenne nouveau modèle adaptée avec DGS alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).	128
Figure III.98 : Coefficient de réflexion de l'antenne nouveau modèle adaptée avec DGS alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).....	129
Figure III.99: La Bande passante de l'antenne nouveau modèle adaptée avec DGS alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).....	129
Figure III.100: Diagramme de rayonnement en 2D et 3D de l'antenne adaptée avec DGS alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).....	130
Figure III. 101:Variation du VSWR de l'antenne adaptée avec DGS alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).	130
Figure III.102: Géométrie d'une cellule Split Ring Resonator (SRR).	131
Figure III.103: Paramètres S (FR4).	131
Figure III.104: Paramètres S (Silicon).....	132
Figure III.105: Paramètres S (Roger).....	132
Figure III.106: Géométrie d'une cellule complémentaire Split Ring Resonator (CSRR).	132

Figure III.107: La cellule CSRR en FR4.....	133
Figure III.108: Paramètres S (FR4).	133
Figure III.109: La permittivité et la perméabilité (FR4).	134
Figure III. 110: : La cellule CSRR en Silicon.	134
Figure III. 111 : Paramètres S (Silicon).	135
Figure III. 112 : La permittivité et la perméabilité (Silicon).	135
Figure III. 113 : La cellule CSRR en Roger.....	136
Figure III. 114 : Paramètres S (Roger).	136
Figure III. 115 : La permittivité et la perméabilité (Roger).	137
Figure III. 116 : L'insertion des cellules CSRR sur le plan de masse (FR4).....	137
Figure III.117 : Coefficient de réflexion de l'antenne après la gravure des cellules (FR4).	138
Figure III.118 : l'insertion des cellules CSRR sur le plan de masse et le patch (Silicon).	138
Figure III. 119 : Coefficient de réflexion de l'antenne après la gravure des cellules (Silicon).	139
Figure III. 120 : l'insertion des cellules CSRR sur le plan de masse (Roger).....	139
Figure III. 121 : Coefficient de réflexion de l'antenne après la gravure des cellules (Roger).	140
Figure III. 122 : L'antenne adaptée après l'insertion des cellules CSRR sur le plan de masse (FR4).	140
Figure III.123 : Coefficient de réflexion de l'antenne adaptée après la gravure des cellules (FR4).	141
Figure III.124 : Diagramme de rayonnement en 2D et 3D de l'antenne adaptée après la gravure des cellules (FR4).	141
Figure III.125 : Variation du VSWR de l'antenne adaptée après la gravure des cellules (FR4).....	141
Figure III.126 : L'antenne adaptée après l'insertion des cellules CSRR sur le plan de masse et le patch (Silicon).	142
Figure III.127 : Coefficient de réflexion de l'antenne adaptée après la gravure des cellules (Silicon).	142
Figure III.128 : Diagramme de rayonnement en 2D et 3D de l'antenne adaptée après la gravure des cellules (Silicon).	143
Figure III.129 : Variation du VSWR de l'antenne adaptée après la gravure des cellules (Silicon).	143
Figure III.130 : L'antenne adaptée après l'insertion des cellules CSRR sur le plan de masse (Roger).	144
Figure III.131: Coefficient de réflexion de l'antenne adaptée après la gravure des cellules (Roger).	144
Figure III.132 : Diagramme de rayonnement en 2D et 3D de l'antenne adaptée après la gravure des cellules (Roger).	145

Figure III.133 : Variation du VSWR de l'antenne adaptée après la gravure des cellules (Roger).	145
Figure III.134 : La Structure d'un réseau MIMO a deux éléments alimentés par la ligne micro-ruban (FR4).	147
Figure III.135 : Paramètres S de réseau MIMO.	148
Figure III.136 : Diagramme de rayonnement en 2D et 3D de réseau MIMO alimenté par la ligne micro-ruban (FR4).	148
Figure III.137 : Variation du VSWR de réseau MIMO alimenté par la ligne micro-ruban (FR4).	149
Figure III.138 : Le gain de diversité.	150
Figure III.139: Le coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC).	150

Sigles et abréviations

2D : Bidimensionnel (Deux dimensions)

2G : Deuxième génération de téléphonie mobile

3D : Tridimensionnel (Trois dimensions)

3G : Troisième génération de téléphonie mobile

4G : Quatrième génération de téléphonie mobile

5G : Cinquième génération de téléphonie mobile

AF : Fonction applicative

AMF : Fonction de gestion de l'accès et de la mobilité

AUSF : Fonction serveur d'authentification

BBU : Unité de bande de base

C : Capacité du canal

CHF : Fonction de taxation/facturation

CPRI : Common Public Radio Interface (Interface radio publique commune)

CSRR : Complementary Split Ring Resonator (Résonateur annulaire fendu complémentaire)

CST : Computer Simulation Technology

CU : Unité centralisée

DGS : Defected Ground Structure (Structure de masse défectueuse)

DN : Data Network (Réseau de données)

DNG : Matériau doublement négatif

DPS : Matériau doublement positif

DU : Unité distribuée

ECC : Coefficient de corrélation d'enveloppe

EF : Équipement frontal

ENG : Matériau à permittivité négative

ETSI : Institut européen des normes de télécommunications

FR-4 : Flame Retardant 4 (Matériau ignifuge de type 4)

FTP : File Transfer Protocol (Protocole de transfert de fichiers)

FTTA : Fiber To The Antenna (Fibre jusqu'à l'antenne)

Full-Duplex : Communication bidirectionnelle simultanée

GPS : Global Positioning System (Système de positionnement mondial)

GSM : Global System for Mobile Communications (Système mondial de communications mobiles)

HTTP : HyperText Transfer Protocol (Protocole de transfert hypertexte)

IA : Intelligence artificielle

IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineers (Institut des ingénieurs électriciens et électroniciens)

IoT : Internet des objets

IP : Internet Protocol (Protocole Internet)

ITU : Union internationale des télécommunications

LoRa : Long Range (Communication longue portée)

LPWAN : Low Power Wide Area Network (Réseau étendu à faible consommation d'énergie)

LTE : Long Term Evolution (Évolution à long terme)

LTE-M : LTE for Machines (LTE pour les communications machine à machine)

MIMO : Multiple Input Multiple Output

MISO : Multiple Input Single Output

MNG : Matériau à perméabilité négative

MU-MIMO : Multi-User Multiple Input Multiple Output

NB-IoT : NarrowBand Internet of Things (Internet des objets à bande étroite)

NEF : Fonction d'exposition du réseau

NG-RAN : Next Generation Radio Access Network (Réseau d'accès radio de nouvelle génération)

NRF : Fonction de référentiel réseau

NSSF : Fonction de sélection des tranches réseau

PCF : Fonction de contrôle des politiques

RF : Radiofréquence

RFID : Radio Frequency Identification (Identification par radiofréquence)

RRH : Remote Radio Head (Tête radio distante)

RU : Unité radio

SBA : Service-Based Architecture (Architecture basée sur les services)

SIMO : Single Input Multiple Output

SISO : Single Input Single Output

SMF : Fonction de gestion de session

SMSF : Fonction de gestion des SMS

SFP : Small Form-Factor Pluggable (Module enfichable à petit format)

SNR : Rapport signal sur bruit

S-parameters : Scattering Parameters (Paramètres de diffusion)

SRR : Split Ring Resonator (Résonateur annulaire fendu)

TCP/IP : Transmission Control Protocol / Internet Protocol (Protocole de contrôle de transmission / Protocole Internet)

UDM : Gestion unifiée des données

UDR : Référentiel unifié des données

UE : Équipement utilisateur

UPF : User Plane Function (Fonction du plan utilisateur)

VSWR / ROS : Rapport d'ondes stationnaires

Wi-Fi : Wireless Fidelity (Réseau local sans fil)

INTRODUCTION GENERALE

Avec le développement rapide des technologies de communication sans fil, les besoins en connectivité, en débit de transmission et en qualité de service ne cessent d'augmenter. La cinquième génération des réseaux mobiles (5G) ainsi que l'Internet des Objets (IoT) constituent aujourd'hui des solutions essentielles pour répondre à ces exigences. Ces technologies nécessitent l'utilisation d'antennes performantes, compactes et faciles à intégrer dans les équipements modernes.

Les antennes micro-ruban, en particulier les antennes patch, sont largement utilisées grâce à leur faible coût, leur simplicité de fabrication et leurs dimensions réduites. Cependant, la réduction de leur taille tout en conservant de bonnes performances reste un défi important. Pour surmonter cette limitation, plusieurs techniques de miniaturisation ont été développées, notamment l'utilisation des métamatériaux et des structures DGS.

L'objectif de ce travail est de concevoir, adapter et miniaturiser une antenne patch rectangulaire destinée aux applications 5G. Une étude comparative de différents substrats est réalisée, suivie de l'intégration de cellules métamatériaux (CSRR) afin de réduire la taille des structures et d'améliorer les performances de l'antenne. Enfin, un réseau MIMO à deux éléments est proposé pour augmenter le gain, la directivité et les performances globales du système.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres :

Le premier chapitre présente les concepts généraux de la 5G, de l'IoT et leurs fonctionnements. Par la suite, nous allons donner un historique sur les antennes imprimées, les différentes antennes micro-ruban, leurs fonctionnements, leurs caractéristiques et leurs applications. En fin, nous allons présenter les différents types d'antennes, les structures des antennes patch (imprimées) et les différentes techniques d'alimentations des antennes et les techniques d'adaptation des différentes antennes, leurs défis, leurs avantages et inconvénients.

Le deuxième chapitre est consacré aux techniques de miniaturisation, aux métamatériaux et leurs différents types, aussi aux systèmes MIMO traditionnels, leurs fonctionnements et leurs capacités dans la technologie MIMO, leurs avantages et inconvénients.

Le troisième chapitre nous avons fait l'étude d'une antenne patch rectangulaire simple après lui avoir donné un nouveau design sous deux types d'alimentations, le premier avec une ligne micro-ruban et le second avec le câble coaxial pour différents types de substrats : le FR-4, le Roger RT5880 et le Silicon à haute permittivité, par la suite, nous allons faire la conception, la simulation et l'analyse des résultats obtenus sous l'environnement CST Studio Suite. Enfin, nous effectuerons une étude comparative des résultats de simulation obtenus.

Chapitre I :Généralités sur les antennes

I.1 INTRODUCTION

Les réseaux de télécommunications ont connu une évolution remarquable au fil des années, passant successivement des réseaux 2G, 3G et 4G/LTE, jusqu'à la cinquième génération 5G, qui représente aujourd'hui une véritable révolution dans le domaine des communications sans fil. Grâce à ses performances exceptionnelles en termes de débit, de latence et de capacité, la 5G ouvre de nouvelles perspectives pour de nombreuses applications.

Parmi ces applications, l'Internet des Objets (IoT) occupe une place centrale. Il désigne l'ensemble des objets physiques connectés capables d'échanger des données via un réseau, et trouve des applications dans des domaines aussi variés que la santé, l'industrie, l'agriculture intelligente et les villes connectées.

Le bon fonctionnement de ces systèmes de communication repose en grande partie sur un composant physique fondamental : l'antenne. C'est elle qui assure la transmission et la réception des ondes électromagnétiques entre les différents dispositifs. Parmi les types d'antennes les plus utilisés dans les systèmes modernes, on trouve les antennes patch micro-strip, qui se distinguent par leur structure planaire, leur légèreté et leur facilité d'intégration.

C'est dans ce cadre que s'inscrit ce chapitre, qui a pour objectif d'étudier les principes fondamentaux de la 5G, de l'IoT et des antennes, en mettant en évidence les liens qui unissent ces trois domaines au service de la communication sans fil de nouvelle génération.

I.2 LA 5 EME GENERATION

I.2.1 Qu'est-ce que la 5 -ème génération ?

La «5G » [1] représente une nouvelle évolution de la technologie de télécommunications sans fil, qui succède aux générations précédentes de téléphonie mobile. Elle s'engage à transformer radicalement la manière dont le monde communique. Cette cinquième itération (5G) a pour objectif d'accroître la rapidité et la réactivité des réseaux sans fil. D'après certaines prévisions, la transmission de données via des connexions sans fil à haut débit pourrait, grâce à cette technologie, atteindre une vitesse de 20 Gbit/s qui surpasserait celle des réseaux câblés, tout en présentant une latence égale ou inférieure à 1 ms pour les applications nécessitant un retour en temps réel. La 5G, grâce à son avantage en termes de bande passante et sa technologie d'antenne sophistiquée, pave également le chemin pour une expansion massive des données véhiculées par les systèmes sans fil.

I.2.2 Objectif et principe de la 5G

La 5G offre des vitesses de connexion et de téléchargement supérieures aux générations précédentes, tout en intégrant une multitude de nouvelles applications, notamment dans le domaine de l'internet des objets. La 5G a pour objectif de :

- Garantir une connexion internet rapide via un smartphone ou une tablette.
- Obtenir les débits les plus performants (1 Gb/s).
- Disposer de forfaits de données plus conséquents : le volume de données devra être 1000 fois plus élevé.
- Acquérir un délai de transmission de moins de 10 ms.
- Disposer d'une latence plus courte qui donne l'illusion que le réseau est extrêmement réactif.
- Moins d'antennes : le nombre de dispositifs pouvant être reliés par antenne devrait être cent fois plus important, cependant, la quantité d'antennes est principalement déterminée par les fréquences employées.

Comme principe, la 5G [2] conduira à une meilleure utilisation du spectre électromagnétique avec l'exploitation de plusieurs bandes de fréquences dont celles des ondes millimétriques, entre 24 et 300 GHz, mais aussi les bandes comprises entre 3 et 30 GHz qui ne sont pas exploitées dans la 4G. Elles apportent un très haut débit sur une courte portée, associé à la densification du réseau et à des antennes directives MU-MIMO et Massive-MIMO.

I.2.3 L'architecture de la 5ème génération

L'architecture de la 5G repose sur un modèle *cloud natifs*, intégrant le principe de *network slicing* ainsi qu'une architecture orientée services (*Service-Based Architecture – SBA*). Cette approche permet d'optimiser la gestion de l'authentification, de la sécurité ainsi que des données. Elle s'organise autour de trois composantes majeures :

- **User Equipment (UE)** : il correspond à l'équipement terminal de l'utilisateur, qui communique avec le réseau via des liaisons radio, tout en étant compatible avec les nouvelles bandes de fréquences introduites par la 5G.
- **Next-Génération Radio Access Network (NG-RAN)** : il s'agit du réseau d'accès de la 5G, chargé d'assurer la communication entre les terminaux mobiles et le réseau à l'aide de stations de base et d'antennes.

La 5G apporte une nouvelle structuration de ce réseau, basée sur une séparation en trois unités principales : l'Unité Centralisée (CU), l'Unité Distribuée (DU) et les unités radio (RU).

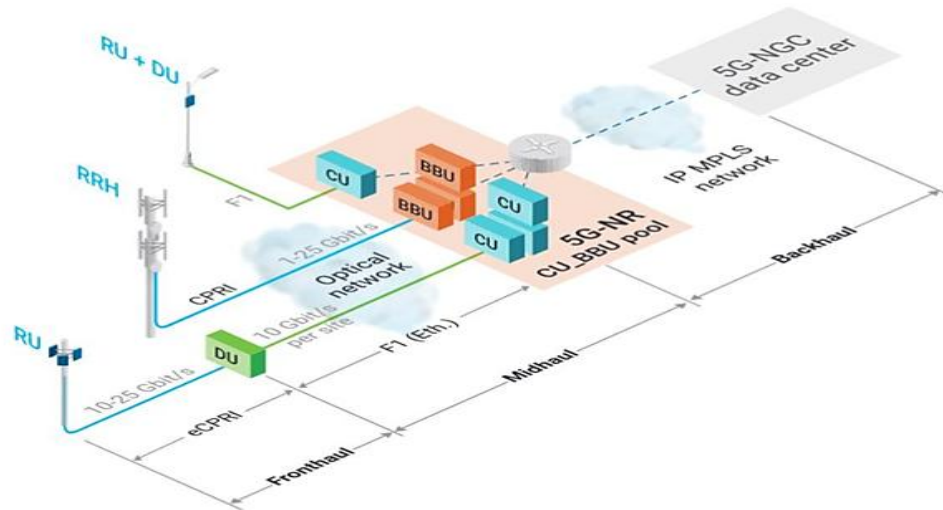


Figure I.1 : Exemple d'architecture fronthaul 5G [3].

Fronthaul : dans les réseaux mobiles 4G et 5G, le fronthaul est la liaison qui relie l'unité radio (RU : Radio Unit) à l'unité de traitement (DU : Distributed Unit ou anciennement BBU).

Pour assurer la connexion entre l'unité d'accès et l'équipement frontal. Ce protocole repose sur la technologie Ethernet comme couche physique et fonctionne généralement sur une architecture FTTA. Il permet d'atteindre des débits élevés, notamment 10 Gbit/s et 25 Gbit/s, tout en optimisant l'utilisation de la bande passante du fronthaul.

Par ailleurs, l'échange d'informations entre l'Unité Centralisée (CU) et l'Unité Distribuée (DU) s'effectue via une interface spécifique appelée F1, également basée sur Ethernet. Étant donné que les fonctions RU, DU et même CU peuvent être intégrées au sein d'un même équipement, l'interconnexion des sites cellulaires avec le reste du réseau peut s'appuyer sur différentes interfaces, selon l'architecture choisie par l'opérateur. [3]

Cette évolution entraîne des modifications significatives par rapport à la génération précédente 4G. En effet, dans les réseaux 4G, les têtes radio déportées (RRH) sont généralement installées au sommet des pylônes ou sur les toits, fonctionnant principalement dans des bandes de fréquences inférieures à 3 GHz, ce qui permet une couverture pouvant atteindre environ 10 km par site. [3]

Un secteur typique en 4G est constitué d'un RRH relié, via un module SFP (Small Form-Factor Plug gable), à une liaison CPRI utilisant une fibre optique vers la station de base (BBU). Ensuite, un câble coaxial court assure la connexion entre les sorties RF du RRH et l'antenne.

En revanche, dans les réseaux 5G, l'architecture évolue vers une connexion directe entre les unités distribuées (DU) et les unités radio (RU), souvent intégrées avec les antennes. Cette

liaison s'appuie sur des versions améliorées des protocoles CPRI, permettant de meilleures performances et une plus grande efficacité du réseau.

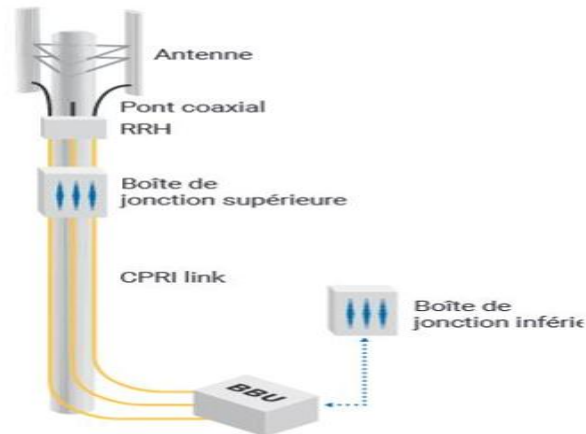


Figure I.2 : RRH 4G typique [3].

- **RRH** : partie radio près de l'antenne.
- **BBU** : traitement numérique des données.
- **RRH ↔ BBU** : liaison fronthaul.

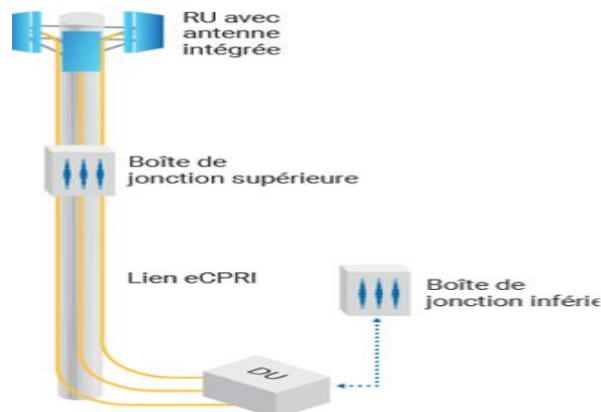


Figure I.3: EF 5G typique [3].

- **EF (Équipement Frontal)** : élément du réseau d'accès 5G situé à proximité de l'antenne, chargé des fonctions radio et relié à l'unité distribuée (DU) via le fronthaul.
- **Core Network (5GC)** : Le cœur du réseau 5G repose sur une architecture orientée services (Service-Based Architecture – SBA), intégrée dans un environnement cloud. Cette conception permet de supporter des fonctionnalités avancées. Il est structuré en deux plans principaux :
 1. Le plan utilisateur (*User Plane*), chargé de la transmission des données.
 2. Le plan de contrôle (*Control Plane*), responsable de la gestion de la signalisation et des différentes fonctions de contrôle.

La figure suivante représente le cœur de l'architecture de 5G avec ces fonctions :

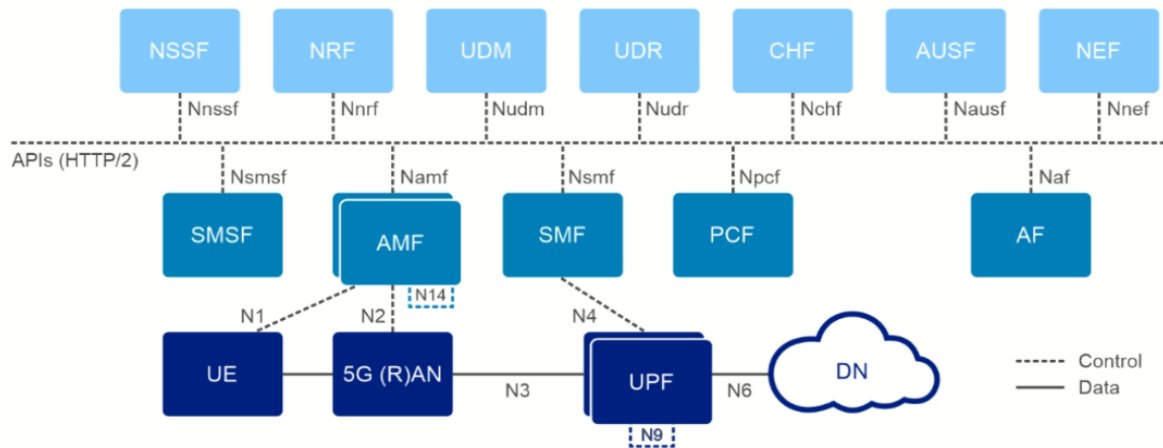


Figure I.4: L'Architecture fonctionnelle du cœur de 5G [4].

Le tableau I.1 présente les principales fonctions de l'architecture du réseau 5G. L'UE communique avec le cœur de réseau via le 5G RAN. Les fonctions AMF, SMF et UPF assurent respectivement la gestion de la mobilité, des sessions et du transfert des données. Les fonctions AUSF, UDM et UDR garantissent l'authentification et la gestion des informations des abonnés. La PCF applique les politiques de qualité de service, tandis que le NRF, le NSSF et le NEF facilitent la découverte des services, la sélection des tranches réseau et l'exposition des capacités du réseau. Enfin, le CHF gère la facturation et le SMSF les services de messagerie. L'ensemble de ces fonctions permet d'assurer un réseau 5G performant, flexible et sécurisé.

Le tableau I.1 résume les principales fonctions de l'architecture 5G. Il présente les différentes entités du réseau ainsi que leurs rôles dans la gestion des communications, de la mobilité, de la sécurité, des données utilisateurs et des services réseau.

Tableau I.1: Description des fonctions du réseau 5G.

	Nom	Description
UE	User Equipment.	L'équipement utilisateur, comme un smartphone.
5G RAN	5G Radio Access Network.	Réseau d'accès radio qui connecte l'UE au réseau central.
UPF	User Plane Fonction.	Assure le transfert des données utilisateur vers les réseaux externes.
DN	Data Network.	Gère l'interaction avec les réseaux de données externes.
AMF	Access and Mobility Management Fonction.	Gère l'accès et la mobilité des utilisateurs.
SMF	Session Management Function.	Gère les sessions et attribue les adresses IP aux utilisateurs.
PCF	Policy Control Fonction.	Applique les règles de gestion du trafic et de la qualité de service.
SMSF	Short Message Service Function.	Assure la gestion des SMS dans le réseau 5G.
AUSF	Authentication Function Server.	Assure l'authentification des abonnés
UDM	Unified Data Management.	Gère les informations des abonnés.
UDR	Unified Data Repository	Stocke les données des abonnés.
CHF	Charging Function	Gère la facturation et le suivi de la consommation
NRF	Network Repository Function	Permet la découverte et l'enregistrement des services du réseau.
NSSF	Network Slice Selection Function	Sélectionne la tranche réseau la plus appropriée pour un utilisateur ou un service.
NEF	Network Exposure Function	Expose les capacités du réseau aux applications externes.
AF	Application Function	Interagit avec des applications spécifiques qui nécessitent des services réseau.

I.2.4 Technologies clés de la 5G

La 5G s'appuie sur les technologies déjà en place avec la 4G LTE (comme les bandes de fréquence de la 4G), mais elle présente plusieurs différences cruciales. Elle utilise aussi de nouvelles gammes de fréquences telles que les ondes millimétriques, qui permettent d'accroître considérablement le débit au prix de la portée. En outre, la 5G introduit de nouvelles

technologies, dont l'emploi du MIMO Massif. Nous allons maintenant décrire de manière succincte les principes de ces technologies récentes.[5]



Figure I.5: Techniques utilisées dans la technologie 5G[5].

- **Les ondes millimétriques :** Les ondes millimétriques [6] correspondent à des ondes radio couvrant la gamme de fréquences comprise entre 30 et 300 GHz (Figure I.5). Actuellement, la majorité des dispositifs électroniques fonctionnent sur des bandes de fréquences inférieures à 6 GHz. Cependant, ces bandes deviennent de plus en plus saturées en raison de la croissance rapide du nombre d'objets connectés, ce qui entraîne une dégradation de la qualité de service.

Afin de répondre aux besoins croissants en termes de transmission de données et de contrôle à distance, il est nécessaire d'exploiter des fréquences plus élevées ainsi qu'un spectre plus large. En effet, les hautes fréquences permettent d'augmenter la quantité d'informations transmises par seconde, tandis que l'élargissement du spectre offre un plus grand nombre de canaux de communication. Ces deux facteurs contribuent à réduire la congestion du réseau.

Néanmoins, l'utilisation des ondes millimétriques présente certaines limites, notamment une faible capacité de pénétration des obstacles. Leur portée est également plus réduite, et elles peuvent être atténuées par des éléments environnementaux tels que les arbres ou les précipitations. Pour pallier ces contraintes, il est nécessaire de recourir à des solutions complémentaires, comme le déploiement de réseaux de petites antennes (Small cells). [6]

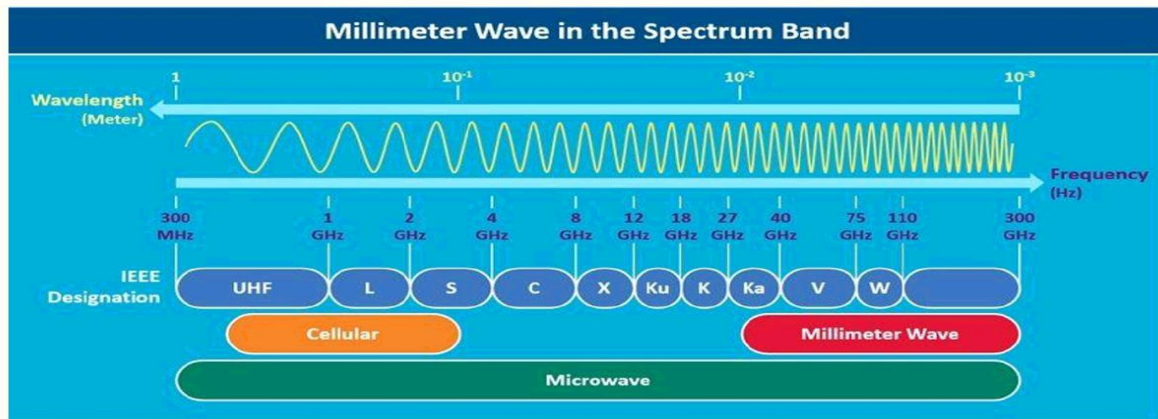


Figure I.6: Spectres des fréquences (ondes millimétriques)[5].

- **Les microcellules** : Aujourd'hui, les réseaux hétérogènes sont étroitement liés au déploiement des small cells [7]. Ces cellules se caractérisent par une zone de couverture limitée, ce qui leur permet d'offrir des débits élevés aux utilisateurs. Cette performance s'explique notamment par le fait qu'un nombre réduit de terminaux partage les ressources en temps et en fréquence.

Les small cells viennent ainsi en complément des macro-cellules, qui assurent une couverture étendue mais avec des débits généralement plus faibles. Dans ce contexte, on parle de déchargement de trafic (offloading) lorsque les données sont redirigées vers les small cells au lieu des macro-cellules.

La densification du réseau à travers ces cellules de petite taille constitue un élément clé des systèmes 5G. Elle contribue non seulement à améliorer l'efficacité énergétique, en réduisant la taille des zones de couverture, mais aussi à répondre à la demande croissante en termes de capacité et de débit [7].

Cependant, cette densification nécessite une infrastructure de *backhaul* capable de supporter des volumes de données importants. Dans ce cadre, l'utilisation du **Massive MIMO** comme solution de *backhaul sans fil* (Wireless Backhaul) apparaît comme une option prometteuse. À terme, la station de base de la macro-cellule pourrait se concentrer principalement sur la gestion de la signalisation et du backhaul, tandis que la transmission des données serait assurée par les small cells [7].

- **Beamforming** : Le beamforming [8] est une technique qui permet d'ajuster dynamiquement le diagramme de rayonnement d'un réseau d'antennes selon des besoins spécifiques. Elle consiste à orienter et concentrer les ondes radio vers des utilisateurs ou des dispositifs ciblés, plutôt que de les diffuser de manière omnidirectionnelle.

Cette approche permet de réduire les interférences, d'améliorer la qualité et l'efficacité du signal, tout en optimisant l'utilisation de l'énergie et de la bande passante. De plus, les caractéristiques de chaque faisceau peuvent être adaptées en fonction des exigences des différentes applications.

- **Full-Duplex** : Le Full-Duplex [9] désigne un mode de communication permettant l'émission et la réception des données de manière simultanée sur une même liaison. Contrairement aux systèmes traditionnels, cette technologie offre une utilisation plus efficace des ressources du réseau.

Ce mode a été expérimenté lors des premières phases de test de la 5G. Les résultats ont démontré la capacité des stations de base à transmettre et recevoir des données en même temps, grâce à des techniques avancées d'annulation des auto-interférences, notamment l'annulation analogique passive. Ces essais ont mis en évidence une réduction des interférences pouvant dépasser 113 dB dans des conditions réelles, ce qui se traduit par une amélioration significative des performances, avec un gain pouvant atteindre environ 90 % du débit.

Également appelée duplex intégral, cette technologie a le potentiel de doubler la capacité des réseaux sans fil au niveau de la couche physique. Elle peut être comparée à une situation où deux personnes communiquent simultanément tout en se comprenant parfaitement, ce qui permet d'optimiser le temps d'échange et d'augmenter l'efficacité globale de la communication.

- **Massive MIMO** : La technologie MIMO (Multiple Input Multiple Output) est utilisée pour améliorer la capacité des systèmes radio ainsi que la fiabilité des communications sans fil. Elle repose sur l'exploitation de multiples antennes en émission et en réception au niveau des équipements radio.

L'une des techniques les plus utilisées dans ce contexte est la diversité spatiale. Celle-ci consiste à transmettre les signaux à travers plusieurs trajets de propagation vers différentes antennes. De ce fait, si l'un des chemins est affecté ou dégradé, les autres peuvent assurer la continuité de la transmission. Cette approche permet ainsi d'augmenter la robustesse du système et d'améliorer la qualité de la liaison radio. [3]

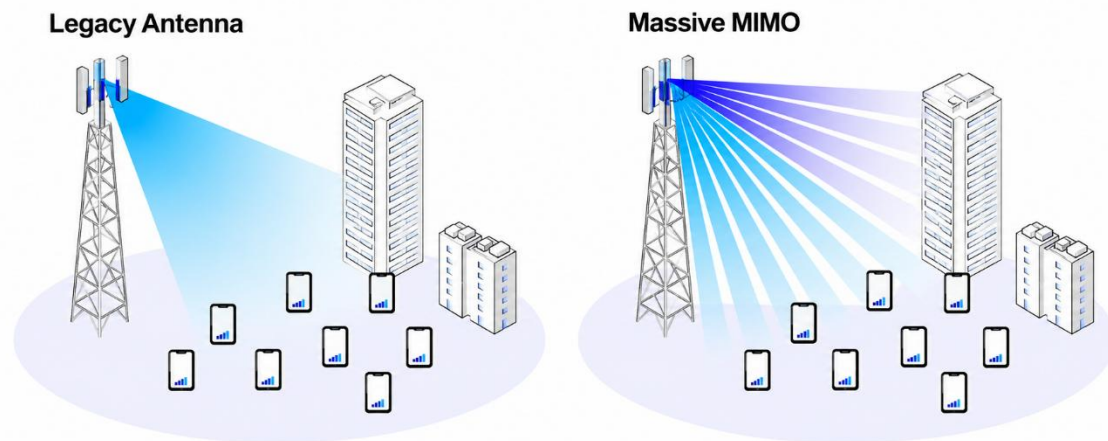


Figure I.7 : Massive MIMO [10].

I.2.5 Fréquences utilisées pour la 5G

La 5G exploite diverses fréquences issues de différentes bandes de fréquence, qu'elles soient basses, moyennes ou élevées :

- **Bande Basse** : La fréquence de 1 GHz est couramment utilisée pour la 4G et peut être utilisée pour la 5G, puisqu'elle offre une excellente couverture géographique et une pénétration efficace à l'intérieur des structures. La bande de 1,4 MHz est donc citée pour des applications industrielles ou particulières.
- **Bande moyenne** : La fréquence de 3,5 GHz est le cœur de la 5G. C'est la bande de fréquences privilégiée pour le nouveau réseau mobile et surtout, celle qui permet une augmentation significative du débit. [11]
- **Bande Haute** : la fréquence de 26 GHz, aussi connue sous le nom d'ondes millimétriques, se caractérise par des longueurs d'onde à l'échelle du millimètre. Ces dernières possèdent la capacité de proposer une bande passante plus étendue, non seulement offrant un spectre très large, mais également des débits similaires à ceux de la fibre optique, même si sur des distances restreintes. Toutefois, elles font face à un défi majeur : leur incapacité à « traverser » ce qui se dresse sur leur chemin.[12]

Les opérateurs de téléphonie mobile s'efforcent de trouver un équilibre entre les fréquences basses pour garantir une couverture étendue à toutes les populations et les fréquences hautes pour garantir une capacité optimale dans les zones où la demande de trafic est la plus intense.

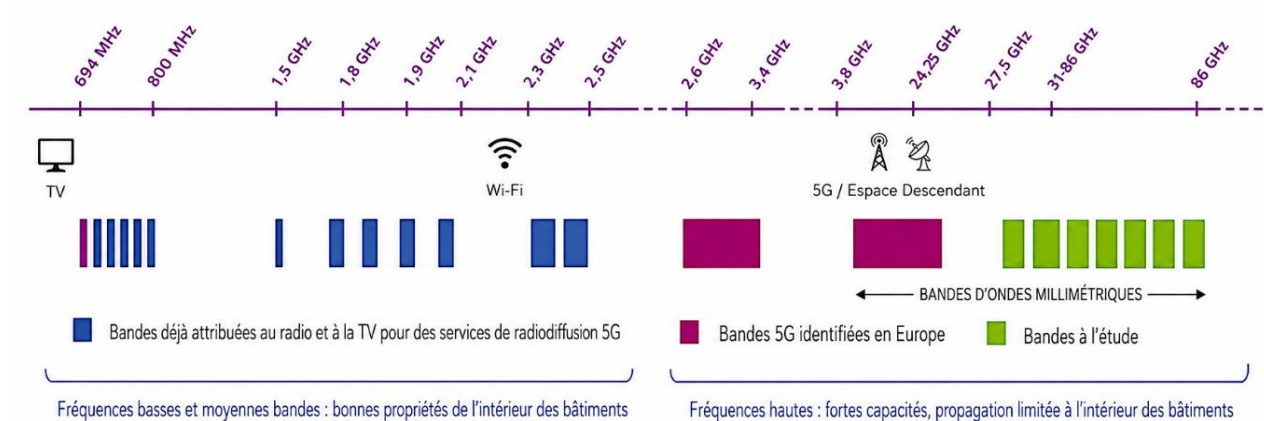


Figure I.8: Fréquences utilisées pour la 5G [13].

I.3 INTERNET DES OBJETS (IOT)

1.3.1 Qu'est-ce que l'Internet des objets (IoT) ?

L'IoT est un réseau d'appareils informatiques reliés entre eux, capables de recueillir et de communiquer des informations par le biais d'un réseau sans fil, sans nécessiter d'interaction humaine.

Ce n'est pas uniquement une question de téléphones portables et d'ordinateurs portables : presque tous les appareils avec un bouton marche/arrêt peuvent être reliés à Internet, les intégrant ainsi dans l'Internet des objets. Par exemple, un « objet » dans le contexte de l'IoT pourrait être une personne équipée d'un stimulateur cardiaque, une caméra transmettant en direct des images de faune côtière ou encore un véhicule doté de capteurs intégrés pour avertir le conducteur des risques potentiels. En substance, tout élément pouvant se voir attribuer une adresse IP (Protocole Internet) et être capable de transmettre des informations sur un réseau a la possibilité d'intégrer l'Internet des objets. [14,15,16]



Figure I.9: Internet des objets [17].

I.3.2 Domaines d'application de l'Internet des objets

L'exploitation de l'internet des objets conduira à la création de diverses applications dans divers domaines. L'IOT a un impact sur de nombreux domaines d'application, Nous mentionnons les domaines suivants : le domaine du transport, le domaine de l'industrie, le domaine de la santé, le domaine de l'agriculture et le domaine de la domotique, smart cities.

I.3.2.1 Domaine du transport

L'IoT permet le développement de voitures connectées, intelligentes et autonomes. L'usage de ces véhicules contribue à sauver des vies et peut avoir un effet bénéfique sur l'environnement, en aidant à réduire la circulation routière.

I.3.2.2 Domaine de l'industrie

Grâce à la technologie IoT, il sera possible de suivre intégralement les produits, depuis la ligne de production jusqu'à la chaîne d'approvisionnement et de distribution en surveillant les conditions d'approvisionnement. Cette traçabilité intégrale offre aux usines la possibilité d'accroître l'efficacité de leurs opérations, d'optimiser leur production et de renforcer la sécurité de leurs employés.[18]

I.3.2.3 Domaine de la santé

Dans le secteur de la santé, l'IoT favorisera l'établissement de réseaux personnels pour la surveillance et le suivi des signes cliniques, en particulier pour les personnes âgées. Les dispositifs connectés facilitent le contrôle de la pression artérielle, du rythme cardiaque, de la qualité respiratoire ou encore du pourcentage de masse grasseuse. Cela facilitera donc la

surveillance à distance des patients chez eux et proposera des solutions pour l'autonomie des personnes ayant une mobilité limitée. [18]

I.3.2.4 Domaine de l'agriculture

L'utilisation d'objets connectés devient courante dans l'agriculture. Plusieurs améliorations peuvent découler de l'exploitation des équipements agricoles, de la gestion efficace de l'irrigation ou de l'utilisation optimale des intrants, tout comme le suivi du développement des végétaux ou la prévention des aléas climatiques. Cela permettra de moderniser en profondeur les pratiques de cette activité ancienne, grâce à l'analyse des données collectées et à une gestion de plus en plus précise des exploitations.[19]

I.3.2.5 Domaine de la domotique

La domotique, également appelée maison intelligente (connectée), fait référence à l'application de l'Internet des Objets dans un domicile. La domotique rend les activités quotidiennes plus simples et pratiques.

I.3.2.6 Smart cities (Les villes intelligentes)

Efficace et innovent. L'idée des cités intelligentes propose aux résidents une qualité de vie supérieure tout en limitant la consommation de ressources, grâce à une utilisation judicieuse des infrastructures (énergie, transport, communication) à divers échelons hiérarchiques (ville, quartier, bâtiment).

I.3.3 Comment fonctionne l'IoT ?

L'environnement IOT [20] se compose de capteurs/dispositifs qui communiquent avec le service cloud via une forme de communication. Une fois que les données atteignent le cloud, le logiciel les traite et décide si une action doit être effectuée, comme le réglage des capteurs/dispositifs, sans nécessiter d'intervention de l'utilisateur ni envoyer d'alerte.

Il existe quatre éléments distincts de tout système IOT complet. Capteurs ou dispositifs, connectivité, traitement de données et interface utilisateur :

- **Capteurs / Appareils**

Il collecte les données de son environnement. L'appareil peut avoir plusieurs capteurs - par exemple, le smartphone dispose d'un GPS, d'un appareil photo, d'un accéléromètre, etc. Essentiellement, le ou les capteurs collectent des données de l'environnement dans un but précis.

- **Contact**

Une fois que l'appareil a collecté les données, elles doivent être envoyées au service cloud. Il le fait de différentes manières - y compris le Wi-Fi, le Bluetooth, le satellite, les réseaux étendus à faible consommation d'énergie (LPWAN) ou la connexion directe

à Internet via Ethernet. L'option de connectivité sélectionnée dépendra de l'application IoT.

- **Traitement de l'information**

Une fois que les données atteignent le cloud, le programme les traite et peut décider d'effectuer une action. Cela peut inclure l'envoi d'une alerte ou le réglage automatique des capteurs ou de l'appareil sans intervention de l'utilisateur. Mais parfois, une entrée de l'utilisateur peut être requise, là où l'interface utilisateur entre en jeu.

- **Interface utilisateur**

Si une entrée est requise de la part de l'utilisateur ou si l'utilisateur souhaite analyser le système, l'interface utilisateur le permet. Toutes les actions effectuées par l'utilisateur en sens inverse sont envoyées via le système. De l'interface utilisateur au service cloud et retour aux capteurs/appareils pour effectuer le changement souhaité. Les protocoles de communication exacts, les réseaux et la communication utilisés par les appareils Web varient en fonction des applications IoT spécifiques. L'Internet des objets utilise de plus en plus l'intelligence artificielle (IA) et l'apprentissage automatique pour faciliter et accélérer la collecte de données. [14]

I.3.4 Architecture de l'IOT

Dans ce cadre les organisations internationales et des grandes entreprises technologiques, telles que l'Union Internationale des Télécommunications (ITU), l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Cisco, Google, Amazon, et l'European Télécommunications Standards Institute (ETSI), ont proposé différents architectures pour l'IoT basés sur les exigences des applications, la topologie des réseaux, les protocoles, les modèles économiques et les modèles de services, car cette technologie englobe une grande variété de concepts [21]. Mais on peut distinguer trois couches fonctionnelles majeures qui montrent une différence significative entre l'Internet et IoT.

I.3.4.1 Couche de perception

Également connue sous le nom de couche physique, elle englobe les capteurs, les actionneurs et la technologie RFID. Il vise à rassembler des informations, à les convertir en données numériques, puis à les acheminer vers un autre niveau pour permettre la mise en œuvre d'actions fondées sur ces données. Elle fait office de passerelle entre le monde virtuel (numérique) et le monde physique (réel).

I.3.4.2 Couche de réseau

Assure la liaison entre les équipements physiques et les serveurs ou le cloud en se servant de technologies comme Wi-Fi, GSM, LTE-M, LoRa ou NB-IoT. Elle s'appuie sur des dispositifs intermédiaires tels que des passerelles et des routeurs.

I.3.4.3 Couche d'application

Se charge de l'analyse et du traitement des données informationnelles issues des couches sous-jacentes (Perception et Transmission). Elle a pour mission de transmettre ces informations aux applications afin qu'elles puissent être exploitées pour les actions désirées.

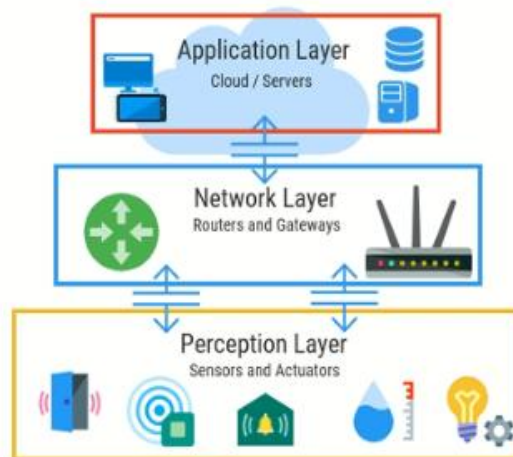


Figure I.10: Vue schématique sur l'architecture de l'IoT [22].

Ces changements incluent de nouveaux protocoles de communication. En termes de communication, l'IoT utilise des protocoles plus légers comparativement à ceux de l'Internet traditionnel, afin de répondre aux limitations liées à la consommation, à la bande passante et au traitement. Parmi ces protocoles :

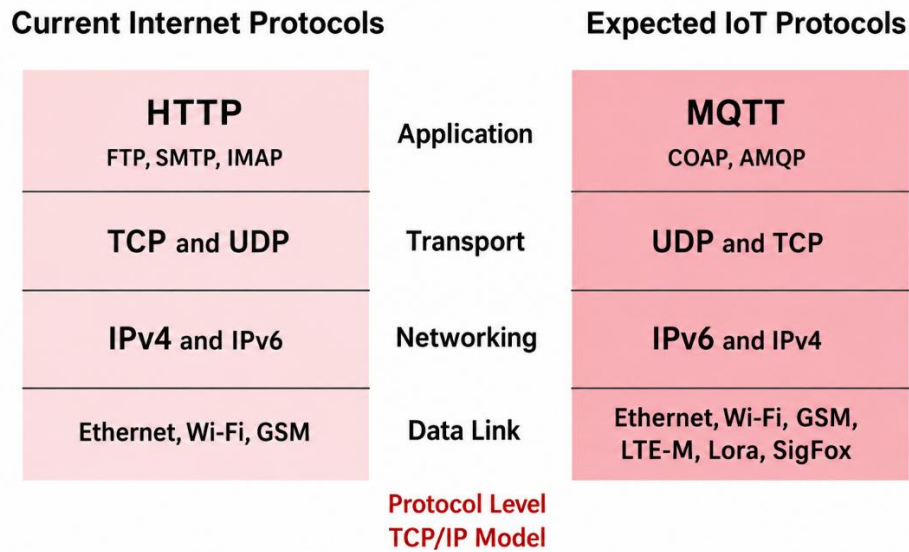


Figure I.11: Protocoles de IoT et l'Internet selon modèle OSI [23].

I.3.5 Comparaisons entre IOT et le réseau traditionnel

La différence principale entre l'IOT et l'internet des personnes résume à leur objectif et les types d'appareils connectés.

L'internet est une vaste toile de réseaux informatiques interconnectés qui facilite la communication et l'échange d'informations entre ordinateurs et serveurs via des protocoles normalisés tels que : FTP, HTTP, TCP/IP. Ces derniers sont utilisés pour accéder à divers services en ligne, comme la navigation sur le web ou l'envoi de courriers électroniques.

L'IoT, en revanche, constitue une section de l'Internet dont le but est de connecter des objets physiques (tels que les capteurs, les appareils portables, les véhicules) grâce à des protocoles tels que CoAP, Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee... et ainsi de suite. Il est principalement utilisé pour optimiser l'automatisation, le suivi et la prise de décision dans différents secteurs tels que la maison intelligente, le domaine médical et les smart cities.[23]

Le tableau I.2 présente une comparaison entre l'Internet traditionnel et l'Internet des Objets (IoT). Il met en évidence les principales différences concernant les types d'équipements utilisés, l'architecture réseau, les protocoles de communication, la gestion des données et les domaines d'application. Alors que l'Internet classique est principalement conçu pour la communication entre utilisateurs et systèmes informatiques, l'IoT vise à connecter des objets intelligents capables d'échanger des données de manière autonome et en temps réel.[23]

Tableau I.2: La différence entre l'Internet et la technologie IoT [23].

Caractéristiques	Internet	IoT
Définition	Réseau globale reliant des ordinateurs et serveurs	Réseau reliant des objets intelligents et capteurs
Type de périphériques	Ordinateurs, commutateurs, smartphones	Actionneurs, capteurs, objets connectés
Topologie	Étoile, maillage, hiérarchique	Étoile, maillage ou hybride
Architecture	Client-serveur, peer-to-peer, architecture centralisée	Architecture décentralisée et des plateformes cloud
Protocoles de Communication	Basés sur IP (HTTP, FTP, TCP/IP,)	Protocoles variés (MQTT, CoAP, LPWAN...)
Latence	Faible à modéré	Très faible pour application à temps réel
Nature de données	Trafic de données volumineux et varié (image, vidéo, audio...)	Trafic de données souvent de petite taille mais en grand quantité
Traitement de données	Centralisé (cloud, serveurs)	Distribué (Edge, Fog, cloud)
Interactivité	Principalement entre humain et ordinateurs	Principalement entre objets physiques intelligents
Objectif	Web, réseaux sociaux, industrie 4.0, courriels, streaming	Smart home, smart citées, industrie 4.0, Santé

Le développement rapide des technologies 5G et de l'Internet des Objets (IoT) impose des exigences élevées en matière de connectivité, de débit, de faible latence et d'efficacité énergétique. Afin de répondre à ces besoins, les antennes jouent un rôle essentiel en assurant une transmission et une réception fiables des signaux. Ainsi, la conception d'antennes performantes, compactes et adaptées aux applications modernes constitue un élément clé pour garantir le bon fonctionnement des systèmes 5G et IoT.

I.4 DEFINITION D'UNE ANTENNE

Une antenne est un dispositif de conversion qui transforme l'énergie électrique en énergie électromagnétique pour l'émission, et vice versa pour la réception, afin de garantir la transmission sans fil des données. Il y a une multitude de méthodes pour la construction d'une antenne. Chaque modèle possède des attributs distinctifs qui le rendent adapté à des utilisations spécifiques. On peut mentionner les types suivants : antennes filaires, antennes en forme de cornet, antennes paraboliques, à fentes et également des antennes imprimées.[23]

Les antennes constituent un élément indispensable de tout système de communication sans fil. Pour mieux comprendre leur fonctionnement, leurs performances et les différentes technologies actuelles, il est important de revenir sur leur évolution. En effet, l'histoire des antennes retrace les principales avancées qui ont conduit au développement des antennes modernes, capables de répondre aux exigences des applications telles que la 5G et l'IoT.

I.5 HISTORIQUE DES ANTENNES IMPRIMEES

Le concept des antennes micro-rubans fut initialement proposé en 1953 par Deschamps aux États Unis d'Amérique et en France par Guttan et Baissimot en 1955 [24]. Un peu plus tard le phénomène de rayonnement provenant des discontinuités dans les strip-lines fût observé et étudié par Lewin en 1960. Au début des années 70, Byron décrit une piste rayonnante conductrice gravée sur un substrat diélectrique ($\epsilon_r < 10$) et repose sur un plan de masse. Par la suite, les caractéristiques des patchs micro-ruban rectangulaires furent publiées par Howell. De son côté, Weinschel, développa plusieurs géométries de patchs micro-ruban pour l'usage en réseau cylindrique. Les travaux additionnels sur les éléments basiques du micro-ruban furent publiés en 1975. Le travail de Nunson dans le développement des antennes micro-rubans a montré que celui-ci était un concept pratique s'étalant à d'autres problèmes relatifs à d'autres systèmes d'antennes. Le modèle mathématique d'un micro-ruban basique fut initialement réalisé à travers l'application de l'analogie avec les lignes de transmission pour patchs rectangulaires simples. Le diagramme de rayonnement d'un patch circulaire fut analysé et le résultat publié par Corver. La première analyse mathématique d'une grande variété de patchs de micro-ruban fut publiée en 1977 par Lo et Al. A la fin des années 70, les antennes micro-ruban sont devenues plus connues et utilisées dans divers systèmes de communications. De nos jours, elles sont très utilisées dans les appareils téléphoniques, les ordinateurs portables, les systèmes embarqués (missiles, fusées, satellites, etc.....).[24]

I.6 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'ANTENNE

- **Émission** : Quand une antenne est utilisée pour transmettre des signaux, elle est alimentée par un courant alternatif, générant par conséquent un champ électromagnétique autour d'elle. La manière dont ce champ se propage est fortement affectée par la conception et la conception de l'antenne, ce qui a un impact direct sur l'orientation, la portée et la configuration du signal transmis dans l'espace.[25]
- **Réception** : Quand l'antenne est employée pour capter des signaux, elle attrape les ondes électromagnétiques produites par une source externe. Ces ondes induisent l'établissement d'un courant électrique au sein de l'antenne, qui est en adéquation avec la fréquence du signal reçu. Par la suite, ce courant est converti en un signal électrique utilisable par l'appareil auquel l'antenne est connectée.[25]

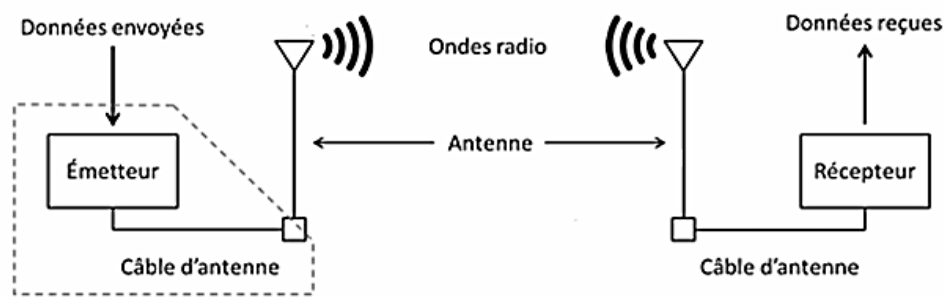


Figure I.12: Le fonctionnement d'antenne [25].

I.7 ROLE DES ANTENNES

I.7.1 Antenne d'émission

Afin d'assurer la propagation dans l'air, il est nécessaire qu'un dispositif génère une onde rayonnée. Le rôle de l'antenne d'émission est de transformer la puissance électromagnétique guidée, issue d'un générateur en une puissance rayonnée. Dans ce sens, c'est un transducteur. [26]

I.7.2 Antenne de réception

De façon inverse, la puissance rayonnée peut être captée par une antenne de réception. Dans ce sens, l'antenne apparaît comme un capteur et un transformateur de puissance rayonnée en puissance électromagnétique guidée. Elle joue le même rôle qu'un télescope qui capte la lumière issue des étoiles et la transforme. [26]

I.7.3 Réciprocité

Dans la plupart des cas, une antenne peut être utilisée en réception ou en émission avec les mêmes propriétés rayonnantes on dit que son fonctionnement est réciproque. Ceci est une conséquence du théorème de réciprocité qui sera démontré plus loin. Dans quelques cas exceptionnels pour lesquels les antennes comportent des matériaux non linéaires ou bien anisotropes, elles ne sont pas réciproques. Du fait de la réciprocité des antennes, il ne sera pratiquement jamais fait de différence entre le rayonnement en émission ou en réception. Les qualités qui seront annoncées pour une antenne le seront dans les deux modes de fonctionnement, sans que cela soit précisé dans la plupart des cas. [26]

I.8 CARACTERISTIQUE DES ANTENNES

Les performances et la capacité des antennes sont affectées par plusieurs de leurs caractéristiques. Voici les principales propriétés des antennes :

I.8.1 Impédance d'entrée

L'antenne expose une résistance électrique, appelée impédance d'entrée, lorsqu'elle est reliée à un circuit émetteur ou récepteur, en réponse au signal électrique. On exprime généralement cette impédance en ohms (Ω). Les valeurs d'impédance à l'entrée peuvent fluctuer selon le type et la conception de l'antenne. Par exemple, les antennes standards peuvent présenter une impédance d'entrée de 50 ohms. La formule fournit l'impédance de l'antenne.

L'impédance de l'antenne est donnée par la formule : (Equation I.1) [27]

$$\mathbf{Z_e = R_e + jX_e} \quad \text{[I.1]}$$

R_e : résistance d'entrée.

X_e : réactance.

D'autre part, l'impédance d'entrée de l'antenne peut s'écrire en fonction du coefficient de réflexion S_{11} sous la formule : (Equation I.2) [27]

$$\mathbf{Z_e = Z_c \frac{1+|S_{11}|}{1-|S_{11}|}} \quad \text{[I.2]}$$

Z_c : Impédance caractéristique.

I.8.2 Coefficient de réflexion

Indique la quantité d'énergie renvoyée en comparaison à celui émis par l'antenne. Une adaptation d'impédance adéquate réduit ce coefficient au minimum. On peut le représenter en termes de l'impédance d'entrée Z_e et de l'impédance caractéristique, comme illustré dans l'équation suivante : (Equation I.3) [27]

$$\mathbf{S_{11} = \frac{Z_e - Z_c}{Z_e + Z_c}} \quad \text{[I.3]}$$

Nous pouvons représenter S_{11} sous la forme en décibel (dB) par cette expression : (Equation I.4) [27]

$$S_{11} \text{ (dB)} = 20 \log (| S_{11} |) \quad [\text{I.4}]$$

Ce coefficient permet de connaître la qualité d'adaptation d'une antenne ; plus ce module tend vers l'infini plus l'antenne est adaptée.

I.8.3 Directivité

La directivité d'une antenne dans une direction spécifique est le quotient de la puissance émise dans cette direction par la puissance qu'émettrait une antenne isotrope [28]. La directivité est donnée par la formule suivante : (Equation I.5) [27]

$$D = \frac{U}{U_0} = 4\pi \frac{U}{P_t} \quad [\text{I.5}]$$

U : l'intensité de rayonnement dans la direction privilégiée.

U_0 : l'intensité de rayonnement d'une source isotrope.

P_t : la puissance totale rayonnée par l'antenne.

I.8.4 Rendement

L'efficacité d'une antenne se caractérise par son rendement, qui correspond à la proportion de la puissance électrique fournie à l'antenne qui est effectivement convertie en énergie électromagnétique rayonnée. Cela permet d'évaluer la performance de l'antenne dans sa capacité à transformer l'énergie électrique en ondes radio. Le rendement est donné par cette équation : (Equation I.6) [27]

$$\eta = \frac{P_r}{P_a} \quad [\text{I.6}]$$

η : le rendement.

P_r : la puissance rayonnée.

P_a : la puissance d'alimentation d'une antenne.

I.8.5 Gain

Le gain est associé à la directivité, c'est un indicateur qui prend en considération l'efficacité de l'antenne ainsi que ses capacités directionnelles. Le gain d'une antenne représente le rapport entre l'intensité de rayonnement dans une direction spécifique et l'intensité de rayonnement qui serait obtenue si la puissance captée par l'antenne était diffusée isotropiquement, comme montré par cette équation : (Equation I.7) [27]

$$G = \frac{4\pi U}{P_e} \quad [\text{I.7}]$$

G : Le gain de l'antenne. ...

U : la puissance rayonnée par une antenne.

P_e : Puissance d'entrée.

I.8.6 Rapport d'onde stationnaire (ROS)

Ressemble au Le coefficient de réflexion représente l'adaptation ou la désadaptation d'impédance entre deux composants. Quand l'adaptation n'est pas optimale, la portion de l'onde réfléchie se superpose à l'onde incidente, créant ainsi une unique onde qu'on appelle onde stationnaire [29]. Il s'exprime comme le rapport des valeurs extrêmes (P_1) et minimales (P_2) de l'amplitude de l'onde stationnaire, selon la formule suivante : (Equation I.8) [27]

$$ROS = \frac{P_1 + P_2}{P_1 - P_2} \quad [I.8]$$

L'équation qui présente la relation entre rapport d'onde stationnaire et coefficient de réflexion c'est la suivante : (Equation I.9) [27]

$$ROS = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|} \quad [I.9]$$

I.8.7 La fréquence de résonance et la bande passante

L'intervalle de fréquences où l'efficacité du transfert d'énergie entre l'alimentation et l'antenne (ou inversement) est optimale correspond à la bande passante d'une antenne. On peut définir cette bande de fréquence à partir du coefficient de réflexion, sous réserve que le diagramme de rayonnement demeure assez constant sur cette plage. On vise généralement un coefficient de réflexion inférieur à -10 dB ou -15 dB sur la bande de fréquences.[30]

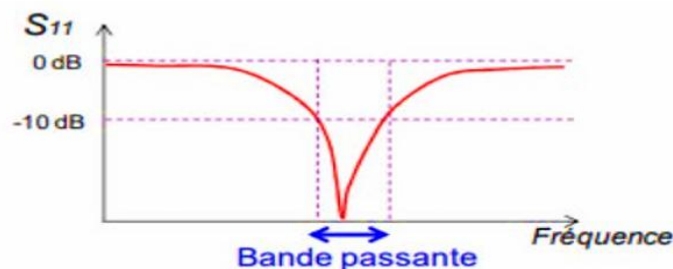


Figure I.13: a bande passante [29].

La bande passante est définie par la formule suivante : (Equation I.10) [27]

$$BP = f_{\max} - f_{\min} \quad [I.10]$$

I.8.8 Diagramme de rayonnement

Il représente les variations de la puissance rayonnée par l'antenne dans différentes directions de l'espace. Il détermine la direction de l'antenne et son gain. [31]

Deux formes typiques peuvent être identifiées dans le diagramme de rayonnement, bien que chacune d'elles varie en fonction du type d'antenne utilisé.

- **Bidirectionnel** : Les antennes bidirectionnelles émettent et reçoivent des signaux dans toutes les directions, ce qui les rend idéales pour des applications où il est nécessaire de communiquer avec des appareils dans diverses orientations sans ajustement constant de l'antenne.[31]

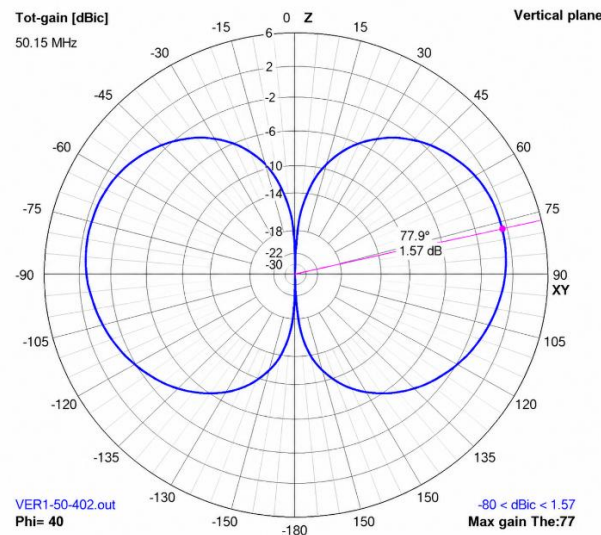


Figure I.14: L'antenne bidirectionnelle [32].

- **Directionnelle** : Les antennes directionnelles émettent et reçoivent des signaux dans une direction spécifique. Elles offrent une portée plus étendue dans une direction donnée, idéales pour des applications nécessitant une communication à longue distance dans une direction précise.[31]

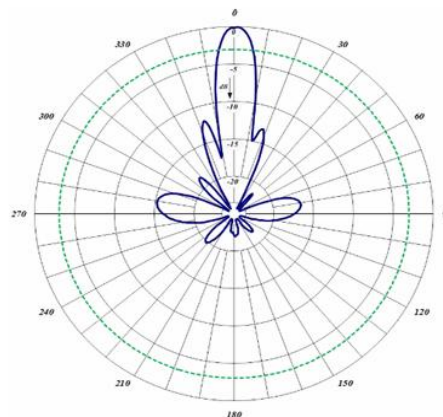


Figure I.15: L'antenne directionnelle [33].

I.8.9 Polarisation

La polarisation d'une antenne exprime alors sa sensibilité à une direction du champ électrique. Une polarisation peut être rectiligne (verticale, horizontale ou oblique) comme elle peut être non rectiligne, c'est à dire circulaire ou elliptique. Le type de polarisation est déterminé par la géométrie de l'antenne d'émission et parfois par le milieu de propagation.[29]

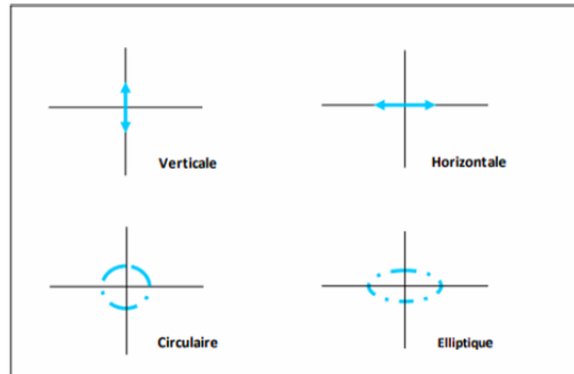


Figure I.16: La polarisation de l'onde électromagnétique [29].

I.9 APPLICATIONS DES ANTENNES IMPRIMEES

Les antennes imprimées sont utilisées dans divers catégories, y compris les suivants [31] :

I.9.1 Télécommunications par satellite

Ces technologies permettent d'établir des liaisons de communication fiables et rapides avec les satellites en orbite.

I.9.2 Commande et contrôle

Elles sont utilisées pour la commande à distance de machines, d'équipements et de systèmes dans différents environnements industriels et militaires.

I.9.3 Télémessure par missile

Ces systèmes facilitent la collecte et la transmission de données en direct à partir des missiles en vol.

I.9.4 Equipements portatifs

Ces outils sont intégrés dans les téléphones mobiles, les ordinateurs portatifs et divers autres dispositifs électroniques portables pour assurer une connexion optimale.

I.9.5 Utilisation des antennes d'émission en médecine

Celles-ci sont mises en œuvre dans les applications d'imagerie médicale ainsi que dans le traitement par radiofréquences.

I.9.6 Récepteurs de navigation par satellite

Ils sont conçus pour recevoir les signaux des satellites GPS ainsi que d'autres systèmes de navigation satellitaire.

I.10 DIFFIRENTS TYPES D'ANTENNES

- Selon la forme géométrique :
 - Antennes filaires : dipôle, boucle, spirale.
 - Antennes à ouvertures : cornet, fente, antenne à réflecteur.
 - Antennes imprimées : patch, dipôle imprimé, spirale.
- Selon le gain :
 - Gain élevé : cornet.
 - Gain moyen : planaire.
 - Gain bas : dipôle, fente, patch.
- Selon la forme du faisceau :
 - Omnidirectionnelle : dipôle.
 - Faisceau étroit : antenne réseau.
 - Faisceau large : planaire.
- Selon la largeur de bande :
 - Bande large : spirale.
 - Bande étroite : patch, fente.[31]

Voici quelques exemples :

I.10.1 Antennes dipolaires

Il s'agit d'antennes plus simples et fréquemment employées pour les transmissions radio à courte distance en raison de leurs caractéristiques.[27]

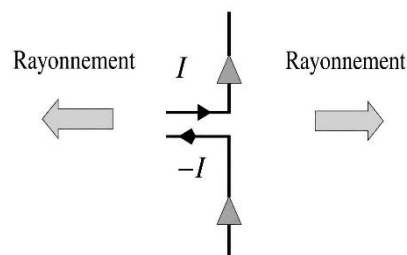


Figure I.17: L'antenne dipolaire [34].

- Antenne Omnidirectionnelle.
- Un gain moyen.
- Sont utilisés sur une large gamme de fréquence en fonction la taille et la conception.

I.10.2 Antennes cornet

Ce sont des antennes forme cylindrique, conique ou pyramide utilisée comme des antennes sources pour éclairer un réflecteur parabolique [27]. Ils sont aussi utilisés pour les applications radar et les transmissions point à point.

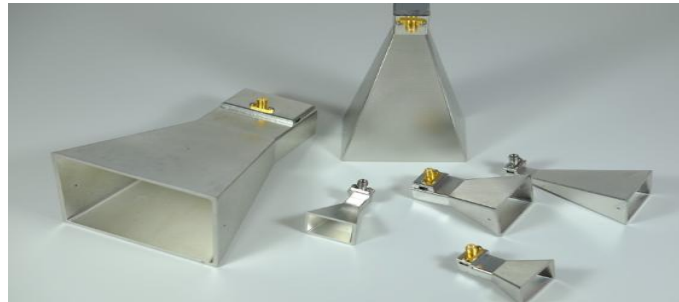


Figure I.18: L'antenne cornet [35].

- Une antenne directionnelle : sa forme permet de concentrer les signaux dans une direction spécifique.
- Un gain moyen, dépend de la taille, la conception et sa fréquence opérationnelle.
- Une large gamme de fréquence et une largeur de bande modérée.

I.10.3 Antennes paraboliques

Sont utilisés pour la transmission et la réception des signaux à longue distance. Elle permet de transférer une onde sphérique en onde plane, grâce à sa forme parabolique [27] et les caractéristiques suivantes :



Figure I.19: Antenne parabolique [36].

- Une antenne directionnelle .
- Gain élevé, dépend de la taille de parabole.
- Sont souvent utilisés pour des fréquences plus élevées et une large bande passante qu'elle est utilisée dans des communications satellitaires.

I.10.4 Antennes Yagi-Uda

Sont des antennes utilisées pour la communication radio amateurs, selon ses caractéristiques :

- Une antenne directionnelle.

- Gain varie selon le nombre d'éléments directeurs et la configuration d'antenne.
- Des fréquences élevées et un large de bande varie selon la conception et le nombre d'éléments.[27]



Figure I.20: Antenne Yagi-Uda [37].

I.10.5 Antennes réseau

Ces éléments, composés de plusieurs parties rayonnantes, sont employés dans des réseaux sans fil de pointe tels que la 5G, en raison des caractéristiques suivantes :

- Sont des antennes directionnelle et omnidirectionnelle selon le besoin spécifiques de communication.
- Gain élevé en fonction de leur conception et sa manière dont elles sont utilisées .
- Sur une large gamme de fréquences directionnelle : peuvent couvrir une bande passante plus étroite, omnidirectionnelle : peuvent couvrir une bande passante plus large. [27]



Figure I.21: Antenne réseau 5G [38].

I.10.6 Antennes patch

Une antenne imprimée se réfère à une antenne dont l'élément rayonnant est fait d'un patch métallique. Cette couche est extrêmement fine, d'une échelle de fraction de longueur d'onde, et est gravé sur un substrat. Le substrat est un matériau qui n'est pas conducteur et qui sert à la fois de support et de guide d'onde. L'autre côté du substrat est généralement revêtu de métal, créant ainsi le plan de masse. Comme il est illustré dans la figure I.19.

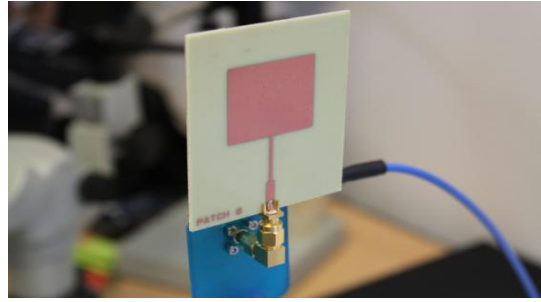


Figure I.22: Antenne patch [39].

I.11 LA STRUCTURE D'UNE ANTENNE PATCH

L'antenne patch, également appelée antenne microbande ou micro-ruban, est un dispositif transducteur assurant deux fonctions principales : l'émission et la réception des ondes électromagnétiques, à une fréquence adaptée à celle de l'antenne.

Sa structure de base est constituée d'un plan de masse conducteur, surmonté d'un substrat diélectrique. Sur ce dernier est déposée une couche conductrice (telle que le cuivre ou l'or) formant l'élément rayonnant, appelé patch.

Le substrat joue un rôle essentiel dans le fonctionnement de l'antenne. Il s'agit d'un matériau diélectrique caractérisé principalement par sa permittivité ϵ_r relative, qui influence directement les performances de l'antenne, notamment en termes de fréquence de résonance et de propagation des ondes. [40]

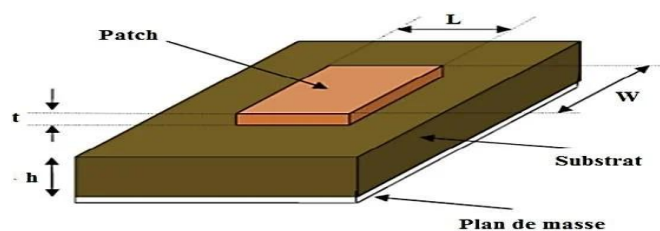


Figure I.23: Structure typique d'une antenne microbande [41].

En raison de la complexité liée à l'analyse de ce type de structures, notamment à cause du caractère non homogène du milieu et de la présence de plusieurs modes de propagation, l'élément conducteur est généralement approximé par des formes géométriques simples et facilement exploitables, comme illustré dans la figure correspondante.

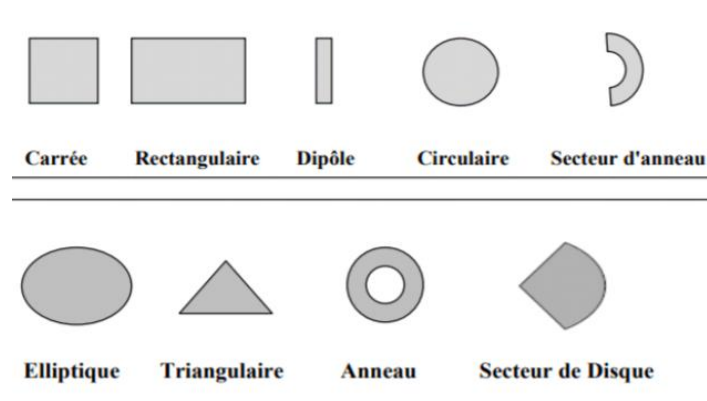


Figure I.24: Diverses formes d'éléments rayonnants dans une antenne patch [42].

Les performances d'une antenne patch dépendent étroitement de la géométrie et des dimensions de tous ses composants. Les paramètres intervenant dans la caractérisation de l'antenne sont :

Le substrat

- Hauteur du substrat h .
- Permittivité relative du diélectrique ϵ_r .
- Tangente des pertes $\tan(\delta)$.

Le conducteur

- La forme géométrique (carré, cercle, triangle etc.)
- Les dimensions (largeur(W), longueur (L) pour la forme rectangle et rayon pour la forme circulaire).
-

I.12 LES BENEFICES ET LES INCONVENIENTS DES ANTENNES PATCH

I.12.1 Les bénéfices

D'une façon générale, les bénéfices des antennes imprimées incluent [43] :

1. Un poids léger.
2. Simulation du risque de défaillance.
3. Coût de production bas, possibilité de fabrication en grande quantité.
4. Polarisation linéaire et circulaire.
5. Il est possible d'utiliser des antennes à bandes multiples et à multipolarisations.
6. Faciles et robustes.
7. Peu encombrants (essentiellement en termes d'épaisseur).

I.12.2 Inconvénient

Toutefois, elles comportent les inconvénients suivants [43] :

1. Une bande passante réduite, fréquemment liée à des problèmes de tolérance (géométriques et physiques).
2. En général, peu de bénéfice.
3. La majorité des antennes émettent uniquement dans le demi-plan.
4. Ne supportent que des puissances faibles (quelques dizaines de watts).
5. Émissions indésirables de l'alimentation.
6. Circuit d'alimentation parfois complexe.

I.13 TECHNIQUES D'ALIMENTATION

I.13.1 Couplage par contact

Cette catégorie d'alimentation permet un contact direct entre la ligne de transmission et la surface rayonnante. Nous distinguons deux types d'alimentations avec contact :

I.13.1.1 Alimentation par ligne micro-ruban

Cette alimentation comporte une ligne micro-ruban dont la largeur est plus petite à celle du patch qui doit être relié à celle-ci. Elles seront installées sur un substrat diélectrique qui possède un plan de masse du côté inférieur. Cette alimentation, bien que simple à produire en raison de son coût modique et facilement ajustable en surveillant la position de la ligne, peut néanmoins engendrer une émission indésirable significative.[44]

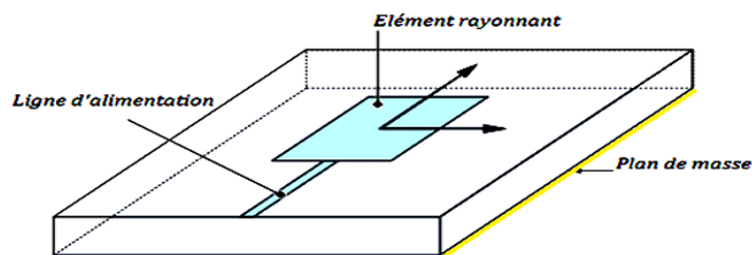


Figure I.25: Patch avec la ligne d'alimentation [45].

I.13.1.2 Alimentation par sonde coaxiale

Dans ce type d'alimentation, le conducteur externe du connecteur coaxial est relié au plan de masse, tandis que le conducteur interne est connecté directement au patch. Cette technique présente toutefois certaines limitations, notamment une bande passante relativement étroite ainsi qu'une difficulté de modélisation, en particulier dans le cas de substrats épais.

Cependant, elle offre l'avantage de pouvoir être utilisée en n'importe quel point du patch, ce qui lui confère une grande flexibilité dans la conception.[45]

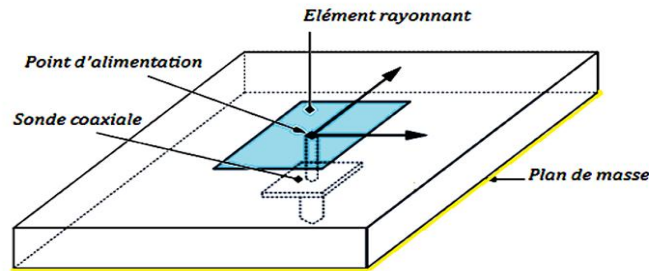


Figure I.26: alimentation de la sonde coaxiale [45].

I.13.2 Alimentation par couplage sans contact

I.13.2.1 Alimentation par couplage à fente (ouverture)

L'antenne à fente alimentée comporte deux substrats ayant des permittivités diélectriques différentes. Le premier substrat, qui supporte une ligne de transmission sur sa face inférieure, est doté d'une fente sur sa face supérieure où se trouve un plan de masse. Un second substrat, qui contient le patch sur sa face supérieure, est positionné au-dessus du premier. Cette méthode donne la possibilité d'alimenter le patch par couplage à travers la fente du plan de masse qui est centré sous ce patch. Cette alimentation présente une bande passante trop étroite, mais elle a l'avantage d'être simple à modéliser.[45]

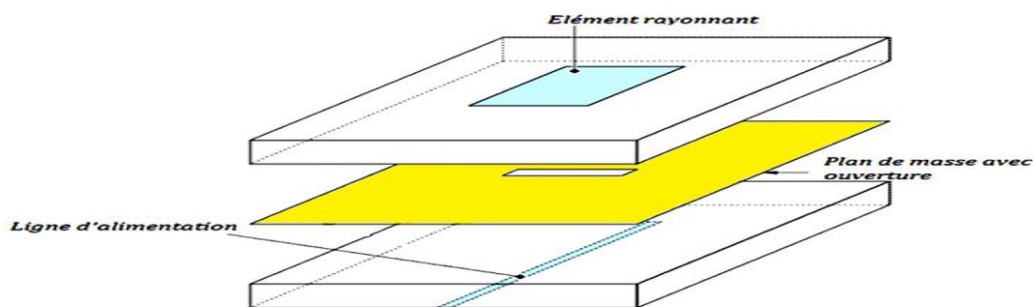


Figure I.27: Alimentation par couplage d'ouverture [45].

I.13.2.2 Alimentation par couplage proximité

Dans ce système d'alimentation, la micro-ruban est mise en place entre deux substrats. Le patch est présent sur le substrat supérieur. Le plan de masse est donc situé sur la surface inférieure du deuxième substrat. L'énergie est transférée par couplage entre la ligne d'alimentation et le patch. On peut optimiser ce couplage en ajustant les dimensions de la ligne. L'un des bénéfices de cette couplage est la diminution du rayonnement parasite, tandis que son principal défi est la complexité de sa mise en pratique.[45]

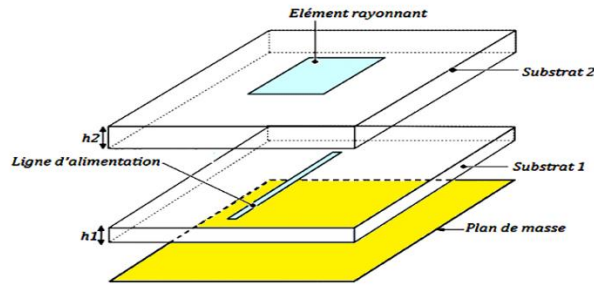


Figure I.28: Alimentation par couplage à proximité [45].

I.14 TECHNIQUES D'ADAPTATION

Les techniques d'adaptation des antennes permettent d'ajuster de manière dynamique leurs caractéristiques de rayonnement afin de s'adapter à l'environnement et d'optimiser les performances en émission et en réception. Plusieurs approches peuvent être utilisées pour adapter les antennes imprimées.[46]

Les principales méthodes d'adaptation mises en œuvre sont les suivantes :

I.14.1 Adaptation par ligne quart d'onde

Dans le domaine des circuits hyperfréquences, l'adaptation d'impédance consiste généralement à transformer l'impédance en un point donné du circuit afin de la faire correspondre à une valeur souhaitée, souvent celle de la charge ou de la source. La technique de la ligne quart d'onde repose sur l'utilisation d'un tronçon de ligne de transmission de longueur égale au quart de la longueur d'onde, permettant ainsi d'assurer cette transformation d'impédance de manière efficace.[46]

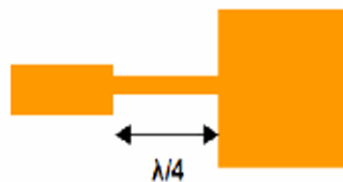


Figure I.29: Adaptation par ligne quart d'onde [47].

I.14.2 Adaptation par encoche

La méthode d'adaptation par encoche consiste à réaliser une encoche sur le patch, y insérant une ligne d'alimentation de 50 Ohm à une profondeur où l'impédance de l'antenne est également de 50 Ohm.[46]

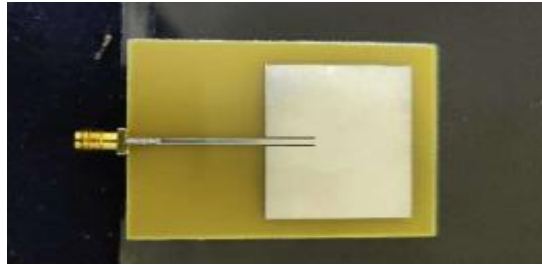


Figure I.30 : Adaptation par encoche [48].

I.14.3 Adaptation par STUB

La méthode STUB est fréquemment employée en radiofréquence pour ajuster l'impédance d'une charge à la sortie d'un circuit. Cette technique privilégie l'emploi d'un STUB, qui est un segment de transmission de longueur adéquate branché en parallèle à la ligne principale.

L'abaque de Smith est un outil graphique facilite la résolution de calculs liés aux lignes de transmission, aux circuits d'adaptation d'impédance, et plus encore.[46]

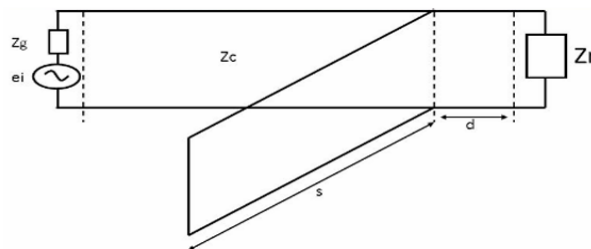


Figure I.31: Adaptation par STUB [48].

I.15 CONCLUSION

Au terme de ce **chapitre**, nous avons pu examiner trois domaines étroitement liés qui constituent les fondements de la communication sans fil moderne : la **5G**, l'**Internet des Objets** et les **antennes**.

L'étude de la **5G** a montré que cette technologie dépasse largement le simple cadre de la téléphonie mobile, en offrant des performances inégalées en matière de débit, de latence et de capacité de connexion, rendant possible le déploiement massif de nouveaux services et applications.

L'**Internet des Objets**, quant à lui, tire pleinement profit de ces capacités pour interconnecter des milliards d'objets intelligents, transformant ainsi notre façon de vivre, de travailler et d'interagir avec notre environnement, dans des domaines aussi variés que la santé, l'industrie ou les transports.

Enfin, l'étude des **antennes**, et plus particulièrement des **antennes patch microstrip**, a mis en évidence leur rôle crucial dans tout système de communication sans fil. Leurs caractéristiques avantageuses en termes de compacité, de légèreté et de facilité de fabrication en font des composants parfaitement adaptés aux exigences des applications **5G** et **IoT**.

En définitive, la convergence de ces trois technologies dessine les contours d'un monde toujours plus connecté. Les perspectives d'évolution restent immenses, et les travaux futurs s'orienteront sans doute vers la conception d'antennes encore plus performantes et mieux adaptées aux besoins des générations de réseaux à venir.

Bibliographie

- [1] Edward M. Roche, Benjamin H. Dickens-Jr. Walker Townes. « La prochaine génération de téléphonie mobile (5G) et ses implications (Infrastructure, Réglementation) », Netcom, 32- 1/2 | 2018, 139-162.
- [2] Olivier Ezratty. « Opinions Libres » <https://www.oezratty.net>, 20 février 2018.
- [3] « L'évolution des réseaux mobiles 5G, Livre blanc, EXFO, 2021 ». Consulté le : 2 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur : https://www.exfo.com/contentassets/331b8bd3b1c442718e03927c77204338/exfo_wpa_per130_v3_fr.pdf
- [4] « The 5G Core Network Demystified | Dell Technologies Info Hub ». Consulté le: 2 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://infohub.delltechnologies.com/fr-fr/p/the-5g-core-network-demystified/>
- [5] Bouhafs Abderrezzaq et Ichou Abdelkader «Etude et conception d'un réseau d'antenne pour des applications 5G». Mémoire Master. Université Aboubakr Belkaid-Tlemcen 2020.
- [6] François MAGNE. « Télécommunications haut débit en ondes millimétriques », 10 mai 1998.
- [7] T. Nakamura, S. Nagata, A. Benjebbour, Y. Kishiyama, T. Hai, S. Xiaodong, Y. Ning et L. Nan, « Trends in small cell enhancements in LTE advanced », IEEE Communications Magazine, vol. 51, no. 2, pp. 98-105, 2013.
- [8] Shahram ShahbazPanahi, Yindi Jing, in Academic Press Library in Signal Processing, Volume 7, 2018.
- [9] Mahmood, Nurul Huda; Gatnau, Marta ; Berardinelli, Gilberto. Mogensen, Preben Elgaard. « Full Duplex Communications in 5G Small Cells ». International Wireless Communications and Mobile Computing Conference. pp. 1665-1670. 2017
- [10] « Samsung Shares Massive MIMO Roadmap in New Whitepaper | Samsung Business Global Networks », Samsung global_nw. Consulté le : 5 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.samsung.com/global/business/networks/insights/press-release/1209-samsung-shares-massive-mimo-roadmap-in-new-whitepaper/>
- [11] « La 5G », Arcep. Consulté le : 5 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.arcep.fr/la-régulation/grands-dossiers-reseaux-mobiles/la-5g.html>

- [12] « 5G : Pour qui ? Pour quoi ? Et pour quand ? | Inria ». Consulté le: 5 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.inria.fr/fr/5G-reseau-mobiles-IoT>
- [13] J. Lausson, « 5G : une toute nouvelle bande de fréquences sera bientôt réservée aux opérateurs », Numerama. Consulté le: 5 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.numerama.com/tech/525705-5g-une-toute-nouvelle-bande-de-frequences-sera-bientot-reservee-aux-operateurs.html>
- [14] [En ligne]. Disponible sur : <https://dzone.com/articles/CoAP-protocol-step-by-step-guide> .Consulté le: 5 avril 2026.
- [15] futura-sciences, futura tech. [En ligne]: .Consulté le: 5 avril 2026. Disponible sur : [www.futurasciences.com/tech/definitions/internet-internet-objets-15158/..](http://www.futurasciences.com/tech/definitions/internet-internet-objets-15158/)
- [16] Learning, Simply easy. Internet of things tutotial. 2016.
- [17] [En ligne]: .Consulté le: 5 avril 2026. Disponible sur : https://www.freepik.com/premium-vector/iot-internet-things-devices-connectivity-concepts-network-flat-style-with-people_37956592.htm
- [18] Mouradian, Alexandre. Proposition et vérification formelle de protocoles de communications temps-réel pour les réseaux de capteurs sans fil. L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Thèse de Doctorat.
- [19] . [En ligne]: .Consulté le: 5 avril 2026. Disponible sur : <https://www.itu.int/rec/T-RREC-E.164-201011> 1/fr.
- [20] Osman Chifa «Proposition d'un modèle de vérification pour un protocole de Communication IOT». Mémoire Master. Université Ouargla .
- [21] A. Gerodimos, L. Maglaras, M. A. Ferrag, N. Ayres, et I. Kantzavelou, « IoT : Communication protocols and security threats », Internet of Things and Cyber-Physical Systems, vol. 3, p. 1-13, 2023, doi : 10.1016/j.iotcps.2022.12.003.
- [22] M. Hassan et J. Li, « Demonstration of cyber security through Penetration testing on IP camera », févr. 2023, Article, Teesside University Middlesbrough, England.
- [23] Bouaza Amina«conception des antennes reconfigurables pour des applications 5G et IoT ». Mémoire Master. Université Aboubakr Belkaid-Tlemcen .
- [24] Soultane soumia «Etude et caracterisation d'antennes imprimees pour systeme ultra-large bande ». Mémoire Mgister. Université Biskra.
- [25] <https://images.app.goo.gl/CU1kat9xusavCfnB8><https://images.app.goo.gl/CU1kat9xusavCfnB8> consulté le 07.04.2026

- [26] solger.free.fr/liens/livres/les-antennes-theorie-conception-et-application.pdf
- [27] C. A. BALANIS « Antenna Theory, Analysis and Design » USA : John Wiley & Sons, Inc, 1997.
- [28] M. CHAABANE « Conception d'une antenne bip large bande a fort gain », thèse de docteur en science en Electronique, Université Ferhat Abbas - Sétif 1-, 23 Février 2017.
- [29] F.A Belainine, M.A. Salmi « Etude De La Miniaturisation Des Antennes par repliement Applications Pour La Conception D'une Antennes 2.4GHZ » Mémoire de Master, Université Houari Boumediene d'Alger 2013.
- [30] ABoyer, « Antennes support de cours énonce de travaux dirigés », cours, Institut Informatique et Réseau, Université Toulouse, Octobre 2011.
- [31] A. Benomar « Etude des Antennes à Résonateurs Diélectriques » Thèse doctorat, Application aux Réseaux de Télécommunications. Limoges, 2015.
- [32] https://www.pdfprof.com/PDF_Image.php?id=67204&t=18 consulté le 15 avril 2026.
- [33] <https://comprodcom.com/fr/shop/antennes-brides-de-fixation-fr/antennes-diedres-fr/antenne-parabolique-directionnelle-965-70/> consulté le 15 avril 2026
- [34] <https://images.app.goo.gl/SrZcgmfEr179ZUfQ9> consulté le 17 avril 2026.
- [35] <https://sl.bing.net/eQZxmbBiUge> consulté le 8 avril 2026.
- [36] <https://sl.bing.net/caPDDiqUq3E> consulté le 8 avril 2026.
- [37] <https://sl.bing.net/kBb7iLdRjP2> consulté le 8 avril 2026.
- [38] <https://sl.bing.net/klSVWK42uhU> consulté le 8 avril 2026.
- [39] <https://sl.bing.net/kjjT6jAq9eu> consulté le 8 avril 2026.
- [40] TEBACHE Soufiane « Méthodes de caractérisation hyperfréquence des antennes imprimées » Mémoire Master. Université Mohammed Khider – Biskra 2013
- [41] <https://sl.bing.net/cSS8WDKIYqq> consulté le 8 avril 2026.
- [42] <https://sl.bing.net/i4CKIB7XTqK> consulté le 8 avril 2026.
- [43] H. LASSELAT « Étude d'antennes imprimées rectangulaires en tenant compte de l'effet de couplage » Université Mohamed Khider Biskra, 2012.
- [44] S. E. Sandstrom « A Compact Microstrip Patch Antenna For LTE Application, Master Thesis, Submitted For Degree Of Master In Electrical Engineering Specialization In Signal Processing & Wave Propagation ».

- [45] BENAZZOZ Ghouti et BESENANE Ikram « Conception et réalisation d'une antenne miniature pour l'application LTE » Mémoire Master. Université Aboubakr Belkaid-Tlemcen 2019.
- [46] GHITRI Manel et FADOUHA Abla Feryel « Système d'antennes MIMO pour les applications 6G » Mémoire Master. Université Aboubakr Belkaid-Tlemcen 2019.
- [47] M. SAYAH, M.L. BANYAHIA « conception et realisation d'un réseau d'antennes à base de graphene pour des applications satellitaires en bande v- cagas », Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen ,2023.
- [48] <https://sl.bing.net/izQiKK4GSbs> consulté le 8 avril 2026.

Chapitre II : Miniaturisation, Métamatériaux et MIMO

II.1 INTRODUCTION

La miniaturisation des antennes constitue un enjeu majeur dans la conception des systèmes de télécommunications modernes, où la réduction de l'encombrement doit être réalisée sans dégrader significativement les performances électromagnétiques. Plusieurs approches ont été proposées, notamment l'insertion de court-circuit, l'utilisation de matériaux diélectriques ou magnéto-électriques, ainsi que la modification de la géométrie des structures rayonnantes.

Cependant, ces techniques sont limitées par des contraintes fondamentales telles que le facteur de qualité élevé, la réduction de la bande passante et la diminution de l'efficacité de rayonnement. Dans ce contexte, les métamatériaux offrent une alternative innovante grâce à leurs propriétés électromagnétiques artificielles, permettant une meilleure maîtrise de la propagation des ondes.

L'utilisation de structures telles que les résonateurs en anneaux fendus (SRR) et leurs équivalents complémentaires (CSRR) permet ainsi d'améliorer la miniaturisation et les performances des antennes. Par ailleurs, leur intégration dans des systèmes MIMO ouvre la voie à des architectures compactes à haute capacité et faible corrélation.

Ce chapitre présente les principales techniques de miniaturisation, les concepts fondamentaux des métamatériaux, ainsi que leur application dans les systèmes d'antennes modernes.

II.2 MINIATURISATION

II.2.1 Définition d'une antenne miniature

Dans le cadre de la conception d'une antenne miniature, il est nécessaire de déterminer la sphère de Chu [1], c'est la sphère qui renferme l'antenne en entier. Elle se caractérise par son rayon a , (voir la figure II.1) qui représente la dimension la plus grande de l'antenne. Cette dimension est exprimée en termes de la longueur d'onde associée à la fréquence fonctionnelle de l'antenne. Pour les antennes ULB, nous considérons cette fréquence comme la fréquence basse de fonctionnement.

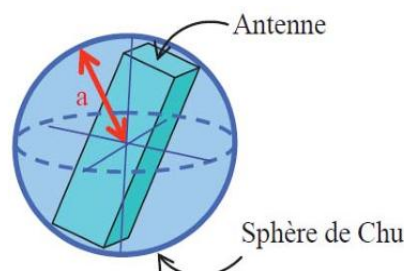


Figure II.1: Sphère de Chu d'une antenne [2].

La caractérisation des antennes miniatures dépend généralement sur le calcul du produit entre le rayon a et le nombre d'onde $k = \frac{2\pi}{\lambda}$. Deux conditions peuvent être appliquées selon ce critère. Wheeler [3] est le premier à définir qu'une antenne est considérée comme miniature si le diamètre de la sphère de Chu ne dépasse pas $\frac{1}{k}$. Cette dimension appelée *radianlength*. Cela signifie qu'une antenne est considérée comme miniature si elle répond au critère suivant :

$$k \times a < 0,5 \quad \text{[II.1]}$$

La deuxième condition est fournie par Hansen [4]. Il estime que l'espace minimal qu'une antenne peut occuper se situe à la distance limite entre le rayonnement de proximité et le rayonnement de distance. La distance qui détermine la transition du champ proche au champ lointain est connue sous le nom de *radian sphere*. D'après Hansen, une antenne est considérée comme miniature si elle se trouve à l'intérieur de la *radian sphere*, en d'autres termes, si le rayon de la sphère correspond à la *radianlength*. En d'autres termes :

$$k \times a < 1 \quad \text{[II.2]}$$

Ces deux critères dépendent uniquement des dimensions géométriques de l'antenne. L'objectif de la miniaturisation consiste à réduire la taille de l'antenne tout en préservant ses performances, notamment en termes de bande passante et de rayonnement. Dans ce contexte, l'analyse du facteur de qualité de l'antenne permet d'évaluer l'influence de cette réduction sur ces différents paramètres.

II.2.2 Techniques de miniaturisation des antennes

Les techniques de miniaturisation des antennes regroupent un ensemble de méthodes visant à réduire leurs dimensions physiques tout en préservant leurs performances en termes de rayonnement et de réception des signaux électromagnétiques [5]. Ces techniques reposent notamment sur l'utilisation de matériaux spécifiques, la conception de structures innovantes, l'exploitation des propriétés électriques et magnétiques des matériaux, ainsi que l'intégration de composants électroniques à proximité de l'antenne. L'objectif principal est de diminuer la taille des antennes tout en conservant leur efficacité et leur bon fonctionnement, afin de répondre aux exigences de miniaturisation des dispositifs électroniques modernes. Parmi les principales techniques de miniaturisation des antennes, on peut citer :

II.2.2.1 Insertion de court-circuit

Le quart d'onde imprimé de l'antenne : En s'appuyant sur l'analogie entre le dipôle et le monopôle, il est envisageable d'intégrer une plaque de court-circuit entre l'élément rayonnant et le plan de masse, au niveau du plan où le champ électrique s'annule pour le mode primaire de l'antenne patch [6][7].

II.2.2.2 Utilisation des matériaux

On utilise souvent les antennes imprimées grâce à leur maniabilité, leur conception et intégration aisée, ainsi qu'à leur faible coût. Elles sont fréquemment miniaturisées électriquement grâce à l'utilisation de divers matériaux, incluant :

- **Utilisation d'un diélectrique** : Pour diminuer la charge, on peut aussi exploiter les propriétés diélectriques des matériaux. Effectivement, de nombreuses recherches ont montré que l'utilisation de substrats à haute permittivité, habituellement comprise entre 10 et 20, contribue à diminuer les dimensions d'une antenne sans en modifier la configuration. L'utilisation de ces matériaux concentre les lignes de champ sous l'antenne. Ce phénomène découle de l'influence d'un environnement à permittivité élevée sur la structuration des électrons. Par conséquent, quand un substrat possède une permittivité diélectrique élevée (ϵ_r), la longueur d'onde guidée (λ_g) se réduit [8][9].
- **Utilisation d'un matériau magnéto-électrique** : L'utilisation de matériaux magnéto-diélectriques, présentant d'une permittivité et d'une perméabilité supérieures à 1, permettant la diminution des dimensions d'une antenne sans compromettre ses performances en termes de la bande passante. Ces matériaux incitent la réduction de taille des antennes imprimées étant donné que le substrat a un indice de réfraction qui est inversement proportionnel aux dimensions de l'antenne [8][10].

II.2.2.3 Modification de la géométrie

La dernière classe de techniques porte sur la modification structurale de l'antenne par l'utilisation des fentes, le repliement, des formes fractales ou arbitraires [6].

- **Insertion d'encoches ou de fentes** : Il est fréquent d'utiliser l'insertion d'encoches (figure II.2 (a)) ou de fentes dans une antenne patch traditionnelle. En effet, cette méthode favorise une augmentation artificielle de la longueur électrique de l'élément rayonnant en étendant le « chemin » des courants de surface sur le corps. Cette substrat lumineuse (figure II.2(b)) [6][11].

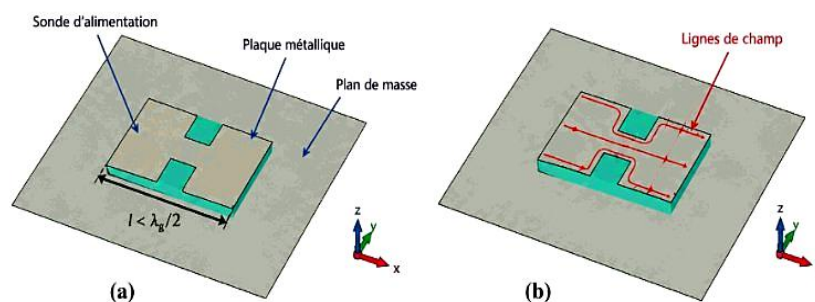


Figure II.2 : Géométrie d'une antenne imprimée à encoches (a) Et son effet sur les courants surfaciques (b) [6][11].

- **Repliement et courbure** : Cette technique est également appropriée pour la miniaturisation des antennes. Elle consiste la modification de la structure de l'élément rayonnant ou son repliage sur lui-même. Ceci entraîne une diminution naturelle de l'espace qu'occupe l'objet en comparaison à une structure qui n'est pas pliée. On utilise principalement cette méthode dans le domaine des dipôles [12][13].

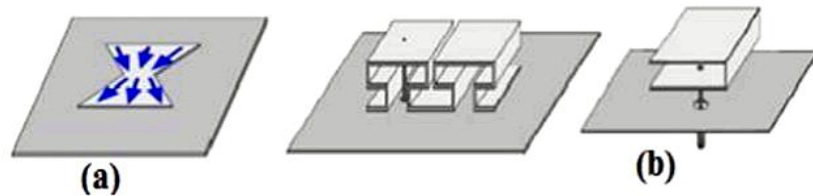


Figure II.3 : Antenne repliée (a) Bow-tie, (b) repliement vertical [12].

II.2.2.4 Miniaturisation à l'aide de métamatériaux

Les métamatériaux sont des matériaux artificiellement posséder des propriétés qui ne sont pas facilement disponibles. Ce genre de structure offre des performances d'antenne élevées et optimise l'efficacité du rayonnement. On peut aussi les utiliser pour la miniaturisation des antennes patch en intégrant les cellules de métamatériaux, comme les cellules SRR et CSRR, sur l'élément rayonnant de l'antenne ou sur son plan de masse [14].

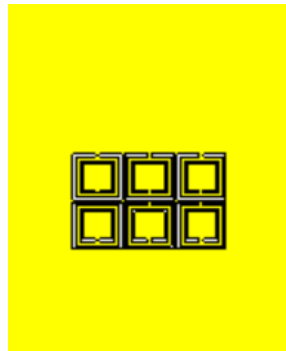


Figure II.4 : Miniaturisation à l'aide de métamatériaux.

II.3 METAMATERIEUX

II.3.1 L'origine des métamatériaux

L'étude des matériaux artificiels présentant des propriétés électromagnétiques particulières remonte à bien avant l'introduction du concept des matériaux à main gauche (Left-Handed Materials – *LHM*) par Victor Veselago en 1968[15]. Dès 1944[16], Mandelshtam avait déjà évoqué les phénomènes de rétro-propagation et de réfraction négative. Toutefois, l'opposition entre la vitesse de phase et la vitesse de groupe avait été mentionnée auparavant par Lamb en 1904 [17]et Pocklington en 1905[18].

Mandelstam a montré que la loi de Snell admet, en plus de la solution classique, une solution correspondant à une réfraction négative. Par la suite, en 1948, Kock a utilisé des structures métalliques pour contrôler la vitesse de phase et concevoir des lentilles pour les systèmes d'antennes [19]. En 1951[20], Malyuzhinets a étudié la rétro-propagation à l'aide de réseaux d'inductances et de capacités, tandis qu'en 1957, Sivukhin a observé ce phénomène dans des milieux à paramètres négatifs [21]. En 1959, Silin [22] a également mis en évidence la réfraction négative dans des structures périodiques bidimensionnelles.

Le travail fondamental dans ce domaine reste celui de Veselago (1967), qui a établi les bases théoriques des matériaux possédant simultanément une permittivité et une perméabilité négatives, tout en prédisant leurs propriétés particulières [15]. Cependant, il a fallu attendre plusieurs décennies pour obtenir une validation expérimentale.

En 1996, Pendry et son équipe ont proposé un milieu à permittivité négative basé sur un réseau de tiges métalliques [23]. En 1999, ils ont introduit les résonateurs en anneaux fendus (SRR), permettant d'obtenir une perméabilité négative [24]. La première validation expérimentale a été réalisée en 2001 par Smith et ses collaborateurs, en combinant ces structures pour obtenir un matériau à main gauche [25].

Enfin, en 2002, une nouvelle catégorie de métamatériaux non résonants, basée sur les lignes de transmission, a été développée par plusieurs chercheurs tels que Eleftheriades [26], Oliner [27] et Caloz [28]. Ces travaux reposent sur l'utilisation de lignes de transmission associées à des inductances en série et des condensateurs en parallèle afin de réaliser des milieux à main gauche.

II.3.2 Définition métamatériaux

Le terme métamatériaux est formé à partir du préfixe grec « méta » (μετά), signifiant « au-delà » ou « un niveau au-dessus », et du mot « matériaux ». Il désigne ainsi des matériaux possédant des propriétés dépassant celles observées dans les milieux naturels, c'est-à-dire des caractéristiques inexistantes a priori dans la nature.

Le concept de métamatériau a été formalisé par Rodger M. Walser en 1999 à l'Université du Texas à Austin. Il les a définis comme des structures macroscopiques artificielles, présentant une architecture périodique tridimensionnelle, conçues pour produire des réponses optimisées et non accessibles dans les matériaux naturels face à une excitation donnée [29].

À ce jour, il n'existe pas de définition universelle du terme. Selon Bilotti et ses collaborateurs, les métamatériaux [30-38] sont des matériaux artificiels présentant de propriétés particulières ou inhabituelles, absentes dans les matériaux naturels aux fréquences considérées [37]. De son côté, Martín [38] souligne qu'il existe un accord général pour définir les

métamatériaux comme des structures artificielles présentant des propriétés électromagnétiques, optiques ou acoustiques à la fois atypiques et contrôlables.

En pratique, les métamatériaux sont constitués de structures périodiques ou quasi-périodiques formées de cellules unitaires (souvent appelées « atomes artificiels »), composées de métaux et/ou de matériaux diélectriques. Leurs propriétés ne dépendent pas uniquement de la nature des matériaux constitutifs, mais surtout de leur organisation structurale. Ainsi, leur conception permet non seulement d'obtenir des propriétés inédites, mais également de les ajuster et de les contrôler afin de répondre à des exigences spécifiques en termes de performance.

De manière générale, les métamatériaux peuvent être définis comme des structures artificielles macroscopiques présentant des propriétés électromagnétiques inhabituelles et maîtrisables. Lorsque ces structures sont considérées comme des milieux effectifs, une condition supplémentaire doit être respectée : la taille de la cellule unitaire doit être inférieure ou égale à la longueur d'onde.

II.3.3 Classifications des métamatériaux

Dans le domaine des micro-ondes, les matériaux sont généralement classés en quatre catégories selon le signe de leur permittivité et de leur perméabilité. Ces paramètres influencent directement le comportement et la propagation des ondes électromagnétiques à l'intérieur du matériau. Ainsi, les métamatériaux peuvent être répartis en quatre principales classes [39] : comme illustré dans la figure II.5 :

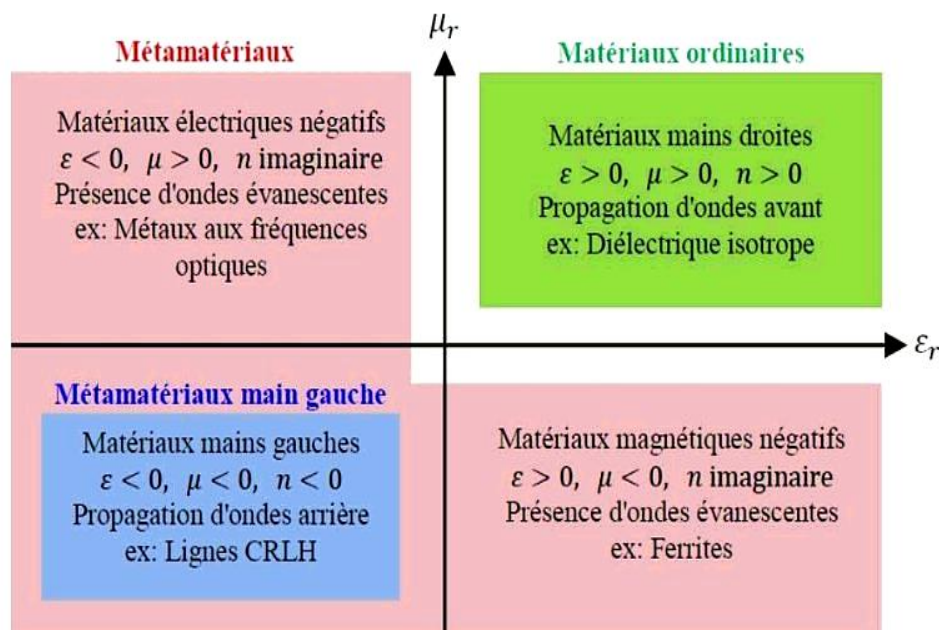


Figure II 5 : Classification des métamatériaux électromagnétiques selon les signes ϵ et μ [39].

II.3.3.1 Matériaux doublement positifs (DPS)

On désigne par DPS (Matériaux Doublement Positifs) [40] les matériaux possédant à la fois une permittivité et une perméabilité supérieures à zéro $\epsilon > 0$, $\mu > 0$. Cette désignation s'applique généralement à la plupart des milieux, tels que les diélectriques.

II.3.3.2 Matériaux à perméabilité négative (MNG)

On désigne tout matériau ayant une permittivité supérieure à zéro et une perméabilité inférieure à zéro ($\epsilon > 0$, $\mu < 0$) comme étant un matériau à perméabilité négative (MNG, Mu Négative). Comme matériau à perméabilité négative MNG, la structure la plus couramment utilisée est celle des résonateurs à anneaux fendus (SRR) [40]. Cette unité est constituée de deux anneaux métalliques concentriques (qui peuvent être un cercle ou un carré), avec un espace 'd' qui les sépare. Chaque anneau a une fente étroite et ils sont disposés à un espace de 180 degrés l'un par rapport à l'autre (consulter la figure II.6 (a)). L'écart entre l'anneau interne et l'anneau externe fonctionne comme un condensateur, alors que les anneaux en eux-mêmes fonctionnent comme des inducteurs. Ainsi, l'association des deux anneaux fonctionne comme un circuit résonant [40]. Le réseau SRR métamatériaux démontrent une perméabilité négative dans une certaine région de fréquences au-dessus de la fréquence de résonance magnétique f_{mp} , comme l'illustre la figure II.6 (b)[40].

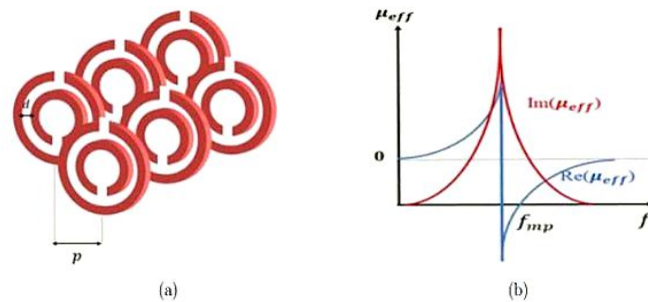


Figure II.6 : Structure SRR (a) et perméabilité effective associée (b)[40].

II.3.3.3 Matériaux à permittivité négative (ENG)

Si un matériau présente une permittivité inférieure à zéro et une perméabilité supérieure à zéro ($\epsilon < 0$, $\mu > 0$), il est désigné comme un matériau à permittivité négative (ENG, Epsilon Négative).

Ces caractéristiques sont présentes dans de nombreux plasmas selon divers régimes de fréquence. Les métamatériaux ENG exploitent un réseau métallique constitué de fils fins en cuivre, en aluminium, en argent ou en or, arrangés de façon périodique (suivant une période et

un rayon de fil r , comme la montre (la figure II.7(a)). Ces fils métalliques en parallèle démontrent une réponse passe-haut pour une onde plane incidente, dont le champ électrique est parallèle avec les fils [41]. Comme montré dans (la figure II.7(b)), le réseau cylindrique présente une permittivité négative en deçà de la fréquence de coupure, et on observe une réflexion totale. Ce comportement rappelle la diffusion des ondes électromagnétiques dans un environnement plasmatique.

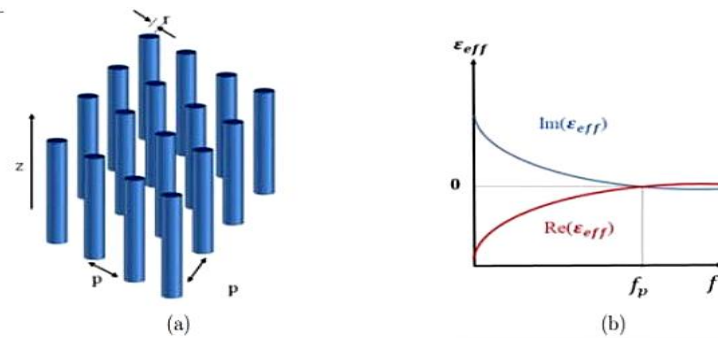


Figure II.7 : réseau de fils conducteurs minces (a), des tracés d'un réseau de fils (b)[40].

II.3.3.4 Les Matériaux doublement négatifs (DNG)

Les matériaux DNG (Double Négative) désignent des substances qui possèdent à la fois une permittivité et une perméabilité négatives en même temps. On peut produire ces métamatériaux à l'aide de cellules dites « imbriquées » ou « combinées ». Les caractéristiques des métamatériaux DNG ont été initialement déterminées en associant la structure ENG utilisant le fil mince à la structure MNG basée sur le SRR, comme démontré dans (la figure II.8). Cette association respecte la condition de $\varepsilon < 0$ à partir d'un fil/milieu rodé (utilisé comme diélectrique artificiel) et de $\mu < 0$ à partir d'un résonateur à anneaux fendus (SRR) [40].



Figure II.8: Combinaison de fils minces et SRR pour former des métamatériaux DNG [40].

II.3.4 Structure des métamatériaux SRR et CSRR

II.3.4.1 Structure métamatériaux SRR

Le Split Ring Resonator (SRR), une structure élaborée par Pendry [42], est également connu sous l'acronyme SRR. Elle comprend un ou plusieurs anneaux concentriques, réalisés en métaux non magnétiques et fréquemment positionnés sur un substrat diélectrique pour des motifs de commodité. Ces anneaux possèdent un rayon interne r et une largeur c , et ils sont interrompus par une fente de largeur p . Ils sont aussi distincts les uns des autres par une légère distance d . La structure adopte un comportement inductif en raison de sa configuration annulaire, tandis que les différentes lacunes présentent un comportement capacitif [42].

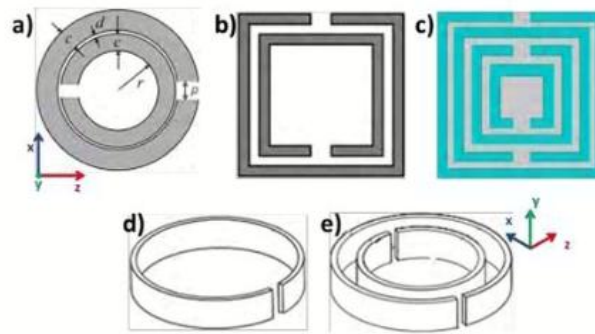


Figure II.9: Représentation schématique des différents types de cellules élémentaires de la structures SRR : En 2D a) Double SRR-rond, b) Double SRR-carré et c) Multi SRR-carré ; en 3D d) SRR-rond simple et d) SRR-rond double [42].

II.3.4.2 Structure métamatériaux CSRR

Contrairement à la SRR, la cellule complémentaire (CSRR) doit afficher une polarisation inversée. Dans ce cas, le vecteur $\vec{E}$ sera perpendiculaire au plan de métallisation alors que le vecteur $\vec{H}$ sera en parallèle avec celui-ci. Cette inversion des conditions de polarisation électromagnétique rend la cellule CSRR plus adaptée pour une application dans des dispositifs plans [43].

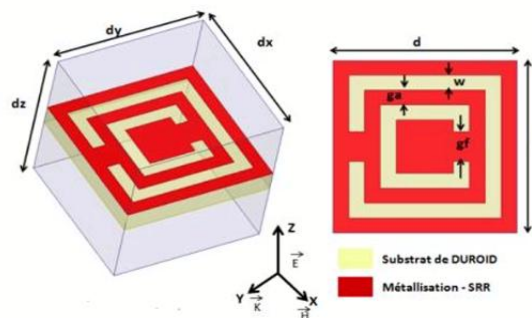


Figure II.10 : Configuration de la cellule unitaire CSRR dans sa boîte de calcul [43].

II.3.5 Applications des métamatériaux

Depuis l'apparition des matériaux artificiels main gauche, leur caractérisation et leur réalisation, les chercheurs et les ingénieurs se sont orientés vers l'étude de leurs différentes applications dans plusieurs domaines scientifiques et technologiques. Grâce à leurs propriétés électromagnétiques particulières, les métamatériaux ont permis le développement de solutions innovantes dans les domaines de l'optique, des micro-ondes et des télécommunications. Parmi leurs principales applications, on peut citer :

- **Les super-lentilles** : Dans le domaine de l'optique, l'une des applications les plus importantes des métamatériaux concerne la réalisation de super-lentilles utilisées notamment dans l'imagerie médicale. Ces lentilles possèdent la capacité de produire des images à très haute résolution sans déformation ni inversion. Les premières super - lentilles fonctionnant dans le domaine des micro-ondes ont été réalisées en 2004 [44][45].
- **Les dispositifs de masquage électromagnétique** : Les propriétés particulières des métamatériaux ont également permis le développement de dispositifs de masquage électromagnétique, souvent appelés capes d'invisibilité. Ces structures sont capables de détourner les ondes électromagnétiques autour d'un objet afin de le rendre difficilement détectable dans certaines bandes de fréquences. Les premières réalisations expérimentales dans le domaine des micro-ondes ont ouvert la voie à des recherches avancées dans ce domaine [46][47].
- **Les composants micro-ondes** : Aux fréquences micro-ondes, les métamatériaux sont utilisés dans la conception de plusieurs composants RF tels que les filtres, les résonateurs et les diviseurs de puissance. Leur intégration permet d'améliorer les performances électriques des composants tout en réduisant leurs dimensions physiques.
- **Les antennes micro-rubans** : L'intégration des métamatériaux dans les structures d'antennes micro-rubans permet de modifier la distribution des courants et des champs électromagnétiques au niveau de l'antenne, ce qui influence directement ses caractéristiques de rayonnement et ses performances globales.
- **La miniaturisation des antennes** : Plusieurs travaux de recherche ont montré l'impact positif des métamatériaux sur les performances des antennes patch [48]. Des structures telles que les résonateurs en anneaux fendus (*SRR : Split Ring Resonator*) ainsi que d'autres structures planaires ont été utilisées afin de réduire les dimensions physiques des antennes tout en conservant de bonnes performances de rayonnement.

- **L'amélioration des performances** : L'utilisation de structures à paramètres effectifs négatifs au niveau du patch rayonnant ou du plan de masse constitue une approche innovante permettant d'améliorer la bande passante, le gain et l'efficacité des antennes patch conventionnelles.
- **Les applications dans les systèmes modernes** : Les antennes basées sur les métamatériaux représentent aujourd'hui une solution prometteuse pour les technologies modernes de télécommunications, notamment les réseaux sans fil avancés, les applications IoT et les systèmes 5G nécessitant des antennes compactes et performantes.

II.4 SYSTEME MIMO TRADITIONNELLE

Technique MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) est une méthode de communication sans fil qui s'appuie sur l'utilisation simultané de plusieurs antennes pour l'émission et la réception, dans le but de transmettre une quantité plus importante de données. Elle utilise un phénomène appelé diffusion multi-trajets, où les ondes radio se réfléchissent sur des éléments comme les murs et les plafonds, parvenant au destinataire sous divers angles et à des instants légèrement décalés [49][50].

MIMO exploite cette complexité en utilisant ces trajets multiples pour générer des flux spatiaux indépendants, améliorant ainsi significativement les performances du système et la portée du signal [49][51]. En fusionnant intelligemment les signaux provenant de diverses sources, le récepteur est en mesure de recueillir une quantité d'informations plus importante de façon efficace.

Dans les systèmes MIMO, les antennes se basent sur le concept de diversité spatiale, ce qui permet d'utiliser des antennes supplémentaires. Quand le nombre d'antennes excède celui des flux spatiaux transmis, ces antennes supplémentaires aident à améliorer la solidité du signal reçu et à élargir la portée du réseau. Par conséquent, MIMO constitue un progrès technologique significatif dans l'amélioration des communications sans fil [50].

II.4.1 Principe du MIMO

Comme indiqué précédemment, le facteur principal qui perturbe un signal radio pendant 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 [49][50]. Contrairement aux systèmes de communication traditionnels qui tentent de réduire ces interférences, les systèmes MIMO exploitent ces perturbations pour optimiser la performance générale du réseau. Pour y parvenir, ils adoptent diverses formes de diversité, notamment :

La diversité spatiale : Également connue sous le nom de diversité d'antenne, elle implique l'utilisation de plusieurs antennes à l'émission et/ou à la réception afin de tirer parti des différentes versions du signal reçu par des trajets distincts [49][50].

La diversité fréquentielle : Elle consiste à émettre le même signal sur différentes fréquences, ce qui permet d'éviter les effets de décoloration sélective en fréquence. Cependant, cette technique exige une vigilance particulière sur la bande de cohérence du canal et sur la dispersion fréquentielle provoquée par les trajets multiples [50].

La diversité temporelle : Elle vise à transmettre le même signal à différents moments, exploitant ainsi les variations du canal au fil du temps. L'efficacité de cette méthode est particulièrement liée à la consistance temporelle du canal, à la rapidité de déplacement du terminal mobile, ainsi qu'à la fréquence porteuse utilisée [50].

De ce fait, en combinant judicieusement ces types de diversité, les systèmes MIMO favorisent l'amélioration de la fiabilité, du débit et de la portée des communications sans fil [49][50][51].

II.4.2 Architecture des systèmes MIMO

Selon le nombre d'antennes utilisées à l'émission et à la réception, plusieurs configurations sont possibles pour les systèmes MIMO. On identifie souvent quatre architectures fondamentales [49][50][52] :

- **SISO (Single Input Single Output) :** C'est la configuration la plus simple, avec une unique antenne à l'émetteur et une autre à la réception. Ce système n'exploite pas les bénéfices de la diversité spatiale, mais il est toujours utilisé dans des environnements de faible complexité.
- **SIMO (Single Input Multiple Output) :** Ce modèle comporte d'une seule antenne pour l'émission et de plusieurs pour la réception. Il offre la possibilité d'utiliser la variété des réceptions pour optimiser la qualité du signal en utilisant différentes trajectoires de propagation [50].
- **MISO (Multiple Input Single Output) :** Dans ce contexte, on utilise plusieurs antennes pour l'émission, alors qu'une seule est utilisée pour la réception. Ceci permet d'exploiter de la diversité en matière d'émission, ce qui peut renforcer la fiabilité de la transmission, particulièrement dans des contextes où l'évanouissement est fréquent [50][52].
- **MIMO (Multiple Input Multiple Output) :** Cette configuration regroupe plusieurs antennes – à la fois pour l'émission et la réception. Elle offre non seulement une plus

grande fiabilité par la diversité, mais également un accroissement notable du débit grâce au multiplexage spatial [49][50][52].

II.4.2.1 Système SISO

L'architecture SISO (Single Input Single Output) constitue l'architecture plus basique des communications sans fil. Il s'appuie sur l'utilisation d'une seule antenne à l'émetteur et d'une seule antenne au récepteur, comme le démontre la Figure II.11.



Figure II.11 : Schéma d'un système SISO[50].

L'un des avantages majeurs du système SISO est sa facilité d'implémentation. Il n'exige pas de gestion compliquée liée à des techniques de diversité (spatiale, fréquentielle ou temporelle), ce qui facilite son intégration et réduit son coût [50].

Cependant, cette architecture présente des limitations importantes :

Elle est plus sensible aux interférences et à la dégradation du signal (fading), car elle n'est pas en mesure d'utiliser plusieurs voies de transmission comme le font les systèmes MIMO [50].

La capacité du canal est restreinte et déterminée directement par la loi de Shannon, formulée comme suit [53] :

$$C = B \log_2(1 + \text{SNR}) \text{ [bits/s]} \quad \text{[II.3]}$$

Où :

C : la capacité du canal,

B : la largeur de bande,

SNR : le rapport signal sur bruit.

Donc, pour une bande passante donnée, l'accroissement du débit exige une amélioration du rapport signal/bruit (SNR), ce qui peut s'avérer compliqué dans des environnements bruités [53].

II.4.2.2 Système SIMO

Le système SIMO (Single Input Multiple Output) se base sur une unique antenne à l'émission et plusieurs à la réception, comme démontré dans la Figure II.12[50][54]. Cette

configuration est élaborée pour optimiser la qualité du signal capté en tirant parti de la diversité de réception.



Figure II.12: Schéma d'un système SIMO [50].

Cette structure, qui intègre plusieurs récepteurs, offre une réponse efficace contre les effets de l'évanouissement (fading) provoqués par le canal de propagation [50]. Les signaux captés par les diverses antennes, malgré quelques décalages ou atténuations, sont astucieusement fusionnés dans le but d'obtenir une version plus solide du signal initial [54].

L'amélioration du rapport signal sur bruit total (SNR) du système est due au fait qu'il représente la somme des SNR mesurés à chaque antenne de réception. Ceci favorise une réception plus fiable, même dans des conditions environnementales compliquées [50]. Historiquement, cette configuration a été mise en œuvre dans les stations de réception à ondes courtes, spécifiquement pour réduire les interférences ionosphériques et les disparitions, procurant ainsi une plus grande stabilité des communications sur de longues distances [54].

II.4.2.3 Système MISO

Le système MISO (Multiple Input Single Output), aussi appelé diversité de transmission, se base sur l'utilisation de plusieurs antennes pour l'émission et d'une unique antenne pour la réception, comme illustré dans la Figure II.13.



Figure II.13: Schéma d'un système MISO [50].

Dans cette architecture, les données identiques sont transmises de façon redondante par plusieurs antennes émettrices. Le récepteur, qui possède une seule antenne, capte alors plusieurs

variantes du signal grâce à diverses trajectoires de propagation. Puis, il peut choisir ou fusionner les signaux afin d'obtenir la qualité optimale, renforçant de ce fait la fiabilité de la transmission [50][54].

L'un des principaux avantages du MISO est que la complexité associée à la gestion des signaux et à leur diversité est transférée de l'émetteur vers le récepteur. Ceci est particulièrement bénéfique pour les appareils utilisateurs tels que les smartphones, où l'espace pour les antennes est restreint et où la minimisation de l'utilisation énergétique est déterminante [50].

Par conséquent, en diminuant la charge de traitement du côté récepteur, le système MISO aide à minimiser la taille, le coût et la consommation énergétique des appareils utilisateurs, allongeant ainsi la durée de vie de leur batterie tout en assurant une excellente qualité de réception [54].

II.4.2.4 Système MIMO

Le système MIMO (Multiple Input Multiple Output) s'appuie sur l'utilisation de multiples antennes tant pour l'émission que la réception, comme le démontre la Figure II.14.

À la différence des systèmes antérieurs, les antennes MIMO ne diffusent pas des copies identiques du signal, mais plutôt des flux de données distincts, qui sont transmis simultanément sur la même fréquence via divers chemins de propagation [49][50].

Un des concepts clés du MIMO est le traitement spatio-temporel du signal : en plus de la dimension temporelle, le système tire parti de la diversité spatiale offerte par les multiples antennes situées à divers emplacements. Ceci contribue à renforcer la solidité du signal et à accroître de manière significative les performances générales du réseau sans fil [52].



Figure II.14 : Schéma d'un système MIMO [50].

Le MIMO représente donc une progression logique des antennes intelligentes, qui ont été largement utilisées pour améliorer la qualité des transmissions sans fil [54].

Les systèmes MIMO se distinguent par deux approches principales :

- **Diversité spatiale** : Cette technique implique l'envoi ou la réception des copies du signal via plusieurs antennes, ce qui renforce la fiabilité du canal de communication en cas de pertes et d'interférences, en améliorant le rapport signal sur bruit [50][54].

- **Multiplexage spatial** : L'objectif ici est d'accroître la capacité de transmission. Plusieurs antennes envoient des flux de données séparés en même temps, utilisant des chemins indépendants pour transmettre davantage d'informations en parallèle, augmentant donc le débit sans élargir la largeur de bande [49][52].

II.4.3 Capacité d'un canal MIMO

L'idée de capacité de canal, mise en avant dans les années 1940, fait référence à la quantité d'information maximale qu'il est possible de transmettre par unité de temps et sur une bande de fréquence spécifique via un canal déterminé [53].

En ce qui concerne les systèmes MIMO, la capacité se présente comme un thème majeur d'analyse dans les publications récentes [49][50]. On suppose que la puissance totale moyenne transmise, symbolisée par P , reste constante. Quand le nombre d'antennes à l'émetteur N_t change, la puissance est distribuée équitablement entre elles afin que la somme totale des puissances diffusées reste identique à P . Dans le cas où l'émetteur n'a aucune donnée concernant l'état du canal, une distribution uniforme de la puissance est idéale en termes de capacité. Par conséquent, chaque émetteur diffuse une puissance de $\frac{P}{N_t}$.

Le calcul de la capacité repose essentiellement sur deux éléments : le modèle MIMO pris en compte et la distribution de la puissance entre les antennes d'émission. La formule ci-après exprime la capacité [49][50].

$$C = \log_2 \left(\det \left[I_{N_r} + \frac{P}{N_t} \cdot HH^* \right] \right) \text{ bps/Hz} \quad \text{[II.4]}$$

Où :

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

II.4.4 Avantages et limitations de la technologie MIMO

II.4.4.1 les avantages

La technologie MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) offre des avantages significatifs aux systèmes de communication sans fil moderne [49][50][52]. On peut mentionner parmi ses principaux atouts :

- **Augmentation du débit de données** : Le MIMO, en utilisant le multiplexage spatial, autorise la transmission simultanée de multiples flux de données à travers diverses antennes, sans nécessiter d'élargissement de la bande passante. Par exemple, un système MIMO 2x2 est capable de transmettre deux flux simultanément, ce qui double par conséquent sa capacité de transmission [49][50].

- **Amélioration de la fiabilité** : En utilisant diverses voies de diffusion du signal, MIMO diminue les impacts du fading. Si l'un des chemins est devenu atténué ou bloqué, les autres voies garantissent la persistance du signal, assurant par conséquent une stabilité accrue de la communication [52][54].
- **Optimisation de l'efficacité spectrale** : Cette technologie optimise l'usage du spectre disponible, ce qui permet de transmettre davantage d'informations sur la même fréquence [49][52].
- **Extension de la couverture** : MIMO, en améliorant la qualité du signal sans exiger une puissance d'émission plus forte, aide à étendre la portée du réseau [50].
- **Support des communications multi-utilisateurs** : MIMO est capable de gérer plusieurs utilisateurs en même temps, ce qui optimise l'administration des ressources et améliore la performance générale du réseau [49][52].

II.4.4.2 Limitations et défis

Malgré ses multiples avantages, MIMO présente également certaines limitations techniques [50][54] :

- **Complexité d'intégration** : L'insertion de multiples antennes est fréquemment problématique dans des dispositifs compacts tels que les téléphones intelligents, dû aux restrictions d'espace.
- **Dépendance à la configuration** : La performance optimale du système est étroitement liée à l'emplacement adéquat des antennes et à leur environnement, nécessitant donc une conception minutieuse.
- **Nécessité de canaux indépendants** : Afin de tirer parti de la diversité spatiale, il est primordial que les signaux transmis empruntent des canaux suffisamment indépendants. Toutefois, ceci n'est pas toujours possible, particulièrement dans des contextes où la diffusion est restreinte.
- **Consommation énergétique accrue** : L'utilisation de plusieurs antennes en même temps peut conduire à une hausse de la consommation d'énergie, ce qui constitue un inconvénient pour les appareils mobiles fonctionnant sur batterie.

II.5 CONCLUSION

Dans ce deuxième chapitre, nous avons présenté les différentes techniques de miniaturisation des antennes permettant de réduire leurs dimensions tout en maintenant des performances acceptables. Une attention particulière a été portée aux métamatériaux,

notamment aux structures SRR et CSRR, qui offrent des propriétés électromagnétiques particulières favorisant la miniaturisation et l'amélioration des caractéristiques des antennes.

Nous avons également étudié les principes fondamentaux des systèmes MIMO ainsi que leurs avantages dans les communications sans fil modernes, notamment l'amélioration de la capacité du canal, du gain et de la fiabilité des transmissions. Les notions théoriques présentées dans ce chapitre constituent une base essentielle pour la conception et l'optimisation de l'antenne proposée. Le chapitre suivant sera consacré à la simulation, à l'analyse des résultats et à l'évaluation des performances de l'antenne miniaturisée.

Bibliographie

- [1] CHU, Lan Jen. Physical Limitations of Omni-Directional Antennas. Journal of applied physics, 1948, vol. 19, no 12, p. 1163-1175.
- [2] M. JEREMY VALLOAU « Miniaturisation d'antennes Très Large Bande Pour Applications Spatiales » Thèse Doctorat De L'université De Toulouse 2016.
- [3] WHEELER, Harold A. Fundamental limitations of Small antennas. Proceedings of the IRE, 1947, vol. 35, no 12, p. 1479-1484.
- [4] HANSEN, Robert C. Fundamental limitations in antennas. Proceedings of the IEEE, 1981, vol. 69, no 2, p. 170-182.
- [5] Volakis, J. L., Chen, C. C., & Fujimoto, K. (2010). "Small antennas : miniaturization techniques & applications". Automatika. 53. 20-30. 10.7305/automatika.53-1.164.
- [6] Chorfi, H. (2012). "Conception d'un nouveau système d'antenne réseau conforme en onde millimétrique". Université du Quebec en Abitibi-Temiscamingue (Canada).
- [7] Pendry, J. B., Holden, A. J., Robbins, D. J., & Stewart, W. J. (1999). "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena". IEEE transactions on microwave theory and techniques, 47(11), 2075-2084.
- [8] YANG, L. (2020). "The measurement of antenna VSWR by means of a Vector Network Analyzer".
- [9] Arab, T. (2018). "Etude des matériaux composites (Titanate oxyde): application pour la réalisation des substrats d'antennes miniatures". Thèse de doctorat. Université de Setif.
- [10] Sarah Sufyar, " Contribution à l'étude d'antenne Miniature Reconfigurables en fréquence par association d'élément actifs ". Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2011.
- [11] Hamidah, M. N., Hikmaturokhman, A., & Wahyuningrum, R. D. (2023, November). "Assessing 5G Network Deployment Strategies in an Industrial Zone : A Case Study on Coverage and Capacity Planning". In 2023 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (COMNETSAT) (pp. 518-524). IEEE.
- [12] Stutzman, W. L., & Thiele, G. A. (2012). "Antenna theory and design". John Wiley & Sons.

- [13] McCartney, A. M., Hyland, E. M., Cormican, P., Moran, R. J., Webb, A. E., Lee, K. D., ... & O'Connell, M. J. (2019). "Gene Fusions derived by transcriptional readthrough are Driven by Segmental Duplication in Human". *Genome biology and evolution*, 11(9), 2678-2690.
- [14] Rakholiya, A. A., &Langhnoja, N. V. (2017). "A review on miniaturization techniques for microstrip patch antenna". *International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education*, 3(2), 4281-4287.
- [15] Veselago, V.G, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of permittivity and permeability". *Soviet Physics Uspekhi*, 1968. 10(4) : p 509-514.
- [16] Mandlshtam L. "Group velocity in a crystal lattice," *Zhurnal Eksperimentalnoi Teoreticheskoi Fiziki*, Vol. 15, 1945, pp. 476-478.
- [17] H. Lamb. "On group-velocity," In *Proc. London Math. Soc.*, pages 473–479, 1904.
- [18] H. C. Pocklington. "growth of a wave-group when the group-velocity is negative," *Nature*, vol. 71 :607–608, 1905.
- [19] W. Kock, "Metallic delay lenses," *Bell Syst. Tech. J.*, Vol. 27, pp. 58-82, 1948.
- [20] Malyuzhinets G.D. "A note on the radiation principle," *Zhurnal Technicheskoi Fiziki*, Vol. 21, 1951, pp. 940-942.
- [21] D.V. Sivukhin, "The energy of electromagnetic waves in dispersive media," *Opt. Spektrosk*, Vol. 3, 1957, pp. 308-312.
- [22] R.A. Silin, "Waveguiding properties of two-dimensional periodical slow-wave systems," *Voprosy Radioelektroniki. Elektronika*, Vol. 4, 1959, pp. 11-33.
- [23] J.B. Pendry, A.J. Holden, D.J. Robbins, et W.J. Stewart, "Extremely Low Frequency Plasmons in Metallic Meso structures", *Phys. Rev. Lett*, vol. 25, pp.4773-4776, 1996.
- [24] J.B. Pendry, A.J. Holden, D. J Robbins, et W.J. Stewart, "Magnetism from conductors and enhanced non linear phenomena". *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 47, p.2075-2084 (1999).
- [25] D.R. Smith, W.J. Padilla, D.C. Vier, S.C.N. Nasser, and S. Schultz, "Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity". *Phys. Rev. Lett.*84, p. 4184-4187 (2000).
- [26] G. V. Eleftheriades, A. K. Iyer and P. C. Kremer, "Planar negative refractive index media using periodically L-C loaded transmission lines," *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, Vol. 50, No. 12, pp. 2702-2712, 2002.

- [27] A.A. Oliner, “A periodic-structure negative-refractive-index medium without resonant elements,” IEEE-AP-S Digest, p. 41, 2002.
- [28] C. Caloz, Itoh T., “Application of the transmission line theory of left-handed (LH) materials to the realization of a microstrip LH line,” IEEE antennas and propagation society international symposium, Vol. 2, pp. 412-415, 2002.
- [29] W.S., Weiglhofer, Lakhtakia, A. “Introduction to complex mediums for optics and electromagnetics”. SPIE Press, Bellingham, WA, USA (2003).
- [30] R. Marqués, F. Martín, and M. Sorolla, “Metamaterials with Negative Parameters : Theory, Design and Microwave Applications” 1st ed., Wiley-Interscience, 2008.
- [31] C. M. Krowne, and Y. Zhang, “Physics of Negative Refraction and Negative Index Materials : Optical and Electronic Aspects and Diversified Approaches” 1st ed, Springer 2007.
- [32] T. J. Cui, D. R. Smith, and R. Liu, “Metamaterials : Theory, Design, and Applications” 1st ed., Springer, 2009.
- [33] N. Engheta, and R. W. Ziolkowski, “Electromagnetic Metamaterials : Physics and Engineering Explorations” 1st ed., Wiley-IEEE Press, 2006.
- [34] G. V. Eleftheriades, and K. G. Balmain, “Negative Refraction Metamaterials : Fundamental Principles and Applications” 1st ed., Wiley-IEEE Press, 2005.
- [35] C. Caloz, and T. Itoh, “Electromagnetic Metamaterials : Transmission Line Theory and Microwave Applications” 1st ed., Wiley-IEEE Press, 2005.
- [36] F. Capolino, “Theory and Phenomena of Metamaterial”. 1st ed. Taylor & Francis, 2009.
- [37] Filiberto Bilotti, Levent Sevgi, “Metamaterials: Definitions, Properties, Applications, and FDTD-Based Modeling and Simulation,” International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 22 pp 210-224, 2012.
- [38] Ferran Martín, “Artificial Transmission Lines for RF and Microwave Applications, ” 1st ed., Wiley-IEEE Press, 2015.
- [39] Walser, R. M. (2001, July). "Electromagnetic metamaterials". In Complex Mediums II : beyond linear isotropic dielectrics (Vol. 4467, pp. 1-15). SPIE.
- [40] Smith, D. R., & Kroll, N. (2000). "Negative refractive index in left-handed materials". Physical review letters, 85(14), 2933.
- [41] Canet-Ferrer, J. (Ed.). (2019). "Metamaterials and metasurfaces". BoD—Books on Demand.doi : 10.5772/intechopen.73359.

- [42] James, J. R., Hall, P. S., & Wood, C. (1986). Microstrip antenna : theory and design (Vol. 12). Iet.
- [43] Lalj, H. (2014). "Conception et caractérisation de filtres et systèmes antennaires reconfigurables chargés par des résonateurs Métamatériaux sub-longueurs d'onde". Thèse de doctorat, INSA de Rennes).
- [44] A. I. Afifi, A. B. Abdel-Rahman, A. Allam, et A. S. A. El-Hameed, « A compact ultra wideband monopole antenna for breast cancer detection », in 2016 IEEE 59th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2016, doi : 10.1109/MWSCAS.2016.7870066.
- [45] D. Shukla, « Latest Trends in Microwave Bioimaging & Diagnostic Technology », International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, vol. 4, no 5, p. 4464-4469, mai 2015.
- [46] S. Adnan, R. A. Abd-Alhameed, C. H. See, H. I. Hraga, I. T. E. Elfergani, et D. Zhou, « A Compact UWB Antenna Design for Breast Cancer Detection », PIERS Online, vol. 6, no 2, p. 129-132, 2010, doi: 10.2529/PIERS091029055334.
- [47] M. A. Al-Joumayly, S. M. Aguilar, N. Behdad, et S. C. Hagness, « Dual-Band Miniaturized Patch Antennas for Microwave Breast Imaging », Antennas Wirel. Propag. Lett., vol. 9, p. 268-271, 2010, doi : 10.1109/LAWP.2010.2045871.
- [48] HASSAINE Nawel épouse SELADJI « Conception d'antennes microrubans miniatures pour différents standards de communications sans fil » Thèse doctorat, Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen – Faculté de TECHNOLOGIE ,08 novembre 2020.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] N. Hassan and X. Fernando, "Massive MIMO Wireless Networks: An Overview," Electronics, vol. 6, no. 3, p. 63, 5 Sept. 2017.
- [52] 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.

- **[53]** C. E. Shannon, “A mathematical theory of communication,” Bell System Technical Journal, vol. 27, no. 3, pp. 379–423, 1948.
- **[54]** S. ShahbazPanahi and Y. Jing, in Academic Press Library in Signal Processing, vol. 7, Academic Press, 2018.

Chapitre III : Résultats et simulations

III.1 INTRODUCTION

A partir des connaissances théoriques acquises dans les chapitres précédents, notamment sur les antennes patch, les métamatériaux et les systèmes MIMO, nous allons à présent passer à la phase de conception et de simulation des différentes structures d'antennes imprimées sous l'environnement CST. L'objectif est de traduire ces fondements théoriques en résultats concrets et mesurables à l'aide d'un outil de simulation numérique.

Dans un premier temps, nous présenterons l'environnement de simulation choisi, à savoir le logiciel CST Studio Suite, en décrivant son interface et ses capacités de modélisation électromagnétique. Nous justifierons ensuite le choix du substrat utilisé pour la fabrication de notre antenne. La partie centrale du chapitre sera consacrée à la conception progressive d'une antenne patch rectangulaire : partant d'un modèle initial de base, nous procéderons à des ajustements successifs afin d'optimiser ses performances, puis nous proposerons un nouveau modèle intégrant une structure DGS. Nous aborderons par la suite la miniaturisation de l'antenne par intégration des cellules métamatériaux SRR et CSRR, en étudiant leur impact avant et après adaptation. Une étude comparative des dimensions obtenues permettra de quantifier le gain apporté par ces structures. Enfin, le chapitre s'achèvera par la conception d'un réseau MIMO à deux éléments, ouvrant ainsi la voie aux applications multi-antennes exigées par la 5G et l'IOT.

III.2 PRESENTATION DE L'ENVIRONNEMENT DE SIMULATION

III.2.1 Présentation du logiciel CST Studio Suite

CST Studio Suite est un logiciel de simulation électromagnétique créé en 1992 et développé au fil des années afin de proposer des solutions de calcul performantes et précises dans le domaine de la conception électromagnétique [1][2]. Il est largement utilisé dans la modélisation et l'analyse des composants haute fréquence tels que les antennes, les filtres, les coupleurs et les structures micro-ondes.

Parmi les modules les plus connus du logiciel figure CST Microwave Studio (CST MWS), spécialement conçu pour la simulation électromagnétique tridimensionnelle (3D) des composants haute fréquence. Ce module permet d'étudier le comportement des structures électromagnétiques et d'analyser leurs performances avec une grande précision.

Les simulations réalisées avec CST MWS reposent principalement sur la méthode des intégrales finies (*FIT : Finite Integration Technique*), qui permet de résoudre les problèmes électromagnétiques à partir des équations de Maxwell sous leur forme intégrale [3][4]. Cette

méthode offre une grande précision dans l'analyse des phénomènes électromagnétiques complexes.

Le logiciel présente plusieurs avantages importants :

- Il permet de simuler différents types de structures, homogènes ou inhomogènes, indépendamment de la technologie utilisée [5][6].
- Il offre une modélisation 3D précise des composants électromagnétiques et micro-ondes.
- Il permet l'analyse et l'optimisation des performances des antennes et des circuits RF.
- Il dispose d'interfaces de visualisation facilitant l'interprétation des résultats de simulation.
- Il est largement utilisé dans la recherche scientifique ainsi que dans le domaine industriel pour la conception et l'optimisation des systèmes électromagnétiques.

Cependant, malgré ses nombreux avantages, le logiciel présente également certaines limites :

- Les simulations nécessitent d'importantes ressources informatiques, notamment en mémoire et en capacité de calcul.
- Les calculs impliquent souvent la résolution de grands systèmes matriciels, ce qui peut augmenter le temps de simulation.
- Une bonne maîtrise du logiciel est nécessaire avant de réaliser des projets complexes, particulièrement lors de la conception de structures non conventionnelles et de la définition des conditions aux limites afin d'éviter les erreurs de simulation [3].
- La durée de simulation varie selon la complexité et la taille du projet étudié, ce qui peut rendre certaines analyses longues et coûteuses en temps.

Ainsi, CST Studio Suite constitue aujourd'hui l'un des outils les plus performants dans le domaine de la simulation électromagnétique, grâce à sa précision, sa flexibilité et ses nombreuses fonctionnalités adaptées à la conception des systèmes haute fréquence modernes.

III.2.2 Description générale du logiciel

Tout d'abord, pour lancer une simulation, il est nécessaire d'ouvrir le logiciel afin d'accéder à l'interface principale permettant la création d'un nouveau projet, comme illustré dans la Figure (II-1). Ensuite, il faut sélectionner l'option « Create Project ».

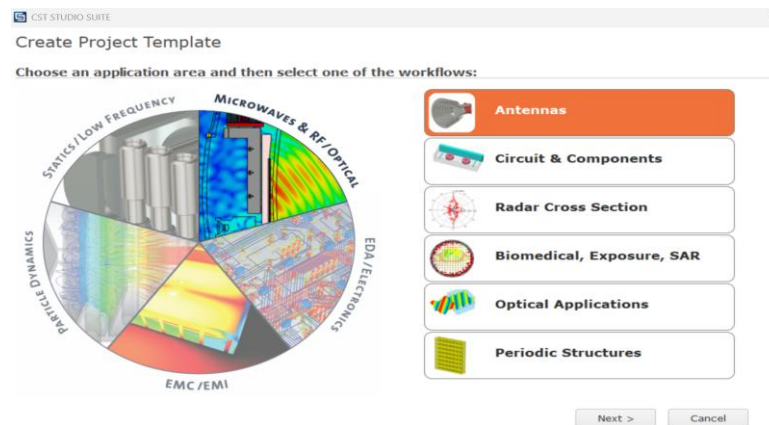


Figure III.1 : Création d'un nouveau projet.

Après avoir cliqué sur 'NEXT', on passera au choix de type d'antenne qu'on va la réaliser.

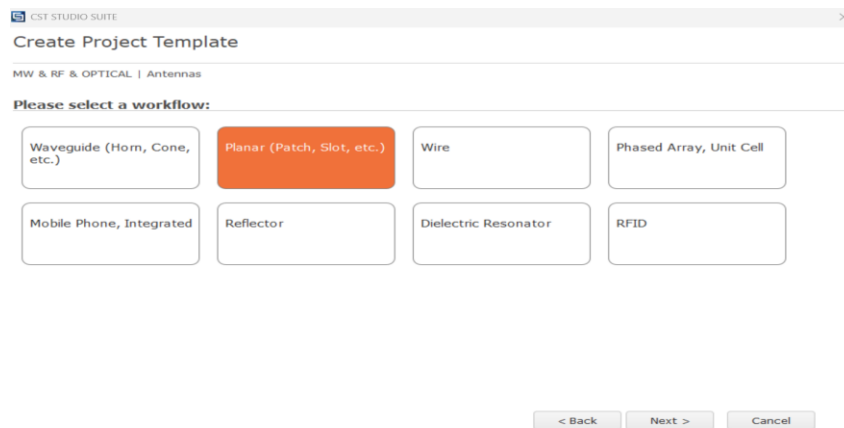


Figure III. 2 : Choix du type d'antenne.

Contrairement à certains logiciels de simulation électromagnétique, CST Studio Suite propose plusieurs techniques de simulation afin de répondre aux besoins de différents domaines de recherche et d'applications électromagnétiques. Parmi les méthodes disponibles dans le logiciel, nous nous intéressons particulièrement à la méthode du **domaine temporel** (*Time Domain*), largement utilisée pour l'analyse des structures haute fréquence et des antennes.

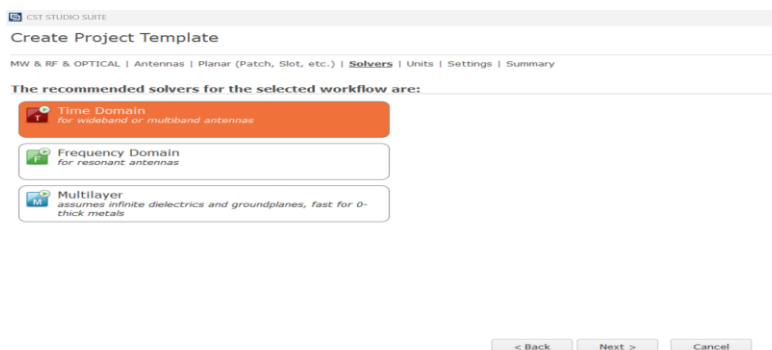


Figure III.3 : Choix de la technique de simulation.

Puis, on effectue les unités de différents paramètres utilisés pour la conception de l'antenne proposée.

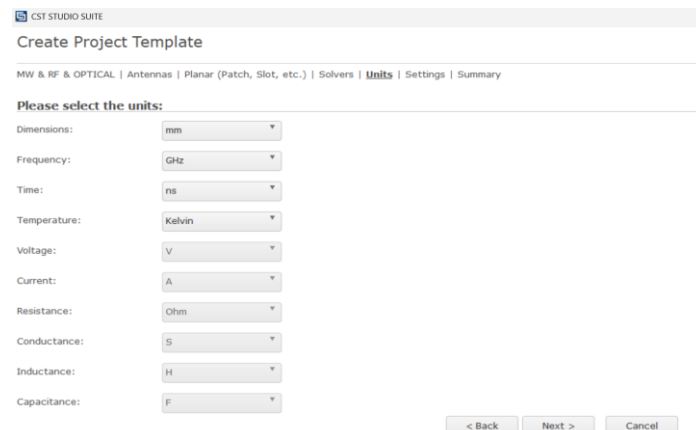


Figure III. 4: Choix des unités de différents paramètres.

Ensuite, on définit les fréquences minimale (2) et maximale (10), puis on mentionne le champ électrique (E-Field), le champ magnétique (H-Field) et le rayonnement lointain (Farfield). Enfin, on définit notre fréquence de résonance.

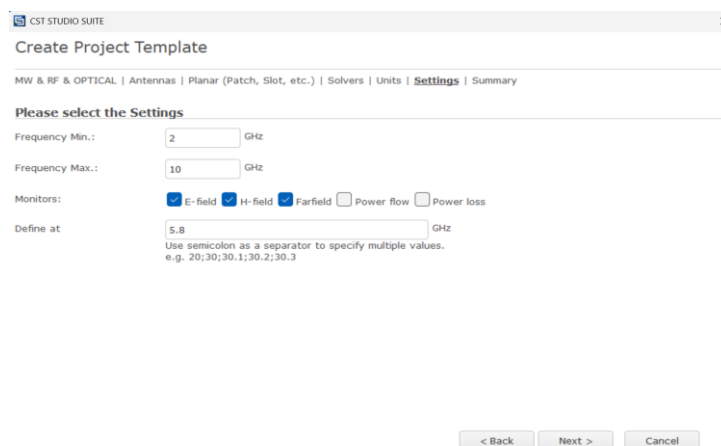


Figure III.5: Définir la fréquence.

En fin, on clique sur 'Finish' dans la fenêtre ci-dessous pour terminer la création du projet.

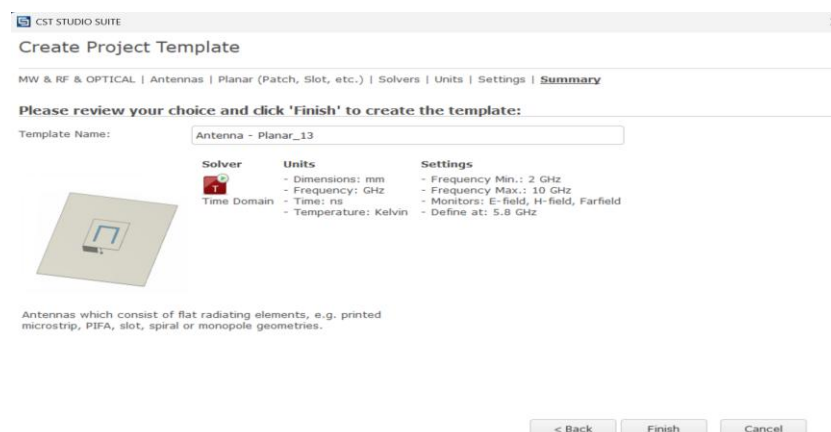


Figure III.6: Finalisation de création.

III.2.3 Interface du CST

L'interface utilisateur de CST Studio Suite est commune à l'ensemble des modules du logiciel, offrant ainsi un environnement de travail cohérent et facilitant la prise en main lors de l'utilisation de différentes simulations. Les principaux outils sont regroupés au niveau du ruban principal, permettant un accès rapide aux différentes fonctionnalités. L'interface intègre également les outils nécessaires à la modélisation des structures, à la gestion des simulations ainsi qu'au post-traitement et à l'analyse des résultats obtenus.

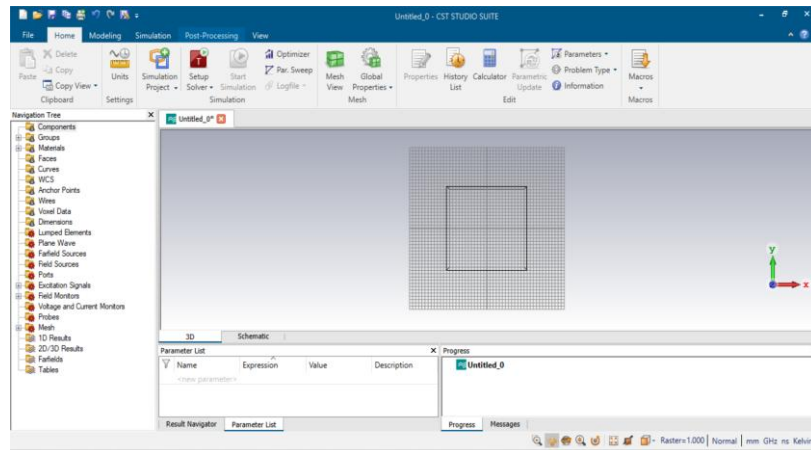


Figure III. 7 : Interface principale de logiciel CST.

III.3 CHOIX DES SUBSTRATS

Dans cette étude, nous nous intéressons au choix du substrat utilisé dans la conception de l'antenne proposée. Trois types de matériaux ont été considérés, à savoir le FR4, le Rogers et le silicon, afin d'analyser leur influence sur les performances électromagnétiques de l'antenne. Chaque substrat possède des caractéristiques électriques et mécaniques spécifiques, notamment la permittivité relative, les pertes diélectriques et la flexibilité, ce qui peut impacter directement la fréquence de résonance, le gain et l'adaptation d'impédance. Ainsi, une étude comparative est réalisée afin de sélectionner le substrat le plus adapté à l'application visée et d'optimiser les performances globales de l'antenne.

- **FR4** : Substrat économique à base de fibre de verre et d'époxy, largement utilisé en électronique, mais avec des pertes diélectriques élevées limitant ses performances en haute fréquence.
- **Roger** : Substrat haute performance destiné aux applications RF et micro-ondes, caractérisé par de très faibles pertes et une excellente efficacité de rayonnement.
- **Silicon** : Substrat flexible utilisé pour les antennes déformables ou portables, offrant une bonne flexibilité mécanique mais des performances électriques moins stables.

III.4 CONCEPTION ET SIMULATION D'UNE ANTENNE PATCH RECTANGULAIRE

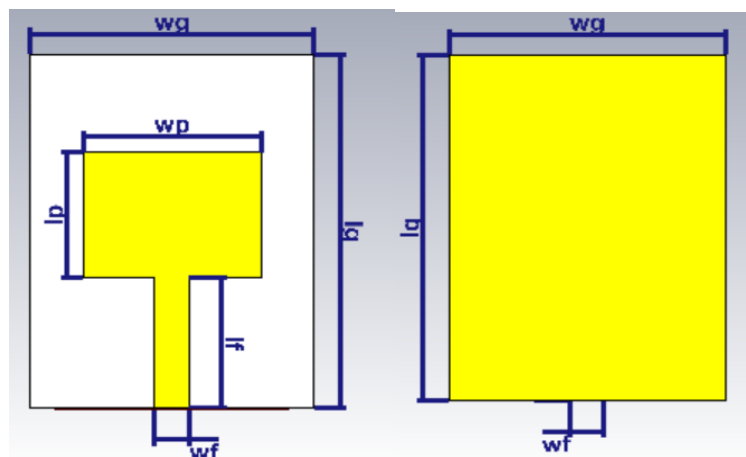
Dans cette section, nous allons réaliser une simulation d'une antenne patch rectangulaire alimentée par une ligne micro-ruban et coaxial à 50ohms. Le cahier des charges suivant a été utilisé :

Tableau III. 1: Cahier de charge de l'antenne proposée.

Les composants de l'antenne	Le type de matériaux	La hauteur (mm)	Permittivité diélectrique
Le patch	Cuivre	0.035	---
Le plan de masse	Cuivre	0.035	---
Les substrats	FR4	1.56	4.3
	Roger		2.2
	Silicon		11.9
Ligne d'alimentation	Cuivre	0.035	---

L'antenne simulée est donnée par la figure III.8 :

- Avec alimentation micro-ruban :



Vue de face.

Vue d'arrière.

Figure III.8: Géométrie de l'antenne rectangulaire alimentée par ligne micro-ruban.

- Avec alimentation coaxial :

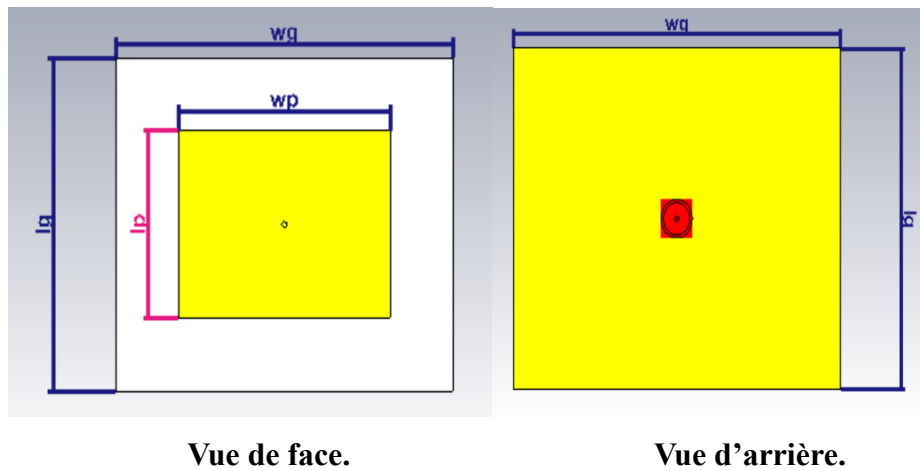


Figure III. 9: Géométrie de l'antenne rectangulaire alimentée par ligne coaxial.

Les équations suivantes permettent de calculer les dimensions de l'antenne patch rectangulaire :

Tableau III. 2 : Paramètres de l'antenne patch rectangulaire.

Paramètres de l'antenne	Équations
Largeur du patch	$W_p = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$
Longueur du patch	$L_p = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 0.824h \left(\frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.8 \right)} \right)$
Permittivité relative effective	$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \left(\frac{h}{w} \right)}} \right]$
Longueur du substrat	$L_g = L_f + 6 \cdot h + L_p$
Longueur effective	$L_f = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_r}}$
Largeur du substrat	$W_g = 6 \cdot h + W_p$

Où : f_r : Fréquence de Résonance.

ϵ_r : Permittivite de substrat .

h : l'épaisseur du substrat.

Remarque : Dans la ligne coaxial le paramètre L_f n'existe pas : $L_g = 6 \cdot h + L_p$.

III.5 ETUDE DE L'ANTENNE

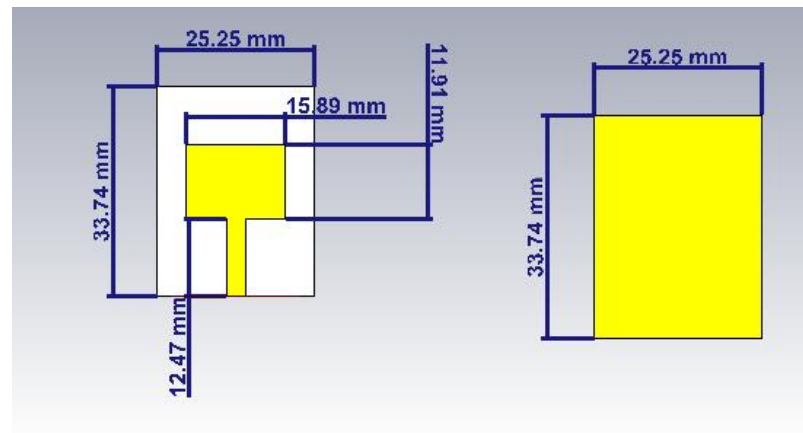
III.5.1 Antenne rectangulaire

III.5.1.1 Antenne rectangulaire initiale

➤ Micro-ruban

a) En utilisant le Substrat en FR4

L'antenne est alimentée par une ligne micro-ruban. La face arrière du substrat est entièrement recouverte par un plan de masse, comme illustré à la Figure III.10 :



Vue de face.

Vue d'arrière.

Figure III. 10: Antenne rectangulaire initiale alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).

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

Tableau III. 3: Dimensions de l'antenne rectangulaire initiale alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).

Paramètres	T	h	wf	lp	lf	wp	wg	lg
Dimensions (mm)	0.035	1.56	3.058	11.906	12.471	15.886	25.246	33.737

La simulation de cette configuration initiale a été effectuée sous environnement CST Microwave Studio. Le coefficient de réflexion S11 en fonction de la fréquence sur un intervalle qui s'étale de 2 à 10 GHz est illustré par la figure III.11.

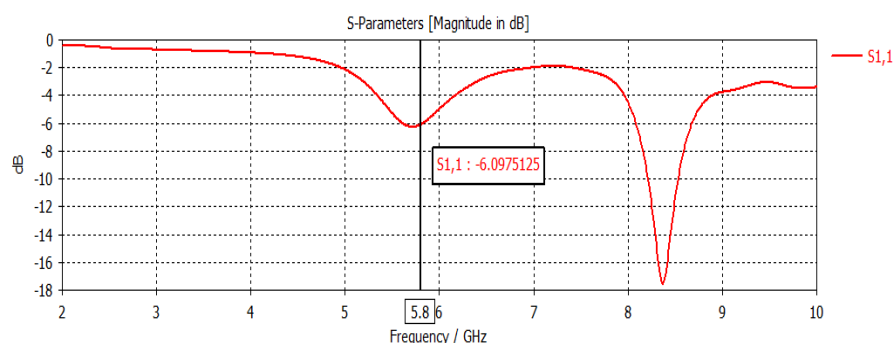


Figure III. 11: Coefficient de réflexion de l'antenne initiale alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).

Cette figure présente le coefficient de réflexion S11 de l'antenne rectangulaire initiale réalisée sur un substrat FR4, obtenu à l'aide du logiciel CST Studio Suite. Le paramètre S11 permet d'évaluer l'adaptation de l'antenne et ses fréquences de résonance.

On observe une première résonance autour de 5,8 GHz avec une valeur approximative de $S_{11} = -6$ dB, indiquant que l'antenne est partiellement adaptée à cette fréquence mais que les pertes par réflexion restent relativement importantes. Une seconde résonance plus prononcée apparaît vers 8,3 GHz avec une valeur inférieure à -18 dB, traduisant une meilleure adaptation de l'antenne à cette fréquence.

Ces résultats montrent que l'antenne possède un comportement multi bande, mais qu'une optimisation supplémentaire est nécessaire afin d'améliorer l'adaptation à 5,8 GHz et d'atteindre une valeur de S_{11} inférieure à -10 dB, critère généralement recherché pour assurer de bonnes performances de rayonnement.

b) En utilisant le Substrat en Roger

L'antenne est alimentée par une ligne micro-ruban. La face arrière du substrat est entièrement recouverte par un plan de masse, comme illustré à la Figure III.12 :

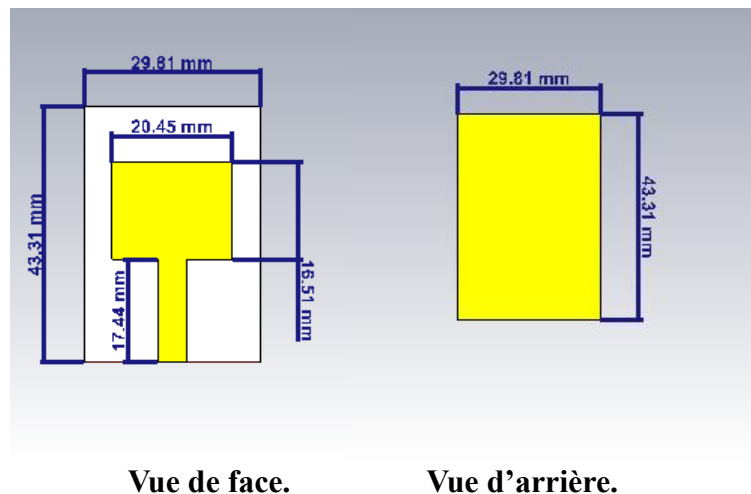


Figure III.12: Antenne rectangulaire initiale alimentée par la ligne micro-ruban (Roger).

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

Tableau III. 4: Dimensions de l'antenne rectangulaire initiale alimentée par la ligne micro-ruban (Roger).

Paramètres	T	h	wf	lp	lf	wp	wg	lg
Dimensions (mm)	0.035	1.56	4.846	16.511	17.436	20.445	29.805	43.307

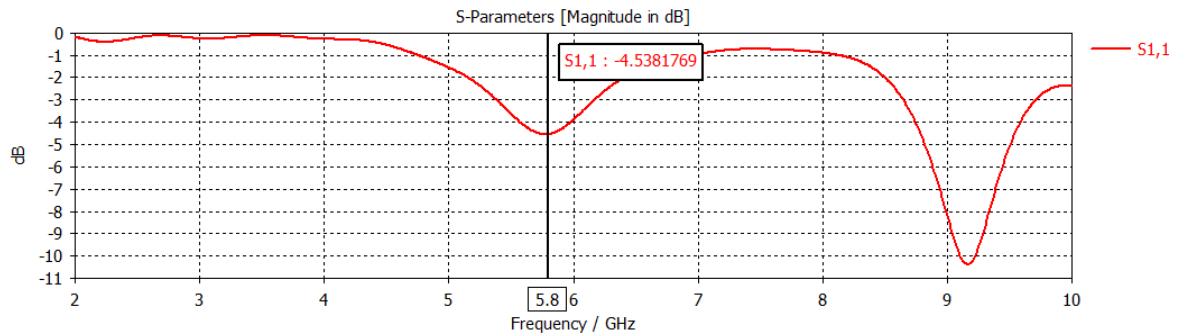


Figure III. 13 : Coefficient de réflexion de l'antenne initiale alimentée par la ligne micro-ruban (Roger).

La figure III.13 présente le coefficient de réflexion s_{11} de l'antenne rectangulaire initiale réalisée sur un substrat Roger et alimentée par une ligne micro-ruban. On observe une fréquence de résonance autour de 5,8 GHz, où la valeur du coefficient de réflexion atteint environ $-4,54$ dB. Cette valeur reste supérieure au critère généralement admis de -10 dB pour une bonne adaptation d'impédance, ce qui indique que l'antenne n'est pas correctement adaptée à cette fréquence. Une partie importante de la puissance incidente est donc réfléchiée vers la source au lieu d'être rayonnée. Ainsi, bien que l'antenne présente une résonance à 5,8 GHz, ses performances d'adaptation demeurent insuffisantes et nécessitent une optimisation de sa géométrie ou de son système d'alimentation afin d'améliorer le transfert de puissance et de réduire les pertes par réflexion.

c) En utilisant le Substrat en Silicon

L'antenne est alimentée par une ligne micro-ruban. La face arrière du substrat est entièrement recouverte par un plan de masse, comme illustré à la Figure III.14 :

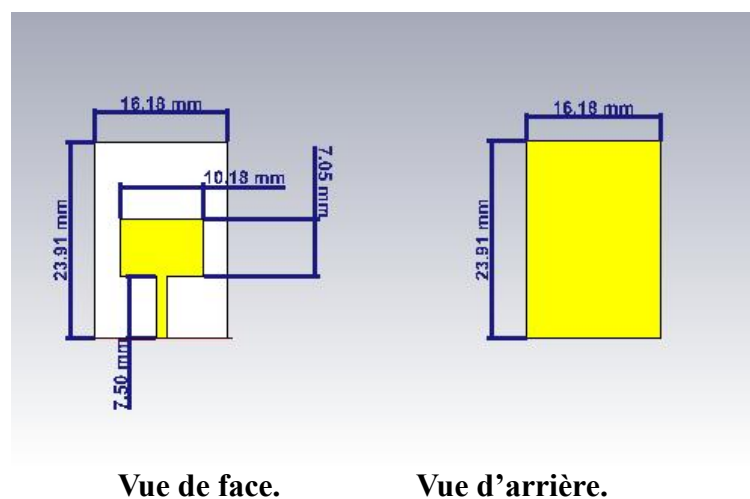


Figure III. 14: Antenne rectangulaire initiale alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).

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

Tableau III. 5: Dimensions de l'antenne rectangulaire initiale alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).

Paramètres	T	h	wf	lp	lf	wp	wg	lg
Dimensions (mm)	0.035	1.56	1.238	7.048	7.497	10.183	16.183	23.905

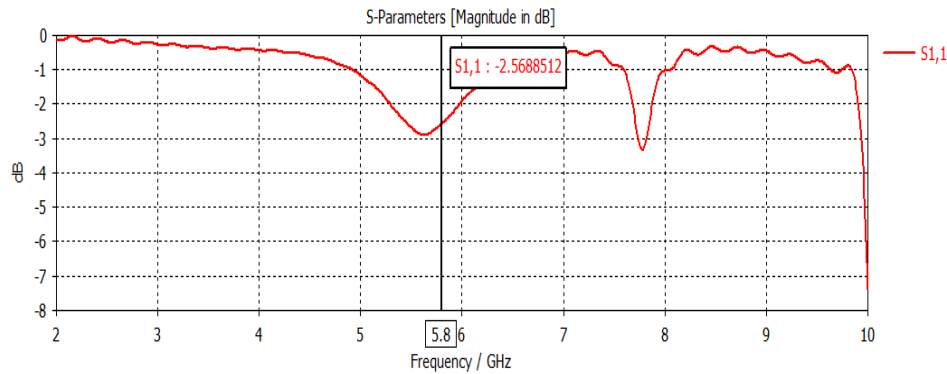


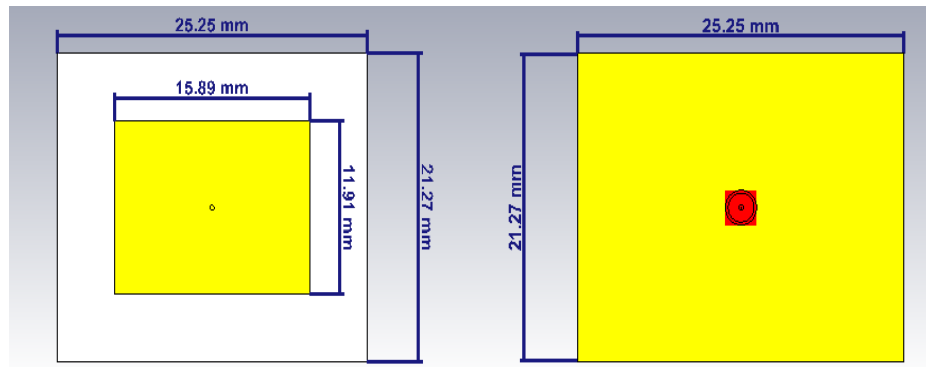
Figure III. 15: Coefficient de réflexion de l'antenne initiale alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).

La figure III.15 présente le coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne rectangulaire initiale réalisée sur un substrat en silicon et alimentée par une ligne micro-ruban. À la fréquence de résonance de 5,8 GHz, la valeur du coefficient de réflexion est d'environ $-2,57$ dB. Cette valeur étant largement supérieure au seuil de -10 dB, l'antenne présente une mauvaise adaptation d'impédance à cette fréquence. Par conséquent, une part importante de la puissance incidente est réfléchiée vers la source, ce qui limite les performances de rayonnement de l'antenne. Ces résultats montrent que la structure nécessite une optimisation afin d'améliorer son adaptation et son efficacité de fonctionnement à 5,8 GHz.

➤ Coaxial

a) En utilisant le Substrat en FR4

L'antenne est alimentée par une sonde coaxiale assurant l'excitation de l'élément rayonnant. La face arrière du substrat est entièrement recouverte par un plan de masse métallique, comme illustré à la Figure III.16.



Vue de face.

Vue d'arrière.

Figure III. 16: Antenne rectangulaire initiale alimentée par un câble coaxial (FR4).

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

Tableau III. 6 : Dimensions de l'antenne rectangulaire initiale alimentée par un câble coaxial (FR4).

Paramètres	Wg	k	x	y	T	inner	h	outer	lp	wp	lg
Dimensions (mm)	25.246	-5	0	0	0.035	0.3549/2	1.56	2/2	11.906	15.886	21.266

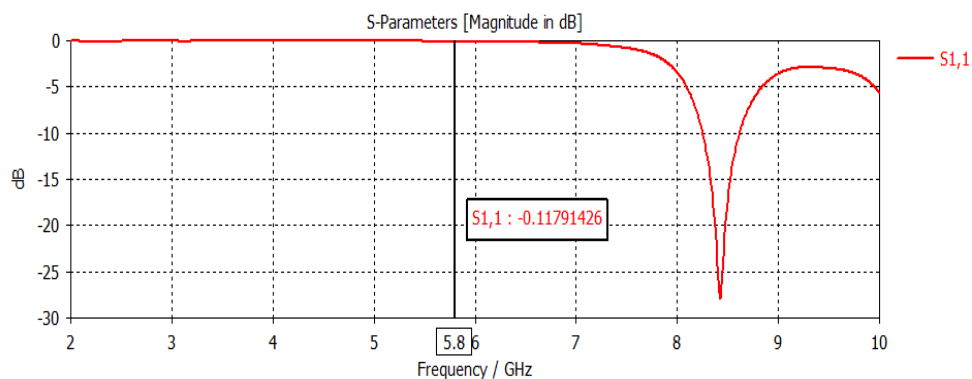


Figure III. 17: Coefficient de réflexion de l'antenne initiale alimentée par un câble coaxial (FR4).

Cette figure présente le coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne rectangulaire initiale réalisée sur un substrat FR4 et alimentée par un câble coaxial. Les résultats ont été obtenus à l'aide du logiciel CST Studio Suite afin d'évaluer l'adaptation de l'antenne et sa fréquence de résonance.

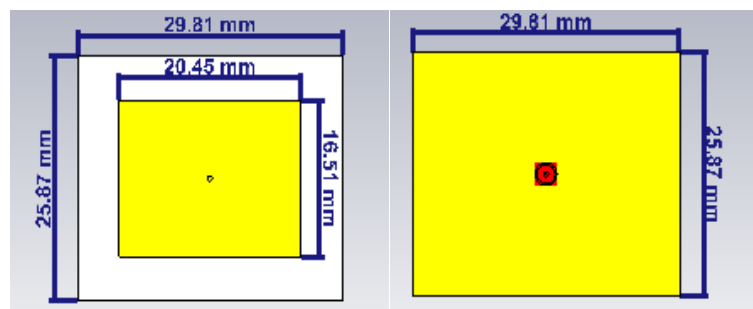
On remarque qu'à la fréquence de 5,8 GHz, la valeur du coefficient S_{11} est proche de 0 dB, ce qui indique une mauvaise adaptation de l'antenne à cette fréquence et une forte réflexion de la puissance incidente. En revanche, une résonance importante apparaît autour de 8,4 GHz

avec une valeur de S_{11} atteignant environ -28 dB, traduisant une excellente adaptation de l'antenne à cette fréquence.

Ces résultats montrent que l'antenne alimentée par câble coaxial ne résonne pas efficacement à 5,8 GHz dans sa configuration initiale. Une optimisation des dimensions de l'antenne ou de la position d'alimentation est donc nécessaire afin de déplacer la fréquence de résonance vers 5,8 GHz et d'obtenir une meilleure adaptation ($S_{11} < -10$ dB).

b) En utilisant le Substrat en Roger

L'antenne est alimentée par une sonde coaxiale assurant l'excitation de l'élément rayonnant. La face arrière du substrat est entièrement recouverte par un plan de masse métallique, comme illustré à la Figure III.18.



Vue de face.

Vue d'arrière.

Figure III. 18: Antenne rectangulaire initiale alimentée par un câble coaxial (Roger).

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

Tableau III. 7 : Dimensions de l'antenne rectangulaire initiale alimentée par un câble coaxial (Roger).

Paramètres	Wg	k	x	y	T	inner	h	outer	lp	wp	lg
Dimensions (mm)	29.805	-5	0	0	0.035	0.5806/2	1.56	2/2	25.871	20.445	25.871

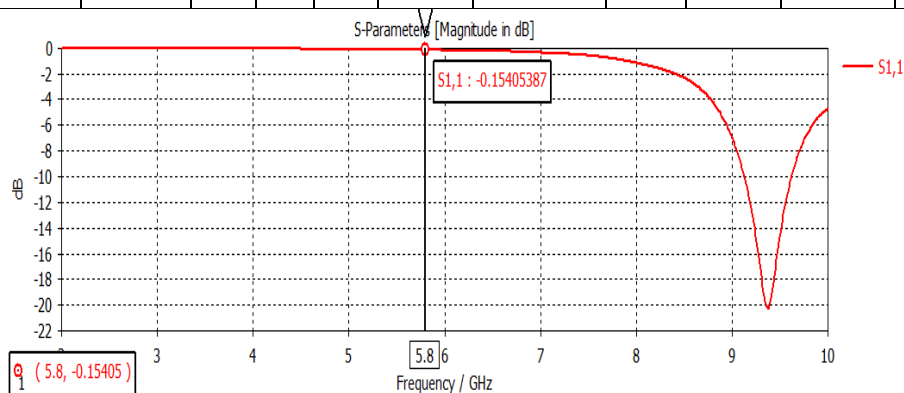


Figure III. 19: Coefficient de réflexion de l'antenne initiale alimentée par un câble coaxial (Roger).

La Figure III.19 présente le coefficient de réflexion S11 de l'antenne rectangulaire initiale réalisée sur un substrat Roger et alimentée par un câble coaxial. Ce paramètre caractérise l'adaptation d'impédance entre l'antenne et la source d'alimentation.

À la fréquence de 5,8 GHz, la valeur de S11 est d'environ $-0,15$ dB, ce qui indique que l'antenne est très mal adaptée à cette fréquence. En effet, une valeur de S11 proche de 0 dB signifie qu'une grande partie de la puissance incidente est réfléchiée vers la source au lieu d'être rayonnée par l'antenne. Par conséquent, le transfert d'énergie est peu efficace et les performances de rayonnement de l'antenne sont fortement dégradées à 5,8 GHz.

Cette courbe montre donc que la structure initiale ne permet pas d'obtenir une adaptation satisfaisante dans la bande de fréquence visée. Une optimisation de la géométrie de l'antenne ou de sa méthode d'alimentation est nécessaire afin d'améliorer l'adaptation et de réduire les pertes par réflexion à 5,8 GHz.

c) En utilisant le Substrat en Silicon

L'antenne est alimentée par une sonde coaxiale assurant l'excitation de l'élément rayonnant. La face arrière du substrat est entièrement recouverte par un plan de masse métallique, comme illustré à la Figure III.20.

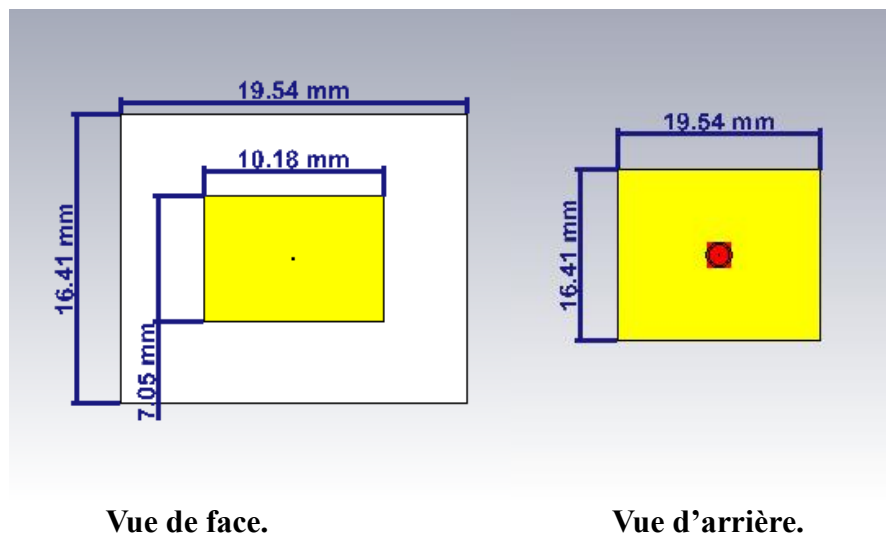


Figure III. 20: Antenne rectangulaire initiale alimentée par un câble coaxial (Silicon).

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

Tableau III. 8: Dimensions de l'antenne rectangulaire initiale alimentée par un câble coaxial (Silicon).

Paramètres	Wg	k	x	y	T	inner	h	outer	lp	wp	lg
Dimensions (mm)	19.543	-5	0	0	0.035	0.11265/2	1.56	2/2	7.048	10.183	16.408

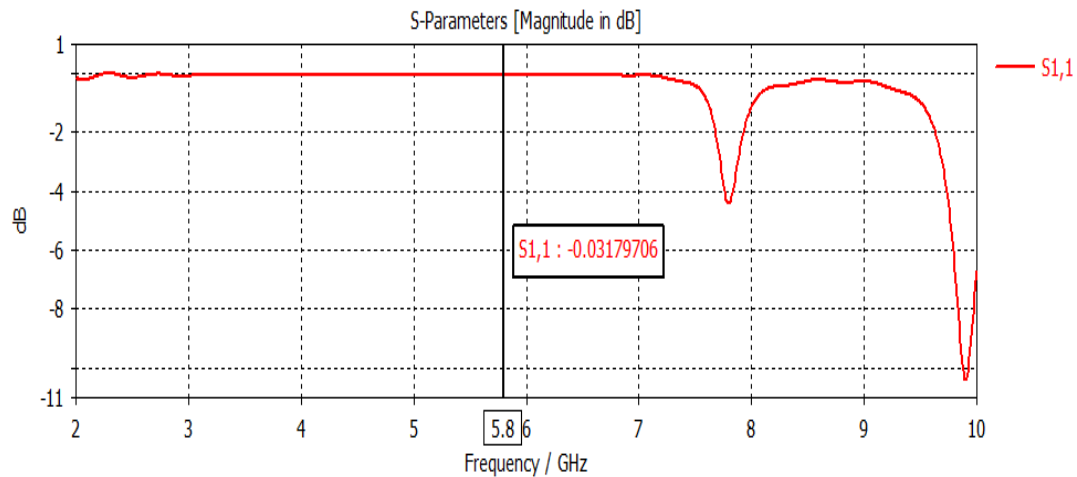


Figure III. 21: Coefficient de réflexion de l'antenne initiale alimentée par un câble coaxial (Silicon).

Cette figure présente le coefficient de réflexion S11 de l'antenne rectangulaire initiale réalisée sur un substrat en silicon et alimentée par un câble coaxial, obtenu à l'aide du logiciel CST Studio Suite. Le paramètre S11 permet d'évaluer l'adaptation de l'antenne et ses fréquences de résonance.

On observe une résonance autour de 5.8 GHz avec une valeur approximative de $S_{11} = -0.12$ dB, indiquant que l'antenne est mal adaptée à cette fréquence et que les pertes par réflexion sont très importantes.

Une seconde résonance plus prononcée apparaît vers 8.4 GHz avec une valeur inférieure à -27 dB, traduisant une meilleure adaptation de l'antenne à cette fréquence.

Ces résultats montrent que l'antenne possède un comportement multi-bande, mais qu'une optimisation supplémentaire est nécessaire afin d'améliorer l'adaptation à 5.8 GHz et d'atteindre une valeur de S11 inférieure à -10 dB, critère généralement recherché pour assurer de bonnes performances de rayonnement.

III.5.1.2 Antenne rectangulaire adaptée

➤ Micro-ruban

a) En utilisant le Substrat en FR4

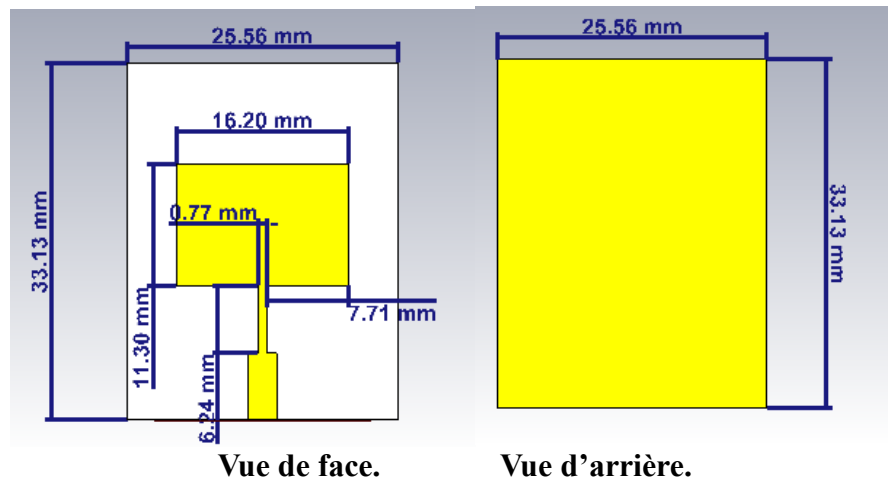


Figure III. 22: Antenne rectangulaire adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).

Cette figure présente la géométrie de l'antenne rectangulaire adaptée réalisée sur un substrat FR4 et alimentée par une ligne micro-ruban. La vue de face montre le patch rectangulaire comportant des encoches, tandis que la vue arrière représente le plan de masse métallique de l'antenne.

L'intégration des encoches dans le patch permet de modifier la circulation du courant de surface, ce qui améliore l'adaptation d'impédance et contribue à ajuster la fréquence de résonance de l'antenne. Cette technique permet également d'optimiser les performances de rayonnement et de réduire les pertes par réflexion.

Ainsi, cette configuration adaptée vise à assurer un meilleur fonctionnement de l'antenne dans la bande de fréquence souhaitée avec une adaptation plus efficace par rapport à l'antenne rectangulaire initiale.

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

Tableau III. 9 : Dimensions de l'antenne rectangulaire adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).

Paramètres	T	h	wf	lp	lf	wp	wg	lg
Dimensions (mm)	0.035	1.56	2.71	11.299	12.471	16.199	25.559	33.13

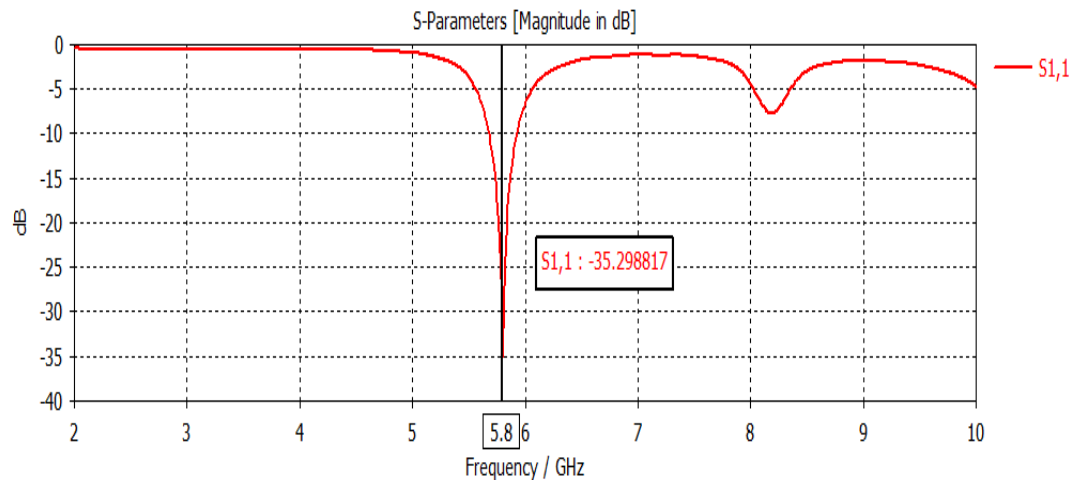


Figure III. 23: Coefficient de réflexion de l'antenne adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).

Cette figure présente le coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne rectangulaire adaptée réalisée sur un substrat FR4 et alimentée par une ligne micro-ruban, obtenu à l'aide du logiciel CST Studio Suite. Le paramètre S_{11} permet d'évaluer l'adaptation de l'antenne et ses fréquences de résonance.

On observe une résonance principale autour de 5.8 GHz avec une valeur approximative de $S_{11} = -35$ dB, indiquant une très bonne adaptation de l'antenne à cette fréquence ainsi que de faibles pertes par réflexion.

Ce résultat confirme que l'ajout des encoches a permis d'améliorer considérablement l'adaptation de l'antenne dans la bande des 5.8 GHz.

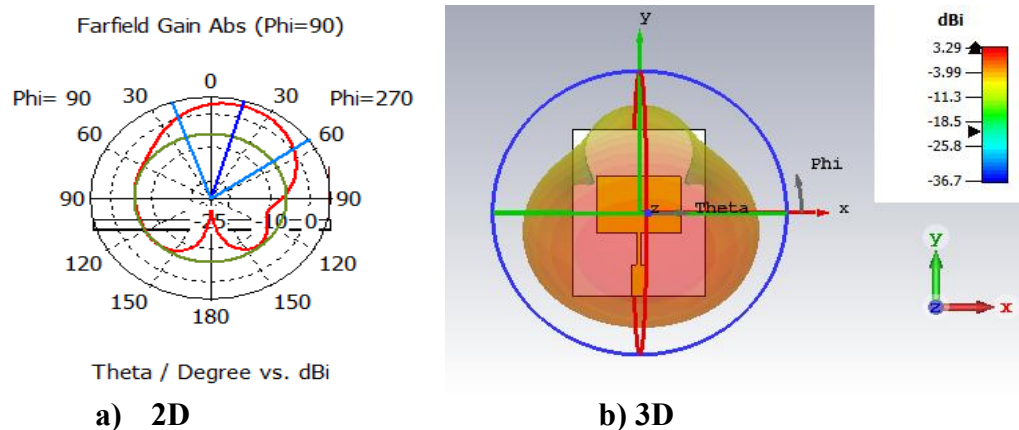


Figure III. 24: Diagramme de rayonnement en 2D et 3D de l'antenne adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).

La figure III.24.a présente le diagramme de rayonnement 2D de l'antenne rectangulaire adaptée réalisée sur un substrat FR4 et alimentée par une ligne micro-ruban. Le diagramme

montre un rayonnement principalement dirigé vers l'avant ($\theta = 0^\circ$), caractéristique des antennes patch rectangulaires. Le lobe principal est bien défini et concentré dans la direction normale au plan de l'antenne, ce qui traduit une bonne directivité. Les lobes secondaires restent faibles par rapport au lobe principal, indiquant une distribution efficace de l'énergie rayonnée et une réduction des pertes dans les directions indésirables. Cette forme de rayonnement confirme que l'antenne est adaptée pour les applications nécessitant une couverture directionnelle autour de la fréquence de résonance.

La figure III.24.b présente le diagramme de rayonnement de l'antenne rectangulaire adaptée simulés sous CST Studio Suite. Le diagramme montre la répartition du rayonnement de l'antenne dans l'espace ainsi que la direction principale d'émission.

On remarque que l'antenne présente un rayonnement principalement orienté dans la direction principale, ce qui traduit un comportement directionnel convenable pour les applications micro-ruban. Le gain maximal obtenu est d'environ 3.9, indiquant de bonnes performances de rayonnement.

Comme la valeur du gain dépasse 2 dB, cela confirme que l'antenne fonctionne correctement dans la bande de fréquence considérée et qu'elle possède une capacité satisfaisante de rayonnement et de transmission de l'énergie électromagnétique.

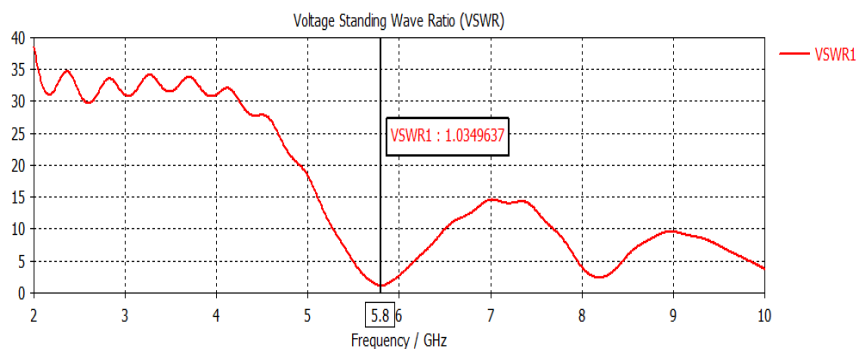


Figure III. 25: Variation du VSWR de l'antenne adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).

Le graphe du VSWR montre que l'antenne présente une bonne adaptation d'impédance à la fréquence de résonance de 5.8 GHz, avec une valeur minimale du VSWR proche de 1 (VSWR = 1.03). Cette valeur indique une très faible réflexion de puissance et une transmission efficace de l'énergie, ce qui confirme les bonnes performances de l'antenne à la fréquence souhaitée.

b) En utilisant le Substrat en Roger

La figure III.26 présente la géométrie de l'antenne rectangulaire adaptée réalisée sur un substrat Rogers et alimentée par une ligne micro-ruban. La vue de face montre le patch rectangulaire comportant des encoches, tandis que la vue arrière représente le plan de masse métallique.

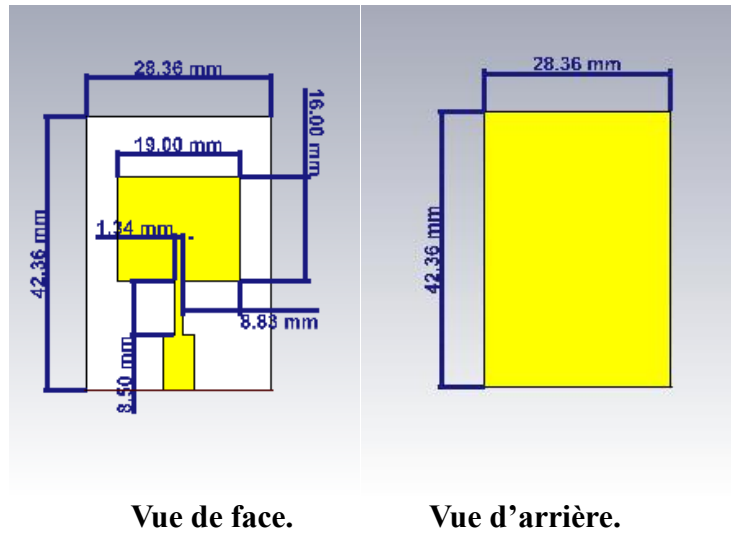


Figure III. 26: Antenne rectangulaire adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (Roger).

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

Tableau III. 10 : Dimensions de l'antenne rectangulaire adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (Roger)

Paramètres	T	h	wf	lp	lf	wp	wg	lg
Dimensions (mm)	0.035	1.56	4.846	16	17	19	28.36	42.36

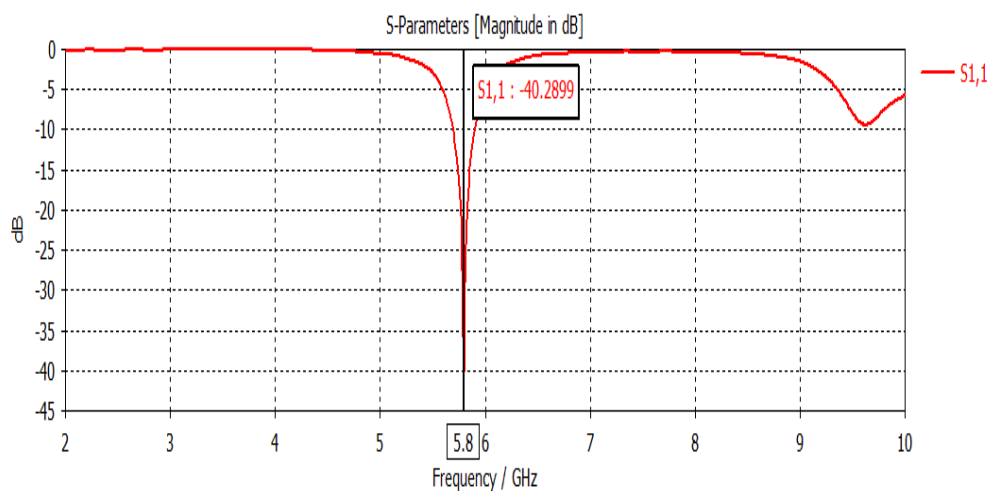


Figure III.27: Coefficient de réflexion de l'antenne adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (Roger).

La Figure III.27 représente l'évolution du coefficient de réflexion S11 de l'antenne rectangulaire adaptée réalisée sur un substrat Rogers et alimentée par une ligne micro-ruban. La courbe obtenue montre une adaptation remarquable de l'antenne à la fréquence de 5,8 GHz, où une valeur minimale de -40.29 dB est observée.

Cette valeur très faible du coefficient de réflexion indique que les pertes dues aux réflexions sont quasiment inexistantes. En effet, seule une très faible partie de la puissance incidente est renvoyée vers la source, tandis que l'essentiel de l'énergie est transmis à l'antenne pour être rayonné efficacement.

Par conséquent, ce résultat confirme la qualité de l'adaptation réalisée et démontre que l'antenne présente un excellent comportement électromagnétique à la fréquence de fonctionnement visée de 5,8 GHz, garantissant ainsi une transmission optimale de l'énergie.

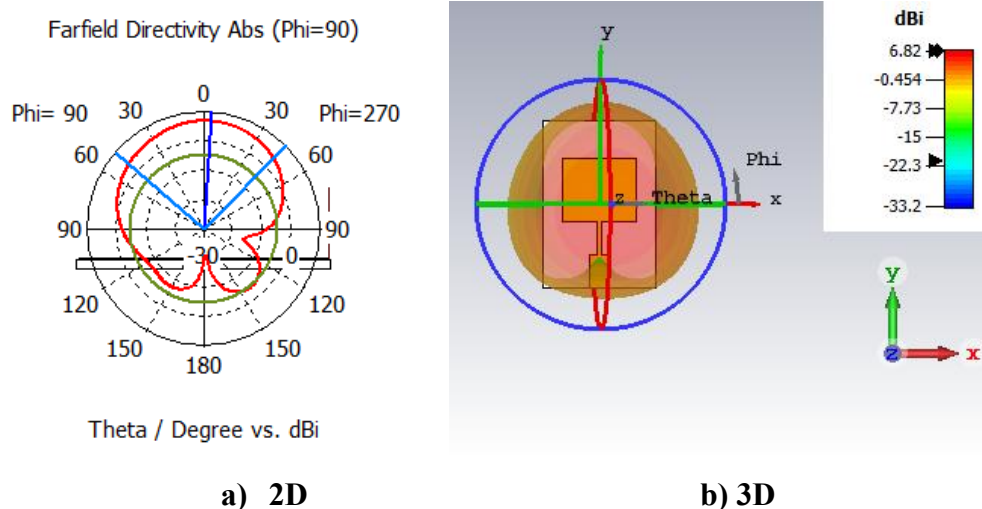


Figure III. 28: Diagramme de rayonnement en 2D et 3D de l'antenne adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (Roger).

La figure III.28.a présente le diagramme de rayonnement 2D de l'antenne adaptée réalisée sur un substrat Roger et alimentée par une ligne micro-ruban. Le diagramme met en évidence un lobe principal orienté dans la direction normale au plan de l'antenne ($\theta = 0^\circ$), ce qui traduit un rayonnement directif. La distribution du rayonnement est relativement symétrique autour de l'axe principal, avec des lobes secondaires de faible amplitude. Cette configuration indique une bonne concentration de l'énergie rayonnée dans la direction souhaitée et une réduction du rayonnement dans les directions arrière, ce qui améliore les performances globales de l'antenne. La Figure III.28.b représente le diagramme de rayonnement de l'antenne rectangulaire adaptée réalisée sur un substrat Rogers et alimentée par une ligne micro-ruban. Les résultats obtenus montrent que l'antenne présente un gain maximal de 6,19 dB à la fréquence de résonance de

5,8 GHz. Cette valeur de gain indique une bonne capacité de l'antenne à concentrer l'énergie rayonnée dans la direction principale de propagation. Le diagramme met en évidence une distribution efficace de l'énergie électromagnétique, traduisant de bonnes performances de rayonnement. Le gain obtenu confirme également l'efficacité de l'adaptation réalisée, permettant d'améliorer le rayonnement de l'antenne à la fréquence de fonctionnement visée. Ainsi, l'antenne présente des caractéristiques de rayonnement satisfaisantes pour les applications opérant dans la bande de 5,8 GHz.

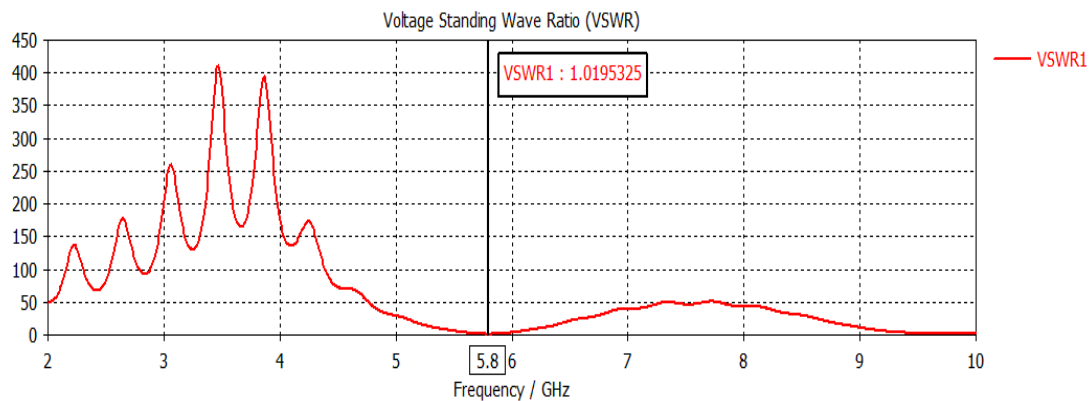


Figure III. 29: Variation du VSWR de l'antenne adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (Roger).

La Figure III.29 représente le rapport d'onde stationnaire (VSWR) de l'antenne rectangulaire adaptée réalisée sur un substrat Roger et alimentée par une ligne micro-ruban. À la fréquence de résonance de 5,8 GHz, la valeur obtenue est de $VSWR = 1,0195$, ce qui est très proche de l'unité.

Cette valeur indique une excellente adaptation entre l'antenne et la ligne d'alimentation. En effet, un VSWR égal à 1 correspond à une adaptation parfaite, où toute la puissance incidente est transférée à l'antenne sans réflexion. La valeur obtenue, très proche de cette condition idéale, traduit donc des pertes par réflexion extrêmement faibles.

Ce résultat confirme les performances d'adaptation mises en évidence par le coefficient de réflexion S_{11} et démontre que l'antenne fonctionne de manière optimale à 5,8 GHz, assurant un transfert efficace de l'énergie vers l'élément rayonnant et une exploitation optimale de la puissance fournie.

c) En utilisant le Substrat en Silicon

Cette figure présente la géométrie de l'antenne rectangulaire adaptée réalisée sur un substrat en silicon et alimentée par une ligne micro-ruban. La vue de face montre le patch rectangulaire comportant des encoches, tandis que la vue arrière représente le plan de masse métallique.

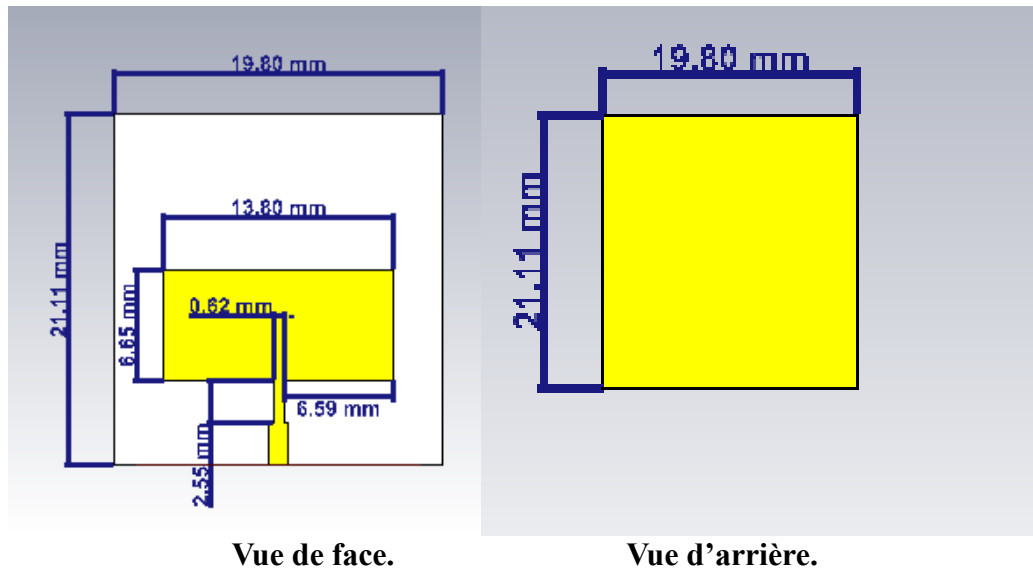


Figure III. 30: Antenne rectangulaire adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).

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

Tableau III. 11 : Dimensions de l'antenne rectangulaire adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).

Paramètres	T	h	wf	lp	lf	wp	wg	lg
Dimensions (mm)	0.035	1.56	1.238	6.65	5.1	13.8	19.8	21.11

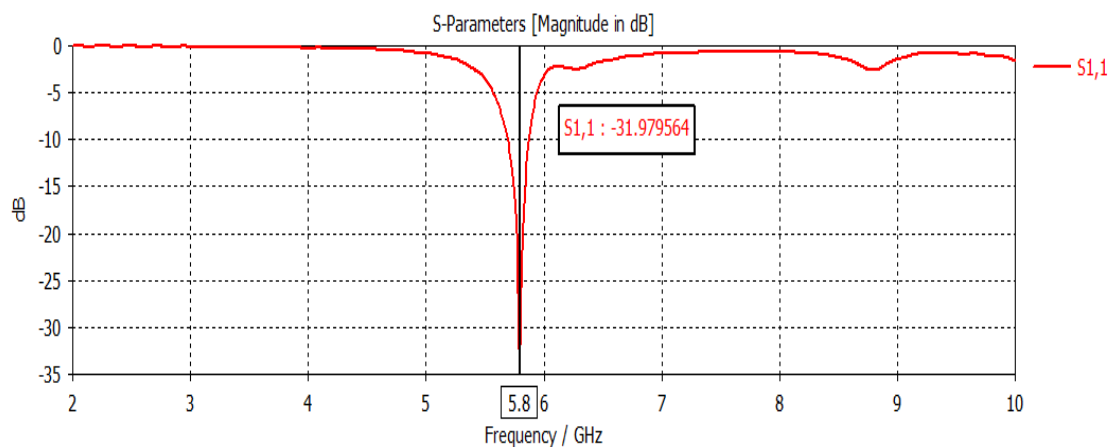


Figure III. 31: Coefficient de réflexion de l'antenne adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).

La Figure III.31 représente le coefficient de réflexion S11 de l'antenne rectangulaire adaptée réalisée sur un substrat en silicon et alimentée par une ligne micro-ruban. La courbe obtenue montre une excellente adaptation de l'antenne à la fréquence de résonance de 5,8 GHz, où une valeur minimale de S11=-31.98 est observée.

Cette valeur, largement inférieure au seuil de -10 dB, traduit une très faible réflexion de la puissance incidente au niveau du port d'alimentation. Par conséquent, la majeure partie de l'énergie fournie est transférée à l'antenne et convertie en rayonnement électromagnétique, ce qui témoigne d'une adaptation efficace entre la ligne micro-ruban et l'antenne.

Ces résultats confirment que l'utilisation du substrat en silicium permet d'obtenir de bonnes performances d'adaptation à 5,8 GHz. La faible valeur du coefficient de réflexion indique un transfert optimal de l'énergie vers l'élément rayonnant et garantit ainsi un fonctionnement efficace de l'antenne dans la bande de fréquence considérée.

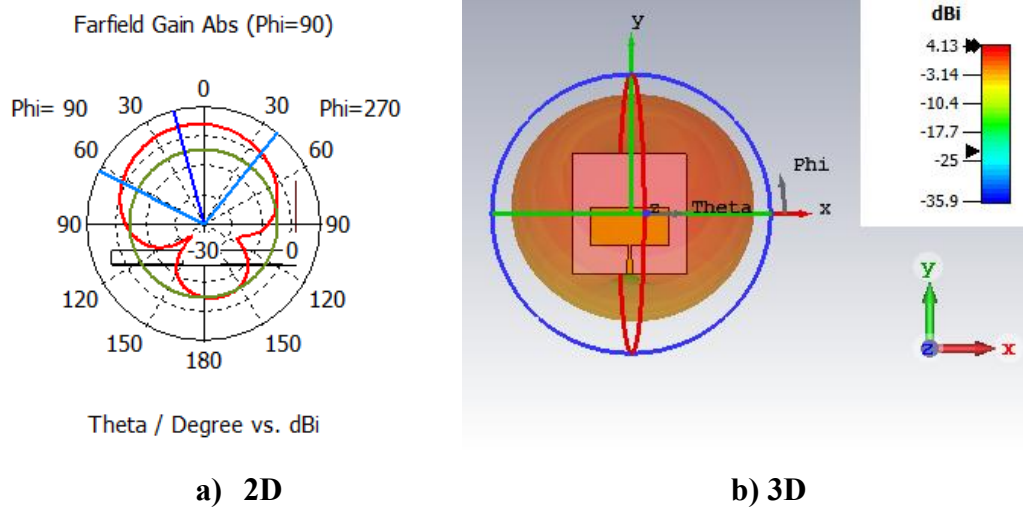


Figure III. 32: Diagramme de rayonnement en 2D et 3D de l'antenne adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).

La Figure III.32.a montre le diagramme de rayonnement 2D de l'antenne adaptée utilisant un substrat en silicium. Le diagramme présente un lobe principal dominant centré autour de la direction $\theta = 0^\circ$, indiquant que l'antenne rayonne principalement dans la direction perpendiculaire à son plan. La forme du diagramme met en évidence une bonne directivité ainsi qu'une distribution homogène du rayonnement autour de l'axe principal. La faible intensité du rayonnement arrière et des lobes secondaires traduit une utilisation efficace de l'énergie rayonnée, ce qui permet d'obtenir des performances satisfaisantes pour les applications visées.

La Figure III.32.b représente le diagramme de rayonnement de l'antenne rectangulaire adaptée réalisée sur un substrat en silicium et alimentée par une ligne micro-ruban. Les résultats obtenus montrent que l'antenne présente un gain maximal de 4,13 dB à la fréquence de résonance de 5,8 GHz.

Cette valeur de gain indique une bonne capacité de l'antenne à rayonner l'énergie électromagnétique dans la direction principale de propagation. Le diagramme met en évidence

une distribution efficace de l'énergie rayonnée, traduisant des performances de rayonnement satisfaisantes à la fréquence de fonctionnement considérée.

Le gain obtenu confirme l'efficacité de l'adaptation réalisée, permettant une transmission efficace de l'énergie vers l'espace libre. Ainsi, l'antenne adaptée sur substrat en silicon présente des caractéristiques de rayonnement adéquates pour les applications fonctionnant dans la bande de fréquence de 5,8 GHz.

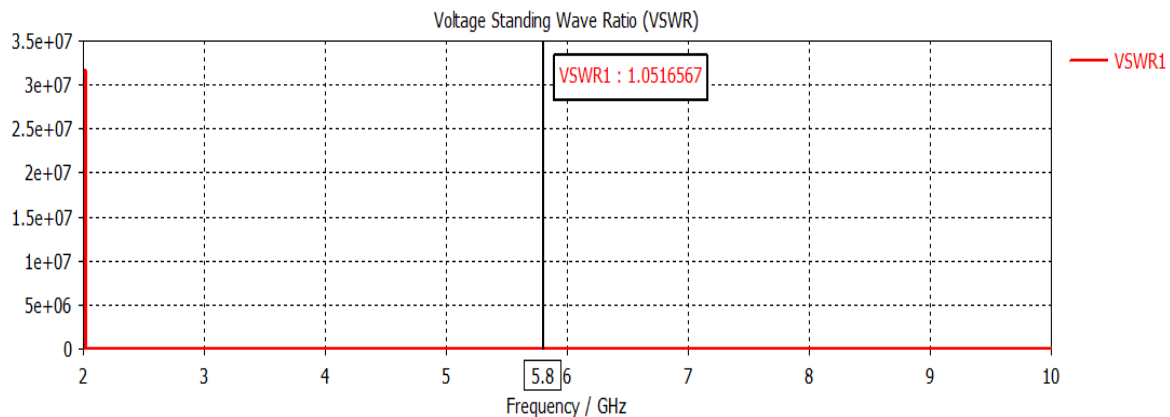


Figure III. 33: Variation du VSWR de l'antenne adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).

La Figure III.33 représente le rapport d'onde stationnaire (VSWR) de l'antenne rectangulaire adaptée réalisée sur un substrat en silicon et alimentée par une ligne micro-ruban. À la fréquence de résonance de 5,8 GHz, la valeur obtenue est de $VSWR = 1,0517$, ce qui est très proche de l'unité.

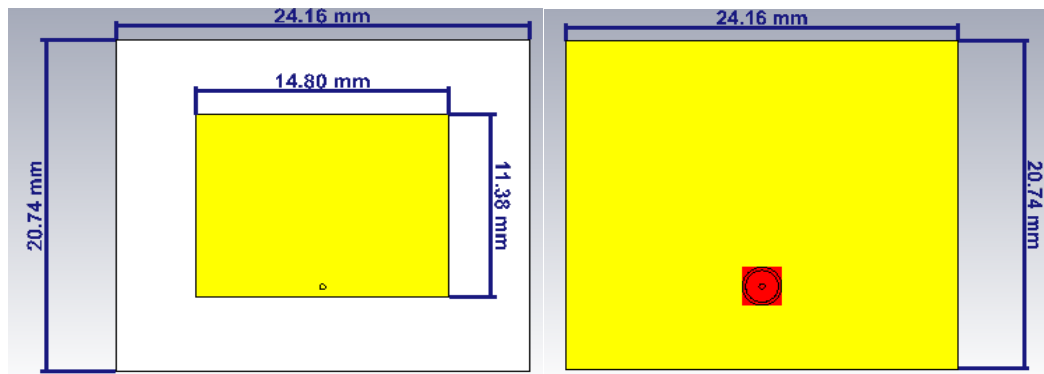
Cette valeur traduit une excellente adaptation entre l'antenne et la ligne d'alimentation. En effet, un VSWR proche de 1 indique que la puissance réfléchie est très faible et que la quasi-totalité de l'énergie incidente est transférée vers l'antenne pour être rayonnée efficacement.

Ce résultat confirme la qualité de l'adaptation obtenue à 5,8 GHz et met en évidence les bonnes performances de l'antenne en termes de transfert d'énergie. Ainsi, l'antenne adaptée sur substrat en silicon présente un fonctionnement optimal dans la bande de fréquence considérée, avec des pertes par réflexion négligeables.

➤ Coaxial

a) En utilisant le Substrat en FR4

La Figure III.34 illustre la géométrie de l'antenne rectangulaire adaptée réalisée sur un substrat FR4 et alimentée par un câble coaxial. L'antenne est composée d'un patch rectangulaire métallique imprimé sur la face supérieure du substrat, tandis qu'un plan de masse est placé sur la face inférieure. L'alimentation est assurée par une sonde coaxiale dont le conducteur central est connecté au patch rayonnant.



Vue de face.

Vue d'arrière.

Figure III.34: Antenne rectangulaire adaptée alimentée par un câble coaxial (FR4).

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

Tableau III. 12 : Dimensions de l'antenne rectangulaire adaptée alimentée par un câble coaxial (FR4).

Paramètres	wg	k	x	y	T	inner	h	outer	lp	wp	lg
Dimensions (mm)	24.159	-5	0	-5.1	0.035	0.3549/2	1.56	2/2	11.38	14.799	20.74

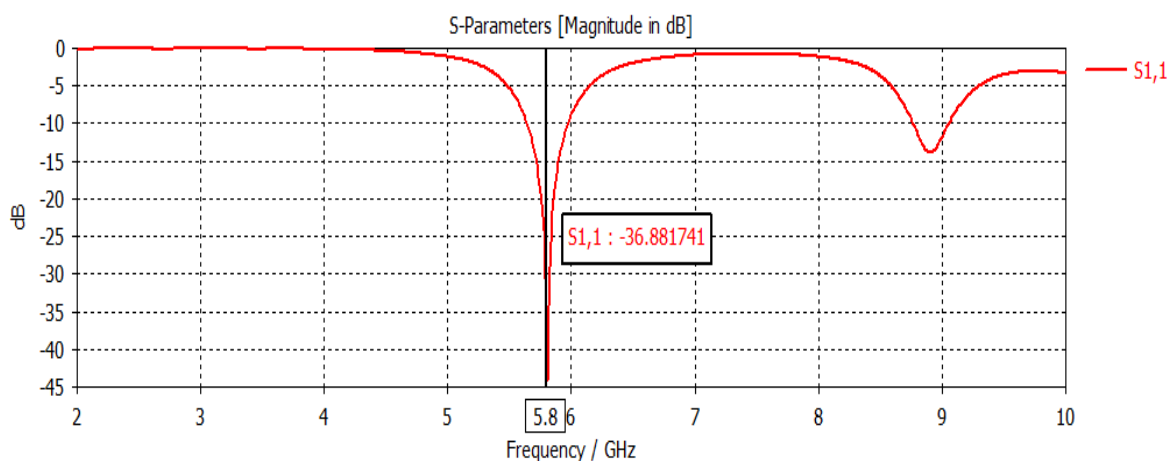


Figure III.35 : Coefficient de réflexion de l'antenne adaptée alimentée par un câble coaxial (FR4).

La courbe du coefficient de réflexion S11 montre que l'antenne FR4 alimentée par câble coaxial résonne autour de 5.8 avec une valeur atteignant environ -36 dB. Cette valeur traduit une très bonne adaptation entre la ligne d'alimentation et l'antenne, ce qui réduit considérablement les réflexions du signal et améliore le transfert de puissance.

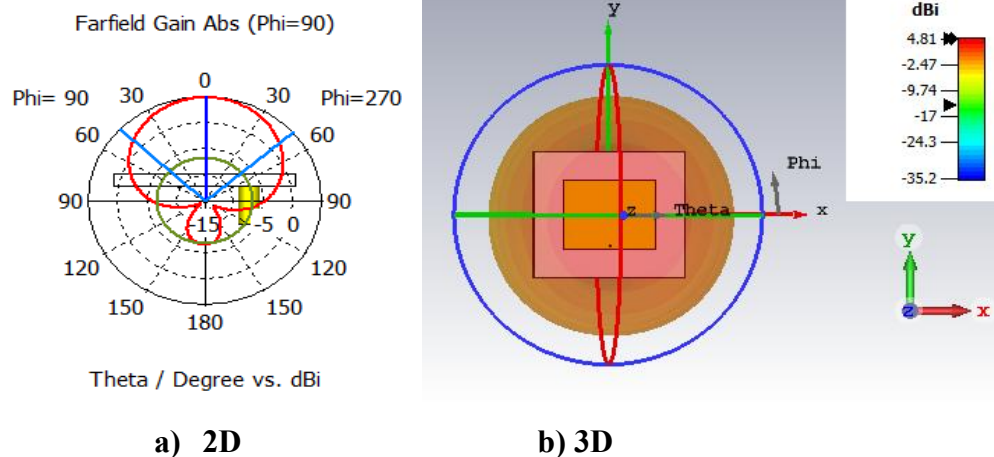


Figure III.36 : Diagramme de rayonnement en 2D et 3D de l'antenne adaptée alimentée par un câble coaxial (FR4).

Le diagramme de rayonnement 2D de l'antenne patch rectangulaire réalisée sur un substrat FR4 et alimentée par un câble coaxial présente un rayonnement directif avec un lobe principal orienté vers la direction normale du patch ($\theta = 0^\circ$).

La puissance rayonnée est maximale dans cette direction puis diminue progressivement vers les directions latérales et arrière. Le faible niveau des lobes secondaires montre une bonne concentration de l'énergie rayonnée.

Le résultat du gain indique que l'antenne présente un rayonnement efficace avec un gain maximal proche de 4.81 dB. Le diagramme de rayonnement obtenu montre une bonne distribution de l'énergie électromagnétique dans l'espace, ce qui confirme les performances satisfaisantes de l'antenne pour l'application visée à 5.8 GHz.

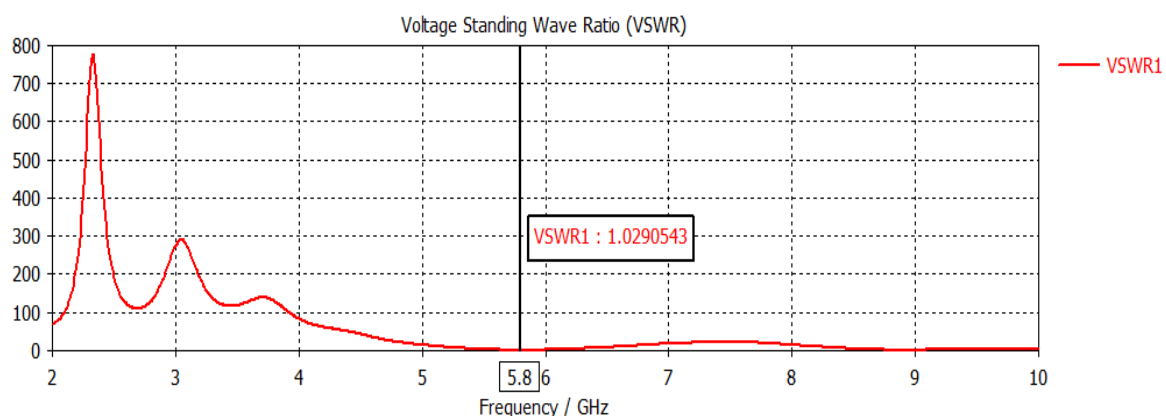


Figure III.37: Variation du VSWR de l'antenne adaptée alimentée par un câble coaxial (FR4).

La Figure présente l'évolution du rapport d'ondes stationnaires (VSWR) de l'antenne rectangulaire adaptée réalisée sur un substrat FR4 et alimentée par un câble coaxial.

On remarque que la valeur minimale du VSWR est obtenue autour de la fréquence de 5,8 GHz, avec une valeur proche de 1,03. Cette valeur très proche de 1 indique une excellente adaptation d'impédance entre l'antenne et la ligne d'alimentation coaxiale, ce qui signifie que la puissance réfléchie est très faible et que la majorité de la puissance est correctement transmise à l'antenne.

b) En utilisant le Substrat en Roger

La Figure III.38 présente la géométrie de l'antenne rectangulaire adaptée réalisée sur un substrat Rogers et alimentée par un câble coaxial. L'antenne est constituée d'un patch rectangulaire métallique imprimé sur la face supérieure du substrat, tandis qu'un plan de masse est placé sur la face inférieure. L'alimentation est assurée par une sonde coaxiale reliant le conducteur central au patch rayonnant.

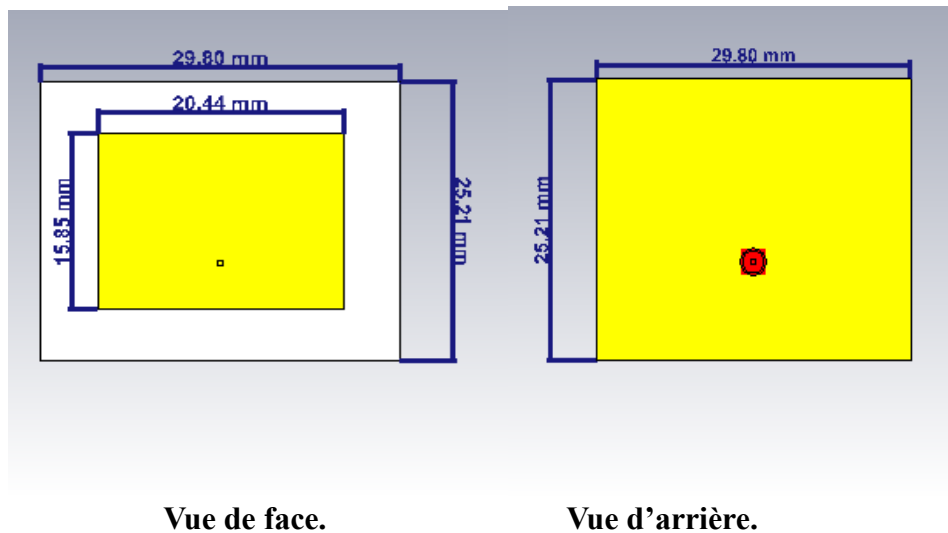


Figure III. 38: Antenne rectangulaire adaptée alimentée par un câble coaxial (Roger).

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

Tableau III.13 : Dimensions de l'antenne rectangulaire adaptée alimentée par un câble coaxial (Roger).

Paramètres	wg	k	x	y	T	inner	h	outer	lp	wp	lg
Dimensions (mm)	29.8	-5	0	- 3.78	0.035	0.5806/2	1.56	2/2	15.85	20.44	25.21

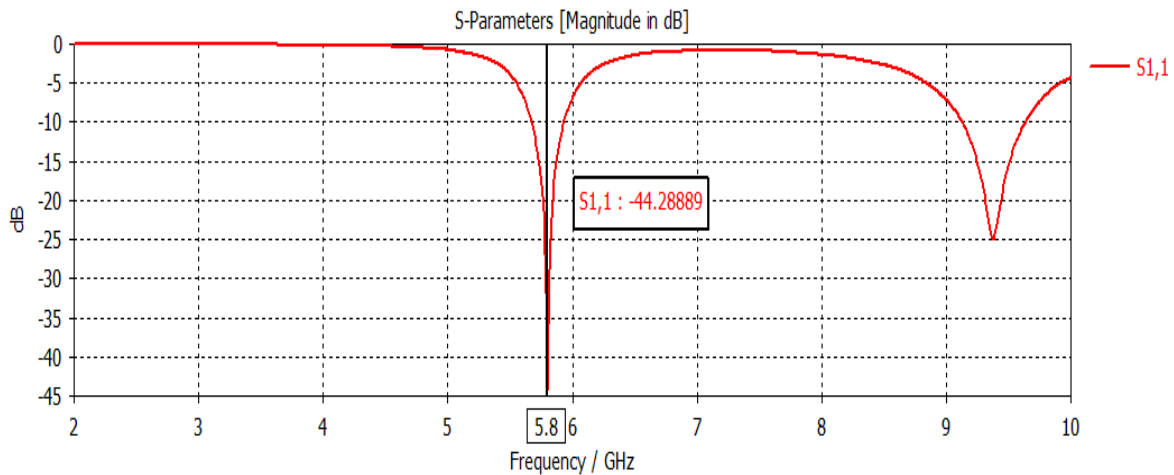


Figure III. 39 : Coefficient de réflexion de l’antenne adaptée alimentée par un câble coaxial (Roger).

La Figure III.39 représente le coefficient de réflexion S_{11} de l’antenne rectangulaire adaptée réalisée sur un substrat Roger et alimentée par un câble coaxial. La courbe obtenue met en évidence une excellente adaptation de l’antenne à la fréquence de résonance de 5,8 GHz, où une valeur minimale de $S_{11} = -44.29$ est observée.

Cette valeur, largement inférieure à la limite de -10 dB, indique que les pertes par réflexion sont extrêmement faibles. Ainsi, la quasi-totalité de la puissance injectée par le câble coaxial est transmise à l’antenne et convertie en rayonnement électromagnétique, ce qui traduit une adaptation optimale du système d’alimentation.

Ces résultats confirment l’efficacité de la structure adaptée et démontrent que l’antenne présente d’excellentes performances à 5,8 GHz. La très faible valeur du coefficient de réflexion garantit un transfert d’énergie maximal vers l’élément rayonnant, assurant ainsi un fonctionnement efficace dans la bande de fréquence considérée.

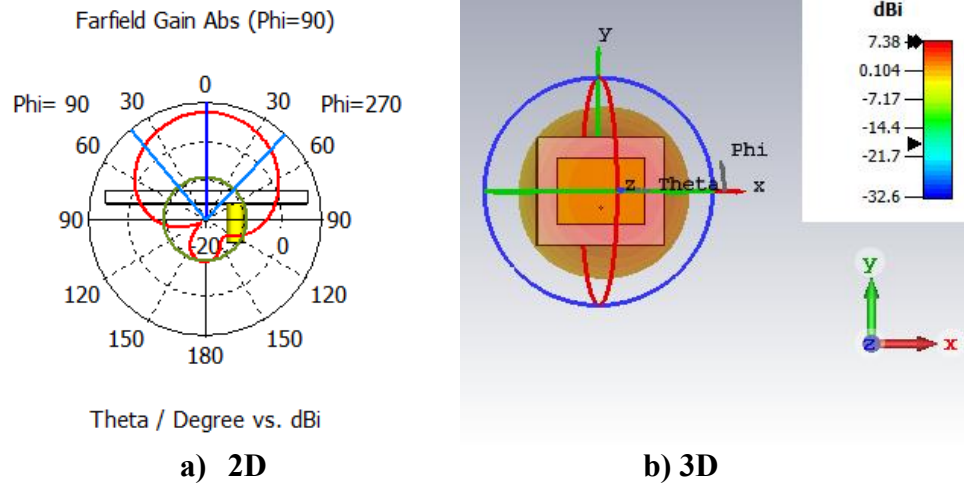


Figure III. 40: Diagramme de rayonnement en 2D et 3D de l'antenne adaptée alimentée par un câble coaxial (Roger).

Le diagramme de rayonnement 2D (Figure III.40.a) de l'antenne rectangulaire adaptée, réalisée sur un substrat Roger et alimentée par un câble coaxial, présente un rayonnement directif avec un lobe principal orienté perpendiculairement au plan de l'antenne.

La puissance rayonnée est maximale autour de $\theta = 0^\circ$, puis diminue progressivement vers les directions latérales et arrière. La faible présence des lobes secondaires indique une bonne concentration de l'énergie rayonnée et une réduction des pertes dans les directions non désirées.

Ces résultats montrent une bonne adaptation de l'antenne ainsi qu'un fonctionnement efficace à la fréquence de résonance.

La Figure III.40.b représente le diagramme de rayonnement de l'antenne rectangulaire adaptée réalisée sur un substrat Roger et alimentée par un câble coaxial. Les résultats obtenus montrent que l'antenne présente un gain maximal de 7,38 dB à la fréquence de résonance de 5,8 GHz.

Cette valeur de gain témoigne d'une bonne aptitude de l'antenne à concentrer l'énergie rayonnée dans la direction principale de propagation. Le diagramme de rayonnement met en évidence une distribution efficace de l'énergie électromagnétique, traduisant de bonnes performances en termes de directivité et de rayonnement.

Le gain obtenu confirme également l'efficacité de l'adaptation réalisée, permettant une exploitation optimale de la puissance fournie à l'antenne. Ainsi, l'antenne présente des caractéristiques de rayonnement satisfaisantes à 5,8 GHz, ce qui la rend adaptée aux applications fonctionnant dans cette bande de fréquence.

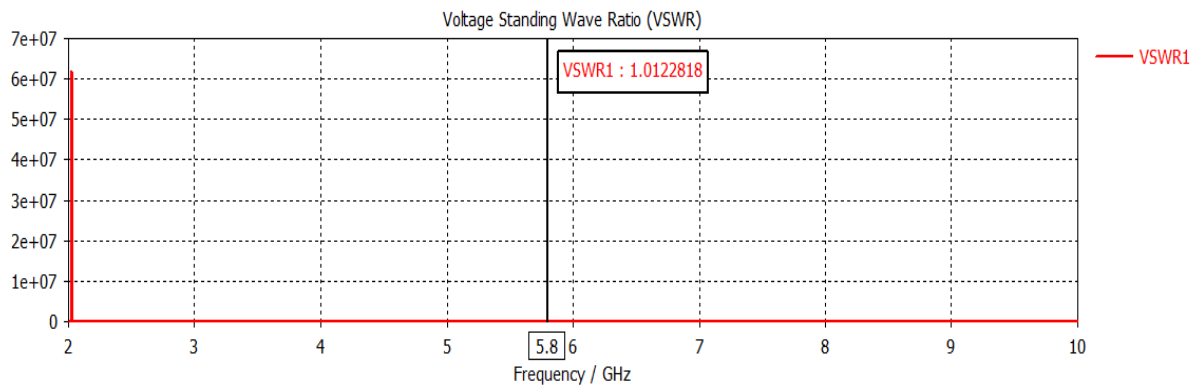


Figure III.41: Variation du VSWR de l'antenne adaptée alimentée par un câble coaxial (Roger).

La Figure III.41 représente le rapport d'onde stationnaire (VSWR) de l'antenne rectangulaire adaptée réalisée sur un substrat Roger et alimentée par un câble coaxial. À la fréquence de résonance de 5,8 GHz, la valeur obtenue est de $VSWR = 1,0123$, ce qui est extrêmement proche de l'unité.

Cette valeur traduit une excellente adaptation entre l'antenne et le système d'alimentation. En effet, un VSWR proche de 1 indique que la puissance réfléchie est quasiment nulle et que la quasi-totalité de l'énergie incidente est transmise à l'antenne pour être rayonnée efficacement.

Ce résultat confirme les excellentes performances d'adaptation de l'antenne à 5,8 GHz et met en évidence un transfert optimal de l'énergie vers l'élément rayonnant. Ainsi, les pertes par réflexion sont négligeables, garantissant un fonctionnement efficace de l'antenne dans la bande de fréquence considérée.

c) En utilisant le Substrat en Silicon

La figure III.42 présente la géométrie de l'antenne rectangulaire adaptée réalisée sur un substrat en silicon et alimentée par un câble coaxial. L'antenne est composée d'un patch rectangulaire métallique imprimé sur la face supérieure du substrat, tandis qu'un plan de masse est disposé sur la face inférieure. L'alimentation est assurée par une sonde coaxiale reliant le conducteur central au patch rayonnant.

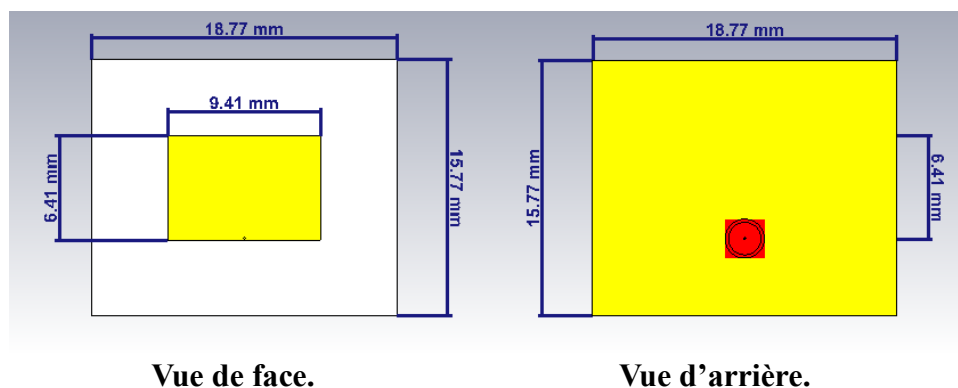


Figure III. 42: Antenne rectangulaire adaptée alimentée par un câble coaxial (Silicon).

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

Tableau III. 14: Dimensions de l'antenne rectangulaire adaptée alimentée par un câble coaxial (Silicon).

Paramètres	wg	k	x	y	T	inner	h	outer	lp	wp	lg
Dimensions (mm)	18.77	-5	0	-3.101	0.035	0.11265/2	1.56	2/2	6.41	9.41	15.77

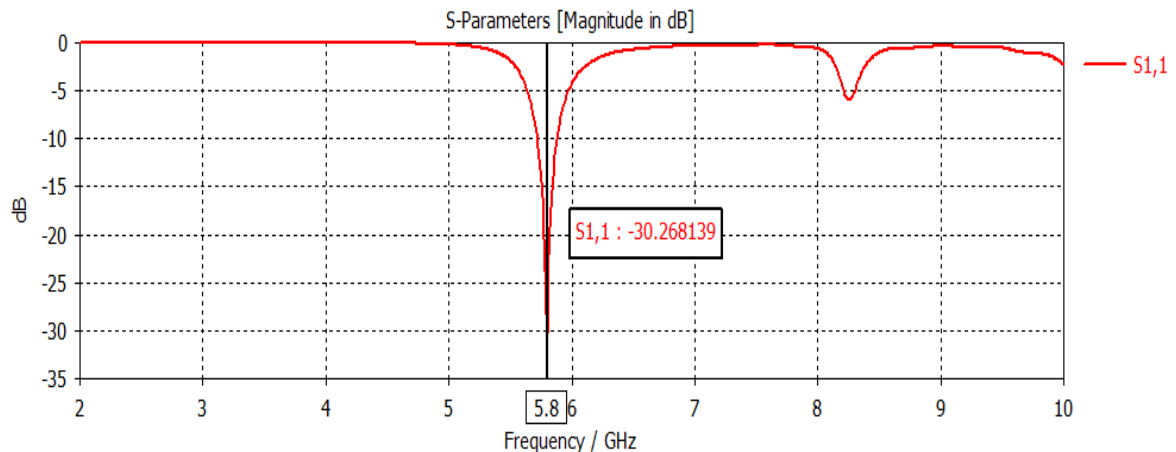
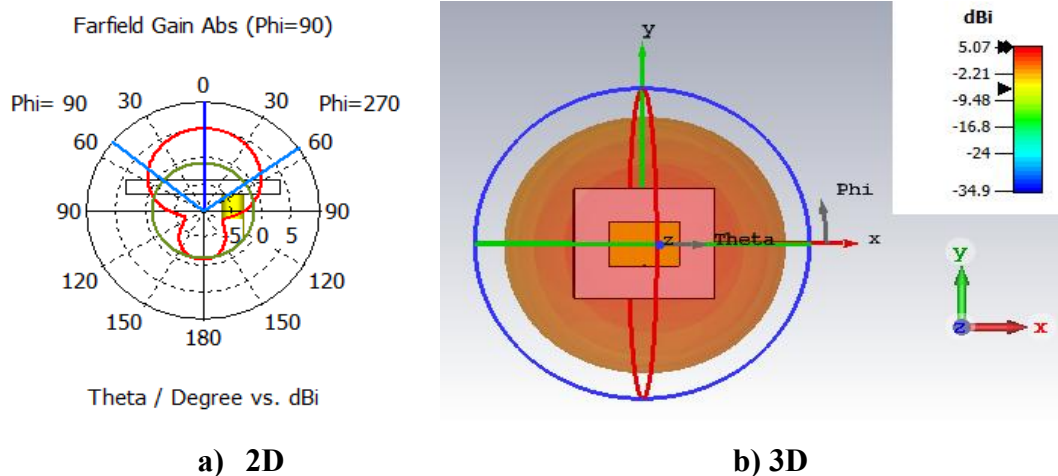


Figure III.43: Coefficient de réflexion de l'antenne adaptée alimentée par un câble coaxial (Silicon).

La Figure représente le coefficient de réflexion S11 de l'antenne rectangulaire adaptée réalisée sur un substrat en silicon et alimentée par un câble coaxial.

On observe qu'à la fréquence de résonance de 5,8 GHz, la valeur du paramètre S11 atteint environ -30,27 dB. Cette valeur très inférieure à -10 dB indique une excellente adaptation de l'antenne à la fréquence de fonctionnement souhaitée.



a) 2D

b) 3D

Figure III.44 : Diagramme de rayonnement en 2D et 3D de l'antenne adaptée alimentée par un câble coaxial (Silicon).

Le diagramme de rayonnement 2D de l'antenne adaptée conçue sur un substrat Silicon et alimentée par un câble coaxial montre une émission principalement concentrée dans la direction frontale de l'antenne.

Le lobe principal apparaît autour de $\theta = 0^\circ$, où le rayonnement atteint sa valeur maximale, tandis qu'une diminution progressive est observée dans les autres directions. Les lobes secondaires restent faibles, ce qui indique une bonne répartition de l'énergie rayonnée.

Ce comportement confirme les bonnes performances de l'antenne en termes de directivité et de rayonnement à la fréquence de fonctionnement étudiée.

La figure du diagramme de rayonnement montre le gain tridimensionnel de l'antenne rectangulaire adaptée sur substrat silicon alimentée par câble coaxial.

Le gain maximal obtenu est d'environ 5.07 dB, ce qui traduit une bonne capacité de rayonnement de l'antenne à la fréquence de 5,8 GHz. Le diagramme présente un rayonnement principalement dirigé, avec une concentration de l'énergie rayonnée dans la direction principale.

Cette valeur de gain confirme que l'antenne assure un compromis satisfaisant entre adaptation et performances de rayonnement, ce qui la rend adaptée aux applications fonctionnant dans la bande des 5,8 GHz.

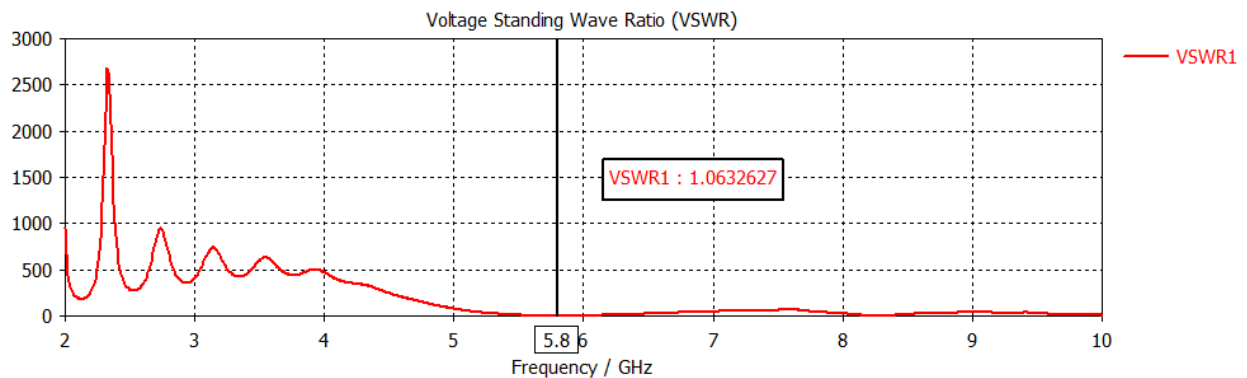


Figure III.45: Variation du VSWR de l'antenne adaptée alimentée par un câble coaxial (Silicon).

La Figure présente l'évolution du rapport d'ondes stationnaires (VSWR) de l'antenne rectangulaire adaptée réalisée sur un substrat en silicon et alimentée par un câble coaxial.

On observe qu'à la fréquence de résonance de 5,8 GHz, la valeur du VSWR est d'environ 1,06, soit une valeur très proche de l'unité. Cela indique une excellente adaptation d'impédance entre l'antenne et la ligne d'alimentation coaxiale, avec une très faible puissance réfléchie.

III.5.2 Antenne rectangulaire (nouveau modèle)

III.5.2.1 Antenne rectangulaire nouveau modèle initiale

Après l'adaptation de l'antenne rectangulaire, nous avons proposé un nouveau modèle en intégrant trois cylindres dans la structure afin d'améliorer les performances électromagnétiques de l'antenne.

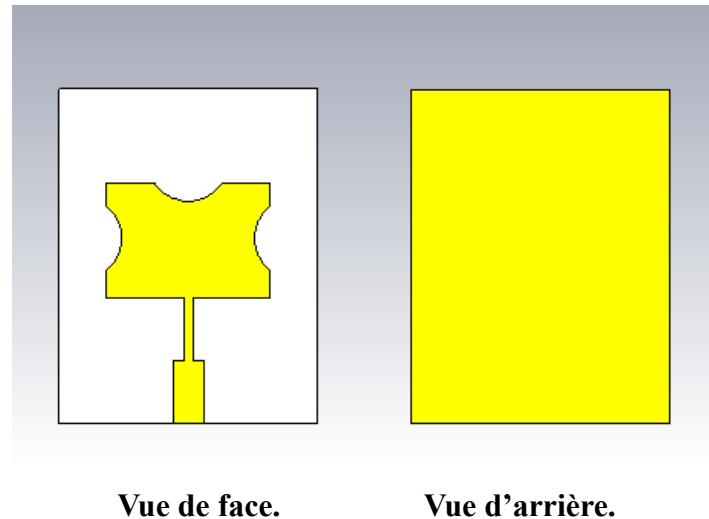


Figure III.46: Géométrie de l'antenne nouveau modèle alimentée par ligne micro-ruban.

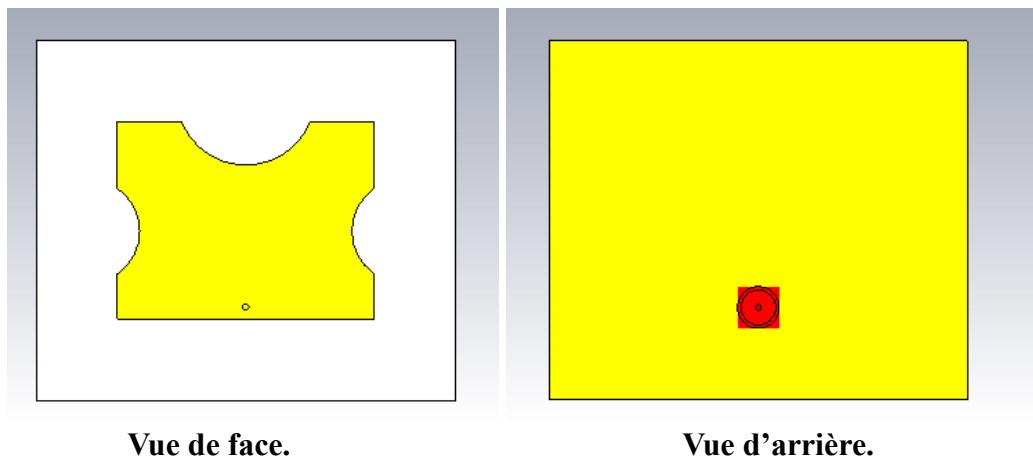
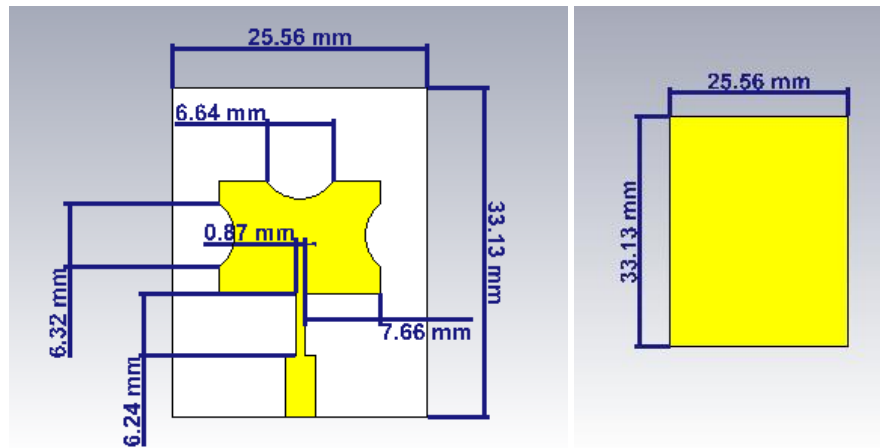


Figure III.47: Géométrie de l'antenne nouveau modèle alimentée par un câble coaxial.

➤ Micro-ruban

a) En utilisant le Substrat en FR4

La figure III.48 présente un nouveau modèle d'antenne réalisé sur un substrat FR4 et alimenté par une ligne micro-ruban. La structure est basée sur un patch rectangulaire modifié par l'ajout de trois encoches cylindriques, permettant d'optimiser ses caractéristiques électromagnétiques. La vue arrière montre le plan de masse métallique de l'antenne.



Vue de face.

Vue d'arrière.

Figure III.48: Antenne nouveau modèle initiale alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).

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

Tableau III.15: Dimensions de l'antenne nouveau modèle initiale alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).

Paramètres	T	h	wf	lp	lf	wp	wg	lg
Dimensions (mm)	0.035	1.56	3.058	11.299	12.471	16.199	25.559	33.13

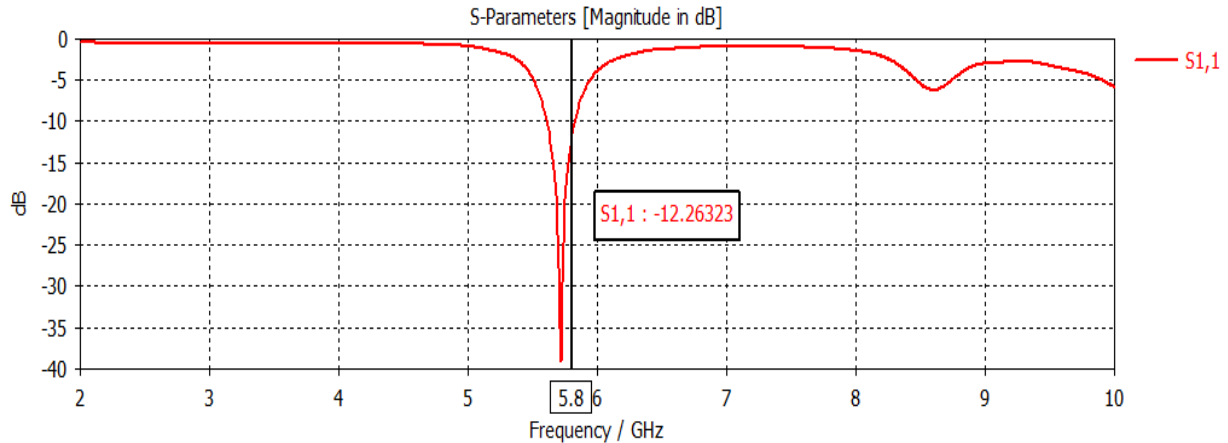


Figure III. 49: Coefficient de réflexion de l'antenne nouveau modèle initiale alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).

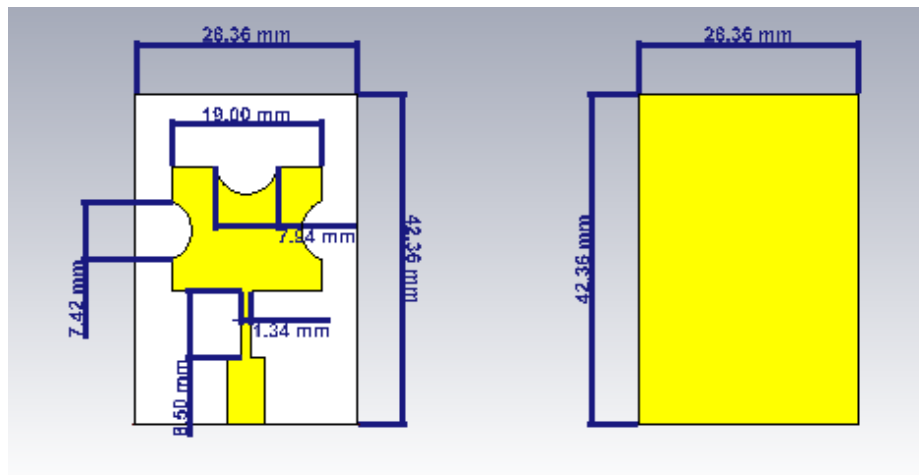
La figure III.49 illustre le paramètre S11 du nouveau modèle initial de l'antenne réalisée sur substrat FR4 et alimentée par ligne micro-ruban, résonant à 5.8 GHz. On observe un minimum de $S_{11} = -12.26$ dB autour de la fréquence de résonance, ce qui indique que l'antenne présente une adaptation d'impédance acceptable mais non optimale.

En effet, cette valeur montre que la puissance réfléchie reste modérée, mais une partie non négligeable de l'énergie incidente est encore renvoyée vers la source. Ainsi, malgré le bon

positionnement de la fréquence de résonance à 5.8 GHz, l'adaptation de l'antenne nécessite encore des améliorations afin d'obtenir un S11 plus faible, garantissant une meilleure efficacité de rayonnement et une réduction des pertes par réflexion.

b) En utilisant le Substrat en Roger

La figure III.50 présente un nouveau modèle d'antenne réalisé sur un substrat Roger et alimenté par une ligne micro-ruban. La structure est basée sur un patch rectangulaire modifié par l'ajout de trois encoches cylindriques, permettant d'optimiser ses caractéristiques électromagnétiques. La vue arrière montre le plan de masse métallique de l'antenne.



Vue de face.

Vue d'arrière.

Figure III.50: Antenne nouveau modèle initiale alimentée par la ligne micro-ruban (Roger).

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

Tableau III.16: Dimensions de l'antenne nouveau modèle initiale alimentée par la ligne micro-ruban (Roger).

Paramètres	T	h	wf	lp	lf	wp	wg	lg
Dimensions (mm)	0.035	1.56	4.846	16	17	19	28.36	42.36

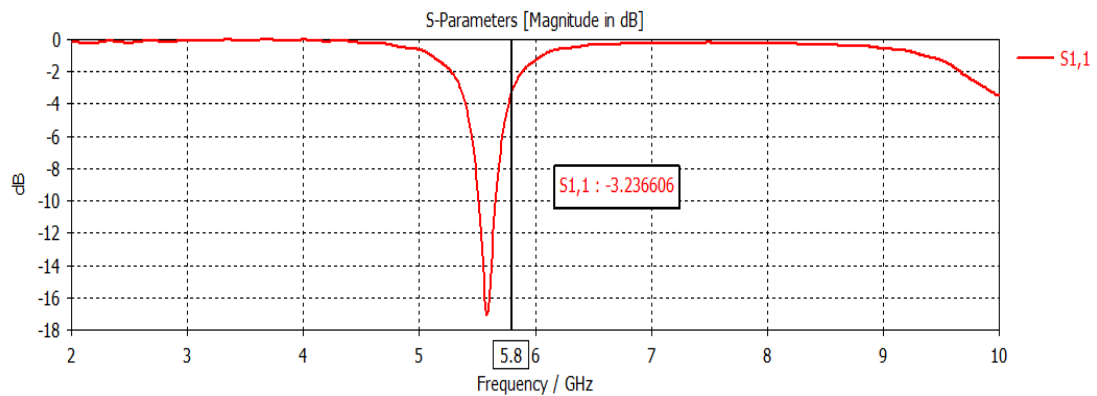


Figure III.51: Coefficient de réflexion de l'antenne nouveau modèle initiale alimentée par la ligne micro-ruban (Roger).

La figure III.51 présente le paramètre S11 du nouveau modèle de l'antenne réalisé sur substrat Roger, destiné à fonctionner autour de la fréquence de résonance 5.8 GHz. On observe une valeur de $S_{11} = -3.2366$ dB, ce qui traduit une très mauvaise adaptation d'impédance.

En effet, une telle valeur, largement supérieure à -10 dB, indique que la majorité de la puissance incidente est réfléchiée vers la source et très peu est effectivement rayonnée par l'antenne. Cela signifie que l'antenne n'est pas accordée à la fréquence de fonctionnement souhaitée et que la condition de résonance n'est pas correctement satisfaite.

Ce mauvais comportement peut être dû à un désajustement des dimensions géométriques, à l'influence du substrat Rogers sur la constante diélectrique effective, ou encore à une inadéquation entre la ligne d'alimentation micro-ruban et la structure rayonnante.

Ainsi, ce résultat montre clairement que ce nouveau modèle nécessite une optimisation approfondie des paramètres de conception afin de rapprocher S11 de valeurs inférieures à -10 dB et d'assurer une meilleure adaptation à 5.8 GHz.

c) En utilisant le Substrat en Silicon

La figure III.52 présente un nouveau modèle d'antenne réalisé sur un substrat Silicon et alimenté par une ligne micro-ruban. La structure est basée sur un patch rectangulaire modifié par l'ajout de trois encoches cylindriques, permettant d'optimiser ses caractéristiques électromagnétiques. La vue arrière montre le plan de masse métallique de l'antenne.

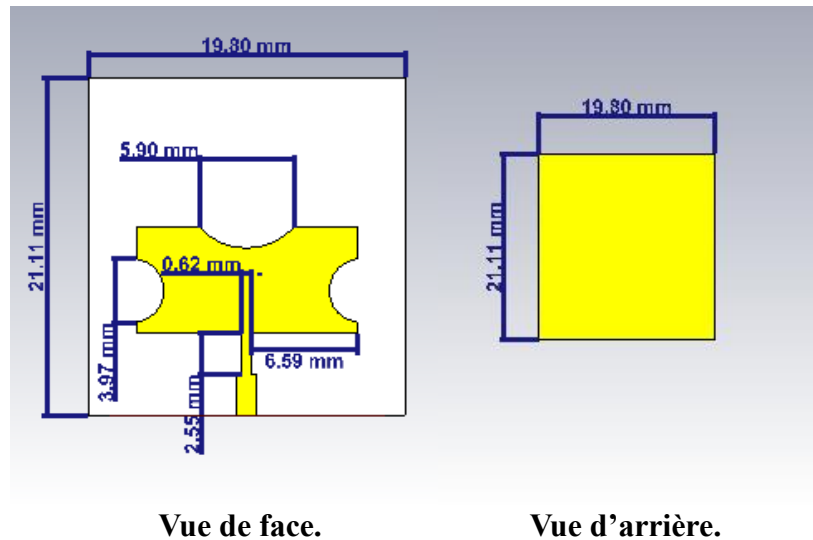


Figure III.52 : Antenne nouveau modèle initiale alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).

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

Tableau III.17: Dimensions de l'antenne nouveau modèle initiale alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).

Paramètres	T	h	wf	lp	lf	wp	wg	lg
Dimensions (mm)	0.035	1.56	1.238	6.65	5.1	13.8	19.8	21.11

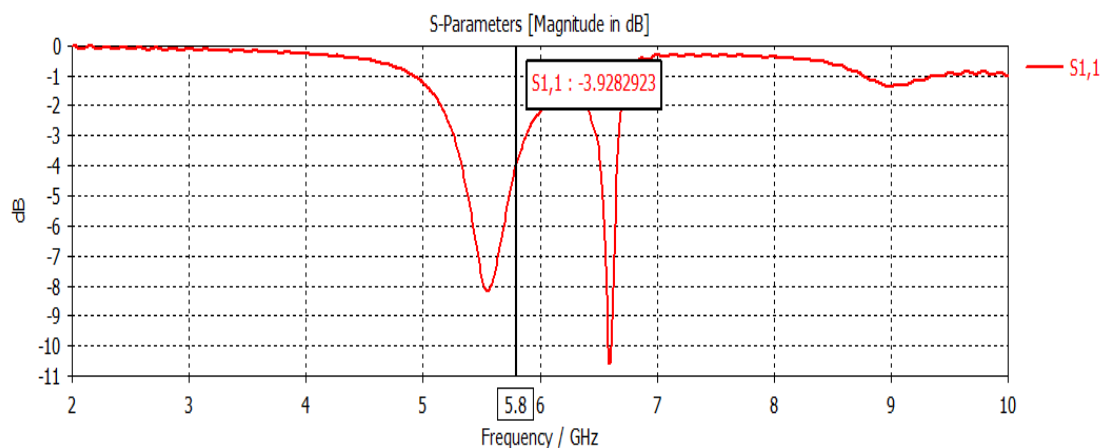


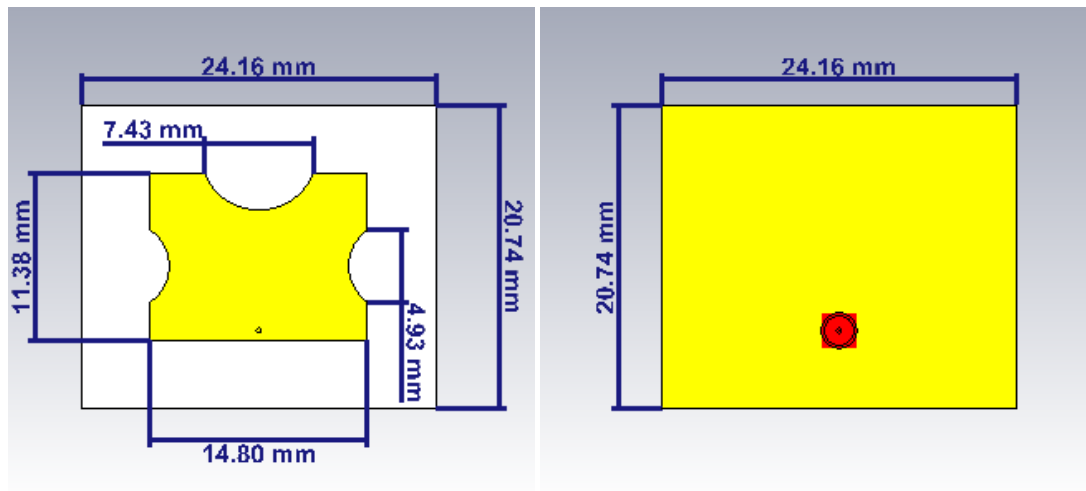
Figure III.53: Coefficient de réflexion de l'antenne nouveau modèle initiale alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).

Cette figure représente le paramètre $S_{11} = -3.9283$ dB. Ce résultat indique une mauvaise adaptation d'impédance, car la valeur est largement supérieure au seuil de -10 dB généralement requis pour considérer une antenne correctement adaptée. Ainsi, une grande partie de la puissance incidente est réfléchiée vers la source, tandis qu'une faible portion seulement est transmise et rayonnée par l'antenne à la fréquence de fonctionnement (5.8 GHz).

➤ Coaxial

a) En utilisant le Substrat en FR4

La figure III.54 présente un nouveau modèle d'antenne réalisé sur un substrat FR4 et alimenté par un câble coaxial. La structure est basée sur un patch rectangulaire modifié par l'ajout de trois encoches cylindriques, permettant d'optimiser ses caractéristiques électromagnétiques. La vue arrière montre le plan de masse métallique de l'antenne.



Vue de face.

Vue d'arrière.

Figure III. 54: Antenne nouveau modèle initiale alimentée par un câble coaxial (FR4).

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

Tableau III. 18 : Dimensions de l'antenne nouveau modèle initiale alimentée par un câble coaxial (FR4).

Paramètres	wg	k	x	y	T	inner	h	outer	lp	wp	lg
Dimensions (mm)	24.159	-5	0	-5	0.035	0.3549/2	1.56	2/2	11.38	14.799	20.74

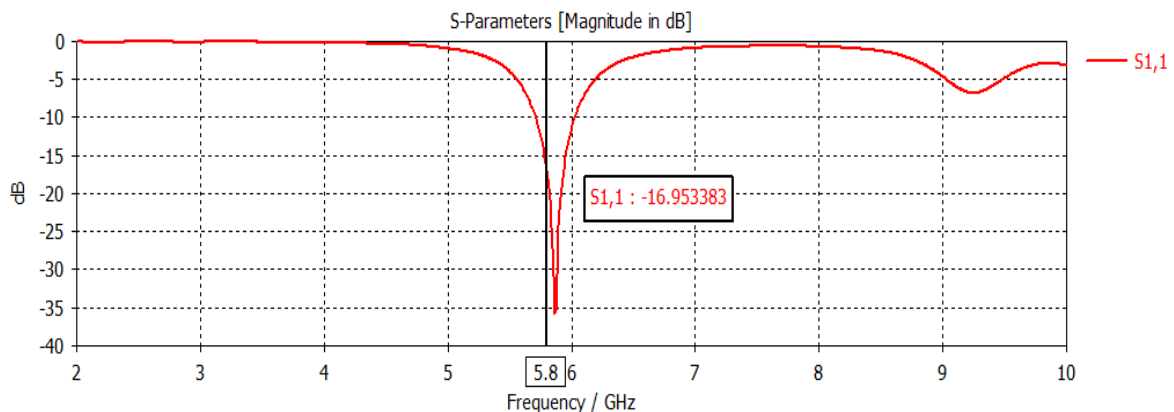


Figure III.55: Coefficient de réflexion de l'antenne nouveau modèle initiale alimentée par un câble coaxial (FR4).

Le coefficient de réflexion S11 du nouveau modèle initial sur substrat FR4 présente une valeur minimale d'environ -16,95 dB à la fréquence de résonance de 5,8 GHz. Cette valeur montre que l'antenne possède une adaptation acceptable avant l'étape d'adaptation finale, avec une réduction importante des pertes par réflexion au niveau du port d'alimentation.

b) En utilisant le Substrat en Roger

La figure III.56 présente un nouveau modèle d'antenne réalisé sur un substrat Rogers et alimenté par un câble coaxial. La structure est basée sur un patch rectangulaire modifié par l'ajout de trois encoches cylindriques, permettant d'optimiser ses caractéristiques électromagnétiques. La vue arrière montre le plan de masse métallique de l'antenne.

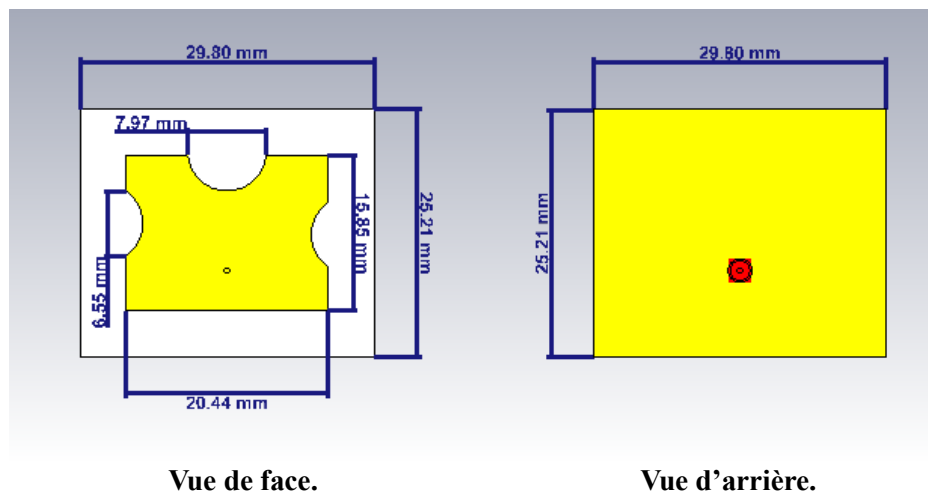


Figure III.56: Antenne nouveau modèle initiale alimentée par un câble coaxial (Roger).

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

Tableau III.19 : Dimensions de l'antenne nouveau modèle initiale alimentée par un câble coaxial (Roger).

Paramètres	wg	k	x	y	T	inner	h	outer	lp	wp	lg
Dimensions (mm)	29.8	-5	0	-3.78	0.035	0.291	1.56	2/2	15.85	20.44	25.21

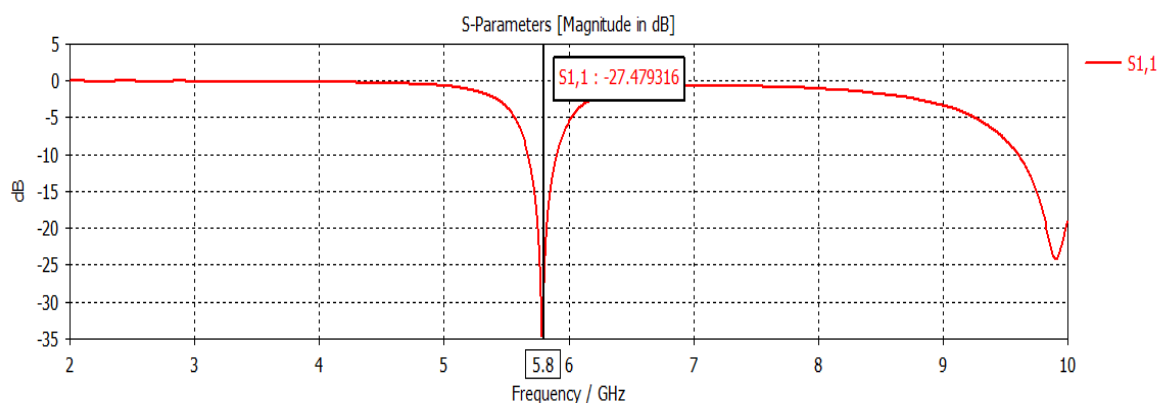


Figure III.57: Coefficient de réflexion de l'antenne nouveau modèle initiale alimentée par un câble coaxial (Roger).

Cette figure représente le paramètre $S_{11} = -27.4793$ dB du nouveau modèle d'antenne réalisé sur substrat Roger et alimenté par câble coaxial.

Ce résultat indique une bonne adaptation d'impédance. En effet, la valeur de S_{11} est nettement inférieure à -10 dB, ce qui montre que la majorité de la puissance incidente est correctement rayonnée par l'antenne, avec de faibles réflexions vers la source. Cela traduit un bon accord entre la structure rayonnante et le système d'alimentation à la fréquence de résonance (5.8 GHz), garantissant ainsi de bonnes performances de fonctionnement de l'antenne.

c) En utilisant le Substrat en Silicon

La figure III.58 présente un nouveau modèle d'antenne réalisé sur un substrat Silicon et alimenté par un câble coaxial. La structure est basée sur un patch rectangulaire modifié par l'ajout de trois encoches cylindriques, permettant d'optimiser ses caractéristiques électromagnétiques. La vue arrière montre le plan de masse métallique de l'antenne.

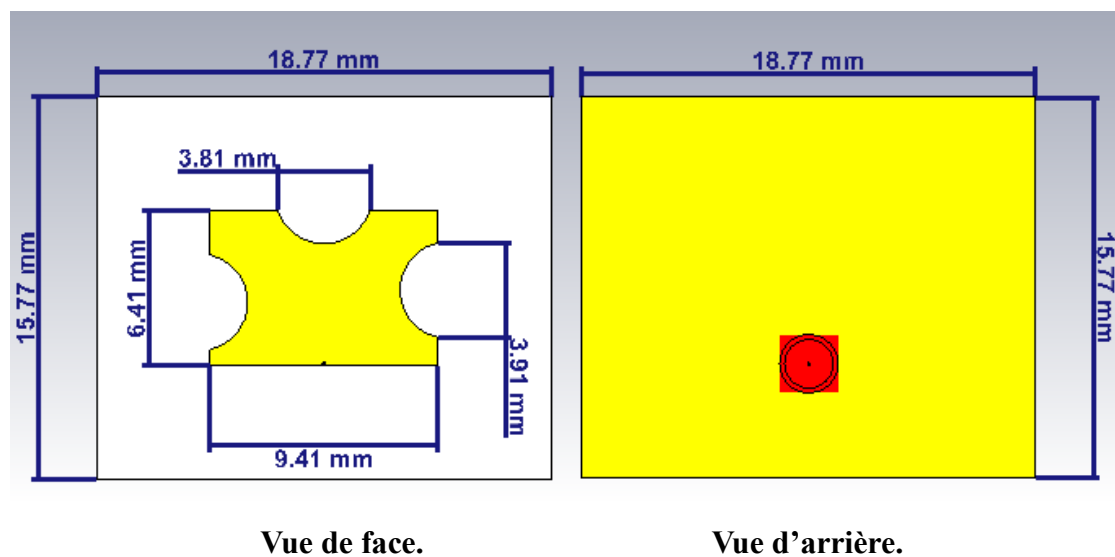


Figure III.58: Antenne nouveau modèle initiale alimentée par un câble coaxial (Silicon).

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

Tableau III.20 : Dimensions de l'antenne nouveau modèle initiale alimentée par un câble coaxial (Silicon).

Paramètres	wg	k	x	y	T	inner	h	outer	lp	wp	lg
Dimensions (mm)	18.77	-5	0	-3.102	0.035	0.11265/2	1.56	2/2	6.41	9.41	15.77

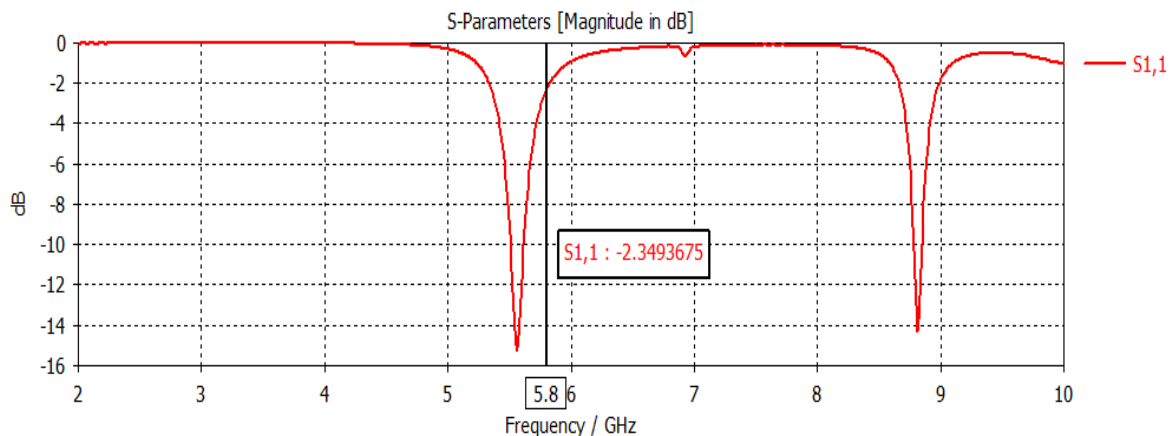


Figure III.59: Coefficient de réflexion de l'antenne nouveau modèle initiale alimentée par un câble coaxial (Silicon).

La courbe du coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne initiale en silicon alimentée par coaxial montre qu'à la fréquence de 5.8 GHz, la valeur du S_{11} est d'environ -2.34 dB.

Cette valeur étant supérieure à -10 dB, elle indique une mauvaise adaptation d'impédance entre l'antenne et la ligne d'alimentation coaxiale à cette fréquence. Une partie importante de la puissance incidente est donc réfléchiée vers la source au lieu d'être rayonnée par l'antenne.

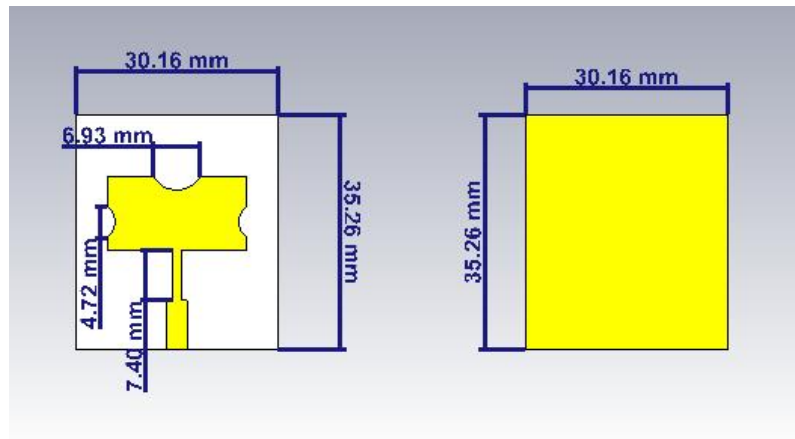
Par conséquent, les performances de l'antenne à 5.8 GHz restent limitées en termes d'efficacité de transmission, ce qui montre que l'antenne nécessite une optimisation supplémentaire afin d'améliorer l'adaptation et réduire les pertes par réflexion dans cette bande de fonctionnement.

III.5.2.2 Antenne rectangulaire nouveau modèle adaptée

➤ Micro-ruban

a) En utilisant le Substrat en FR4

La figure III.60 présente la géométrie du nouveau modèle d'antenne adaptée, réalisée sur un substrat FR4 et alimentée par une ligne micro-ruban. Cette structure est obtenue à partir du nouveau modèle précédent après une optimisation de ses dimensions géométriques afin d'améliorer son adaptation à la fréquence de fonctionnement visée. Le patch rectangulaire conserve les trois encoches cylindriques intégrées, tandis que certaines dimensions ont été ajustées pour optimiser les performances électromagnétiques de l'antenne.



Vue de face.

Vue d'arrière.

Figure III.60: Antenne nouveau modèle adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).

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

Tableau III.21 : Dimensions de l'antenne nouveau modèle adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).

Paramètres	T	h	wf	lp	lf	wp	wg	lg
Dimensions (mm)	0.035	1.56	3.058	11.0999	14.8	20.8	30.16	35.2599

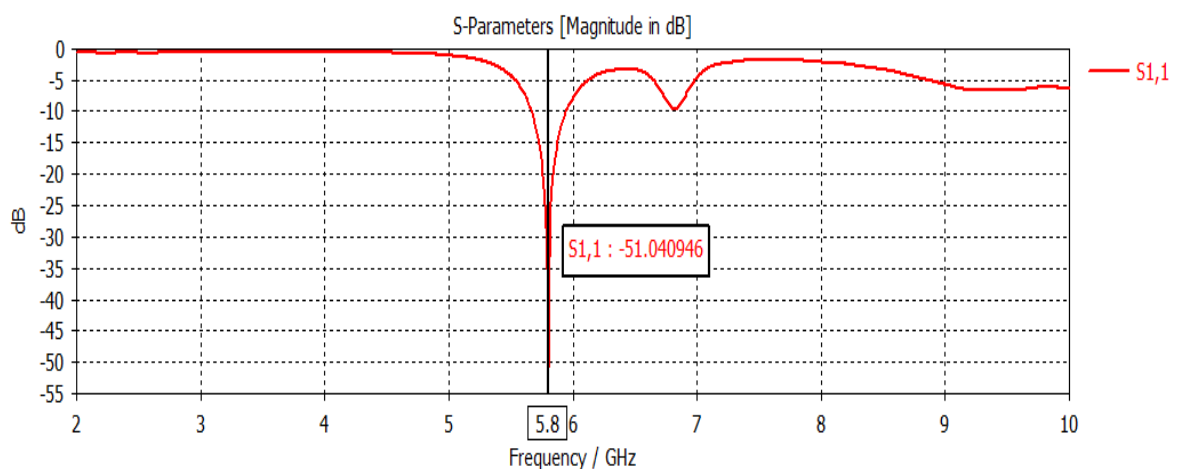


Figure III.61: Coefficient de réflexion de l'antenne nouveau modèle adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).

La figure III.61 présente le coefficient de réflexion (S_{11}) du nouveau modèle d'antenne adaptée alimentée par une ligne micro-ruban et réalisée sur un substrat FR4. On observe une fréquence de résonance principale située à 5,8 GHz, pour laquelle le coefficient de réflexion atteint une valeur minimale d'environ -51 dB.

Cette valeur très inférieure à -10 dB indique une excellente adaptation d'impédance entre l'antenne et la ligne d'alimentation, ce qui se traduit par une très faible puissance réfléchie et

un transfert quasi total de l'énergie vers l'antenne. Les résultats obtenus confirment ainsi l'efficacité des modifications apportées à la géométrie de l'antenne pour optimiser son fonctionnement à la fréquence visée.

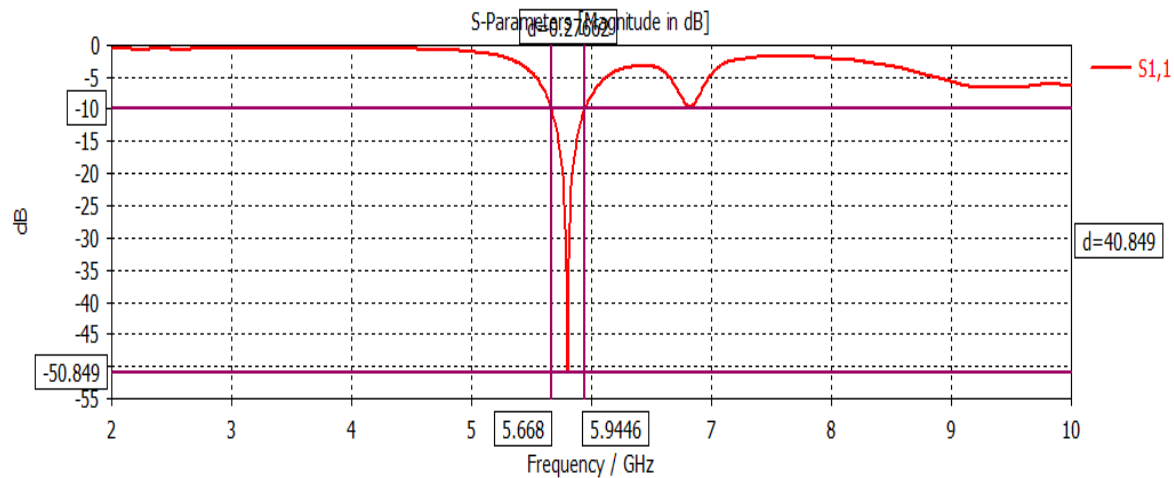


Figure III.62: La Bande passante de l'antenne nouveau modèle adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).

La bande passante de l'antenne, déterminée pour un coefficient de réflexion de -51.04 dB, est d'environ 277 MHz. Cette valeur montre que l'antenne reste bien adaptée sur une plage de fréquences suffisante autour de 5,8 GHz, garantissant ainsi de bonnes performances de fonctionnement.

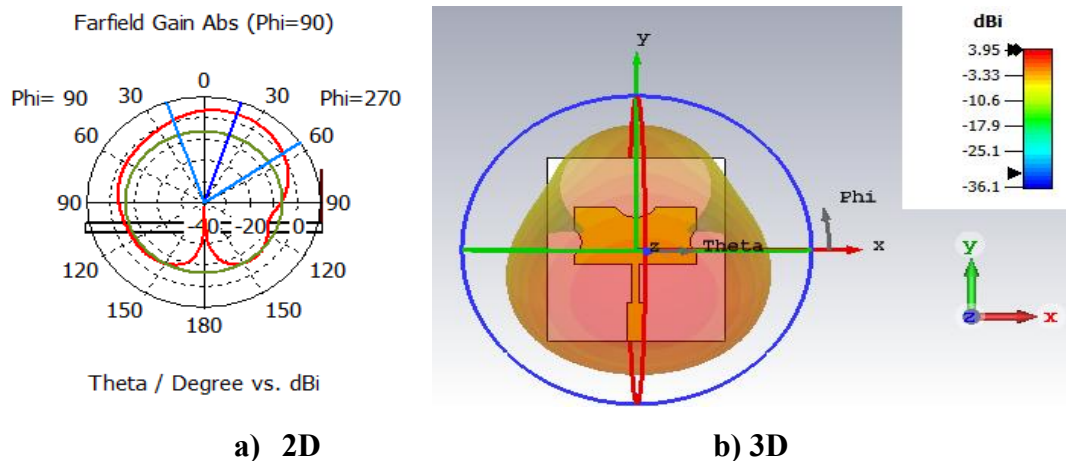


Figure III.63: Diagramme de rayonnement en 2D et 3D de l'antenne adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).

Le diagramme de rayonnement 2D (Figure III.63.a) montre que l'antenne rayonne principalement dans une direction privilégiée, avec un lobe principal bien défini. Cela indique une bonne directivité et une concentration efficace de l'énergie rayonnée.

Le diagramme de rayonnement 3D (Figure III.63.b) met en évidence un gain maximal de 3,95 dB, traduisant une bonne aptitude de l'antenne à rayonner l'énergie dans l'espace.

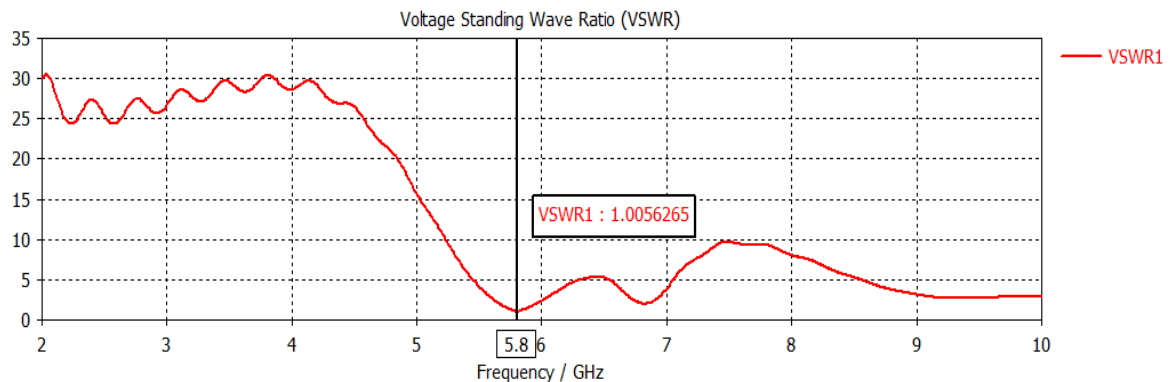
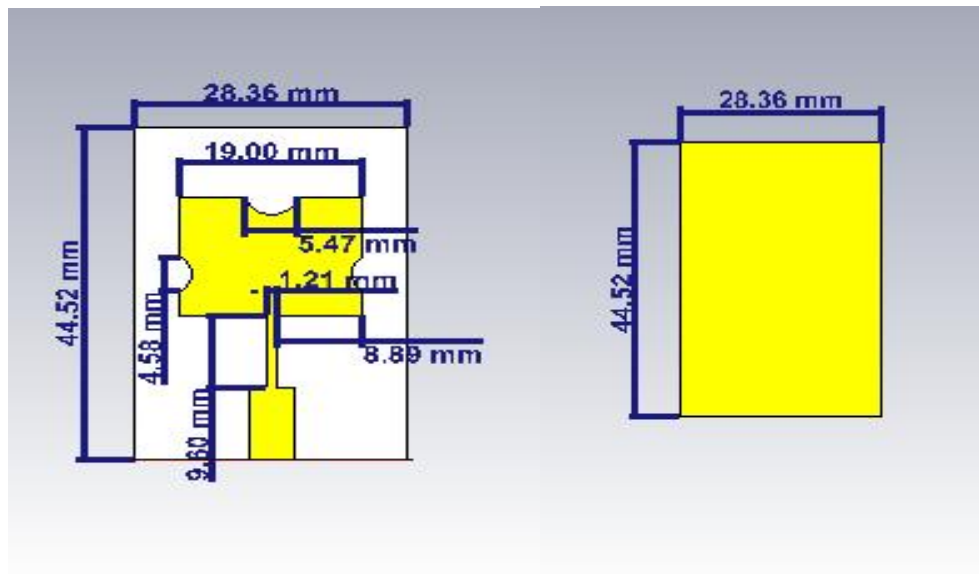


Figure III.64: Variation du VSWR de l'antenne adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).

La valeur du VSWR obtenue est de 1,005, très proche de l'unité. Cela indique une excellente adaptation d'impédance entre l'antenne et la ligne d'alimentation, avec des pertes par réflexion quasiment nulles. Ce résultat confirme le bon fonctionnement de l'antenne à la fréquence de résonance.

b) En utilisant le Substrat en Roger

La figure III.65 présente la géométrie du nouveau modèle d'antenne adaptée, réalisée sur un substrat Roger et alimentée par une ligne micro-ruban. Cette structure est obtenue à partir du nouveau modèle précédent après une optimisation de ses dimensions géométriques afin d'améliorer son adaptation à la fréquence de fonctionnement visée. Le patch rectangulaire conserve les trois encoches cylindriques intégrées, tandis que certaines dimensions ont été ajustées pour optimiser les performances électromagnétiques de l'antenne.



Vue de face.

Vue d'arrière.

Figure III.65: Antenne nouveau modèle adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (Roger).

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

Tableau III.22: Dimensions de l'antenne nouveau modèle adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (Roger).

Paramètres	T	h	wf	lp	lf	wp	wg	lg
Dimensions (mm)	0.035	1.56	4.846	15.96	19.2	19	28.36	44.52

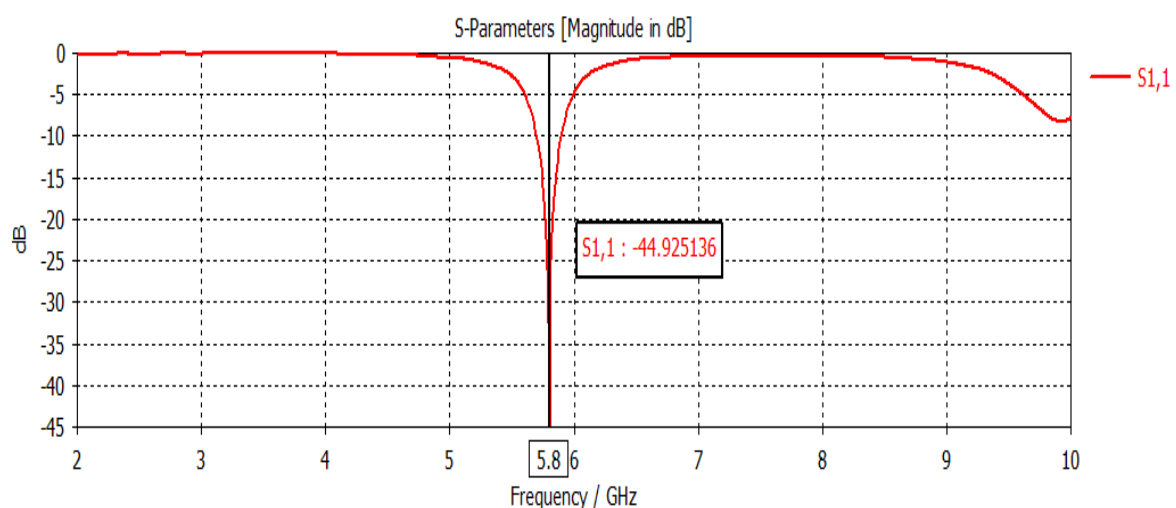


Figure III.66: Coefficient de réflexion de l'antenne nouveau modèle adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (Roger).

Cette figure représente le paramètre $S_{11} = -44.9251$ dB du nouveau modèle adapté de l'antenne réalisé sur substrat Roger et alimenté par ligne micro-ruban.

Ce résultat indique une excellente adaptation d'impédance. En effet, la valeur de S_{11} est largement inférieure à -10 dB, ce qui traduit des réflexions quasi nulles et une très bonne transmission de la puissance incidente vers la structure rayonnante. Cela montre un accord optimal entre l'antenne et la ligne d'alimentation à la fréquence de résonance de 5.8 GHz, garantissant ainsi des performances très satisfaisantes.

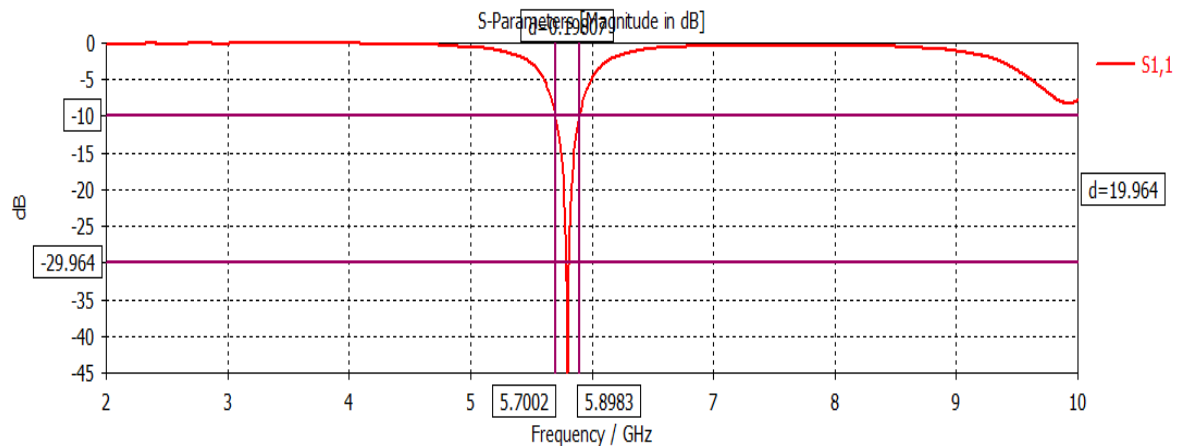
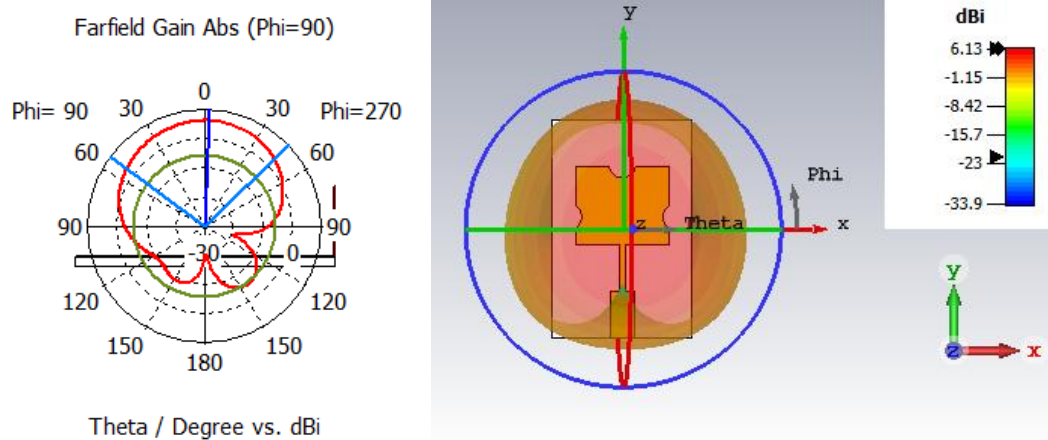


Figure III.67: La Bande passante de l'antenne nouveau modèle adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (Roger).

La bande passante de l'antenne réalisée sur un substrat Roger, déterminée pour un coefficient de réflexion de -44.92 dB, est d'environ 198,7 MHz. Cette valeur indique que l'antenne présente une bonne adaptation autour de sa fréquence de résonance et assure un fonctionnement satisfaisant dans la bande de fréquence considérée.



a) 2D

b) 3D

Figure III.68: Diagramme de rayonnement en 2D et 3D de l'antenne adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (Roger).

Le diagramme de rayonnement 2D montre que l'antenne rayonne principalement dans la direction de $\theta = 0^\circ$, où le gain atteint sa valeur maximale. Le lobe principal est bien défini et les lobes secondaires sont relativement faibles, ce qui indique une bonne concentration de l'énergie rayonnée dans la direction souhaitée. Cette caractéristique traduit une bonne directivité de l'antenne et un faible rayonnement dans les directions non désirées.

La figure (III.68.b) présente le diagramme de rayonnement de l'antenne, avec un gain maximal de 6.13 dB. Ce résultat montre que l'antenne possède une bonne capacité de rayonnement directionnel à la fréquence de fonctionnement (5.8 GHz).

En effet, ce niveau de gain indique que l'énergie électromagnétique est correctement concentrée dans les directions principales de rayonnement, ce qui améliore les performances globales de l'antenne en termes de portée et d'efficacité. Ainsi, le diagramme obtenu confirme le bon fonctionnement du nouveau modèle adapté et sa capacité à assurer une transmission efficace du signal.

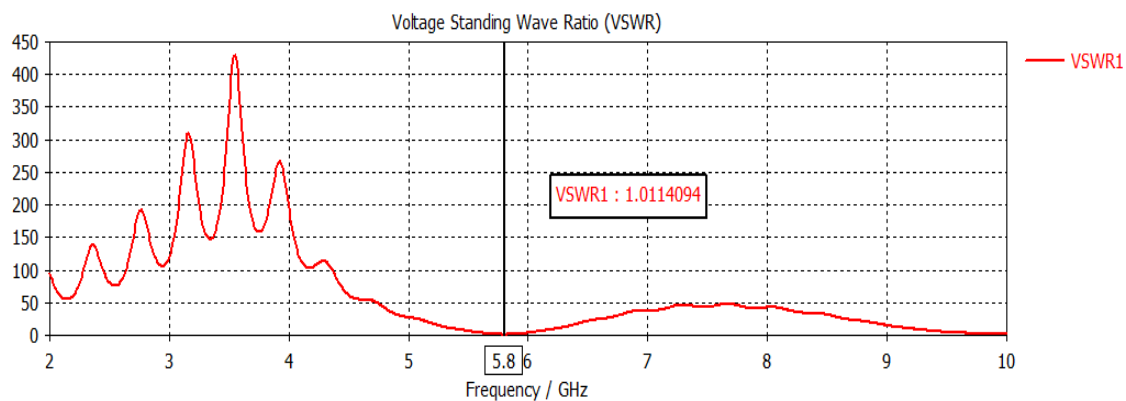


Figure III.69: Variation du VSWR de l'antenne adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (Roger).

Cette figure représente le paramètre $VSWR = 1.0114$ de l'antenne.

Ce résultat indique une excellente adaptation d'impédance. En effet, une valeur de VSWR très proche de 1 signifie que les réflexions sont quasi nulles et que la quasi-totalité de la puissance incidente est transmise vers la structure rayonnante. Ainsi, l'antenne est parfaitement accordée à la fréquence de fonctionnement (5.8 GHz), assurant de très bonnes performances globales.

c) En utilisant le Substrat en Silicon

La figure III.70 présente la géométrie du nouveau modèle d'antenne adaptée, réalisée sur un substrat Silicon et alimentée par une ligne micro-ruban. Cette structure est obtenue à partir du nouveau modèle précédent après une optimisation de ses dimensions géométriques afin d'améliorer son adaptation à la fréquence de fonctionnement visée. Le patch rectangulaire

conserve les trois encoches cylindriques intégrées, tandis que certaines dimensions ont été ajustées pour optimiser les performances électromagnétiques de l'antenne.

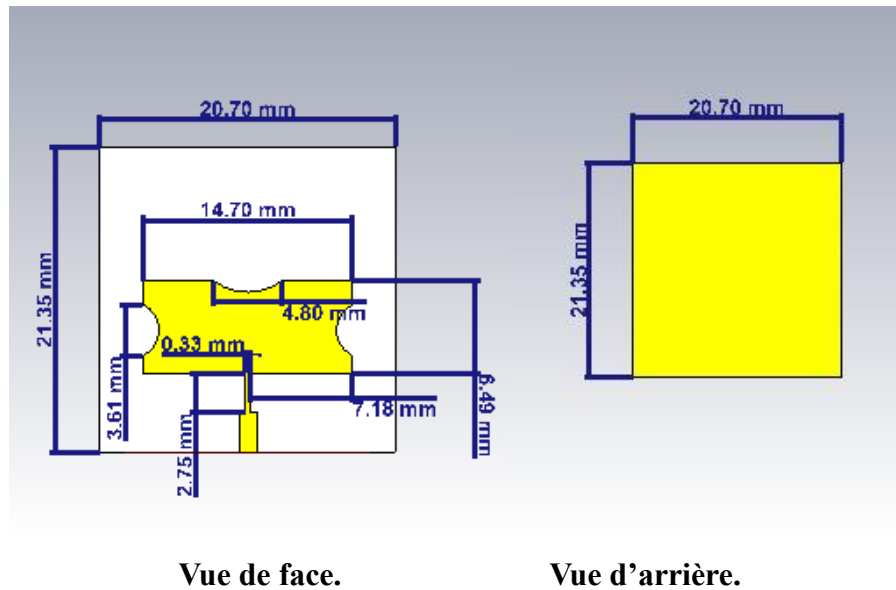


Figure III.70: Antenne nouveau modèle adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).

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

Tableau III.23: Dimensions de l'antenne nouveau modèle adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).

Paramètres	T	h	wf	lp	lf	wp	wg	lg
Dimensions (mm)	0.035	1.56	1.238	6.485	5.5	14.7	20.7	21.345

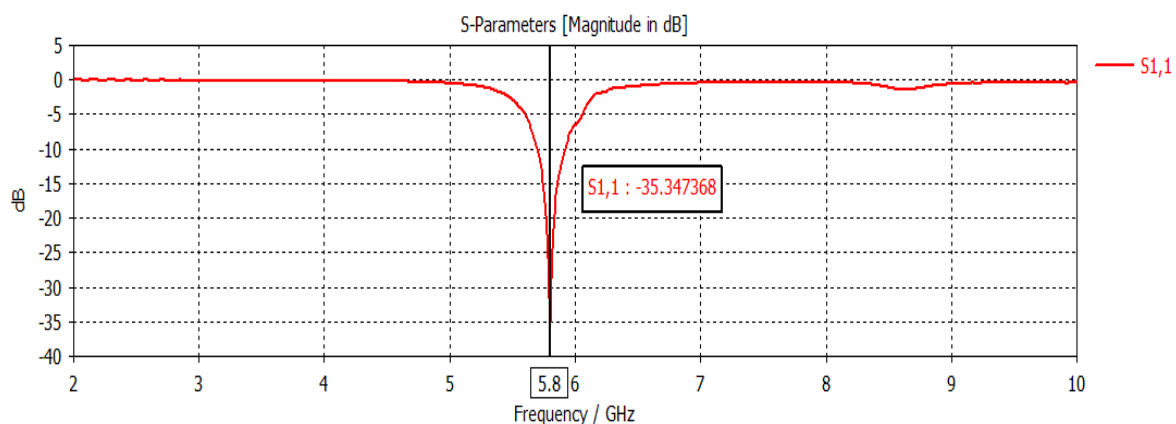


Figure III.71: Coefficient de réflexion de l'antenne nouveau modèle adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).

La figure représente le paramètre $S_{11} = -35.3474$ dB de l'antenne nouveau modèle adapté réalisée sur substrat silicon et alimentée par ligne micro-ruban.

Ce résultat indique une excellente adaptation d'impédance. En effet, une telle valeur de S_{11} , très inférieure à -10 dB, traduit des pertes par réflexion extrêmement faibles et une très grande partie de la puissance incidente correctement transmise et rayonnée par l'antenne. Ainsi, l'antenne présente un très bon accord avec la ligne d'alimentation à la fréquence de résonance (5.8 GHz), garantissant de très bonnes performances de fonctionnement.

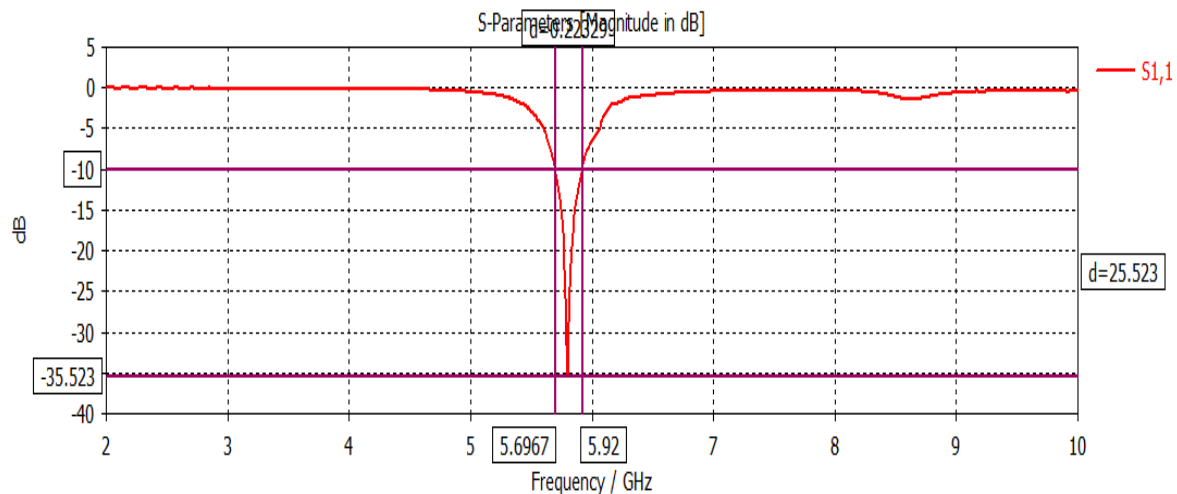


Figure III.72: La Bande passante de l'antenne nouveau modèle adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).

La bande passante de l'antenne réalisée sur un substrat en silicon, déterminée pour un coefficient de réflexion de -35.34 dB, est d'environ 223,29 MHz. Cette valeur indique une bonne adaptation d'impédance autour de la fréquence de résonance et garantit un fonctionnement efficace de l'antenne dans la bande de fréquence considérée.

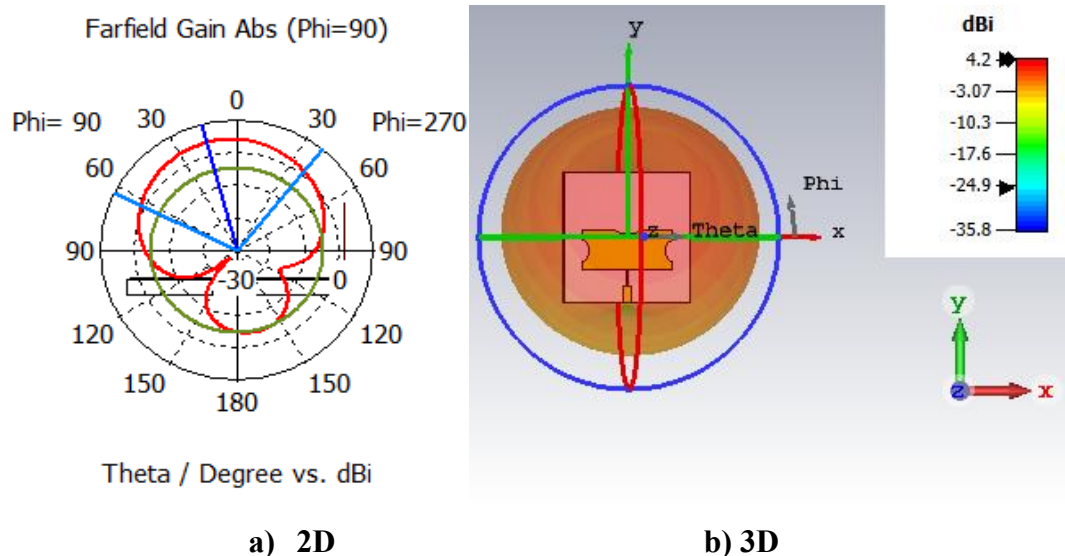


Figure III.73: Diagramme de rayonnement en 2D et 3D de l'antenne adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).

Le diagramme de rayonnement 2D montre que l'antenne présente un rayonnement principalement orienté vers la direction normale au plan de l'antenne. Le lobe principal est centré autour de $\theta = 0^\circ$, traduisant une bonne directivité. Les lobes secondaires demeurent faibles, ce qui limite les pertes d'énergie dans les directions indésirables. Le gain reste relativement élevé dans la direction principale, assurant ainsi une transmission efficace du signal.

La figure (III.73.b) représente le gain de l'antenne égal à 4.2 dB du nouveau modèle adapté réalisé sur substrat silicon et alimenté par ligne micro-ruban.

Ce résultat met en évidence une bonne capacité de rayonnement de l'antenne à la fréquence de fonctionnement (5.8 GHz). En effet, la valeur obtenue traduit une émission efficace de l'énergie électromagnétique dans une direction privilégiée, ce qui confirme le bon fonctionnement du modèle proposé en termes de rayonnement et de performance globale.

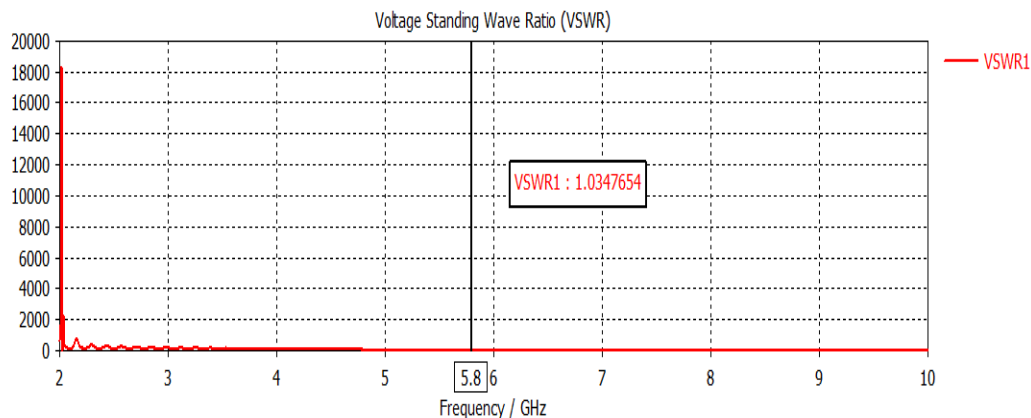


Figure III.74: Variation du VSWR de l'antenne adaptée alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).

La figure représente le paramètre $VSWR = 1.0348$ de l'antenne.

Cette valeur traduit une excellente qualité d'adaptation d'impédance. En effet, un VSWR très proche de 1 indique que la puissance réfléchiée est négligeable et que la quasi-totalité de l'énergie fournie est effectivement rayonnée par l'antenne. Ainsi, le dispositif est correctement accordé à la fréquence de fonctionnement (5.8 GHz), ce qui assure de bonnes performances de transmission.

➤ Coaxial

a) En utilisant le Substrat en FR4

La figure III.75 présente la géométrie du nouveau modèle d'antenne adaptée, réalisée sur un substrat en FR4 et alimentée par un câble coaxial. Cette structure est obtenue à partir du modèle précédent après une optimisation de ses dimensions géométriques afin d'améliorer

son adaptation à la fréquence de fonctionnement visée. Le patch rectangulaire conserve les trois encoches cylindriques intégrées, tandis que certaines dimensions ont été ajustées pour optimiser les performances électromagnétiques de l'antenne. L'alimentation par câble coaxial assure un transfert efficace de l'énergie vers le patch rayonnant et contribue à une meilleure adaptation de la structure.

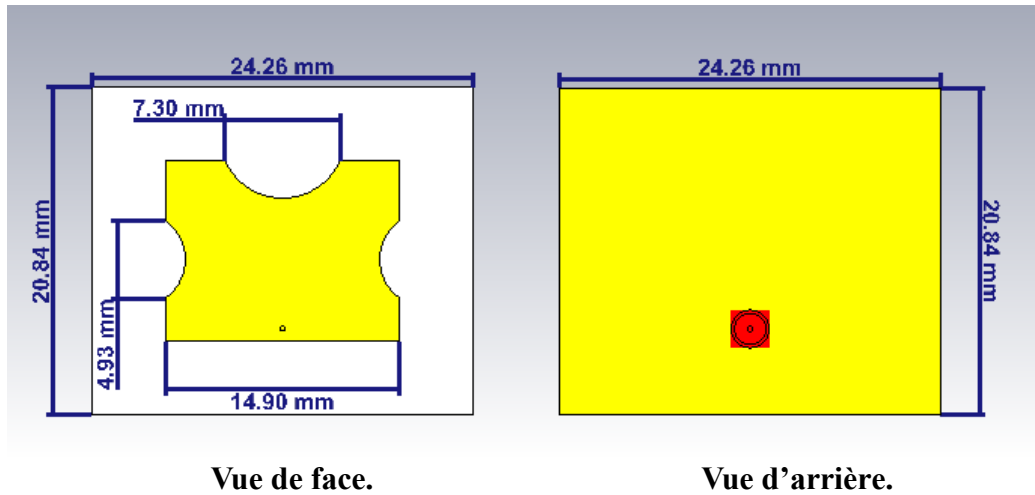


Figure III.75: Antenne nouveau modèle adaptée alimentée par un câble coaxial (FR4).

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

Tableau III.24: Dimensions de l'antenne nouveau modèle adaptée alimentée par un câble coaxial (FR4).

Paramètres	wg	k	x	y	T	inner	h	outer	lp	wp	lg
Dimensions (mm)	24.26	-5	0	-4.9	0.035	0.3549/2	1.56	2/2	11.48	14.9	20.84

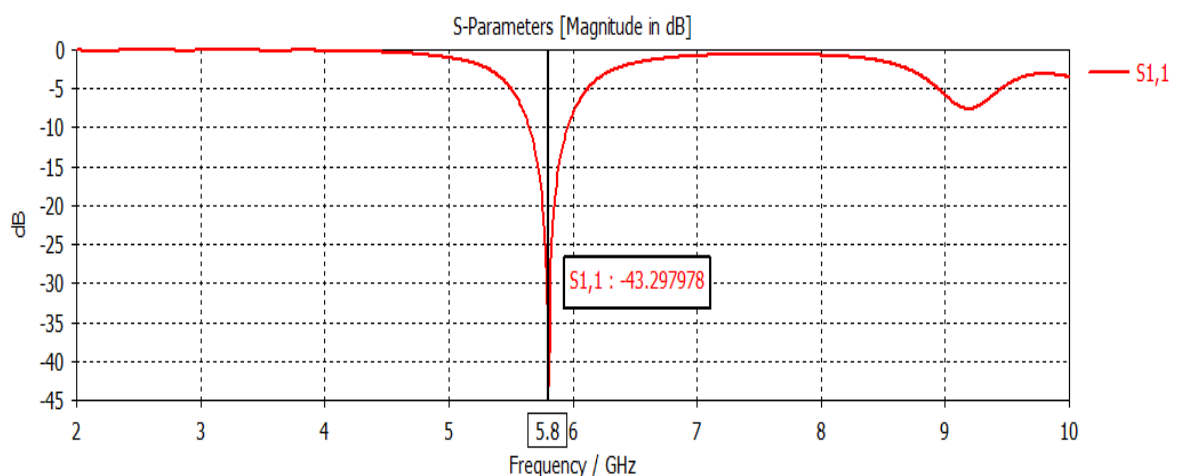


Figure III. 76: Coefficient de réflexion de l'antenne nouveau modèle adaptée alimentée par un câble coaxial (FR4).

Le coefficient de réflexion (S11) atteint une valeur minimale de $-43,29$ dB à $5,8$ GHz, indiquant une excellente adaptation d'impédance et de très faibles pertes par réflexion. Ce résultat confirme le bon fonctionnement de l'antenne à la fréquence de résonance.

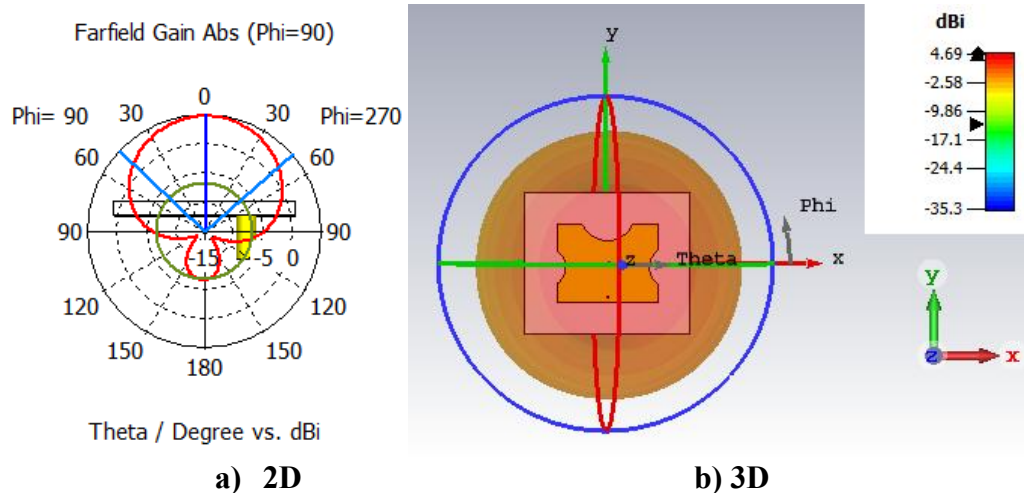


Figure III.77: Diagramme de rayonnement en 2D et 3D de l'antenne adaptée alimentée par un câble coaxial (FR4).

La figure (III.77.a) représente le diagramme de rayonnement 2D de l'antenne alimentée par un câble coaxial sur substrat FR4 présente un lobe principal orienté vers $\theta = 0^\circ$, indiquant que le rayonnement est maximal dans la direction normale au plan de l'antenne. La forme du diagramme est quasi symétrique et les lobes secondaires restent faibles, ce qui traduit une bonne directivité et une répartition efficace de la puissance rayonnée dans la direction souhaitée.

La figure (III.77.b) représente le diagramme de rayonnement 3D montre que l'antenne atteint un gain maximal de $4,69$ dB. Cette valeur indique une bonne capacité de l'antenne à concentrer l'énergie rayonnée dans la direction principale de propagation. Le gain obtenu confirme que l'antenne assure une transmission efficace du signal et présente des performances satisfaisantes pour l'application visée.

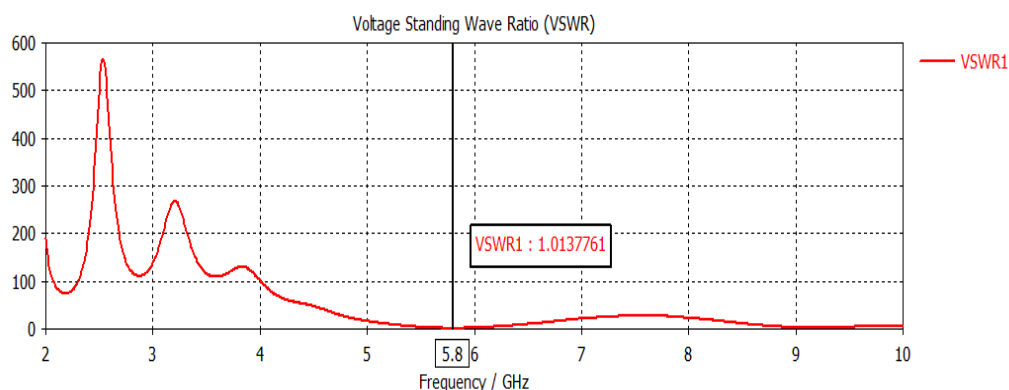


Figure III.78: Variation du VSWR de l'antenne adaptée alimentée par un câble coaxial (FR4).

La valeur du VSWR obtenue est de 1,013, ce qui est très proche de l'unité. Cette valeur indique une excellente adaptation d'impédance entre l'antenne et le câble coaxial, avec des pertes par réflexion très faibles. Ce résultat confirme le bon fonctionnement de l'antenne à la fréquence de résonance et son efficacité dans le transfert de puissance.

b) En utilisant le Substrat en Roger

La figure III.79 présente la géométrie du nouveau modèle d'antenne adaptée, réalisée sur un substrat en Roger et alimentée par un câble coaxial. Cette structure est obtenue à partir du modèle précédent après une optimisation de ses dimensions géométriques afin d'améliorer son adaptation à la fréquence de fonctionnement visée. Le patch rectangulaire conserve les trois encoches cylindriques intégrées, tandis que certaines dimensions ont été ajustées pour optimiser les performances électromagnétiques de l'antenne. L'alimentation par câble coaxial assure un transfert efficace de l'énergie vers le patch rayonnant et contribue à une meilleure adaptation de la structure.

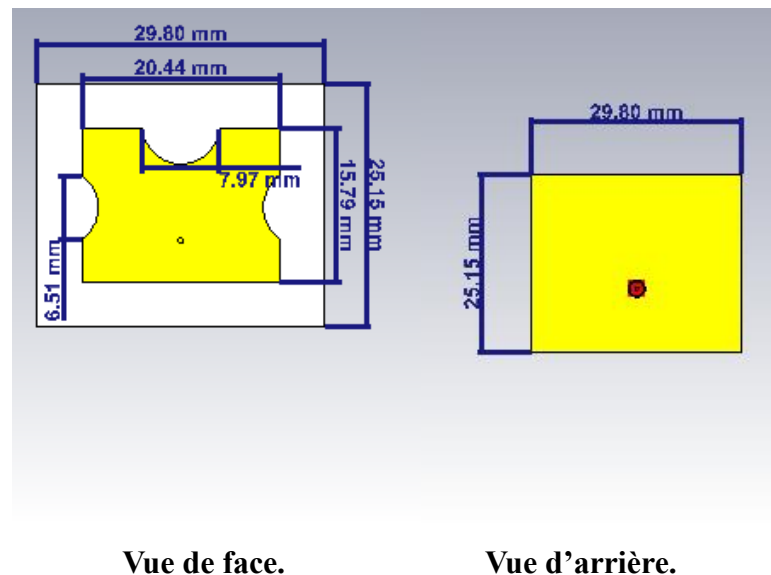


Figure III.79: Antenne nouveau modèle adaptée alimentée par un câble coaxial (Roger).

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

Tableau III. 25 : Dimensions de l'antenne nouveau modèle adaptée alimentée par un câble coaxial (Roger).

Paramètres	wg	k	x	y	T	inner	h	outer	lp	wp	lg
Dimensions (mm)	29.8	-5	0	-3.65	0.035	0.5806/2	1.56	2/2	15.79	20.44	25.15

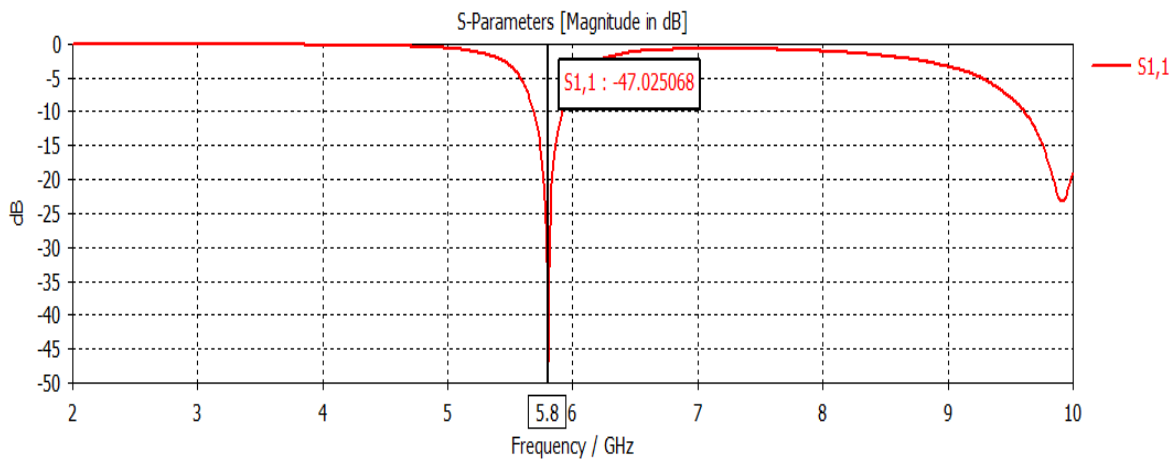


Figure III.80: Coefficient de réflexion de l'antenne nouveau modèle adaptée alimentée par un câble coaxial (Roger).

La figure présente le paramètre $S_{11} = -47.0251$ dB du nouveau modèle adapté de l'antenne réalisé sur substrat Roger et alimenté par câble coaxial.

Ce résultat traduit une excellente adaptation d'impédance à la fréquence de résonance (5.8 GHz). En effet, une telle valeur de S_{11} , très largement inférieure au seuil de -10 dB, indique des réflexions quasi nulles au niveau du port d'alimentation et une transmission quasi intégrale de la puissance incidente vers la structure rayonnante. Ainsi, l'antenne présente un accord optimal entre la ligne d'alimentation et l'élément rayonnant, garantissant un fonctionnement performant du dispositif.

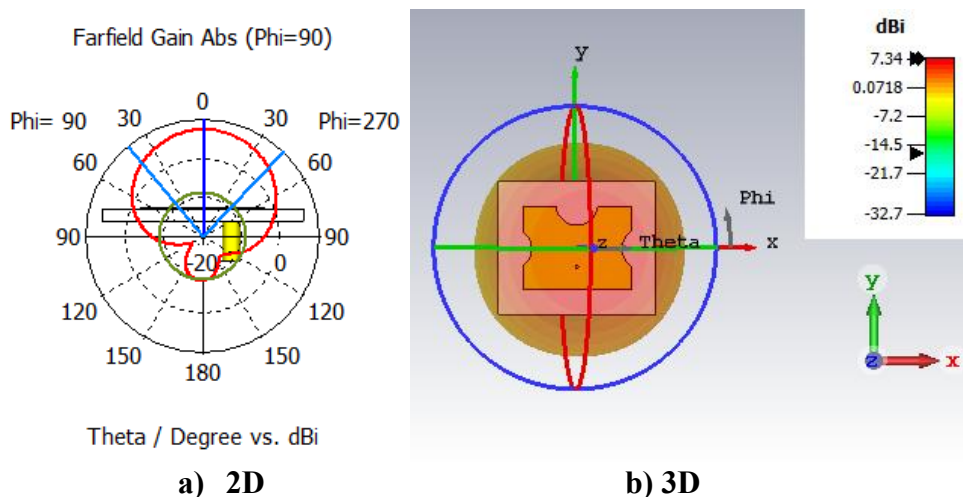


Figure III.81: Diagramme de rayonnement en 2D et 3D de l'antenne adaptée alimentée par un câble coaxial (Roger).

La Figure III.81(a) montre le diagramme de rayonnement 2D de l'antenne adaptée. On observe que le rayonnement est maximal dans la direction principale ($\theta = 0^\circ$) et diminue

progressivement dans les autres directions. La présence d'un lobe principal dominant indique que l'antenne rayonne efficacement dans la direction souhaitée, avec de faibles rayonnements secondaires.

La figure représente le diagramme de rayonnement de l'antenne, avec un gain maximal de 7.34 dB. Ce résultat met en évidence une bonne capacité de rayonnement directionnel de l'antenne à la fréquence de fonctionnement (5.8 GHz). En effet, le diagramme obtenu montre une concentration efficace de l'énergie électromagnétique dans les directions principales de rayonnement, ce qui traduit de bonnes performances globales du dispositif en termes de propagation et d'efficacité de rayonnement.

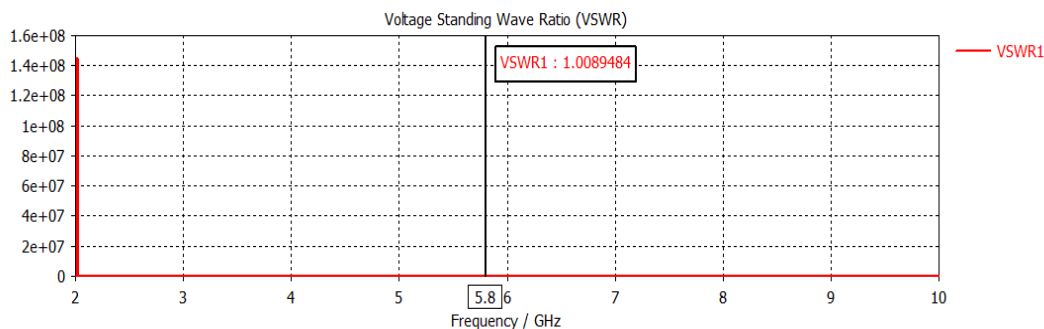


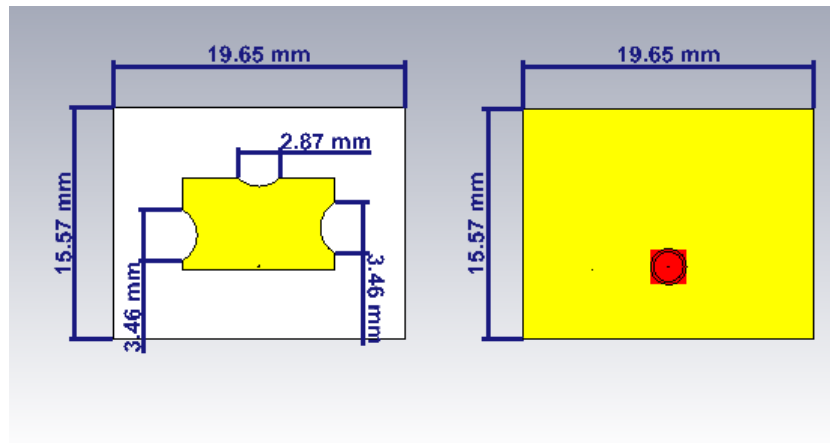
Figure III.82 : Variation du VSWR de l'antenne adaptée alimentée par un câble coaxial (Roger).

La figure représente le paramètre $VSWR = 1.0089$ de l'antenne.

Ce résultat traduit une adaptation d'impédance quasi parfaite. En effet, la valeur du VSWR étant très proche de 1, cela indique que les réflexions au niveau de l'entrée de l'antenne sont négligeables, et que l'essentiel de la puissance incidente est efficacement transféré vers la structure rayonnante. Ainsi, l'antenne présente un excellent accord à la fréquence de fonctionnement (5.8 GHz), garantissant un fonctionnement très performant du dispositif.

c) En utilisant le Substrat en Silicon

La figure III.83 présente la géométrie du nouveau modèle d'antenne adaptée, réalisée sur un substrat en Silicon et alimentée par un câble coaxial. Cette structure est obtenue à partir du modèle précédent après une optimisation de ses dimensions géométriques afin d'améliorer son adaptation à la fréquence de fonctionnement visée. Le patch rectangulaire conserve les trois encoches cylindriques intégrées, tandis que certaines dimensions ont été ajustées pour optimiser les performances électromagnétiques de l'antenne. L'alimentation par câble coaxial assure un transfert efficace de l'énergie vers le patch rayonnant et contribue à une meilleure adaptation de la structure.



Vue de face.

Vue d'arrière.

Figure III.83: Antenne nouveau modèle adaptée alimentée par un câble coaxial (Silicon).

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

Tableau III. 26 : Dimensions de l'antenne nouveau modèle adaptée alimentée par un câble coaxial (Silicon).

Paramètres	wg	k	x	y	T	inner	h	outer	lp	wp	lg
Dimensions (mm)	19.65	-5	0	-2.9	0.035	0.11265/2	1.56	2/2	6.21	10.29	15.57

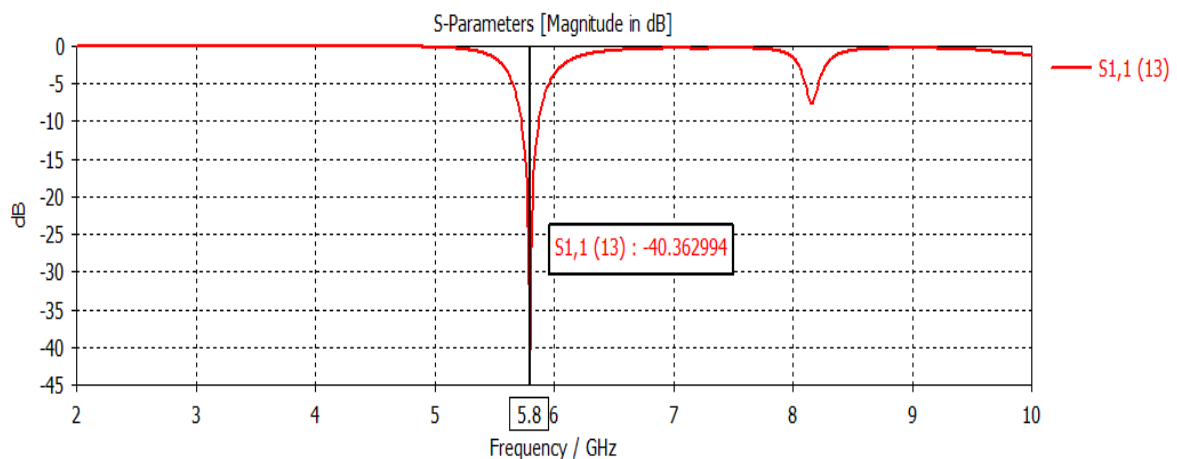
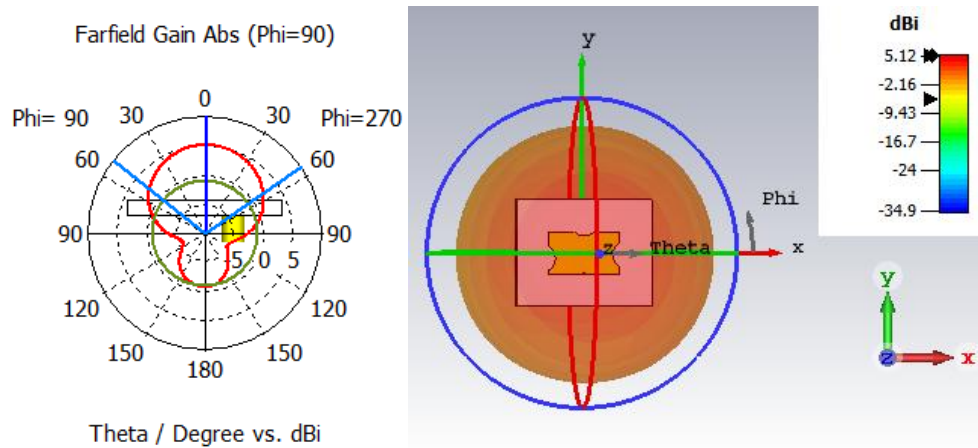


Figure III.84: Coefficient de réflexion de l'antenne nouveau modèle adaptée alimentée par un câble coaxial (Silicon).

Le coefficient de réflexion (S_{11}) atteint une valeur minimale de $-40,36$ dB à 5,8 GHz, ce qui traduit une excellente adaptation d'impédance et de très faibles pertes par réflexion. Ce résultat confirme le bon fonctionnement de l'antenne réalisée sur un substrat en silicon et alimentée par un câble coaxial.



a) 2D

b) 3D

Figure III.85: Diagramme de rayonnement en 2D et 3D de l'antenne adaptée alimentée par un câble coaxial (Silicon).

La Figure III.85(a) présente le diagramme de rayonnement 2D de l'antenne adaptée réalisée sur un substrat en silicium. On observe un lobe principal orienté vers la direction normale à l'antenne ($\theta = 0^\circ$), ce qui indique que la majeure partie de l'énergie est rayonnée dans cette direction. Les lobes secondaires restent faibles, traduisant un comportement directif satisfaisant.

La Figure III.85(b) montre le diagramme de rayonnement 3D de l'antenne adaptée sur substrat en silicium. Le gain maximal obtenu est d'environ 5,12 dB, ce qui confirme la capacité de l'antenne à concentrer l'énergie rayonnée dans la direction principale.

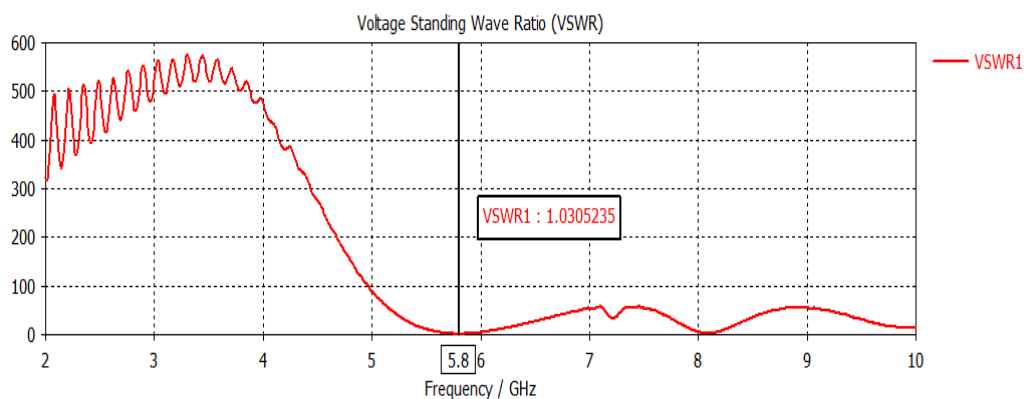


Figure III.86: Variation du VSWR de l'antenne adaptée alimentée par un câble coaxial (Silicon).

Le VSWR obtenu est de 1,305, ce qui traduit une bonne adaptation d'impédance et des pertes par réflexion relativement faibles. L'antenne présente ainsi un fonctionnement satisfaisant à la fréquence de résonance.

III.5.3 Antenne rectangulaire (nouveau modèle) avec DGS

Étant donné que les systèmes de communication 5G nécessitent une large bande passante afin de prendre en charge des débits de transmission élevés et une meilleure qualité de service, il est essentiel de concevoir des antennes capables de fonctionner sur une plage de fréquences suffisamment étendue. Dans ce contexte, la technique du plan de masse défectueux (Defected Ground Structure – DGS) a été adoptée pour améliorer les performances fréquentielles de l'antenne.

Le principe de la DGS consiste à introduire des motifs ou des encoches dans le plan de masse afin de perturber la distribution des courants de surface. Cette modification permet d'agir sur les paramètres électromagnétiques de l'antenne, notamment l'adaptation d'impédance et les caractéristiques de résonance. Par conséquent, la technique DGS contribue à l'élargissement de la bande passante, à la réduction des pertes par réflexion et à l'amélioration des performances globales de l'antenne.

Ainsi, l'utilisation de la structure DGS constitue une solution efficace pour répondre aux exigences des applications 5G nécessitant des antennes à large bande passante.

➤ Micro-ruban

a) En utilisant le Substrat en FR4

La figure III.87 présente le nouveau modèle d'antenne adaptée avec DGS, réalisé sur un substrat FR4 et alimenté par une ligne micro-ruban. L'ajout de la structure DGS au plan de masse vise à améliorer l'adaptation de l'antenne et à élargir sa bande passante.

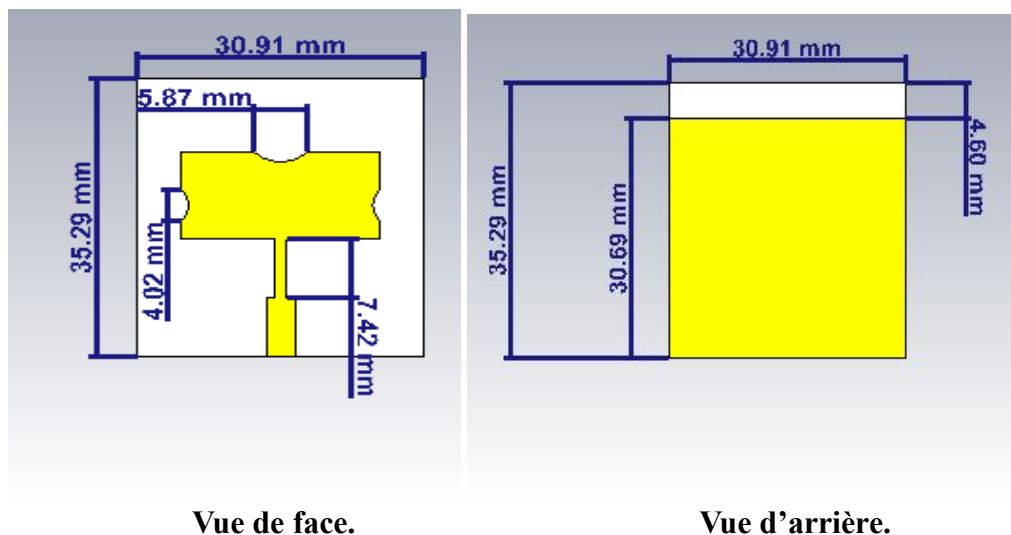


Figure III.87: Antenne nouveau modèle adaptée avec DGS alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).

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

Tableau III.27 : Dimensions de l'antenne nouveau modèle adaptée avec DGS alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).

Paramètres	T	h	wf	lp	lf	wp	wg	lg
Dimensions (mm)	0.035	1.56	3.058	11.0999	14.335	21.55	30.91	35.2949

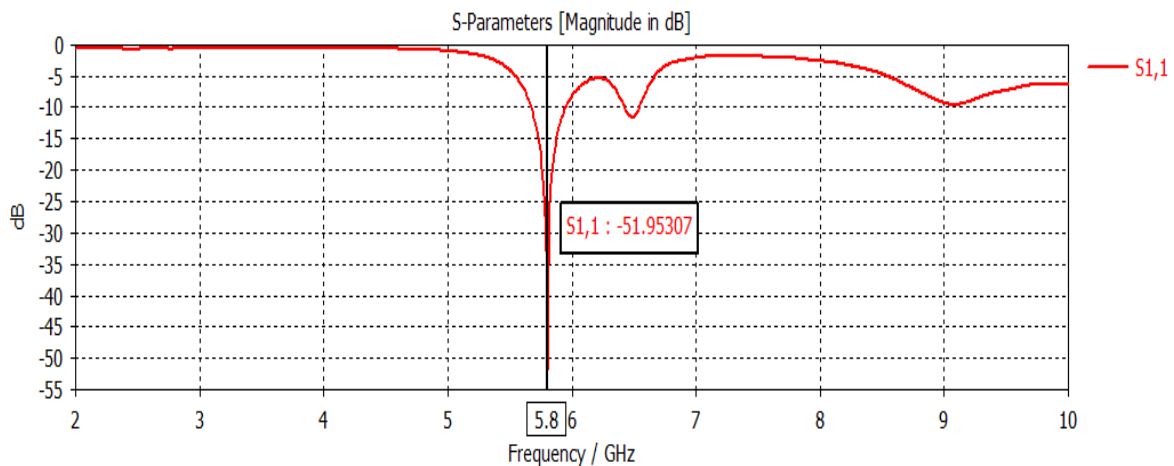


Figure III.88: Coefficient de réflexion de l'antenne nouveau modèle adaptée avec DGS alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).

Le coefficient de réflexion (S_{11}) atteint une valeur minimale de $-51,95$ dB à 5,8 GHz, indiquant une excellente adaptation d'impédance et des pertes par réflexion quasi nulles. Ce résultat confirme les bonnes performances de l'antenne avec DGS.

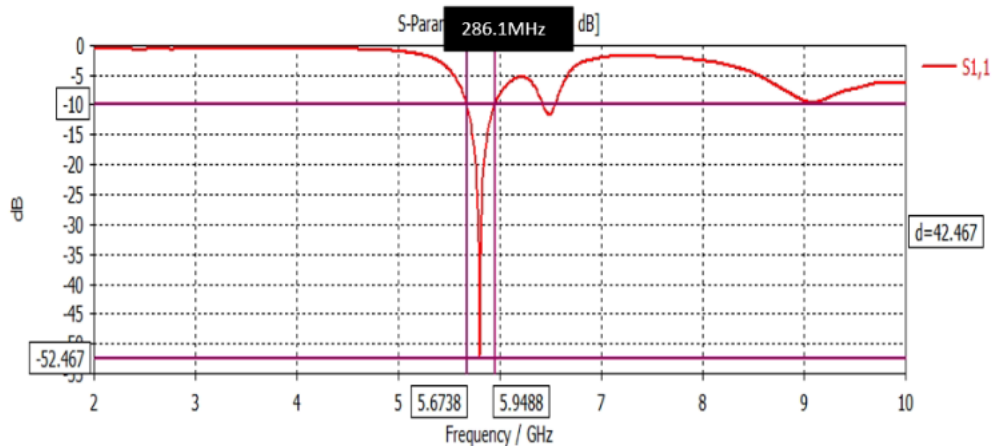


Figure III.89: La Bande passante de l'antenne nouveau modèle adaptée avec DGS alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).

L'ajout de la structure DGS a permis d'augmenter la bande passante de l'antenne de 273 MHz à 286,1 MHz. Cette amélioration confirme l'efficacité de la technique DGS pour élargir la bande de fonctionnement et optimiser les performances de l'antenne.

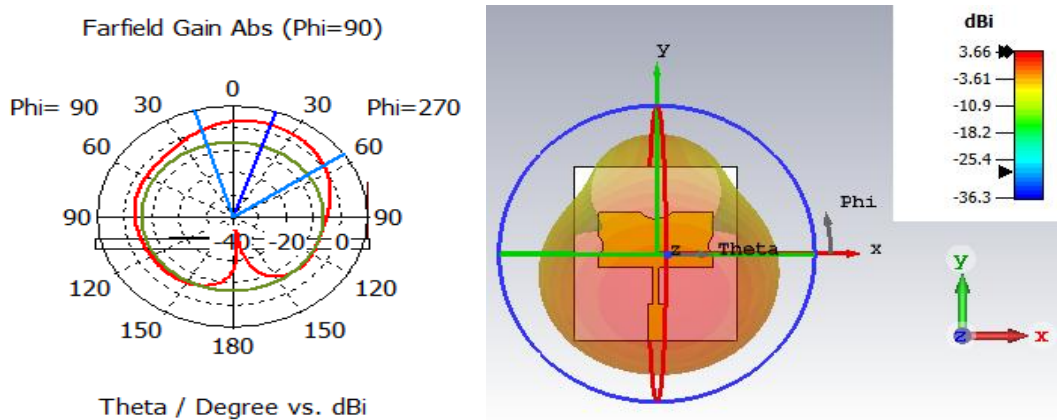


Figure III.90: Diagramme de rayonnement en 2D et 3D de l'antenne adaptée avec DGS alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).

Les diagrammes de rayonnement 2D et 3D montrent que l'antenne présente un rayonnement principalement directionnel. Le gain maximal obtenu est d'environ 3,66 dB, ce qui confirme de bonnes performances de rayonnement à la fréquence de fonctionnement.

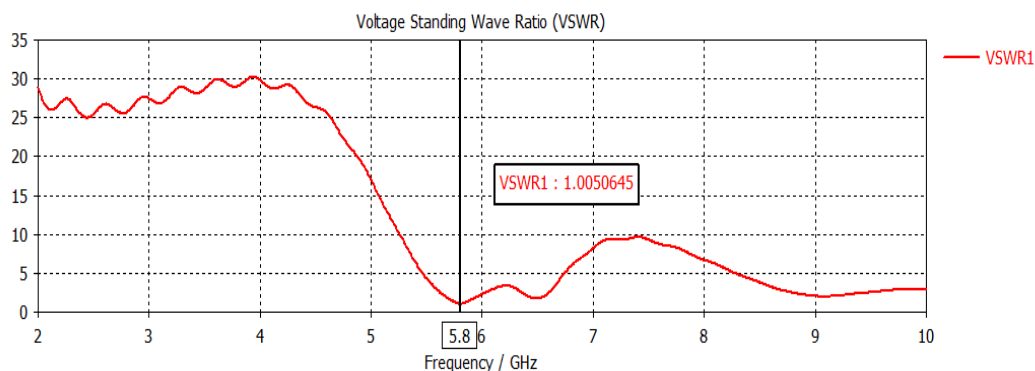
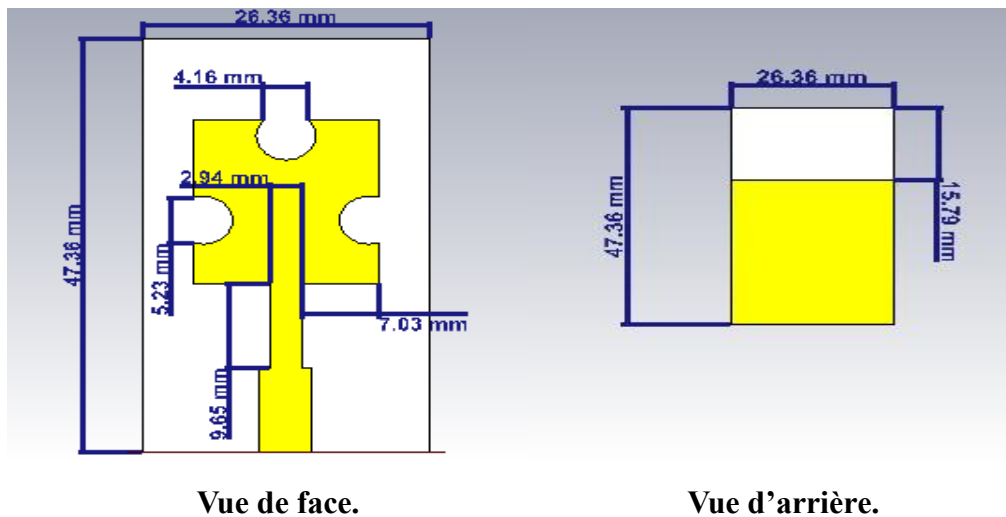


Figure III.91: Variation du VSWR de l'antenne adaptée avec DGS alimentée par la ligne micro-ruban (FR4).

Le VSWR obtenu est de 1,00506, indiquant une excellente adaptation d'impédance et de très faibles pertes par réflexion.

b) En utilisant le Substrat en Roger

La figure III.92 présente le nouveau modèle d'antenne adaptée avec DGS, réalisé sur un substrat Roger et alimenté par une ligne micro-ruban. L'ajout de la structure DGS au plan de masse vise à améliorer l'adaptation de l'antenne et à élargir sa bande passante.



Vue de face.

Vue d'arrière.

Figure III.92: Antenne nouveau modèle adaptée avec DGS alimentée par la ligne micro-ruban (Roger).

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

Tableau III.28 : Dimensions de l'antenne nouveau modèle adaptée avec DGS alimentée par la ligne micro-ruban (Roger).

Paramètres	T	h	wf	lp	lf	wp	wg	lg
Dimensions (mm)	0.035	1.56	4.846	18.7	19.3	17	26.36	47.36

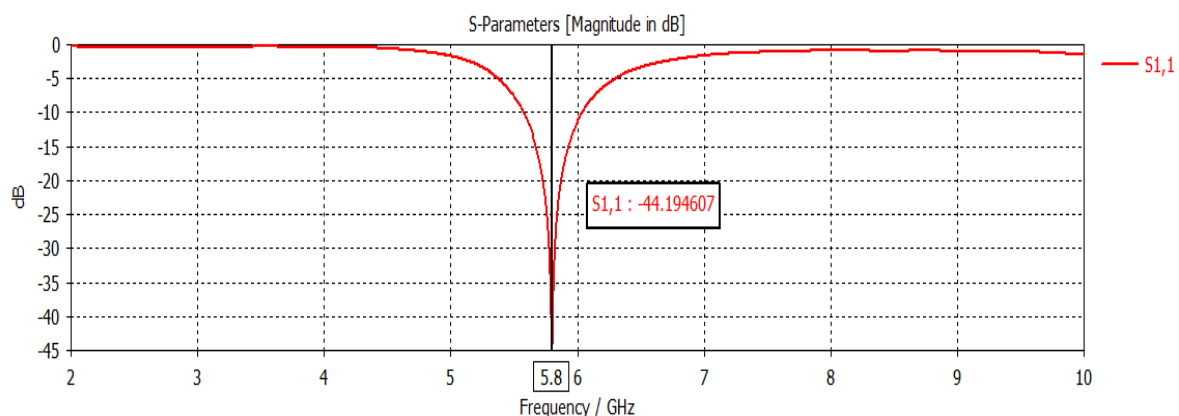


Figure III.93: Coefficient de réflexion de l'antenne nouveau modèle adaptée avec DGS alimentée par la ligne micro-ruban (Roger).

Le coefficient de réflexion (S11) atteint une valeur minimale de $-44,19$ dB à 5,8 GHz, traduisant une excellente adaptation d'impédance et de faibles pertes par réflexion. Ce résultat confirme les bonnes performances de l'antenne avec DGS.

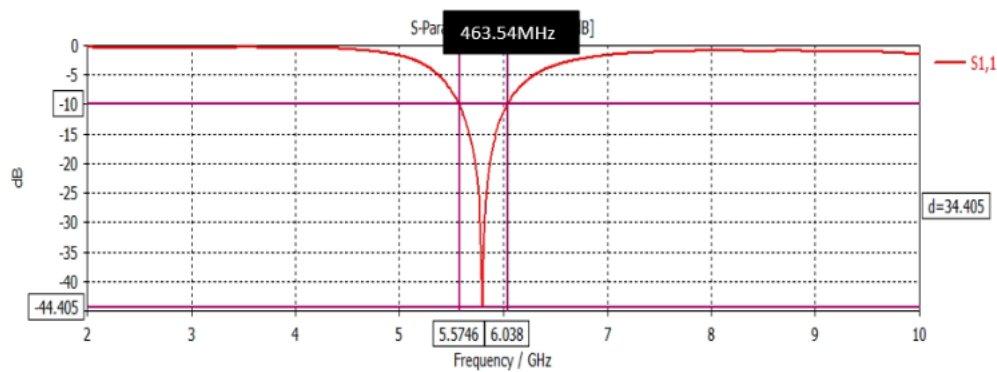


Figure III.94: La Bande passante de l'antenne nouveau modèle adaptée avec DGS alimentée par la ligne micro-ruban (Roger).

L'ajout de la structure DGS a permis d'augmenter la bande passante de l'antenne de 197,6 MHz à 463,54 MHz. Cette amélioration montre l'efficacité de la technique DGS dans l'élargissement de la bande de fonctionnement de l'antenne, tout en conservant de bonnes performances d'adaptation.

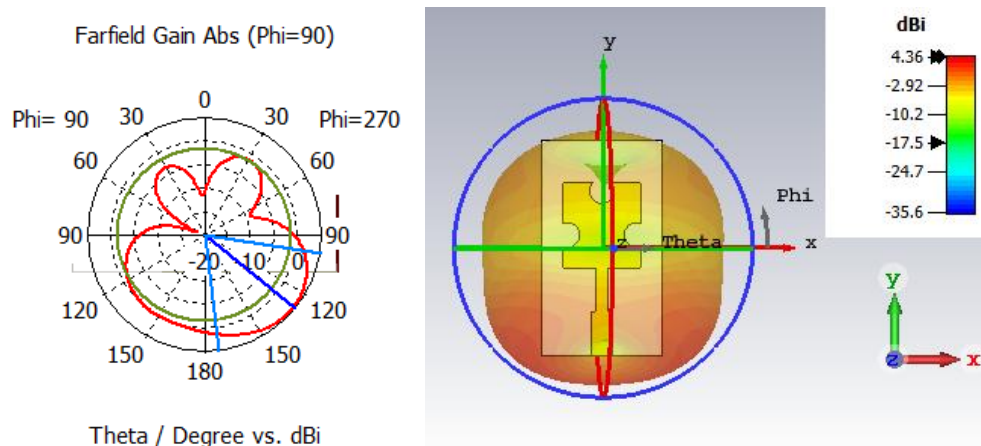


Figure III.95: Diagramme de rayonnement en 2D et 3D de l'antenne adaptée avec DGS alimentée par la ligne micro-ruban (Roger).

Les diagrammes de rayonnement 2D et 3D montrent que l'antenne présente un rayonnement directionnel avec un gain maximal d'environ 4,36 dB. Cette valeur confirme de bonnes performances de rayonnement et une transmission efficace de l'énergie à la fréquence de fonctionnement.

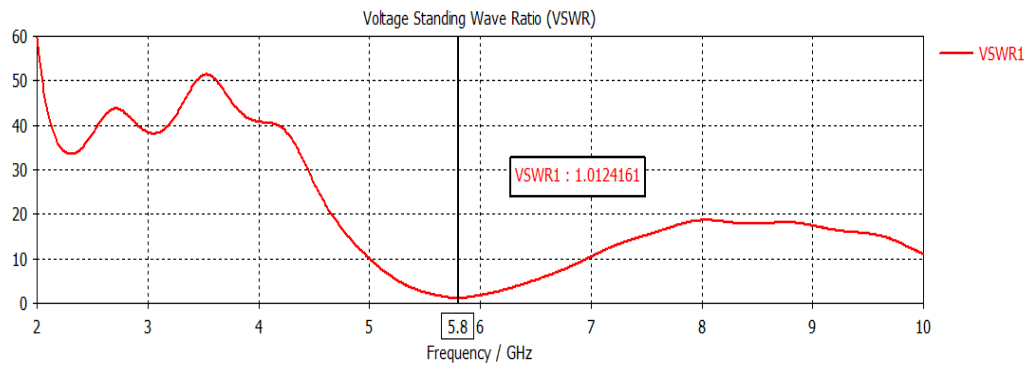
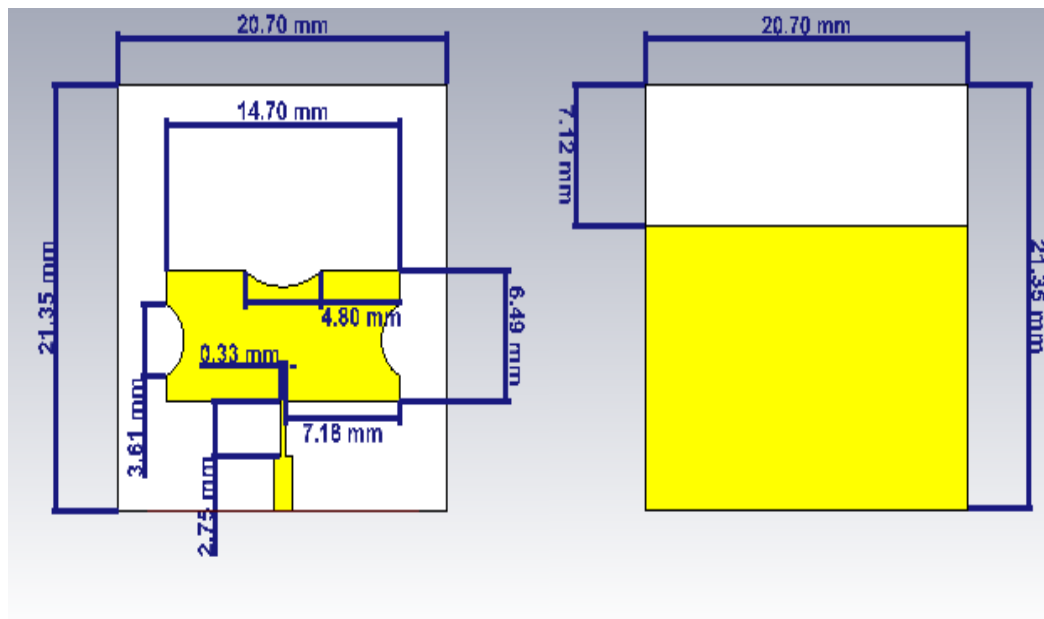


Figure III.96: Variation du VSWR de l'antenne adaptée avec DGS alimentée par la ligne micro-ruban (Roger).

Le VSWR obtenu est de 1,0124161, indiquant une excellente adaptation d'impédance et de très faibles pertes par réflexion.

c) En utilisant le Substrat en Silicon

La figure III.96 présente le nouveau modèle d'antenne adaptée avec DGS, réalisé sur un substrat Silicon et alimenté par une ligne micro-ruban. L'ajout de la structure DGS au plan de masse vise à améliorer l'adaptation de l'antenne et à élargir sa bande passante.



Vue de face.

Vue d'arrière.

Figure III.97 : Antenne nouveau modèle adaptée avec DGS alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).

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

Tableau III.29: Dimensions de l'antenne nouveau modèle adaptée avec DGS alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).

Paramètres	T	h	wf	lp	lf	wp	wg	lg
Dimensions (mm)	0.035	1.56	1.238	6.485	5.5	14.70	20.70	21.35

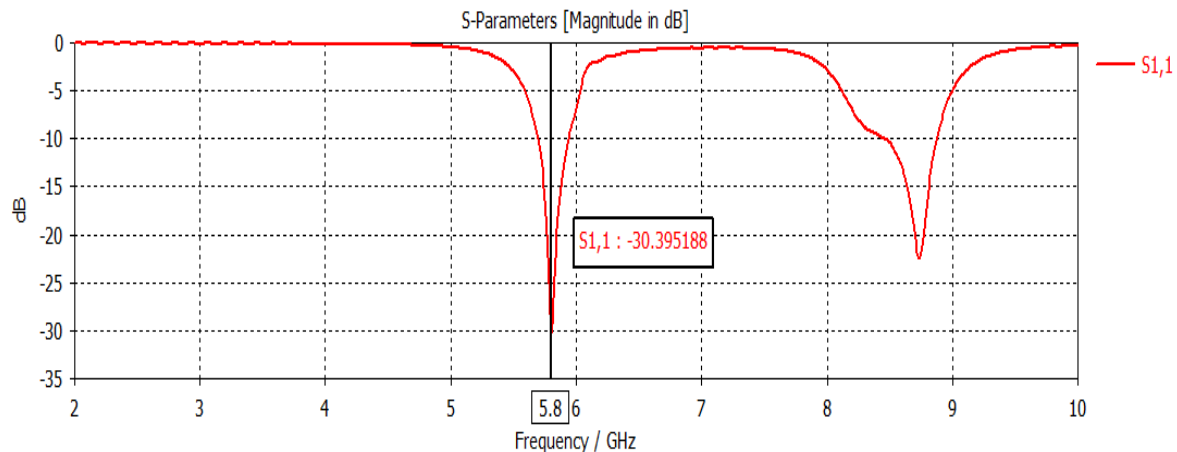


Figure III.98 : Coefficient de réflexion de l'antenne nouveau modèle adaptée avec DGS alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).

Le coefficient de réflexion (S_{11}) atteint une valeur minimale de $-30,395$ dB à 5,8 GHz, indiquant une bonne adaptation d'impédance et de faibles pertes par réflexion. Ce résultat confirme le bon fonctionnement de l'antenne avec DGS.

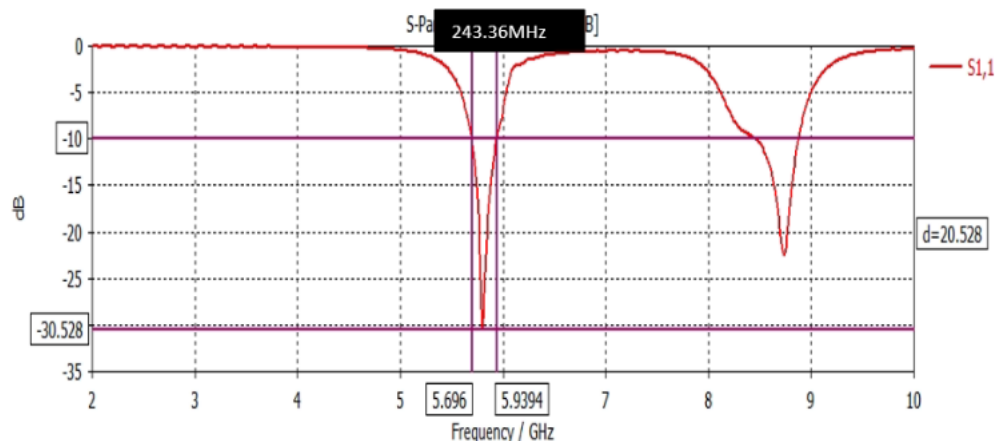


Figure III.99: La Bande passante de l'antenne nouveau modèle adaptée avec DGS alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).

L'ajout de la structure DGS a permis d'augmenter la bande passante de l'antenne de 223,29 MHz à 243,36 MHz, confirmant ainsi son efficacité pour l'élargissement de la bande de fonctionnement.

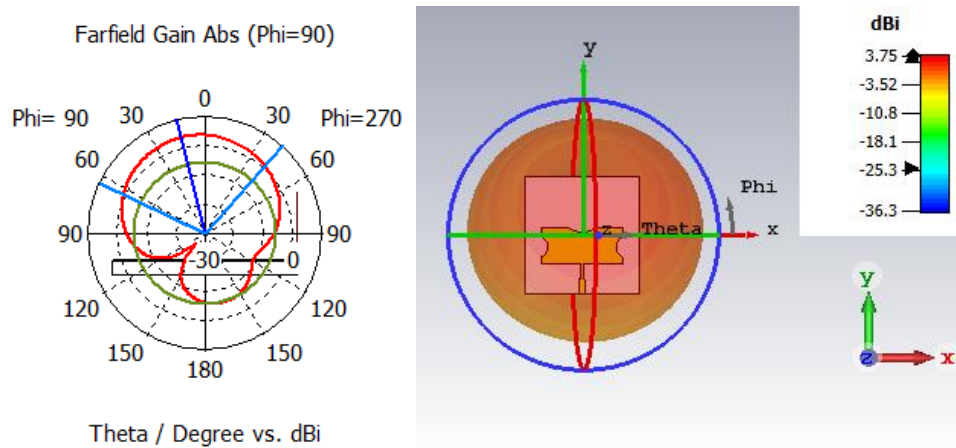


Figure III.100: Diagramme de rayonnement en 2D et 3D de l'antenne adaptée avec DGS alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).

Les diagrammes de rayonnement 2D et 3D montrent que l'antenne présente un rayonnement principalement directionnel. Le gain maximal obtenu est d'environ 3,75 dB, ce qui confirme de bonnes performances de rayonnement à la fréquence de fonctionnement.

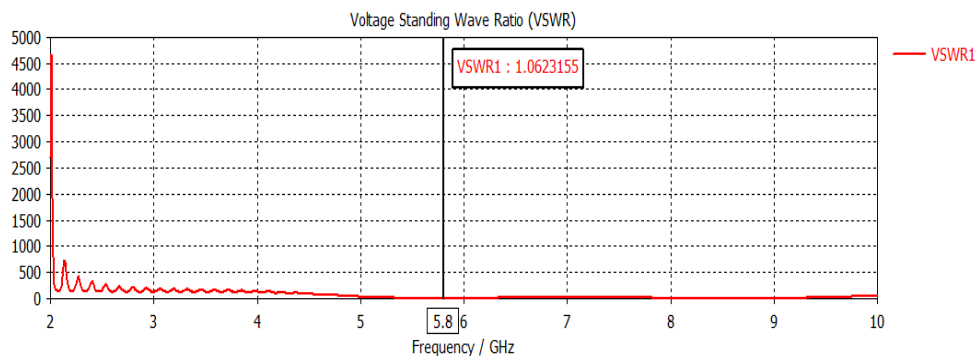


Figure III.101: Variation du VSWR de l'antenne adaptée avec DGS alimentée par la ligne micro-ruban (Silicon).

Le VSWR obtenu est de 1,0623155, indiquant une excellente adaptation d'impédance et de très faibles pertes par réflexion.

III.6 MINIATURISATION

Dans cette étude, une cellule SRR (Split Ring Resonator) résonnant à 5,8 GHz a été gravée sur l'antenne dans le but de la miniaturiser. La gravure de cette cellule entraîne automatiquement l'apparition de sa structure complémentaire (CSRR), ce qui provoque un déplacement de la fréquence de résonance vers les basses fréquences. Afin de rétablir la résonance à 5,8 GHz, les dimensions de l'antenne ont été optimisées et réduites. Cette approche

a permis d'obtenir une antenne plus compacte tout en conservant la même fréquence de fonctionnement.

III.6.1 Etude de la cellule SRR

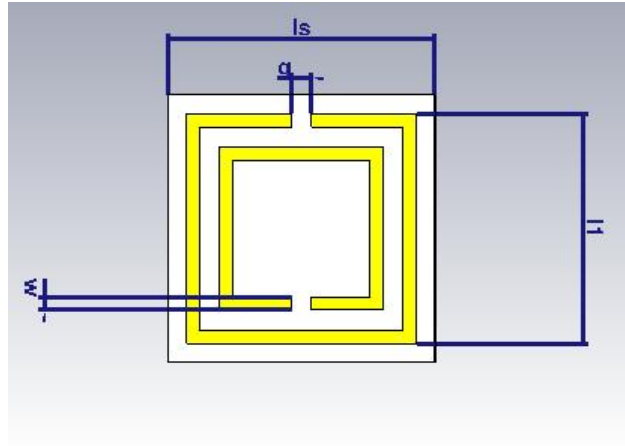


Figure III.102: Géométrie d'une cellule Split Ring Resonator (SRR).

La figure III.102 illustre la géométrie d'une cellule Split Ring Resonator (SRR), composée de deux anneaux métalliques concentriques fendus. Cette structure résonante est utilisée pour modifier les caractéristiques électromagnétiques de l'antenne et améliorer ses performances.

- **En utilisant le Substrat en FR4**

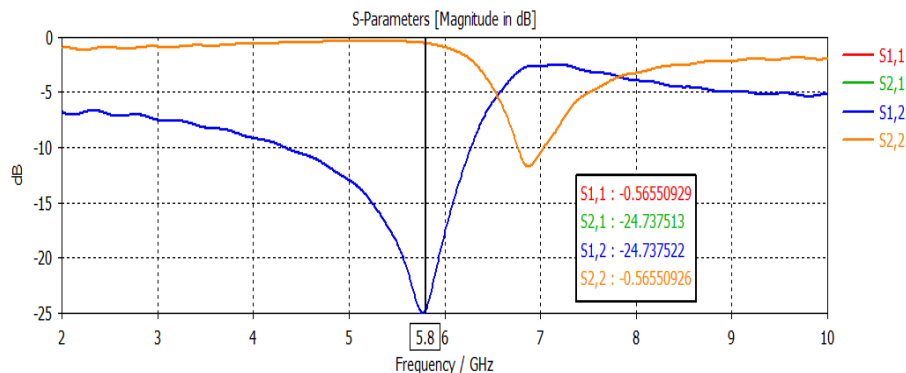


Figure III.103: Paramètres S (FR4).

- En utilisant le Substrat en Silicon

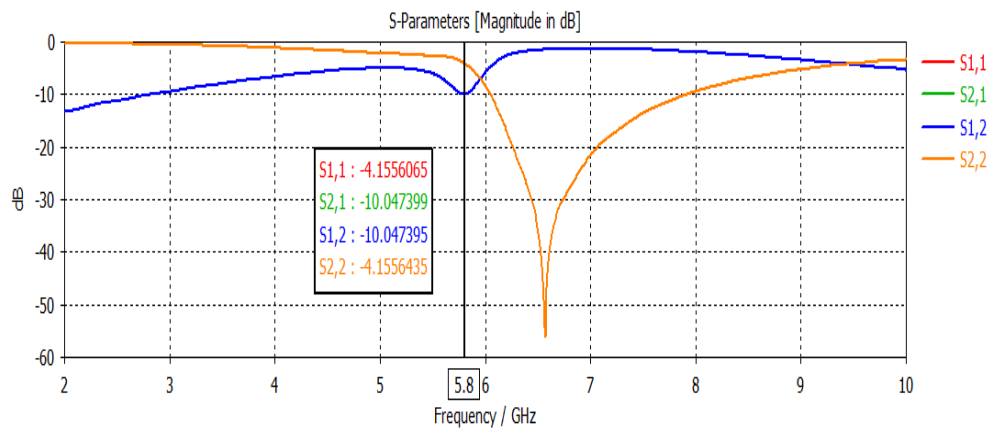


Figure III.104: Paramètres S (Silicon).

- En utilisant le Substrat en Roger

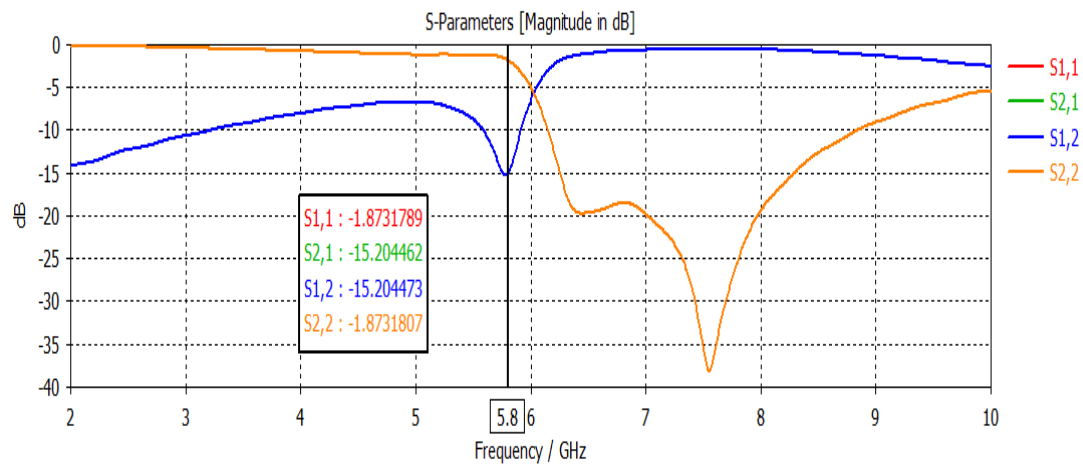


Figure III.105: Paramètres S (Roger).

III.6.2 Etude de la cellule CSRR

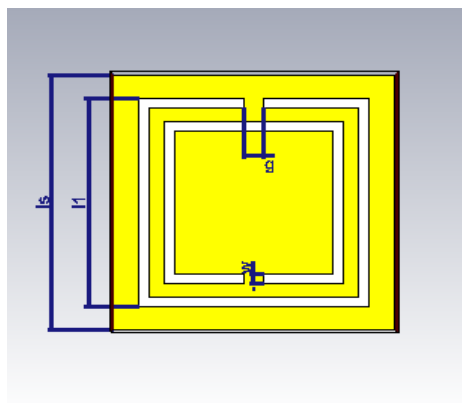


Figure III.106: Géométrie d'une cellule complémentaire Split Ring Resonator (CSRR).

La figure III.106 illustre la géométrie d'une cellule Split Ring Resonator (SRR), composée de deux anneaux métalliques concentriques fendus. Cette structure résonante est

utilisée pour modifier les caractéristiques électromagnétiques de l'antenne et améliorer ses performances.

- En utilisant le Substrat en FR4

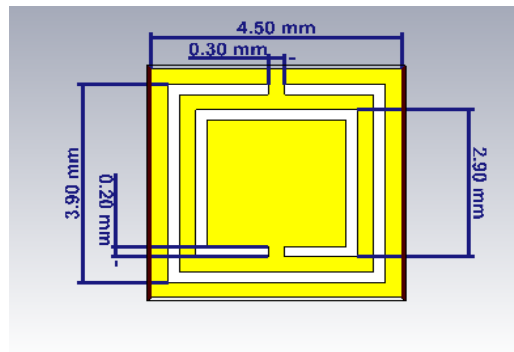


Figure III.107: La cellule CSRR en FR4.

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

Tableau III.30: Dimensions de la cellule CSRR en FR4.

Les paramètres	Les dimensions(mm)
t	0.017
w	0.2
lw	0.2
h	0.25
s	0.3
g	0.3
ls	4.5
ll	3.9

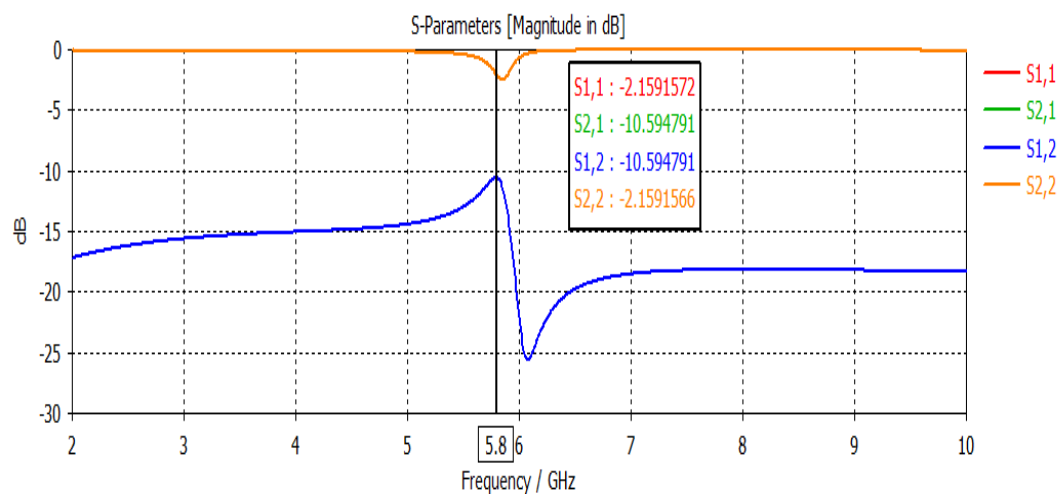


Figure III.108: Paramètres S (FR4).

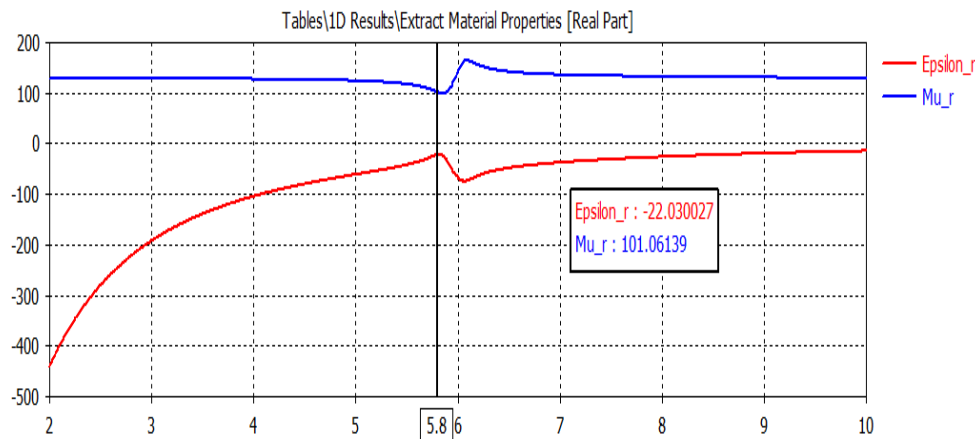


Figure III.109: La permittivité et la perméabilité (FR4).

La figure III.109 présente l'évolution de la permittivité relative effective (ϵ_r) et de la perméabilité relative effective (μ_r) de la cellule CSRR réalisée sur un substrat FR4. On observe qu'autour de la fréquence de résonance de 5,8 GHz, la permittivité devient négative avec une valeur d'environ $\epsilon_r = -22,03$, tandis que la perméabilité conserve une valeur positive ($\mu_r \approx 101,06$). Ce comportement confirme les propriétés métamatériaux de la structure CSRR, caractérisées par une permittivité négative dans la bande de résonance. Cette propriété permet de modifier la propagation des ondes électromagnétiques et contribue à la miniaturisation ainsi qu'à l'amélioration des performances de l'antenne.

- En utilisant le Substrat en Silicon

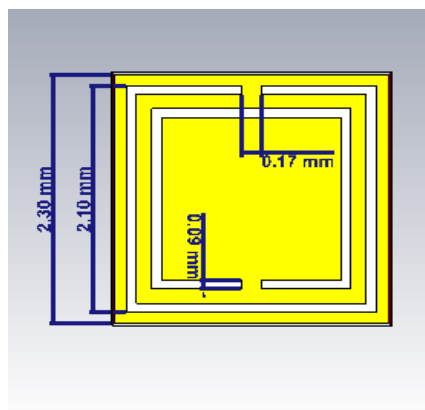


Figure III. 110: : La cellule CSRR en Silicon.

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

Tableau III.31: Dimensions de la cellule CSRR en Silicon.

Les paramètres	Les dimensions(mm)
t	0.17
w	0.085
lw	0.085
h	0.8
s	0.13
g	0.17
ls	2.30
ll	2.10

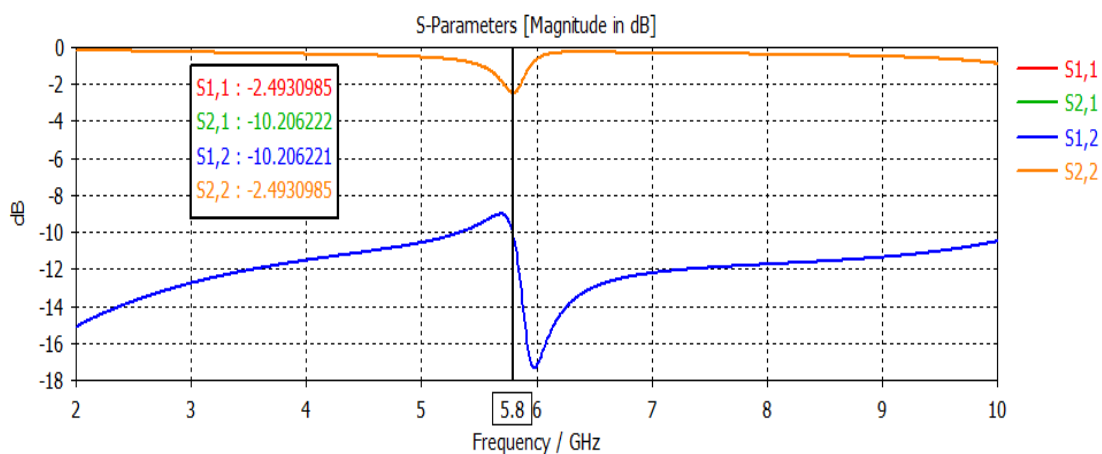


Figure III. 111 : Paramètres S (Silicon).

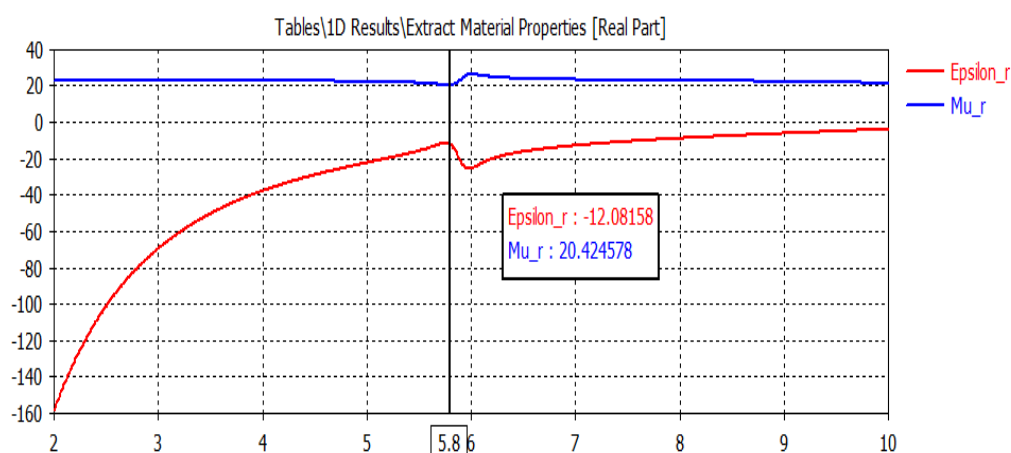


Figure III. 112 : La permittivité et la perméabilité (Silicon).

À 5,8 GHz, la cellule CSRR sur substrat silicon présente une permittivité négative ($\epsilon_r = -12,08$) et une perméabilité positive ($\mu_r = 20,42$). Ces résultats confirment le comportement métamatériau de la structure et son aptitude à contribuer à la miniaturisation de l'antenne.

- En utilisant le Substrat en Roger

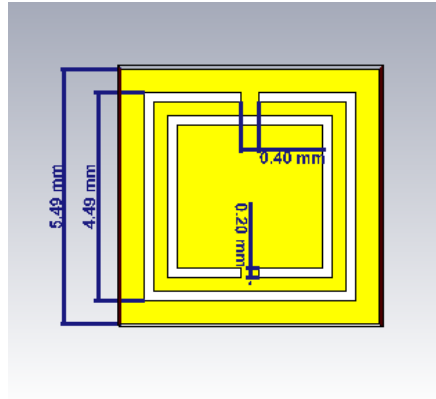


Figure III. 113 : La cellule CSRR en Roger.

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

Tableau III.32: Dimensions de la cellule CSRR en Roger.

Les paramètres	Les dimensions(mm)
t	0.017
w	0.2
lw	0.2
h	0.8
s	0.3
g	0.4
ls	5.49
ll	4.49

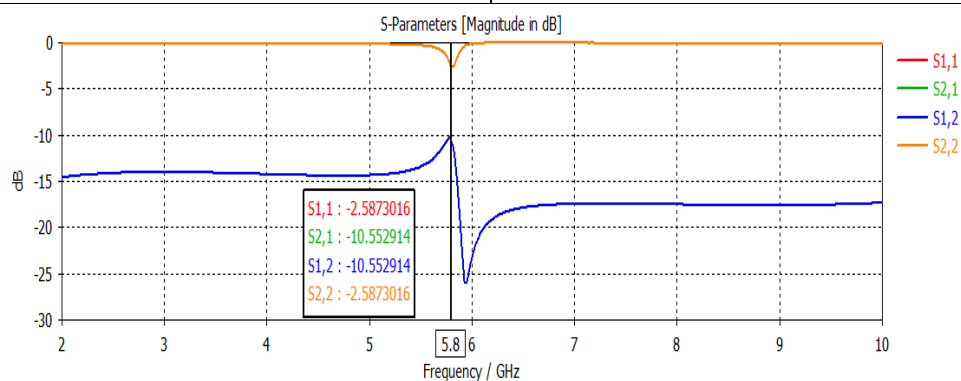


Figure III. 114 : Paramètres S (Roger).

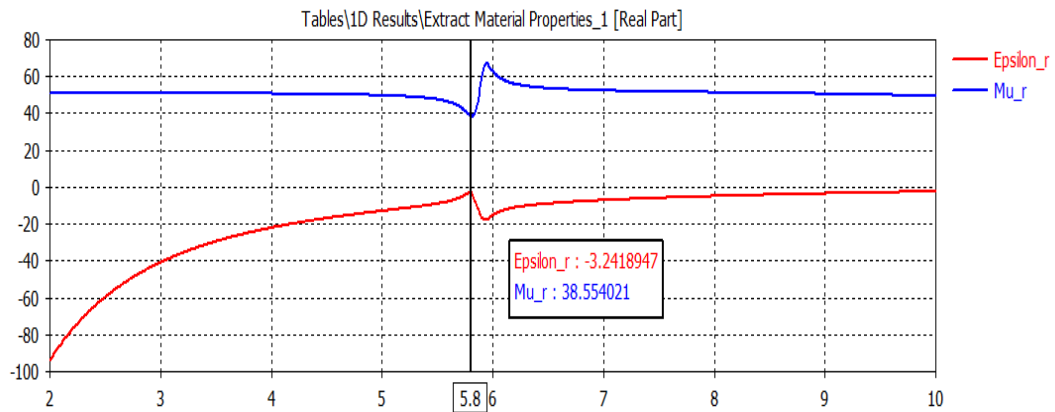
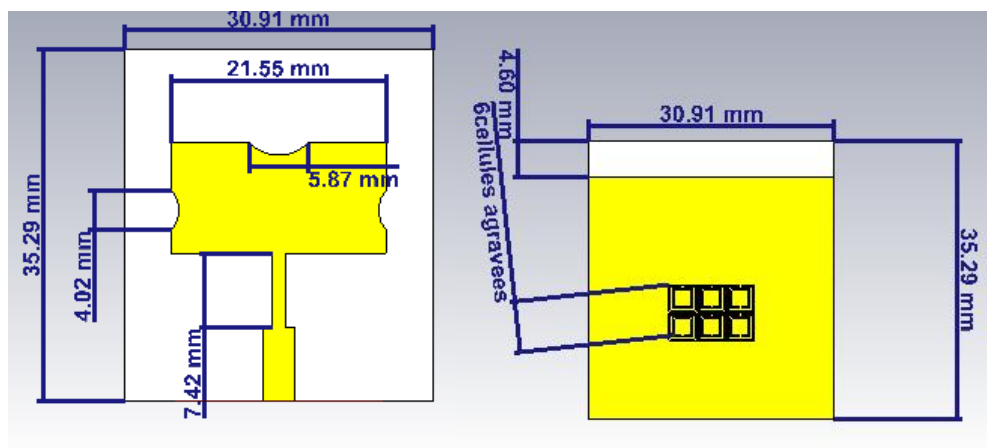


Figure III. 115 : La permittivité et la perméabilité (Roger).

À la fréquence de résonance de 5,8 GHz, la cellule CSRR sur substrat Roger présente une permittivité négative ($\epsilon_r = -3,24$) et une perméabilité positive ($\mu_r = 38,55$), confirmant ainsi son comportement métamatériau et son aptitude à la miniaturisation des antennes.

III.6.3 Avant l'adaptations (intégrations des cellules)

- FR4



Vue de face.

Vue d'arrière.

Figure III. 116 : L'insertion des cellules CSRR sur le plan de masse (FR4).

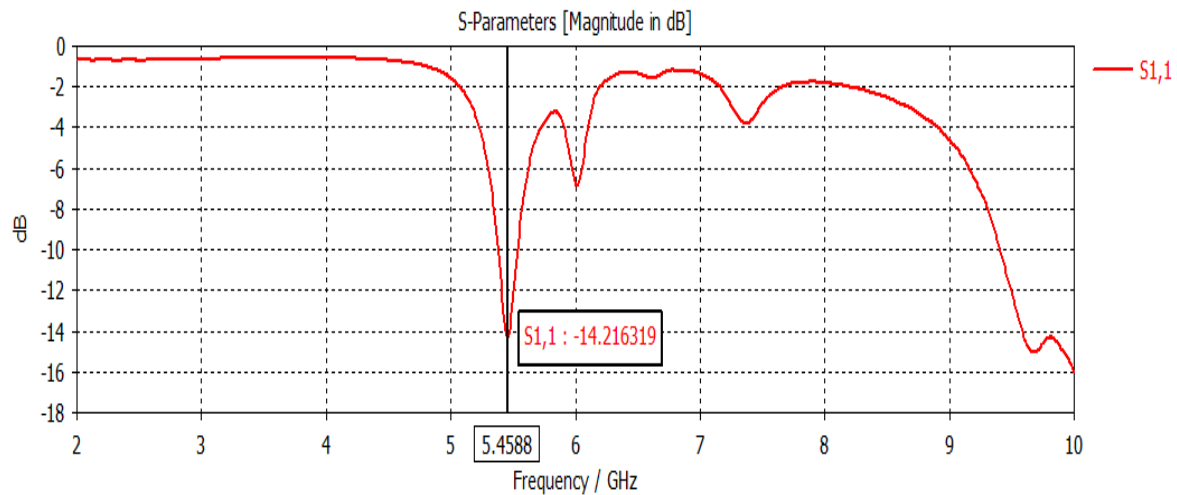


Figure III.117 : Coefficient de réflexion de l'antenne après la gravure des cellules (FR4).

La gravure de six cellules sur le plan de masse a provoqué un déplacement de la fréquence de résonance de l'antenne vers 5,45 GHz. Ce changement est dû à l'influence des cellules sur les caractéristiques électromagnétiques de la structure.

- **Silicon**

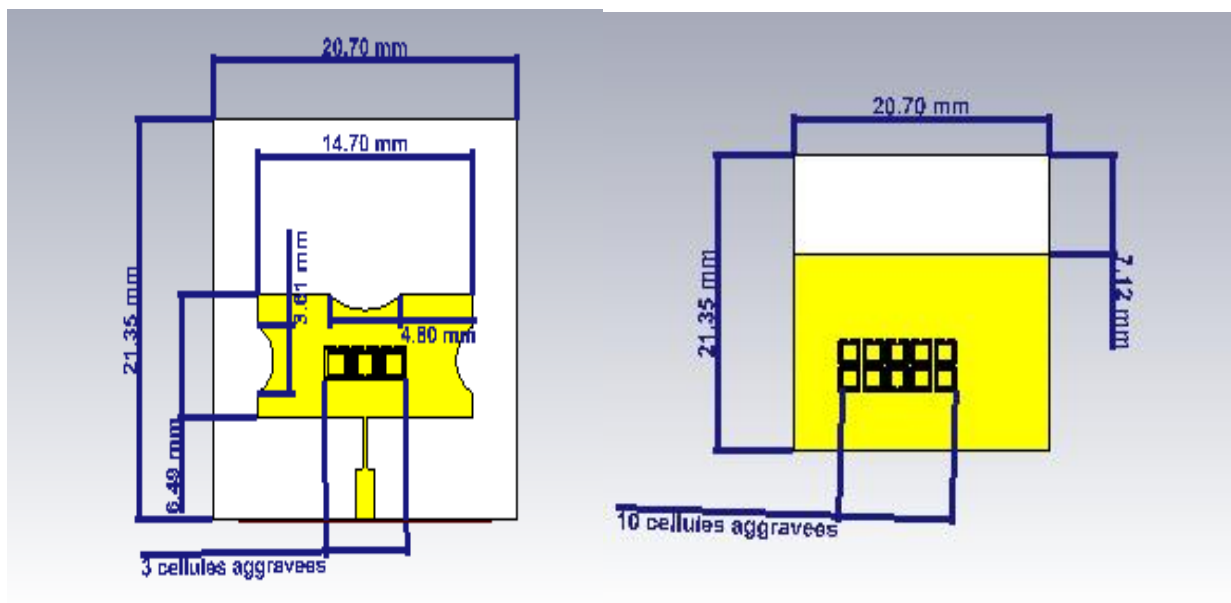


Figure III.118 : l'insertion des cellules CSRR sur le plan de masse et le patch (Silicon).

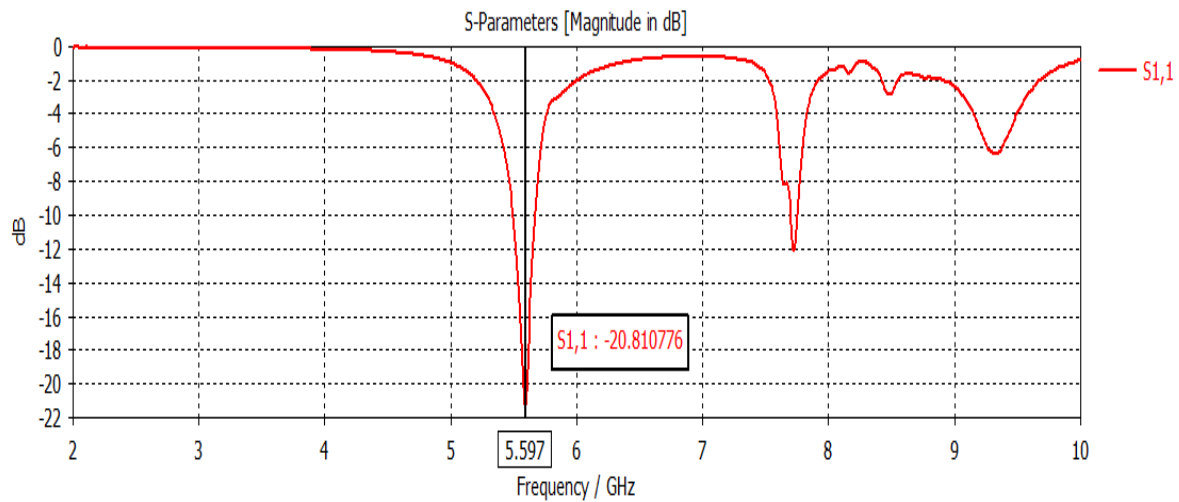
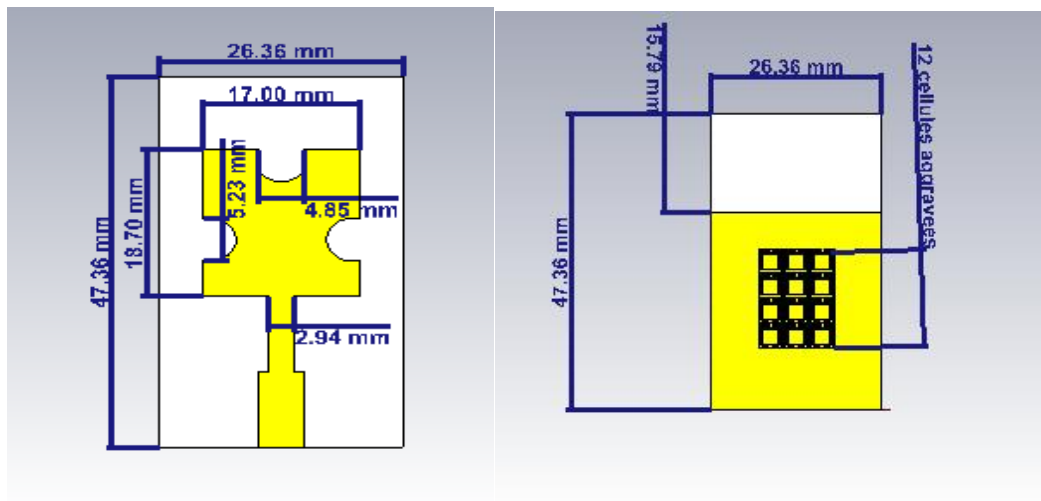


Figure III. 119 : Coefficient de réflexion de l'antenne après la gravure des cellules (Silicon).

La gravure de dix cellules sur le plan de masse et de trois cellules sur le patch, un déplacement de la fréquence de résonance vers 5,59 GHz. Cette variation résulte de la modification des caractéristiques électromagnétiques de la structure induite par les cellules gravées.

- Roger



Vue de face.

Vue d'arrière.

Figure III. 120 : l'insertion des cellules CSRR sur le plan de masse (Roger).

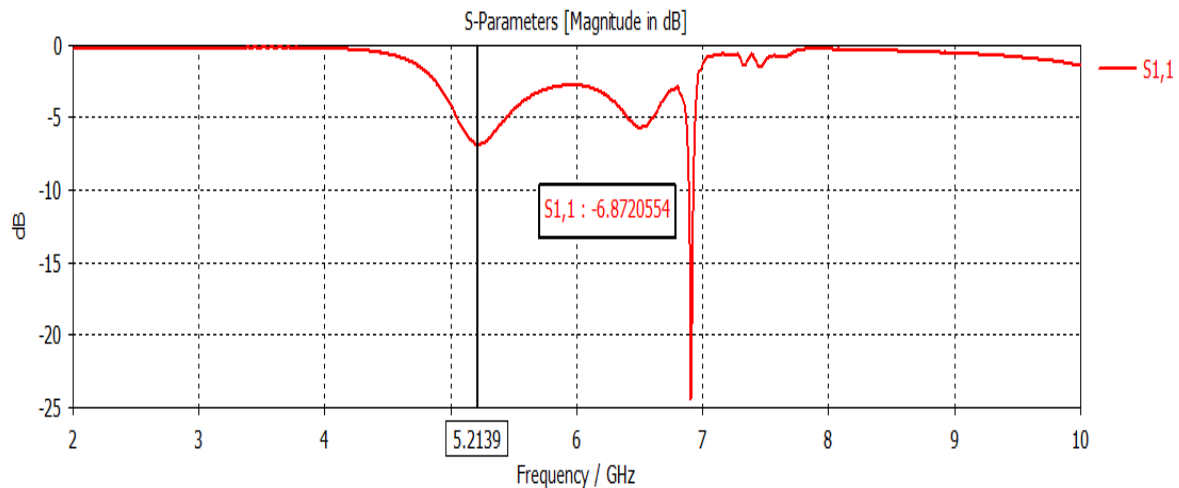
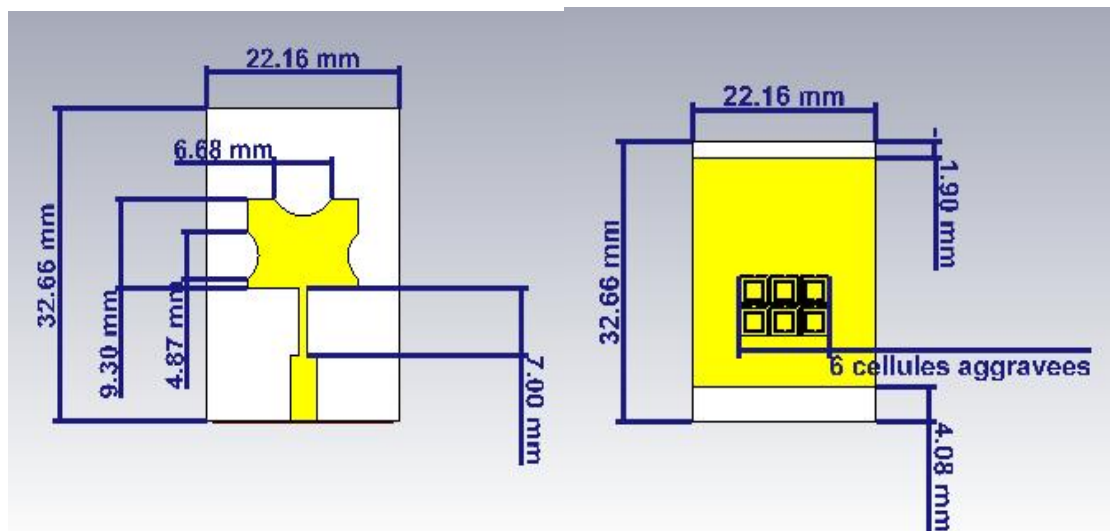


Figure III. 121 : Coefficient de réflexion de l'antenne après la gravure des cellules (Roger).

La gravure de douze cellules sur le plan de masse a déplacé la fréquence de résonance à 5,21 GHz. Ce décalage est lié à la modification des caractéristiques électromagnétiques de la structure.

III.6.4 Après l'adaptations

- FR4



Vue de face.

Vue d'arrière.

Figure III. 122 : L'antenne adaptée après l'insertion des cellules CSRR sur le plan de masse (FR4).

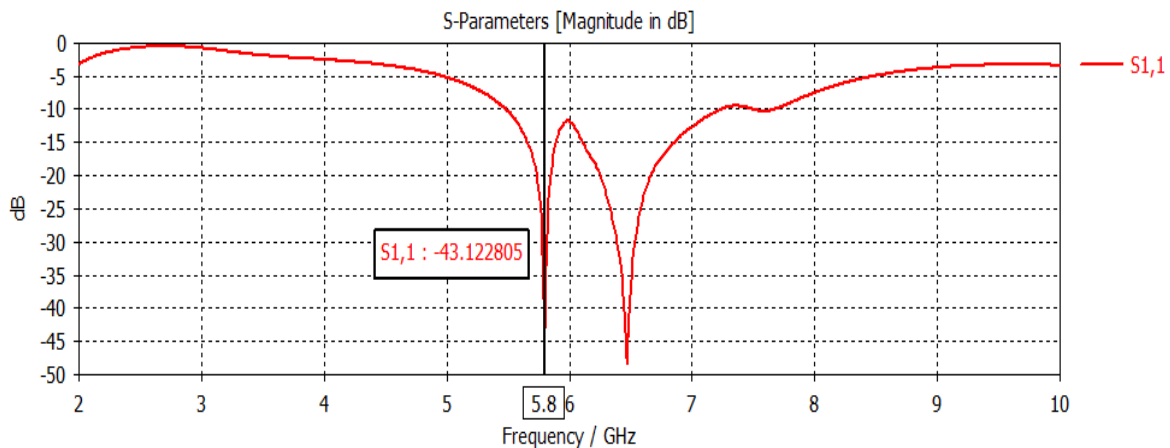


Figure III.123 : Coefficient de réflexion de l'antenne adaptée après la gravure des cellules (FR4).

Le coefficient de réflexion (S_{11}) atteint -43.122 dB, traduisant une excellente adaptation d'impédance et de faibles pertes par réflexion à la fréquence de résonance.

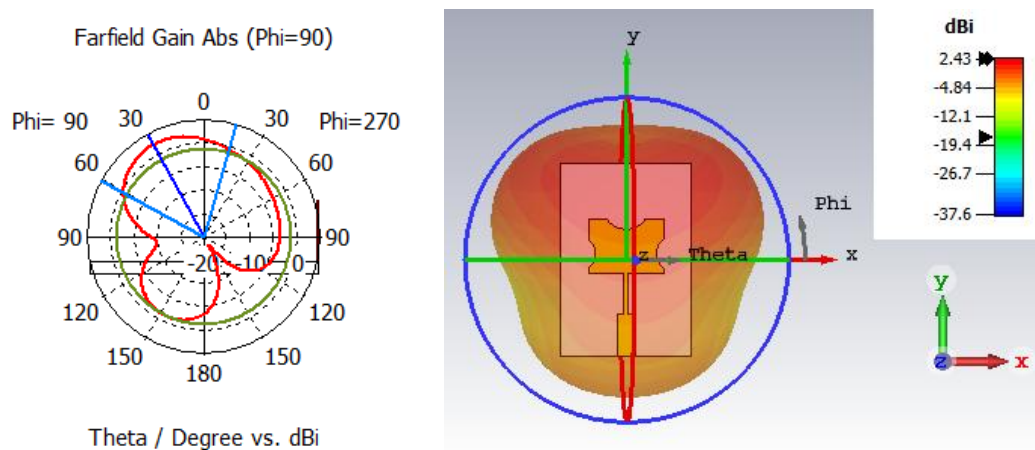


Figure III.124 : Diagramme de rayonnement en 2D et 3D de l'antenne adaptée après la gravure des cellules (FR4).

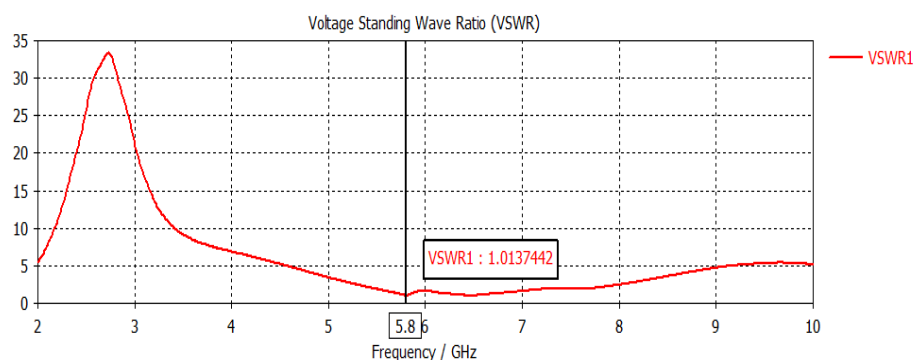
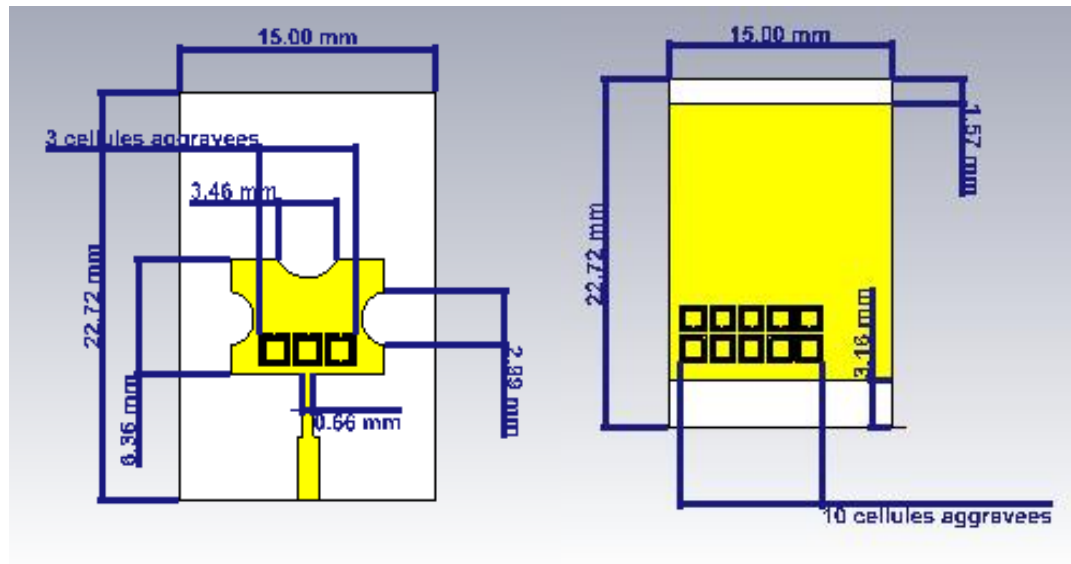


Figure III.125 : Variation du VSWR de l'antenne adaptée après la gravure des cellules (FR4).

La valeur du VSWR obtenue est de 1,0137, très proche de l'unité. Cette valeur indique une excellente adaptation d'impédance entre l'antenne et la ligne d'alimentation, avec des

pertes par réflexion très faibles. Ce résultat confirme le bon fonctionnement de l'antenne à la fréquence de résonance.

- **Silicon**



Vue de face.

Vue d'arrière.

Figure III.126 : L'antenne adaptée après l'insertion des cellules CSRR sur le plan de masse et le patch (Silicon).

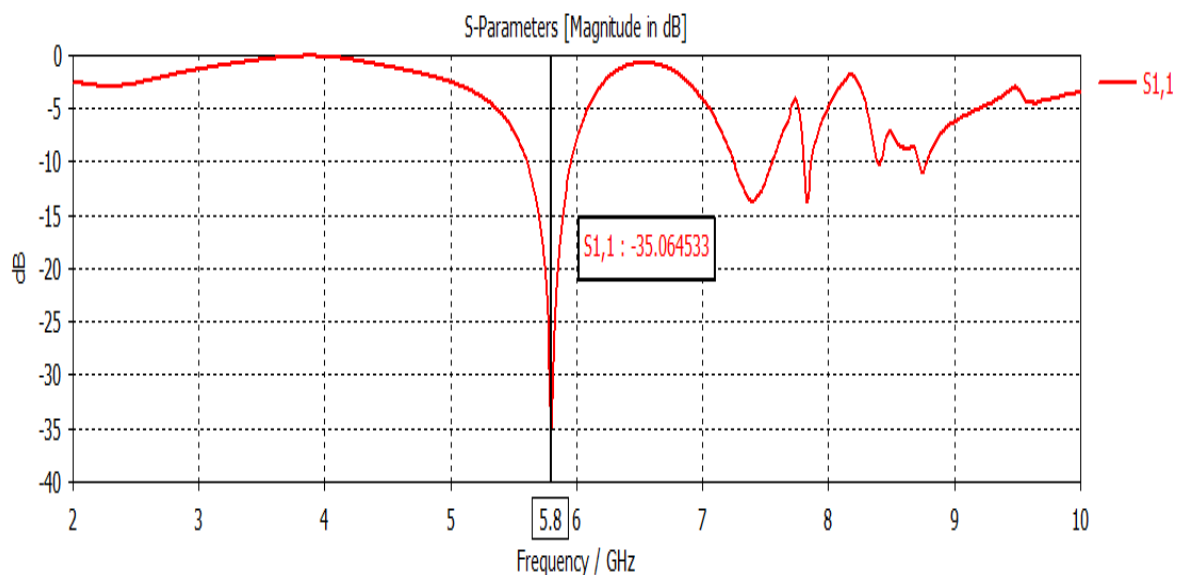


Figure III.127 : Coefficient de réflexion de l'antenne adaptée après la gravure des cellules (Silicon).

Le coefficient de réflexion (S11) atteint $-35,06$ dB, traduisant une excellente adaptation d'impédance et de faibles pertes par réflexion à la fréquence de résonance.

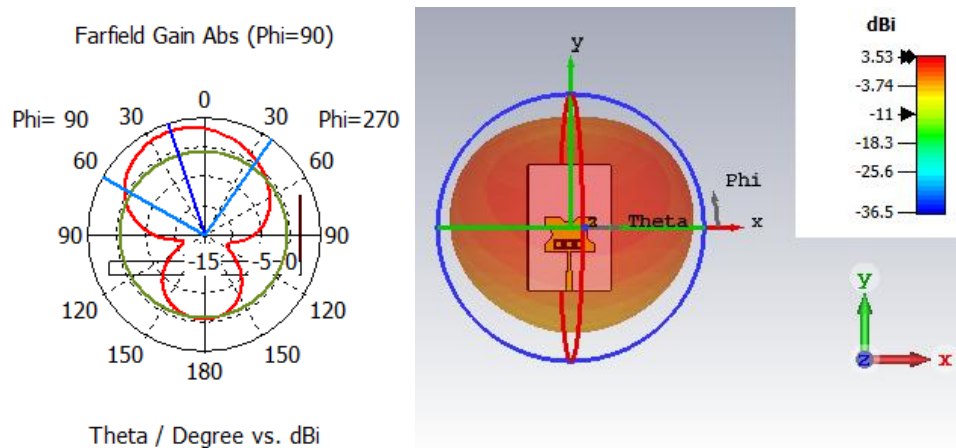


Figure III.128 : Diagramme de rayonnement en 2D et 3D de l'antenne adaptée après la gravure des cellules (Silicon).

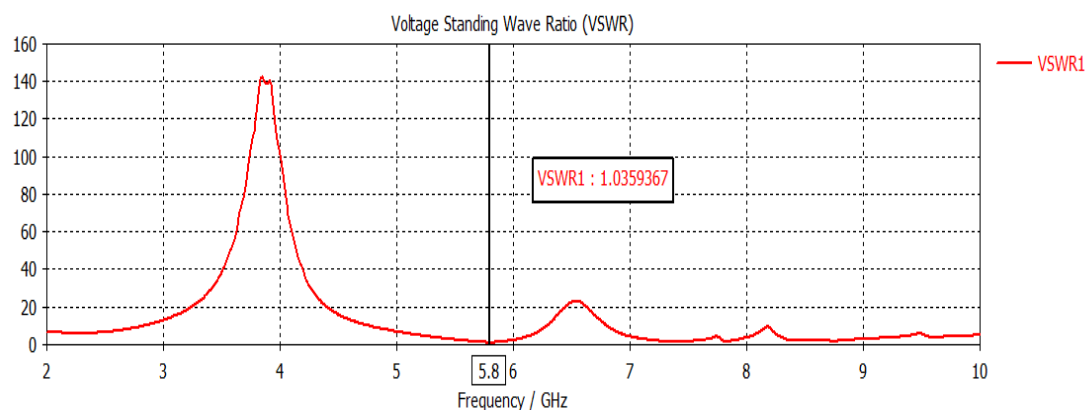
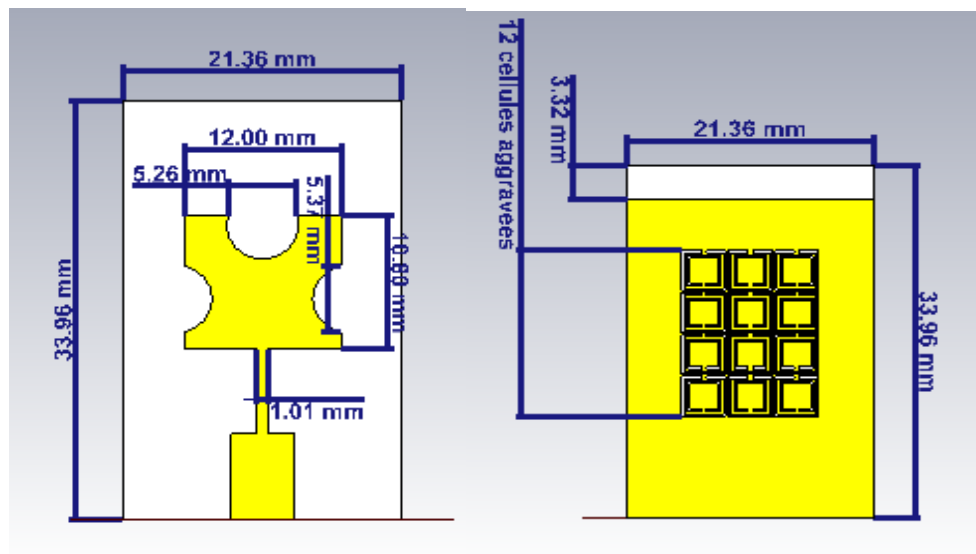


Figure III.129 : Variation du VSWR de l'antenne adaptée après la gravure des cellules (Silicon).

Après l'adaptation, la valeur du VSWR obtenue est de 1,03593, très proche de l'unité. Cette valeur indique une excellente adaptation d'impédance entre l'antenne et la ligne d'alimentation, avec des pertes par réflexion très faibles. Ce résultat confirme le bon fonctionnement de l'antenne à la fréquence de résonance.

- Roger



Vue de face.

Vue d'arrière.

Figure III.130 : L'antenne adaptée après l'insertion des cellules CSRR sur le plan de masse (Roger).

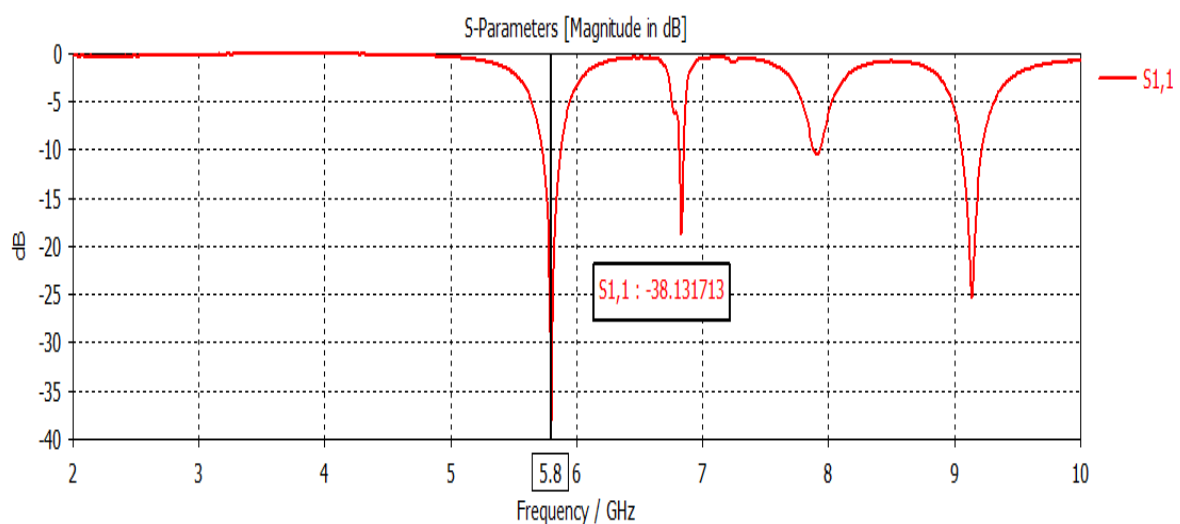


Figure III.131: Coefficient de réflexion de l'antenne adaptée après la gravure des cellules (Roger).

Le coefficient de réflexion (S_{11}) atteint $-38,131$ dB, traduisant une excellente adaptation d'impédance et de très faibles pertes par réflexion à la fréquence de résonance.

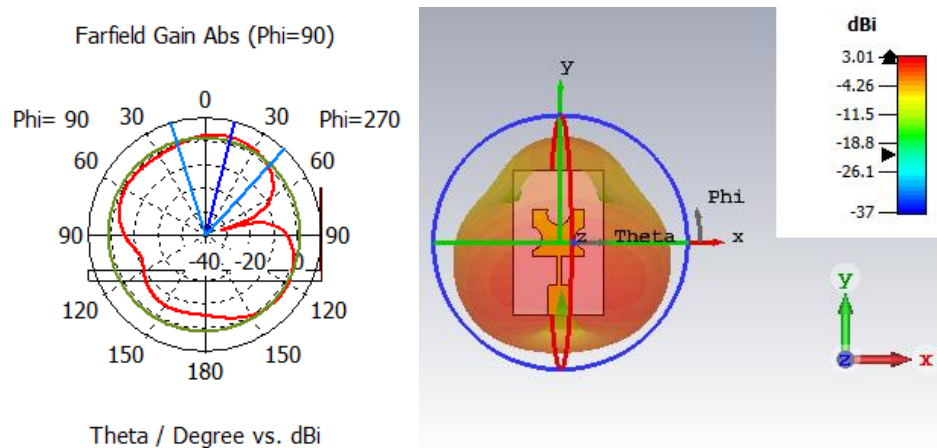


Figure III.132 : Diagramme de rayonnement en 2D et 3D de l'antenne adaptée après la gravure des cellules (Roger).

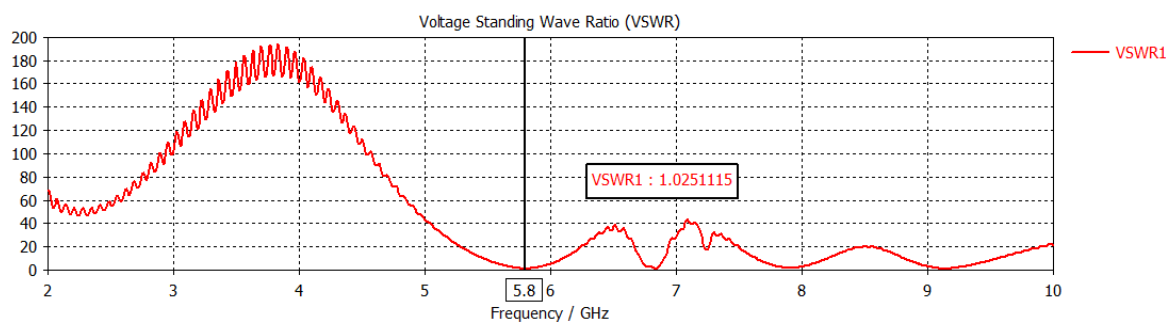


Figure III.133 : Variation du VSWR de l'antenne adaptée après la gravure des cellules (Roger).

La valeur du VSWR obtenue est de 1,02511, très proche de l'unité. Cette valeur indique une excellente adaptation d'impédance entre l'antenne et la ligne d'alimentation, avec des pertes par réflexion très faibles. Ce résultat confirme le bon fonctionnement de l'antenne à la fréquence de résonance.

III.6.5 Etude comparative des dimensions de l'antenne

Le tableau III.33 présente une comparaison des principales dimensions géométriques de l'antenne avant et après l'adaptation par l'intégration des structures métamatériaux (SRR/CSRR) pour les trois substrats étudiés : FR4, Roger et Silicon. Les paramètres géométriques considérés sont la largeur du plan de masse (w_g), la longueur du plan de masse (l_g), la largeur du patch (w_p), la longueur du patch (l_p) et la longueur de la ligne d'alimentation

(lf). Cette comparaison permet d'évaluer l'effet des métamatériaux sur la miniaturisation de l'antenne tout en conservant les performances de résonance souhaitées.

Tableau III. 33: Comparaison des dimensions avant et après l'adaptation.

Choix du substrat	Les dimensions	Avant L'adaptation	Après L'adaptation
FR4	wg	30.91	22.16
	lg	35.2949	32.66
	wp	21.55	12.8
	lp	10.0999	9.3
	lf	14.835	14
Roger	wg	26.36	21.36
	lg	47.36	33.96
	wp	17	12
	lp	18.7	10.8
	lf	19.3	13.8
Silicon	wg	20.7	15
	lg	21.345	22.715
	wp	14.7	9
	lp	6.485	6.355
	lf	5.5	7

L'analyse des résultats montre que l'intégration des structures métamatériaux a conduit à une réduction significative des dimensions de l'antenne pour la plupart des paramètres géométriques étudiés. Cette diminution confirme l'effet de miniaturisation apporté par les métamatériaux, qui augmentent la longueur électrique du trajet des courants sans nécessiter une augmentation des dimensions physiques de l'antenne.

Pour le substrat FR4, on observe une réduction notable de la largeur du plan de masse (wg) de 30,91 mm à 22,16 mm ainsi qu'une diminution importante de la largeur du patch (wp) de 21,55 mm à 12,8 mm. Les dimensions lg, lp et lf diminuent également, traduisant une miniaturisation globale de la structure.

Dans le cas du substrat Roger, la réduction est encore plus marquée. La longueur du plan de masse (lg) passe de 47,36 mm à 33,96 mm, tandis que les dimensions du patch (wp et lp)

diminuent respectivement de 17 mm à 12 mm et de 18,7 mm à 10,8 mm. Ces résultats montrent que le substrat Roger permet d'obtenir une antenne plus compacte après adaptation.

Pour le substrat Silicon, l'intégration des structures métamatériaux a permis de réduire les dimensions de l'antenne, notamment la largeur du plan de masse (wg) et la largeur du patch (wp). Cette réduction confirme l'efficacité des métamatériaux dans la miniaturisation de l'antenne tout en conservant les performances recherchées à la fréquence de fonctionnement.

Globalement, les résultats démontrent que l'intégration des métamatériaux permet une miniaturisation efficace de l'antenne pour les trois substrats étudiés. Le substrat Silicon conduit aux dimensions finales les plus réduites, tandis que le substrat FR4 présente un bon compromis entre miniaturisation, coût de fabrication et disponibilité des matériaux. Ces caractéristiques ont motivé le choix du substrat FR4 pour la réalisation du réseau MIMO à deux éléments dans la suite de ce travail.

III.7 Réseau MIMO a deux éléments d'une antenne alimentée par une ligne micro-ruban (FR4)

Après l'adaptation de l'antenne et l'atteinte de l'objectif de miniaturisation, l'antenne conçue sur substrat FR4 a été retenue pour la réalisation d'un réseau MIMO à deux éléments. Ce choix est principalement motivé par la disponibilité du substrat FR4, son faible coût et sa facilité de fabrication. De plus, l'utilisation d'une configuration MIMO permet d'améliorer les performances globales du système, notamment en augmentant le gain, en améliorant la capacité de transmission et en renforçant la fiabilité de la communication. Ainsi, cette configuration a été adoptée pour la phase de réalisation pratique et de validation expérimentale du système proposé.

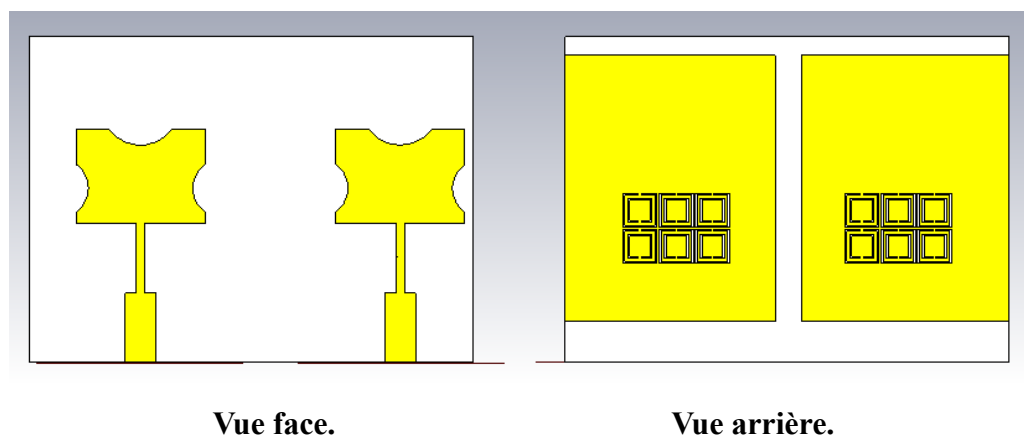


Figure III.134 : La Structure d'un réseau MIMO a deux éléments alimentés par la ligne micro-ruban (FR4).

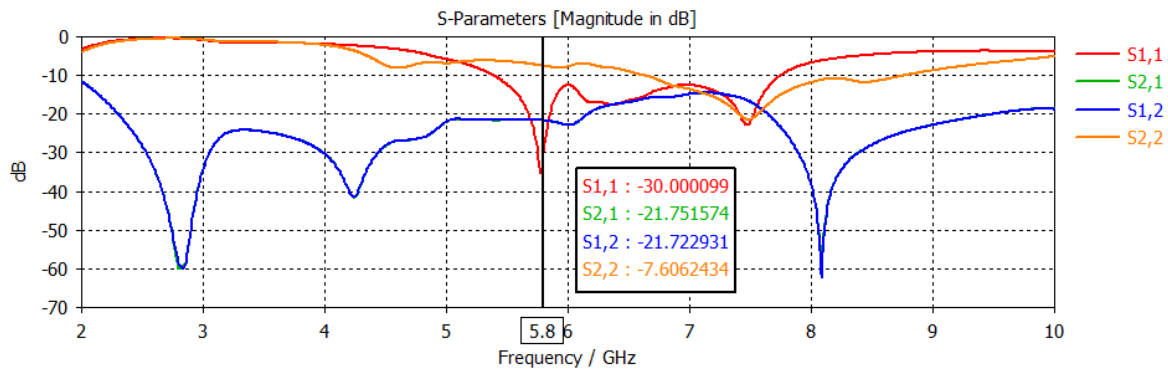


Figure III.135 : Paramètres S de réseau MIMO.

La figure présente les paramètres S du réseau MIMO réalisé à partir de l'antenne finale miniaturisée sur substrat FR4 et alimentée par une ligne micro-ruban. On remarque que le coefficient de réflexion S11 atteint une valeur d'environ -30 dB à la fréquence de résonance 5,8 GHz, ce qui traduit une excellente adaptation de l'antenne à l'impédance caractéristique de 50Ω . Cette faible valeur de S11 indique qu'une grande partie de la puissance injectée est rayonnée par l'antenne avec des pertes par réflexion minimisées.

Par ailleurs, le coefficient de transmission S21 présente une valeur d'environ $-21,75$ dB à 5,8 GHz, qui est inférieure au seuil généralement admis de -20 dB. Cela montre une faible interaction électromagnétique entre les deux éléments rayonnants et confirme une bonne isolation entre les antennes du réseau MIMO. Ainsi, le découplage obtenu permet d'assurer un fonctionnement efficace du système MIMO tout en conservant les performances de l'antenne miniaturisée.

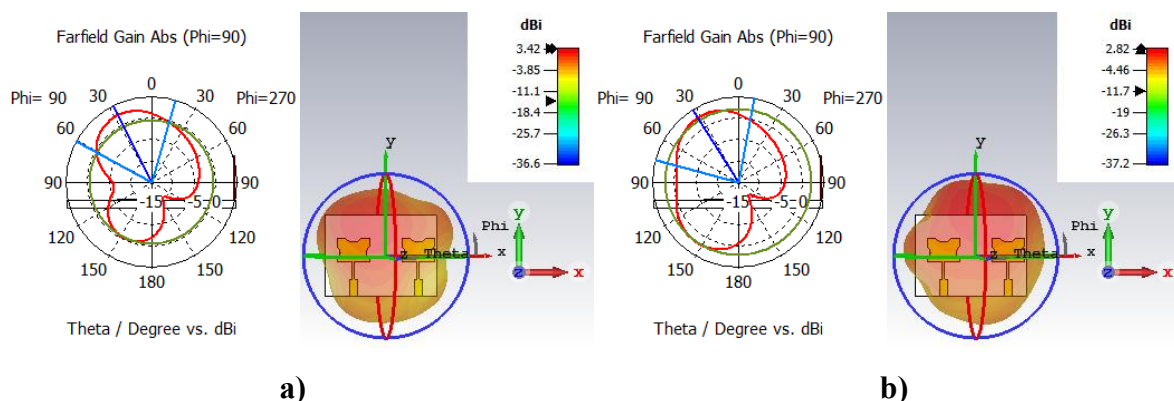


Figure III.136 : Diagramme de rayonnement en 2D et 3D de réseau MIMO alimenté par la ligne micro-ruban (FR4).

La figure III.136 présente les diagrammes de rayonnement en 2D et en 3D du réseau d'antennes MIMO réalisé sur un substrat FR4 et alimenté par une ligne micro-ruban. Les résultats montrent que l'antenne rayonne principalement dans la direction perpendiculaire au plan du substrat, ce qui est caractéristique des antennes patch.

Les diagrammes 2D révèlent un lobe principal bien défini avec une bonne concentration de l'énergie rayonnée dans la direction souhaitée. Les niveaux de rayonnement arrière et des lobes secondaires restent relativement faibles, traduisant une bonne directivité de l'antenne.

Les représentations 3D confirment cette répartition spatiale du rayonnement, avec une forme de rayonnement quasi omnidirectionnelle dans certains plans et plus directive dans d'autres. Le gain maximal obtenu est d'environ 3,42 dBi pour la configuration (a) et 2,82 dBi pour la configuration (b). Cette légère diminution du gain dans le second cas peut être attribuée aux interactions électromagnétiques entre les éléments rayonnants ou aux modifications géométriques introduites dans la structure.

Globalement, ces résultats démontrent que le réseau MIMO proposé assure un rayonnement efficace et une directivité satisfaisante, ce qui le rend adapté aux applications de communications sans fil modernes, notamment les systèmes 5G et IoT.

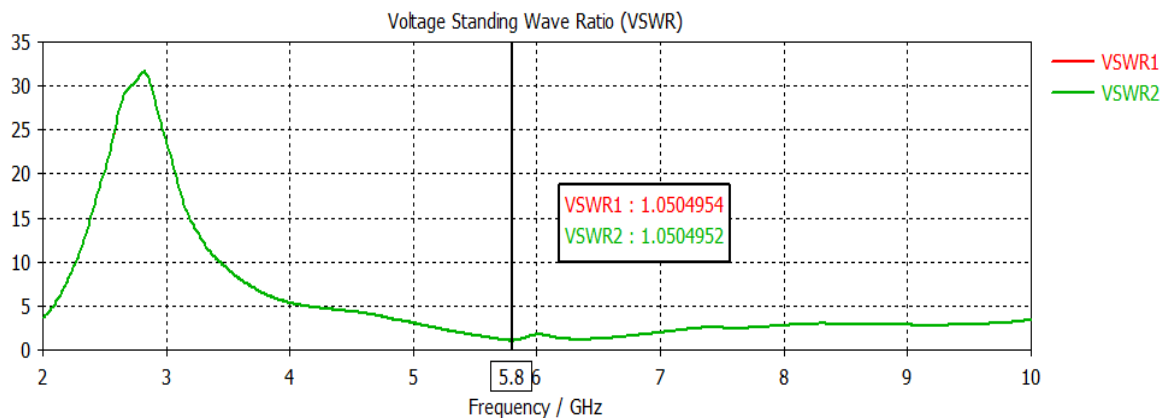


Figure III.137 : Variation du VSWR de réseau MIMO alimenté par la ligne micro-ruban (FR4).

La figure III.137 présente la variation du VSWR du réseau MIMO réalisé à partir de l'antenne finale miniaturisée sur substrat FR4 et alimentée par une ligne micro-ruban. À la fréquence de résonance 5,8 GHz, le VSWR obtenu pour les deux ports est d'environ 1,05 (VSWR1 = 1,050954 et VSWR2 = 1,050952).

Cette valeur, très proche de l'unité, indique une excellente adaptation d'impédance entre les antennes et la ligne d'alimentation $50\ \Omega$. Elle confirme les résultats obtenus à partir du paramètre S11, avec une faible quantité de puissance réfléchie et une meilleure transmission de l'énergie vers les éléments rayonnants. Ainsi, le réseau MIMO présente une bonne adaptation à la fréquence de fonctionnement visée, garantissant un fonctionnement efficace à 5,8 GHz.

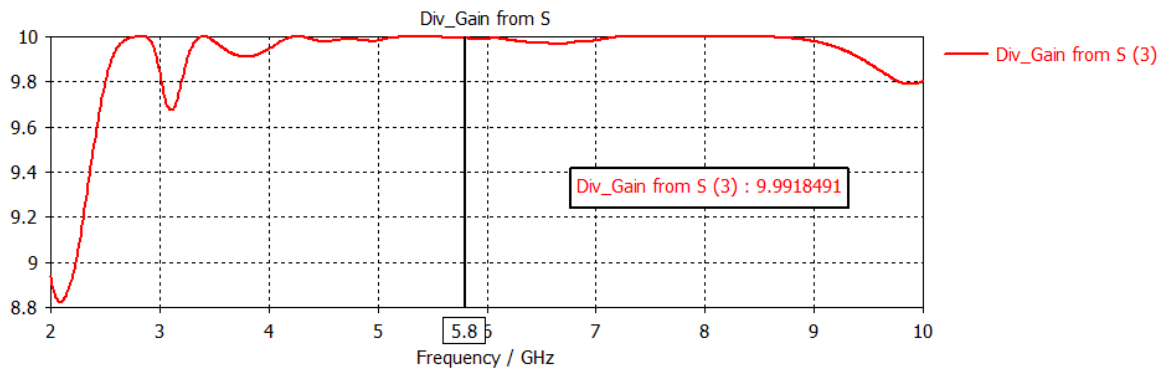


Figure III.138 : Le gain de diversité.

La figure III.138 présente la variation du gain réalisé (Dv_Gain from S) du réseau MIMO constitué de l'antenne finale miniaturisée sur substrat FR4 et alimentée par une ligne micro-ruban. À la fréquence de fonctionnement 5,8 GHz, le gain obtenu est d'environ 9,99 dBi, ce qui montre une bonne capacité de rayonnement du réseau.

Cette valeur de gain, proche de 10 dB, indique que l'antenne assure une directivité élevée et une bonne concentration de l'énergie rayonnée dans la direction utile. Elle confirme également que, malgré la miniaturisation de la structure, le réseau MIMO conserve des performances de rayonnement satisfaisantes à la fréquence de résonance. Ainsi, l'association des deux éléments rayonnants permet d'obtenir un gain élevé tout en maintenant une bonne adaptation et un faible couplage entre les ports.

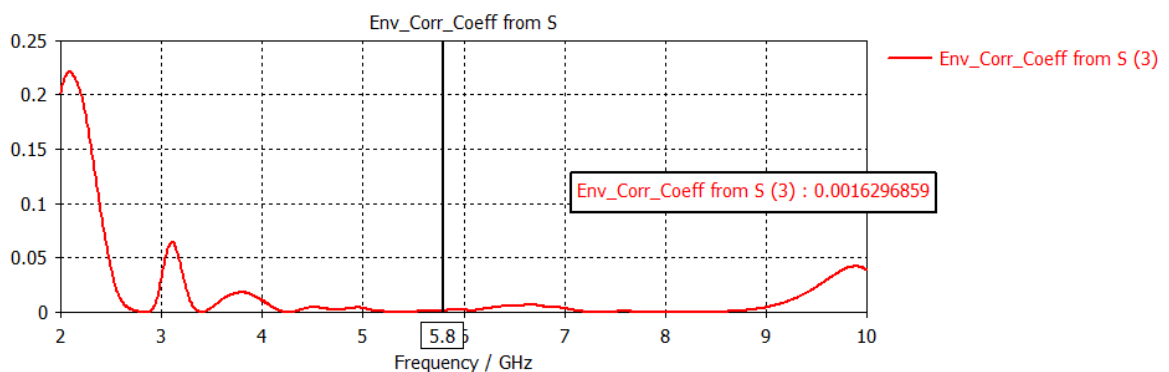


Figure III.139: Le coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC).

La Figure III.139 présente l'évolution du coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC) en fonction de la fréquence pour l'antenne MIMO étudiée. À la fréquence de résonance de 5,8 GHz, la valeur de l'ECC est d'environ 0,00163, ce qui est extrêmement faible et largement inférieur à la limite recommandée de 0,5, voire au seuil plus strict de 0,05 pour les systèmes MIMO performants.

Cette très faible valeur indique une faible corrélation entre les ports rayonnants, traduisant une excellente diversité spatiale et un couplage mutuel réduit entre les éléments de l'antenne. Par conséquent, les signaux transmis ou reçus par les différents ports sont pratiquement indépendants, ce qui améliore la capacité du système, la qualité de transmission et la fiabilité de la liaison.

III.8 CONCLUSION

Au terme de ce chapitre, les différentes simulations réalisées sous CST Studio Suite ont permis de valider progressivement les choix de conception adoptés tout au long de ce travail.

L'étude de l'antenne patch rectangulaire dans ses différentes versions a montré qu'une optimisation rigoureuse de la géométrie et de l'adaptation d'impédance est indispensable pour atteindre les performances souhaitées à la fréquence cible. L'ajout de la structure DGS a joué un rôle particulièrement important en élargissant la bande passante de l'antenne, permettant ainsi de couvrir une plage de fréquences plus large et de mieux répondre aux exigences des systèmes 5G qui nécessitent une bande passante étendue pour assurer des débits élevés.

L'intégration des cellules métamatériaux SRR et CSRR a représenté une avancée déterminante dans le processus de miniaturisation. En comparant les dimensions de l'antenne avant et après l'incorporation de ces structures, il ressort clairement que les métamatériaux constituent un outil efficace et prometteur pour répondre aux exigences de compacité imposées par les dispositifs 5G et IoT, sans compromettre les performances électromagnétiques de l'antenne.

Pour couronner l'ensemble de ce travail, la réalisation du réseau MIMO à deux éléments sur substrat FR4 a permis de franchir un cap supplémentaire vers des systèmes antennaires plus complexes et plus performants. Ce résultat témoigne de la faisabilité d'une telle architecture dans un format compact, et ouvre la voie à des configurations à plus grand nombre d'éléments pour répondre aux besoins croissants en capacité et en fiabilité des réseaux pour les nouvelles générations.

Bibliographie

- [1] Mr. MERIAH S.M. (2013)." Présentation du logiciel de simulation CST Studio Suite présente ". Université Abou bekr belkaid de Tlemcen.
- [2] BEN TAHAR, Z., & BEN ABDESSELAM, S. Y. (2019). "Réalisation d'une Interface graphique de Calcul des paramètres d'antennes patch et conception logicielle". Mémoire de fin d'étude de master académique, Université de Ain temouchent.
- [3] Deschamps, G. A. (1953). "Microstrip microwave antennas", presented at the Third USAF Symp. On Antennas.
- [4] M. Corriveau (2006)"Modélisation et Conception D'une Antenne Micro-Onde De Type Micro-Ruban Avec Radome".Université Du Québec.
- [5] Pozar, D. M. (1992). "Microstrip antennas". Proceedings of the IEEE, 80(1), 79-91.
- [6] BEN TAHAR, Z., & BEN ABDESSELAM, S. Y. (2019). "Réalisation d'une Interface graphique de Calcul des paramètres d'antennes patch et conception logicielle". Mémoire de fin d'étude de master académique, Université de Ain temouchent.

CONCLUSION GENERALE

Dans ce mémoire, nous avons étudié la conception, l'analyse, l'adaptation et la miniaturisation d'une antenne patch rectangulaire destinée aux applications 5G et IoT à 5,8 GHz. Après une étude théorique des antennes micro-ruban, des métamatériaux et de la technologie MIMO, plusieurs structures d'antennes ont été conçues et simulées sous CST Studio Suite.

Dans un premier temps, une antenne patch rectangulaire de référence a été réalisée. Ensuite, une adaptation par ligne quart d'onde a été proposée afin d'améliorer l'adaptation d'impédance et de réduire le coefficient de réflexion. Les résultats de simulation ont montré une amélioration significative des performances, avec un coefficient de réflexion très faible, un VSWR proche de 1 et un gain satisfaisant.

Par la suite, une étude comparative a été menée sur trois substrats : FR4, Rogers et Silicone. Cette comparaison a permis d'évaluer leur influence sur les performances de l'antenne en termes de coefficient de réflexion, de gain, de bande passante, de flexibilité et de dimensions. Les résultats obtenus ont montré que le substrat Rogers offre les meilleures performances électriques grâce à son faible coefficient de pertes, tandis que le FR4 représente une solution économique et que le Silicone constitue un choix intéressant pour les applications flexibles.

Afin de réduire les dimensions de l'antenne, une structure à métamatériaux a ensuite été proposée. Les résultats obtenus ont confirmé l'efficacité de cette technique, qui a permis de miniaturiser l'antenne tout en conservant de bonnes performances, notamment en termes d'adaptation et de rayonnement.

Enfin, un réseau MIMO à deux éléments a été conçu afin d'améliorer les performances globales du système. Les simulations ont mis en évidence une amélioration du gain, une bonne isolation entre les éléments rayonnants ainsi qu'une meilleure qualité de transmission, ce qui confirme l'intérêt de la technologie MIMO pour les systèmes de communication sans fil de nouvelle génération.

En conclusion, les objectifs fixés au début de ce travail ont été atteints. Les résultats obtenus démontrent que l'association d'une antenne patch adaptée, de la miniaturisation par métamatériaux, du choix judicieux du substrat et de la technologie MIMO constitue une solution performante pour les applications 5G et IoT fonctionnant à 5,8 GHz.

Comme perspective, ce travail pourra être poursuivi par la réalisation pratique de l'antenne, la validation expérimentale des résultats de simulation et l'étude d'autres techniques de miniaturisation et d'optimisation afin d'améliorer davantage les performances de l'antenne.

Résumé

Ce travail explore les nouvelles technologies d'innovation des réseaux MIMO (Multiple Input Multiple Output) destinées aux systèmes intelligents dans le contexte des réseaux 5G et de l'Internet des Objets (IoT). L'étude se concentre sur le développement et l'évaluation de solutions avancées, notamment le Massive MIMO, qui utilise des centaines d'antennes aux stations de base pour multiplier le débit par dix, améliorer l'efficacité spectrale, et augmenter le gain et la directivité sans nécessiter une augmentation significative de la bande passante. La miniaturisation des antennes à base de cellules CSRR (Complementary Split Ring Resonators) permet de réduire la taille des antennes afin de les intégrer dans des boîtiers compacts. L'utilisation de trois substrats différents FR4, silicium et Rogers TMM5880 est étudiée pour optimiser le gain et l'adaptation d'impédance des antennes. La combinaison des technologies 5G et IoT permet d'atteindre une capacité réseau élevée, une latence faible essentielle pour les applications IoT en temps réel, et le support d'un nombre très élevé d'appareils connectés. Les applications couvrent les villes intelligentes, l'industrie 4.0, la santé connectée et les transports intelligents, positionnant le MIMO comme une technologie fondamentale pour les réseaux 5G actuels et les futures générations beyond-5G et 6G. Les résultats de comparaison des différentes structures proposées sont satisfaisants et démontrent la viabilité de ces solutions innovantes.

Mots clés : Réseau MIMO, 5G, IoT, Silicone, Rogers RT5880, FR-4.

Abstract

This work explores innovative technologies for MIMO (Multiple Input Multiple Output) networks designed for intelligent systems within the context of 5G networks and the Internet of Things (IoT). The study focuses on the development and evaluation of advanced solutions, particularly Massive MIMO, which leverages hundreds of antennas at base stations to increase throughput tenfold, enhance spectral efficiency, and boost antenna gain and directivity without requiring a significant increase in bandwidth. The miniaturization of antennas based on CSRR (Complementary Split Ring Resonator) cells enables a substantial reduction in antenna size, facilitating their integration into compact enclosures. The use of three different substrates FR4, silicon, and Rogers TMM5880, is investigated to optimize antenna gain and impedance matching. The convergence of 5G and IoT technologies enables high network capacity, low latency essential for real-time IoT applications, and support for an extremely large number of connected devices. Applications span smart cities, Industry 4.0, connected healthcare, and intelligent transportation systems, positioning MIMO as a foundational technology for current 5G networks and future beyond-5G and 6G generations. The comparative results of the various proposed structures are satisfactory and demonstrate the viability of these innovative solutions.

Keywords : MIMO Network, 5G, Internet of Things (IoT), Silicone, Rogers RT5880, FR-4.

ملخص

يستكشف هذا العمل التقنيات المبتكرة لشبكات الهوائيات المتعددة الإرسال والاستقبال (MIMO — Multiple Input Multiple Output) الموجهة للأنظمة الذكية في سياق شبكات الجيل الخامس (5G) وإنترنت الأشياء (IoT). تنصب الدراسة على تطوير حلول متقدمة وتقييمها، ولا سيما تقنية الـ Massive MIMO التي تعتمد مئات الهوائيات في المحطات الأساسية لمضاعفة معدل نقل البيانات عشرة أضعاف، وتحسين الكفاءة الطيفية، وتعزيز كسب الهوائي والاتجاهية دون الحاجة إلى توسيع ملحوظ في عرض النطاق الترددي. كما تُتيح تصغير الهوائيات المبنية على خلايا CSRR (Complementary Split Ring Resonators) تقليل حجمها بشكل كبير لدمجها في هياكل مضغوطة. ويُدرس استخدام ثلاثة ركائز مختلفة FR4 — وSilicone Rogers — TMM5880 بهدف تحسين كسب الهوائيات والتكيف مع الممانعة. ويُمكن الجمع بين تقنيتي 5G وIoT من تحقيق طاقة شبكية عالية، وزمن استجابة منخفض ضروري للتطبيقات الآنية لإنترنت الأشياء، ودعم عدد كبير جداً من الأجهزة المتصلة. وتشمل التطبيقات المدن الذكية والصناعة 4.0 والرعاية الصحية المتصلة وأنظمة النقل الذكي، مما يُرسخ مكانة MIMO بوصفها تقنية أساسية لشبكات الجيل الخامس الحالية والأجيال المستقبلية من beyond-5G و 6G. وقد جاءت نتائج مقارنة الهياكل المقترحة المختلفة مُرضية، مُثبتة جدوى هذه الحلول المبتكرة وقابليتها للتطبيق.

الكلمات المفتاحية: شبكة MIMO، الجيل الخامس (5G)، إنترنت الأشياء (IoT)، السيليكون، Rogers RT5880، FR-4.

