

N° d'ordre :

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de L'enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique

جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب

Université Ain Témouchent-Belhadj Bouchaib



Faculté : Sciences et technologies
Département : Electronique et
Télécommunications
Laboratoire : Structures intelligentes



THESE

Présentée pour l'obtention du **diplôme de DOCTORAT**

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Télécommunications

Spécialité : Système de Télécommunications

Par : MOUSSA Fatima Zahra

Intitulé

Étude et conception des antennes miniatures à base des métamatériaux pour les standards de télécommunications mobiles et de la nouvelle génération 5G

Soutenue publiquement, le 26 / 09 / 2024 , devant le jury composé de :

Nom & Prénom(s)	Grade	Qualité	Etablissement de rattachement
Mr.DEBBAL Mohammed	MCA	Président	Université de Ain Témouchent Belhadj Bouchaib
Mme.BELHADEF Yamina	MCA	Directrice de thèse	Université de Tlemcen Abou Bekr Belkaid
Mme.FEROUANI Souheyla	MCA	Co-directrice de thèse	Université de Ain Témouchent Belhadj Bouchaib
Mme.MOULESSEHOUL Wassila	MCA	Examinatrice	Université de Ain Témouchent Belhadj Bouchaib
Mme.BENOSMAN Hayet	MCA	Examinatrice	Université de Tlemcen Abou Bekr Belkaid
Mme. BOUSALAH Fayza	MCA	Examinatrice	Université de Tlemcen Abou Bekr Belkaid

Je dédie ce modeste travail

À mes Parents,

À mes sœurs, et mon Frère,

À ma famille,

À la mémoire de ma chère cousine Rekia Amel,

À tous ceux qui m'ont soutenu et cru en moi

Remerciements

Avant tout, toute ma gratitude va à **ALLAH** de m'avoir donné la force, le courage et l'engagement qui m'ont permis de terminer ce travail de recherche, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude et mon appréciation à mon encadrante **Dr. BELHADEF Yamina** et mon Co-encadrante **Dr. FEROUANI Souheyla** pour leur soutien continu, leurs encouragements et leurs précieuses conseils tout au long de l'accomplissement de ce travail. La clarté de leur pensée et l'étendue de leurs connaissances techniques m'a permis d'avancer sur mon axe de recherche d'une manière progressive.

Mes remerciements les plus respectueux et mon profond respect s'adressent à **Mr. DEBBAL Mohammed**, maitre de conférences de classe 'A' à l'université de Ain Temouchent, qui m'a fait l'honneur et le plaisir de présider le jury de ma soutenance.

J'exprime aussi mes sincères remerciements à mes examinatrices, **Mme. MOULESSEHOUL Wassila**, maitre de conférences de classe 'A' à l'université de Ain Temouchent, **Mme. BENOSMAN Hayet** maitre de conférences de classe 'A' à l'université de Tlemcen, **Mme. BOUSALAH Fayza**, maitre de conférences de classe 'A' à l'université de Tlemcen, qui ont bien voulu examiner soigneusement ce modeste travail et apporter leurs observations rigoureuses. Qu'elles trouvent ici, l'expression de ma profonde gratitude.

Comme pour tout doctorat, ce travail a connu des hauts et des bas, et c'est là que mes amis et ma famille ont joué leur rôle de super anti-stress. Qu'ils trouvent ici toute ma gratitude et mes vifs remerciements.

Et je suis à jamais redevable à mes parents, d'avoir été toujours à mes côtés, de m'avoir soutenu et encouragé. Je tiens à les remercier tout particulièrement. Alors merci **papa, maman** pour votre éducation, vos prières et votre aide par tous les moyens dont vous disposiez. Que Dieu me donne les moyens pour vous les rendre.

Résumé

Récemment, le domaine des télécommunications a connu une croissance technologique rapide. La miniaturisation des antennes patch par la technologie des métamatériaux représente un domaine de recherche en plein essor qui répond à la demande croissante des réseaux de télécommunications mobiles. Ce travail de recherche vise à concevoir et réaliser des nouvelles structures d'antennes miniatures tout en mettant en évidence l'utilisation de cellules métamatériaux, tels que les résonateurs en anneaux fendus complémentaires (CSRR). Une comparaison entre deux méthodes de miniaturisation à base des fentes et à base des métamatériaux a été introduite pour montrer l'intérêt des résonateurs métamatériaux sur la miniaturisation de la taille de l'antenne par rapport à la technique des fentes. Afin d'optimiser les performances des antennes miniatures proposées, notamment en termes de bande passante et gain, la technique DGS a été ajoutée sur le plan de masse des structures proposées qui sont dédiées aux applications des nouvelles technologies 5G et Wi-Fi-5, Wi-Fi 6 dans les plages de fréquences [3.4-3.8] GHz, [5.15-5.85] GHz et [5.925-7.125] GHz respectivement. Plusieurs études paramétriques sont menées pour améliorer les performances des géométries étudiées en tenant compte du coefficient de réflexion, du gain, et de la bande passante avec une réduction importante de la taille de l'antenne. La simulation a été effectuée à l'aide du logiciel CST Microwave Studio. Les résultats de simulation obtenus et les mesures des prototypes des modèles proposés sont alors comparés et commentés.

Mots clés : Conception, Réalisation, Miniaturisation, Antennes patch, Métamatériaux, 5G, Wi-Fi 5, Wi-Fi 6.

Abstract

The telecommunications sector has undergone rapid technological development in recent years. The miniaturisation of patch antennae using metamaterial technology is a fast-growing area of research that meets the increasing demand of mobile telecommunications networks. The aim of this research work is to design and produce new miniature antenna structures while highlighting the use of metamaterial cells, such as complementary split ring resonators (CSRRs). A comparison between two miniaturisation methods based on slots and metamaterials was introduced to show the interest of metamaterial resonators in reducing the size of the antenna compared with the slot technique. In order to optimise the performance of the proposed miniature antennae, particularly in terms of bandwidth and gain, the DGS technique has been added to the ground plan of the proposed structures, which are dedicated to applications of the new 5G, Wi-Fi-5 and Wi-Fi 6 technologies in the [3.4-3.8] GHz, [5.15-5.85] GHz and [5.925-7.125] GHz frequency bands respectively. Several parametric studies have been carried out to improve the performance of the geometries studied in terms of reflection coefficient, gain and bandwidth, while significantly reducing the antenna footprint. The simulation was carried out using CST Microwave Studio software. The simulation results obtained and the measurements of the prototypes of the proposed models are then compared and discussed.

Key words: Design, Production, Miniaturisation, Patch antennas, Metamaterials, 5G, Wi-Fi 5, Wi-Fi 6.

ملخص

في الآونة الأخيرة، شهد مجال الاتصالات السلكية واللاسلكية نمواً تكنولوجياً سريعاً. يُمثل تصغير هوائيات المطبوعة باستخدام تكنولوجيا المواد الفوقية مجالاً متنامياً للبحث، يلبي الطلب المتزايد على شبكات الاتصالات المتنقلة.

يهدف هذا العمل البحثي إلى تصميم وإنتاج هياكل هوائيات مصغرة جديدة مع تسليط الضوء على استخدام الخلايا للمواد الفوقية، مثل مرنانات الحلقة المنقسمة التكميلية (CSRRs). تم تقديم مقارنة بين طريقتين للتصغير تعتمدان على الفتحات والمواد الفوقية لإظهار فائدة المرنانات الفوقية في تصغير حجم الهوائي مقارنة بتقنية الفتحات.

من أجل تحسين أداء الهوائيات المصغرة المقترحة، لا سيما من حيث عرض النطاق الترددي والكسب، تمت إضافة تقنية DGS إلى المخطط الأرضي للهياكل المقترحة المخصصة لتطبيقات التقنيات الجديدة 5G و Wi-Fi و Wi-6 في نطاقات التردد [3.4-3.8] جيجاهرتز، [5.15-5.85] جيجاهرتز، و [5.925-7.125] جيجاهرتز على التوالي.

تم إجراء العديد من الدراسات البارامترية لتحسين أداء الأشكال الهندسية التي تمت دراستها، مع مراعاة معامل الانعكاس والكسب وعرض النطاق الترددي، مع انخفاض كبير في حجم الهوائي.

تم إجراء المحاكاة باستخدام برنامج CST Microwave Studio. ثم تمت مقارنة نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها بقياسات النماذج الأولية للنماذج المقترحة والتعليق عليها.

الكلمات المفتاحية: التصميم، الإنتاج، التصغير، هوائيات المطبوعة، المواد الفوقية، 5G، Wi-Fi-5، Wi-Fi 6 .

Table des matières

Remerciements	ii
Résumé	iii
Abstract.....	iv
ملخص	v
Table des matières	vi
Table des Figures.....	x
Liste des Tableaux	xv
Liste des symboles et des abréviations	xvi
Introduction Générale	1
<i>Chapitre I .Etat de l’art sur les antennes imprimées et les systèmes de télécommunications mobiles</i>	6
I.1 Introduction	6
I.2 Description de l’antenne patch	6
I.2.1 Antenne patch rectangulaire.....	7
I.2.2 Antenne patch circulaire	9
I.2.3 Antenne patch triangulaire	10
I.3 Caractéristiques de l’antenne patch	11
I.3.1 Régions de rayonnement du champ de l'antenne	11
I.3.1.1 Champ proche ou région de champ proche réactif	11
I.3.1.2 Champ proche radiatif ou région de Fresnel	11
I.3.1.3 Champ lointain ou région de Fraunhofer.....	11
I.3.2 Coefficient de réflexion	12
I.3.3 Rapport d’onde stationnaire ROS	12
I.3.4 Bande passante	13
I.3.5 Impédance d’entrée	14
I.3.6 Directivité et gain.....	15
I.3.7 Polarisation	16
I.3.8 Diagramme de rayonnement	17
I.4 Techniques d’adaptation	19
I.4.1 Adaptation par des encoches.....	19

I.4.2	Adaptation par une ligne quart d'onde.....	19
I.5	Différentes Techniques d'excitation de l'antenne microruban	20
I.5.1	Excitations par contact	20
1.4.0.1	Excitation par ligne microruban	20
1.4.1.2	Excitation par sonde coaxiale	21
1.4.2	Excitations par proximité	22
1.4.2.1	Excitation par couplage de proximité	22
I.5.2.2	Excitation par couplage à une ouverture dans le plan de masse.....	22
I.6	Avantages et inconvénients des antennes patch	25
I.6.1	Avantages.....	25
I.6.2	Inconvénients	25
I.7	Domaines d'applications des antennes patch	26
I.8	Systèmes de télécommunications mobiles	27
I.8.1	Première génération (1G).....	27
I.8.2	Deuxième génération (2G).....	27
I.8.3	Troisième génération (3G).....	28
I.8.4	Quatrième génération (4G)	28
I.9	La technologie 5G	28
I.9.1	Caractéristiques et avantages de la technologie 5G.....	29
I.9.2	Inconvénients de la technologie 5G	30
I.9.3	Domaines d'application des antennes 5G	31
I.10	La technologie WI-FI.....	32
I.10.1	Evolution des normes Wi-Fi	32
I.10.2	Avantages des technologies Wi-Fi-5 et Wi-Fi-6.....	34
I.10.3	Inconvénients des technologies Wi-Fi-5 et Wi-Fi-6	34
I.10.4	Performances et applications des technologies Wi-Fi-5 et Wi-Fi-6.....	34
I.11	Conclusion.....	36
	Chapitre II. Technologie des antennes miniatures	38
II.1	Introduction	38
II.2	Définition	38
II.3	Limites théoriques de la miniaturisation des antennes planaires	39
II.3.1	Antenne Électriquement Petite	39
II.3.2	Facteur de qualité d'une antenne	40
II.3.3	Facteur de miniaturisation.....	40
II.4	Techniques de miniaturisation	41

II.4.1	Modification de la géométrie	41
II.4.1.1	Ajout de fentes	41
II.4.1.2	Technique de modification du plan de masse (DGS)	42
II.4.1.3	Technique de formes fractales	43
II.4.2	Ajout de courts-circuits	44
II.4.2.1	Fil de court-circuit (shorting pin)	44
II.4.3	Replissements et méandres	46
II.4.3.1	Replissements	46
II.4.3.2	Méandres	47
II.4.4	Résonateurs parasites	48
II.4.5	Utilisation d'un matériau diélectrique à haute permittivité	49
II.4.6	Utilisation d'un matériau magnétique	50
II.4.7	Utilisation d'un matériau magnéto-diélectrique	51
II.4.8	Miniaturisation à l'aide des méta- matériaux.....	51
II.5	Techniques d'amélioration des performances des antennes miniatures.....	52
II.6	Applications des antennes miniatures	54
II.7	Conclusion.....	55
	Chapitre III. Technologie des métamatériaux	57
III.1	Introduction	57
III.2	Historique et contexte.....	57
III.3	Définition des métamatériaux	60
III.4	Classification des métamatériaux	61
III.5	Terminologie des métamatériaux	66
III.6	Structure des métamatériaux	67
III.6.1	Structure et modèle du SRR	67
III.6.2	Structure et modèle du CSRR	69
III.7	Différentes configurations géométriques des résonateurs des métamatériaux SRR.....	70
III.8	Applications des métamatériaux	71
III.9	Méthodes d'extraction des paramètres effectifs.....	77
III.9.1	Méthode de transmission-réflexion TR (Transmission-Réflexion method)...	77
III.9.2	Méthode de Nicolson-Ross-Weir (NRW)	78
III.9.3	Méthode de Smith	79
III.10 Conclusion	80
	Chapitre IV Conception et validation expérimentale d'une antenne patch miniature à base des métamatériaux pour la 5G	82

IV.1 Introduction	82
IV.2 Présentation du logiciel CST MWS	82
IV.3 Structure initiale de l'antenne patch rectangulaire	83
IV.3.1 Géométrie de l'antenne patch initiale.....	83
IV.3.2 Résultats de simulation.....	84
IV.4 Miniaturisation de l'antenne patch proposée à base des cellules métamatériaux CSRR.....	86
IV.4.1 Conception des cellules CSRR adaptés pour la 5G.....	86
IV.4.2 Insertion des cellules CSRR sur le plan de masse de l'antenne patch proposée.	88
IV.4.3 Adaptation de l'antenne patch miniature proposée	90
IV.4.4 Elargissement de la bande passante de l'antenne miniature avec la technique DGS.....	93
IV.5 Résultats de mesures et validations expérimentales.....	100
IV.5.1 Antenne rectangulaire initiale proposée	100
IV.5.2 Antenne miniature finale à base des métamatériaux et la technique DGS.....	101
IV.6 Comparaison entre l'antenne patch miniature à fentes et l'antenne miniature finale à base des métamatériaux.....	102
IV.7 Conclusion.....	107
<i>Chapitre V. Conception des antennes patch miniatures à base des résonateurs CSRR pour les systèmes de Télécommunications modernes</i>	109
V.1. Introduction	109
V.2 Conception de l'antenne patch pentagone proposée	109
V.2.1 Résultats et discussions.....	110
V.2.2 Miniaturisation de l'antenne patch pentagone proposée.....	112
V.2.2.1 Cellule métamatériaux CSRR.....	112
V.2.2.2 Géométrie de l'antenne patch pentagone miniature	114
V.2.2.3 Amélioration du gain et de la bande passante de l'antenne miniature de forme pentagone proposée.....	118
V.3 Conception de l'antenne patch circulaire de base proposée.....	121
V.3.1 Résultats et discussion	122
V.3.2 Miniaturisation de l'antenne patch circulaire proposée	125
V.3.2.1 Cellule CSRR proposée	125
V.3.2.2 Géométrie de l'antenne miniature	127
V.3.2.3 Amélioration du gain et élargissement de la bande passante	130
V.4 Conclusion.....	135
Conclusion Générale et Perspectives.....	137
Bibliographie :	141

Table des Figures

Chapitre I

Figure I. 1: Différentes formes d'antennes patch .	7
Figure I. 2 : Antenne patch de forme rectangulaire.	8
Figure I. 3: Antenne patch de forme circulaire.	9
Figure I. 4: Antenne patch de forme triangulaire.	10
Figure I. 5: Régions de champ d'une antenne	12
Figure I. 6: Bande passante	14
Figure I. 7 : Représentation du champ électrique pour une polarisation linéaire, circulaire et elliptique	17
Figure I. 8: Diagramme de rayonnement d'une antenne dipôle verticale en coordonnées polaires ; a) diagramme de rayonnement en 2D, b) diagramme de rayonnement en 3D	18
Figure I. 9 : Diagramme de rayonnement en 3D d'un réseau d'antennes à quatre patches [16].	18
Figure I. 10: Adaptation avec des encoches	19
Figure I. 11: Adaptation par une ligne quart d'onde	20
Figure I. 12: Excitation par ligne microruban (microbande)	21
Figure I. 13 : Excitation par une sonde coaxiale	21
Figure I. 14 : Excitation par couplage de proximité	22
Figure I. 15: Excitation par couplage à une ouverture dans le plan de masse	23

Chapitre II

Figure II. 1 : Sphère de Chu: Sphère minimale qui englobe l'antenne	40
Figure II. 2: Antenne miniature avec fentes de forme C : (a) vue d'avant : le patch, (b) vue d'arrière : plan de masse	42
Figure II. 3 : Antenne miniature avec la technique DGS	42
Figure II. 4 : Description des différents processus de conception de la courbe de Sierpinski	43
Figure II. 5 : Quatre itérations des fractales de Sierpinski	44
Figure II. 6: Fil de court-circuit	44
Figure II. 7: Antenne miniature avec trois fils de court-circuit	45
Figure II. 8: Languette de court-circuit	45
Figure II. 9: Antenne miniature avec une languette de court-circuit	46
Figure II. 10: (a) Antenne repliée, (b) Repliement vertical	47
Figure II. 11: Antenne repliée pour les applications RFID	47
Figure II. 12: Antenne miniaturisée à fente méandree	48
Figure II. 13: Résonateur parasite juxtaposé	49
Figure II. 14: Résonateur parasite superposé	49
Figure II. 15 : Réseau d'antennes à base du matériau céramique en titanate de bismuth (BiT)	50
Figure II. 16 : Antenne triple bande basée sur des cellules CSRR	52

Chapitre III

Figure III. 1 : Premier schéma illustrant le concept de la réfraction négative, publié en 1950 par L.I. Mandelshtam..	58
Figure III. 2 : Trièdre indirect défini par la règle de la main gauche .	60
Figure III. 3 : Une structure pseudo-homogène bi-dimensionnelle composée d'un réseau périodique d'anneaux résonnants et de fils .	61
Figure III. 4 : Représentation vectorielle d'une onde électromagnétique plane. (a) Trièdre direct (matériaux main droite). (b) Trièdre indirect (matériaux main gauche) .	63
Figure III. 5 : Réseau de tiges métalliques formant les métamatériaux ENG .	64
Figure III. 6: Géométrie de rouleau suisse, proposée par Pendry: (a) vue de face. (b) vue de profil .	65
Figure III. 7. Résonateur en Anneau Fendu « RAF » (Split Ring Resonator « SRR ») introduit par Pendry .	66
Figure III. 8 : Classement des matériaux en fonction du signe de leur permittivité ϵ et de leur perméabilité μ .	66
Figure III. 9 : Représentation de la structure appelée Split Ring Resonator (SRR) (la couleur grise représente les bandes métalliques); (b) : Modèle LC du SRR .	68
Figure III. 10: (a) Vue en 3D du résonateur à double anneau fendu complémentaire (la couleur grise représente la couche métallique), (b) le model LC de CSRR .	70
Figure III. 11 : Exemples de résonateurs magnétiques SRR (a) structure à un seul anneau (b) à deux anneaux (c) à anneaux fendus multiples (d) structure SRR imbriquée (e) SRR modifié en forme d'oméga .	71
Figure III. 12 : (a) Antenne patch miniaturisée. (b) Cellule métamatériaux RAFC(CSRR). (c) Coefficient de réflexion simulé et mesuré de l'antenne patch miniaturisée à 11,6 % de taille de l'antenne traditionnelle .	73
Figure III. 13: (a),(b) & (c) Absorbeur à métamatériaux et sa cellule unitaire, (d) Résultats de fabrication (e) Résultats de simulation .	74
Figure III. 14 : (a) Focalisation avec une lentille ordinaire. (b) Focalisation avec une super lentille .	75
Figure III. 15 : Principe du Cloaking, les rayons contournent la sphère (objet) et se reconstruisent en aval, un observateur en aval ne voit pas l'objet. (A) Coupe transversale en 2D (B) vue 3D .	76

Chapitre IV

Figure IV. 1 : Antenne patch initiale : (a) vue de face (patch) , (b) vue d'arrière (plan de masse)	84
Figure IV. 2 : Coefficient de réflexion de l'antenne initiale proposée .	85
Figure IV. 3 : Diagrammes de rayonnement de l'antenne initiale proposée (a) et (b) en 2D , (c) en 3D .	86
Figure IV. 4 : Cellule CSRR proposée .	87
Figure IV. 5 : Coefficients de réflexion et de transmission de la cellule CSRR .	87
Figure IV. 6 : Permittivité et la perméabilité de la cellule CSRR proposée.....	88
Figure IV. 7 : Insertion des cellules CSRR sur le plan de masse, (a) 2 cellules, (b) 4 cellules, (c) 6 cellules et (d) 8 cellules .	89
Figure IV. 8 : Coefficients de réflexion des quatre antennes proposées à base des métamatériaux .	90

Figure IV. 9 : Structure géométrique de l'antenne miniaturisée équipée d'un réseau de 8 CSRR. (a) vue d'avant : patch, (b) vue d'arrière : plan de masse	90
Figure IV. 10 : Influence de l'espacement entre les 8 cellules CSRR sur l'adaptation de l'antenne	91
Figure IV. 11 : Coefficient de réflexion de l'antenne miniature proposée	92
Figure IV. 12 : Taux d'onde stationnaire de l'antenne miniature proposée	92
Figure IV. 13 : Antenne miniature proposée avec DGS, (a) vue avant : patch, (b) vue arrière : plan de masse	93
Figure IV. 14: Coefficients de réflexions pour différentes valeurs de la longueur K_2 (a) et R_2 (b), et pour différentes valeurs de la largeur S_2 (c) et U_1 (d)	96
Figure IV. 15 : Coefficient de réflexion de l'antenne miniature finale proposée	97
Figure IV. 16 : Taux d'onde stationnaire de l'antenne miniature finale proposée	97
Figure IV. 17 : Gain de l'antenne miniature finale proposée	98
Figure IV. 18 : Diagrammes de rayonnement de l'antenne proposée (a) et (b) en 2D, (c) en 3D	99
Figure IV. 19: Prototype de l'antenne rectangulaire initiale proposée, (a) vue du patch, (b) vue de plan de masse	100
Figure IV. 20 : Coefficient de réflexion simulé et mesuré de l'antenne patch de forme rectangulaire initiale	101
Figure IV. 21 : Prototype de l'antenne miniature proposée à base des cellules métamatériaux CSRR et la technique DGS, (a) vue du patch, (b) vue de plan de masse	102
Figure IV. 22: Coefficients de réflexion simulé et mesuré de l'antenne miniature avec des métamatériaux et la technique DGS	102
Figure IV. 23 : Antenne miniature proposée avec fentes : (a) Vue d'avant (patch), (b) vue d'arrière (plan de masse)	103
Figure IV. 24: Prototype de l'antenne miniature à fentes, (a) vue du patch, (b) vue de plan de masse	104
Figure IV. 25 : Coefficient de réflexion simulé et mesuré de l'antenne patch miniature avec fentes	104
Figure IV. 26 : Comparaison entre les prototypes de l'antenne initiale, de l'antenne miniature avec fentes et de l'antenne miniature avec métamatériau respectivement : (a) vue d'avant : patch, (b) vue d'arrière : plan de masse	105
Figure IV. 27 : Mesures des prototypes par l'analyseur de réseau : (a) antenne initiale, (b) antenne miniature avec fentes et (c) antenne miniature avec métamatériaux	105
Figure IV. 28: Coefficients de réflexions simulés des antennes miniatures avec métamatériaux et avec fentes	106
Figure IV. 29: Coefficients de réflexions mesurés des antennes miniatures à base des métamatériaux et à fentes	107

Chapitre V

Figure V. 1 : Géométrie de l'antenne initiale de forme pentagone proposée.	110
Figure V. 2 : Coefficient de réflexion de l'antenne patch de forme pentagone proposée ..	111
Figure V. 3 : Taux d'onde stationnaire de l'antenne patch de forme pentagone proposée.	111
Figure V. 4: Gain de l'antenne patch de forme pentagone proposée	111
Figure V. 5: Diagrammes de rayonnement de l'antenne pentagone initiale proposée : (a) 3D, (b) et (c) polaires en 2D	112
Figure V. 6 : Cellule CSRR proposée	113
Figure V. 7 : Coefficients de réflexion et de transmission de la cellule CSRR proposée ..	113

Figure V. 8 : (a) la permittivité relative et (b) la perméabilité relative de la cellule CSRR proposée.	114
Figure V. 9 : Géométrie de l'antenne patch de forme pentagone avec deux cellules CSRR insérées dans le plan de masse	115
Figure V. 10 : Variation de la largeur et de la longueur de l'antenne patch pentagone proposée en fonction de la fréquence	115
Figure V. 11 : Antenne patch miniature à base des cellules CSRR (a) Vue de face (Patch), (b) Vue d'arrière (plan de masse)	116
Figure V. 12 : Coefficient de réflexion de l'antenne patch miniature de forme pentagone proposée.	116
Figure V. 13 : Taux d'onde stationnaire de l'antenne patch miniature de forme pentagone proposée.	117
Figure V. 14: Gain de l'antenne miniature de forme pentagone proposée 117	117
Figure V. 15 : Diagrammes de rayonnement de l'antenne miniature proposée : (a) en 3D, (b) et (c) polaires en 2D	118
Figure V. 16 : Fentes de différentes formes insérées dans le plan de masse de l'antenne miniature proposée : (a) 3 fentes rectangulaires, (b) fente en L et (c) fente en U 119	119
Figure V. 17 : Coefficients de réflexion des trois configurations avec la technique DGS . 119	119
Figure V. 18 : Taux d'ondes stationnaires des trois configurations avec la technique DGS.	120
Figure V. 19 : Gains des trois configurations avec la technique DGS 120	120
Figure V. 20 : Diagrammes de rayonnement en 3D des trois structures d'antennes miniatures avec la technique DGS : (a) trois fentes rectangulaires, (b) fente en L et (c) fente en U 121	121
Figure V. 21 : Diagrammes de rayonnement polaires en 2D des trois structures d'antennes miniatures avec la technique DGS, (a) $\phi=90$ et (b) $\phi=0$ 121	121
Figure V. 22: Antenne patch circulaire proposée 122	122
Figure V. 23: Coefficient de réflexion de l'antenne patch circulaire proposée 123	123
Figure V. 24: Taux d'onde stationnaire de l'antenne patch circulaire proposée 123	123
Figure V. 25: Gain de l'antenne patch circulaire proposée 124	124
Figure V. 26: Diagrammes de rayonnement de l'antenne patch circulaire proposée : (a) 3D, (b) et (c) polaires en 2D 124	124
Figure V. 27 : Cellule CSRR proposée 125	125
Figure V. 28: Coefficients de réflexion et de transmission de la cellule CSRR proposée . 126	126
Figure V. 29 : Paramètres diélectriques de la cellule CSRR proposée, (a) La permittivité relative et (b) la perméabilité relative..... 127	127
Figure V. 30 : Antenne patch miniature avec des cellules CSRR (a) Vue de patch, (b) Vue de plan de masse 127	127
Figure V. 31: Variation du rayon R de l'élément rayonnant en fonction de la fréquence [181]. 128	128
Figure V. 32: Coefficient de réflexion de l'antenne miniature proposée 128	128
Figure V. 33: Taux d'onde stationnaire de l'antenne miniature proposée 129	129
Figure V. 34: Gain de l'antenne miniature proposée 129	129
Figure V. 35: Diagrammes de rayonnement de l'antenne miniature proposée : (a) en 3D, (b) et (c) en 2D 130	130
Figure V. 36: Antenne miniature finale proposée avec deux fentes de formes rectangulaires . insérées dans le plan de masse . 130	130
Figure V. 37: Coefficients de réflexion de l'antenne miniature finale proposée 131	131

Figure V. 38: Taux d'onde stationnaire de l'antenne miniature finale proposée	132
Figure V. 39: Gain de la structure finale proposée basée sur la technique DGS	132
Figure V. 40: Diagrammes de rayonnement de l'antenne miniature à fentes proposée : (a) en 3D, (b) et (c) en 2D à la fréquence de résonance de 5,16 GHz	133
Figure V. 41: Diagrammes de rayonnement de l'antenne miniature à fentes proposée : (a) en 3D, (b) et (c) en 2D à la fréquence de résonance de 6,22 GHz	133

Liste des Tableaux

Tableau I. 1 : Avantages et inconvénients des types d'alimentation.....	25
Tableau IV. 1 : Paramètres de l'antenne patch initiale	84
Tableau IV. 2: Dimensions de l'antenne miniature de forme rectangulaire proposée	90
Tableau IV. 3 : Dimensions finales des différents paramètres du DGS	96
Tableau IV. 4 : Résultats de simulation de l'antenne miniature proposée à base des métamatériaux	99
Tableau IV. 5 : Comparaison des résultats de la simulation avec d'autres travaux de la littérature	99
Tableau IV. 6 : Paramètres de l'antenne patch miniaturisée par fentes	103
Tableau IV. 7 : Analyse comparative des résultats obtenus	107
Tableau V. 1 : Dimensions de l'antenne patch de forme pentagone proposée	110
Tableau V. 2 : Dimensions finales de l'antenne patch miniature de forme pentagone [121].	116
Tableau V. 3 : Dimensions de l'antenne patch circulaire proposée	122
Tableau V. 4 : Dimensions de l'antenne miniature proposée	127
Tableau V. 5 : Dimensions des fentes insérées dans le plan de masse.....	131
Tableau V. 6: Comparaison entre l'antenne patch proposée et l'antenne miniature finale proposée	134
Tableau V. 7 : Comparaison de l'antenne miniature finale avec d'autres travaux similaires.	135

Liste des symboles et des abréviations

- 1G** : Première Génération.
- 2G** : Deuxième Génération.
- 3G** : Troisième Génération.
- 3GPP**: 3rd Generation Partnership Project.
- 4G** : Quatrième Génération.
- 5G** : Cinquième Génération.
- CSRR**: Complementary Split Ring Resonator
- DGS** : Defected Ground Structure
- DNG** : Double Negative.
- GPRS** : General Packet Radio Service
- GSM**: The Global System for Mobile Communications
- IEEE** : Institute of Electrical and Electronics Engineers
- IOT**: Internet Of Things (internet des objects).
- LTE** : Long Term Evolution
- MMD** : Matériau Main Droite
- MMG** : Matériau Main Gauche
- MTM** : Métamatériaux
- n** : Indice de réfraction
- NRW** : Nicolson-Ross-Weir
- RAF**: Résonateur en Anneau Fendu .
- RAFC** : Résonateur en Anneau Fendu Complémentaire.
- RF** : Radio Fréquence
- S11** : coefficient de réflexion
- S21** : coefficient de transmission
- SRR**: Split Ring Resonator .
- VSWR**: Voltage Standing Wave Ratio
- Wi-Fi**: Wireless fidelity
- ϵ_r** : Permittivité électrique relative
- λ** : Longueur d'onde
- μ_r** : Perméabilité magnétique relative

ρ : densité des électrons

ω : pulsation angulaire

ε : Permittivité

μ : Perméabilité

Introduction Générale

Introduction Générale

L'évolution des télécommunications s'est déroulée en plusieurs étapes, favorisant une croissance exponentielle des dispositifs de communication au cours de la dernière décennie. Les prémices de la théorie de l'électromagnétisme trouvent leur origine dans les expériences de Faraday au début du XIXe siècle. La technologie cellulaire a connu une évolution considérable depuis leur déploiement initial dans les années 1980 et aujourd'hui, nous sommes à un seuil important avec la normalisation de la cinquième génération (5G) par le projet de partenariat de troisième génération (3GPP), et elle fait l'objet d'essais sur le terrain par l'industrie.

À l'arrivée du réseau cellulaire de première génération (1G) dans les années 1980, sa fonction principale était limitée à la transmission des signaux vocaux (appels vocaux), réalisée de manière analogique, caractérisait ainsi cette génération de communication mobile. Par la suite, l'introduction de la 2G au début des années 1990 a apporté des services permettant le transfert de données pour les mobiles, comprenant des messages texte SMS et des conversations numériquement cryptées. Elle a offert une meilleure qualité d'appels vocaux numériques, bien que limité à un débit de 10 kbps, avec une réduction significative du bruit statique. Il y a également eu quelques mises à niveau ultérieures de la 2G, notamment le GSM, le GPRS (2,5G) et l'EDGE (2,75G), offrant des débits de données plus élevés. La première apparition de la troisième génération (3G) a eu lieu au Japon en octobre 2001. Ce n'est qu'avec l'avènement de cette génération que les gens ont pu bénéficier d'une meilleure expérience d'internet mobile avec un débit de données allant jusqu'à 500 kbps. La 3G a fourni un niveau de connexion supérieur à son prédécesseur, la 2G, et ce n'est qu'à ce moment-là qu'il y avait des services jamais vus auparavant, tels que les appels vidéo, les services basés sur la localisation, la participation à des visioconférences et la télévision mobile. La technologie 4G, également désignée sous le nom de Long Term Evolution (LTE), a été présentée pour la première fois au Royaume-Uni en 2012. Elle a franchi une étape majeure par rapport à la 3G en inaugurant la fourniture de services entièrement en mode IP, englobant à la fois la voix et les données. La 4G offre une expérience Internet à haut débit rapide et intègre des architectures et des protocoles réseau unifiés. En raison de ses performances exceptionnelles, la 4G est progressivement en train de prendre le relais des systèmes cellulaires plus anciens. L'élaboration de la 5G vise à améliorer différentes caractéristiques de la 4G, notamment en surpassant sa vitesse et en facilitant le développement d'industries du big data telle que l'IoT et les villes intelligentes,

Introduction Générale

grâce au potentiel qu'elle offre. La 5G assurera une expérience utilisateur sans faille en fournissant un débit de données maximal allant jusqu'à 10 Gbit/s et une capacité de mobilité d'environ 500 km/h. Récemment, La 5G est devenue une tendance en raison de sa capacité théorique à améliorer la vitesse du débit de données jusqu'à 20 Gbit/s, à réduire la latence à 1 milliseconde et à augmenter le volume de trafic jusqu'à 10 Mbit/m². La bande 1-6 GHz a été attribuée en tant que spectre intermédiaire, assurant la période de transition entre la 4G et la 5G pour une mise en œuvre réussie. Cette bande de fréquence permet d'équilibrer la couverture et la capacité, et devrait constituer la base initiale des services 5G. En effet, le spectre de fréquences plus élevé de 26-28 GHz associé à la 5G, notamment les ondes millimétriques (mmWave) est connu pour sa distance de transmission de signal très courte en raison de sa perte de propagation élevée et de l'absorption moléculaire.

De nos jours, les réseaux sans fils sont en croissance tant en termes de connexions que d'applications couvertes, avec une amélioration notable de la qualité des liaisons. Cette génération de télécommunications se caractérise principalement par l'utilisation d'ondes électromagnétiques au lieu de câbles et de liaisons filaires. Les réseaux de Télécommunications ne se limitent pas seulement aux standards de télécommunications mobiles, mais également aux réseaux sans fils, notamment aux standards de l'IEEE 802.11, connus sous le nom de Wi-Fi (Wireless Fidelity en anglais). Cette technologie de télécommunication sans fil, largement répandue dans les réseaux domestiques et les lieux publics, est apparue pour la première fois en 1997 et continue à se développer jusqu'à présent. Elle offre plusieurs bénéfices comparativement aux réseaux filaires, tels que la mobilité, la flexibilité, la facilité de déploiement, ainsi que la réduction des coûts de déploiement. L'évolution de cette technologie est passée par l'introduction de différentes normes, notamment la norme Wi-Fi -1 (802.11b), Wi-Fi -2 (802.11a), Wi-Fi -3 (802.11g), Wi-Fi -4 (802.11n), Wi-Fi -5 (802.11ac), Wi-Fi -6 (802.11ax) et Wi-Fi -7 (802.11be) qui est en cours d'étude et de développement.

Les antennes sont parmi les éléments constitutifs des réseaux mobiles et sans fils, où leur qualité est totalement dépendante des performances de ces équipements, qui sont spécifiques et nécessaire pour chaque application, tels que les téléphones portables, les ordinateurs, les stations de base et autres infrastructures assurant la liaison entre ces terminaux. De plus, la réduction de la taille de ces dispositifs antennaires est la tendance de cette dernière décennie, tout en améliorant leurs performances grâce à l'utilisation des différentes techniques de miniaturisation. Cela constituera le cœur de notre problématique de thèse. Cependant, l'objectif principal est de contribuer au développement d'antennes patch à base des

Introduction Générale

métamatériaux en utilisant des résonateurs en anneaux fendus Complémentaires (CSRRs), qui présentent des avantages accrus pour la conception et la miniaturisation des antennes micro-ruban.

Contributions et organisation de la thèse

Dans ce contexte, notre travail de thèse se concentre plus particulièrement sur la conception d'antennes miniatures à base des métamatériaux, adaptées aux applications de la nouvelle génération 5G et du standard Wi-Fi 5/ Wi-Fi 6. En effet, la tendance technologique actuelle consiste à miniaturiser et intégrer ces composants afin de réduire l'encombrement des circuits RF. Par ailleurs, les métamatériaux ont fait l'objet des études approfondies grâce à leur capacité pour la création de nouvelles propriétés électromagnétiques et à miniaturiser les antennes micro-ruban. Ces matériaux sont caractérisés par des propriétés uniques, notamment leur permittivité et perméabilité effectives, toutes les deux négatives.

Le manuscrit de la thèse est organisé comme suit :

L'objectif du premier chapitre est de présenter l'état de l'art sur les antennes imprimées et les systèmes de télécommunications mobiles et la technologie Wi-Fi. Dans cette partie, on rappelle tout d'abord les différentes formes des antennes et leurs régions de rayonnement des trois champs existants, ainsi que leurs principales caractéristiques, suivi d'une synthèse des techniques d'excitation couramment utilisées. Ensuite, il a été nécessaire de présenter les avantages et les inconvénients de ces structures antennaires et leurs applications dans divers domaines. Pour achever ce premier chapitre, les systèmes de télécommunications mobiles ont été exposés.

Le deuxième chapitre abordera la technologie des antennes miniatures. Nous allons commencer premièrement par la définition des antennes miniatures, ainsi que les limites théoriques de la miniaturisation des antennes planaires, puis nous citerons les techniques de miniaturisation qui représentent le cœur de notre travail de thèse, enrichies avec des exemples de la littérature. Enfin, nous présenterons les diverses applications des antennes miniatures ainsi que les différentes techniques d'amélioration de leurs performances en termes de gain et de bande passante.

Le troisième chapitre sera consacré à une étude approfondie sur la technologie des métamatériaux. Dans un premier temps, nous allons présenter une brève historique ainsi qu'une définition de ces matériaux particulier. Nous introduisons par la suite leurs principales classifications et leur terminologie. Nous dresserons également les structures de base et les

Introduction Générale

différentes configurations géométriques des résonateurs en anneaux fendus RAF (où SRR Split Ring Resonator en anglais) et des résonateurs en anneaux fendus complémentaires RAFC. Nous terminerons ce chapitre par une vue générale sur les applications dans lesquelles ils sont utilisés. Nous soulignerons également les différentes méthodes numériques utilisées pour l'extraction de leurs paramètres effectifs.

Le quatrième chapitre de cette thèse est dédié à la conception et la validation expérimentale d'une antenne patch miniature à base des métamatériaux pour la 5G. Nous nous focaliserons sur la conception et la simulation d'une antenne patch rectangulaire miniature à base des résonateurs complémentaires CSRR, avec l'utilisation du logiciel de simulation CST Microwave Studio. Toutes les étapes utilisées pour réduire la taille de la structure de l'antenne proposée seront présentées et commentées. Les résultats de simulation obtenus se révèlent très prometteurs pour notre application, notamment en ce qui concerne les coefficients de réflexion, la bande passante, le gain et le diagramme de rayonnement. De même, ces résultats sont confirmés par une validation expérimentale. À la fin de ce chapitre, une comparaison entre deux méthodes de miniaturisation à base des fentes et des métamatériaux est effectuée sur la même antenne proposée. Cette comparaison vise à mettre en évidence l'efficacité des métamatériaux dans ce contexte et de valider les résultats obtenus.

Le dernier chapitre portera sur la simulation et la conception des autres structures antennaires miniatures à base des métamatériaux dédiés aux réseaux de communications mobiles tels que le WiFi-5, le WiFi-6 et la 5G. En premier lieu, nous allons présenter une structure d'antenne patch de forme pentagone miniaturisée en utilisant les métamatériaux CSRR pour les applications de la 5G. Toutes les étapes de miniaturisation seront présentées et discutées. Ensuite, nous allons passer à la partie visant à améliorer les performances de l'antenne miniature en augmentant le gain et en élargissant la bande passante, tout en utilisant la technique de plan de masse partiel (DGS en anglais) à travers différentes formes de fentes insérées sur le plan de masse de notre antenne miniature proposée, à savoir une fente en forme de L, une fente en forme de U et trois fentes rectangulaires. En deuxième lieu, une antenne miniature de forme circulaire dédiée aux applications WiFi-5 et WiFi-6 sera présentée par la suite de ce chapitre. Un réseau de (3×4) cellules CSRR sera intégré au plan de masse de l'antenne pour en réduire les dimensions. En outre, la technique DGS est également utilisée pour optimiser les performances de cette antenne en termes de bande passante et de gain.

Chapitre I

Etat de l'art sur les antennes imprimées et les systèmes de télécommunications mobiles

I Etat de l'art sur les antennes imprimées et les systèmes de télécommunications mobiles

I.1 Introduction

De nos jours, la demande des systèmes de communications sans fils a connu une croissance sans précédent, stimulée par la prolifération des appareils mobiles et le besoin croissant de transmission de données à haut débit. L'onde électromagnétique est le principal support de cette génération de télécommunications, plutôt que les câbles et les liaisons filaires. Les antennes patch sont de plus en plus sollicitées pour les applications de télécommunications. Dans ce premier chapitre, nous présentons un aperçu sur l'état de l'art des antennes patch micro-ruban où nous faisons le point d'abord sur la définition de l'antenne patch suivie par leurs formes couramment utilisées qui constituent la géométrie de base pour la plupart des antennes, puis les régions de rayonnement de champ de ces antennes. Par la suite, nous définissons leurs différentes caractéristiques radioélectriques tels que le coefficient de réflexion, le rapport d'onde stationnaire, la bande passante, le gain et la directivité...etc. Ensuite, nous citons les techniques d'adaptation et d'excitation des antennes patch, en mettant en évidence à la fois leurs avantages et inconvénients. Finalement, nous exposons les divers systèmes de télécommunications mobiles qui font usage des antennes imprimées, avec une présentation approfondie de la nouvelle technologie 5G, ainsi que la technologie des réseaux sans fils Wi-Fi 5 et Wi-Fi 6.

En résumé, l'objectif de ce chapitre est de fournir une présentation des concepts théoriques des antennes patch microruban et les notions fondamentales de certains paramètres dans le domaine des antennes et de leurs applications dans les réseaux de communication mobiles. Il est donc impératif de connaître ces informations afin de comprendre le rôle et le principe de fonctionnement des antennes patch microruban dans les systèmes de télécommunications mobiles modernes et les travaux effectués dans ce domaine.

I.2 Description de l'antenne patch

Une antenne est un dispositif métallique qui se présente sous différentes formes. Son rôle est de transmettre ou de recevoir des ondes radio dans l'espace. Elle agit comme un transducteur spécialisé qui transforme les champs de radiofréquences (RF) en énergie électrique et vice versa. Il en existe deux types principaux : l'antenne réceptrice, qui capte l'énergie RF et

Chapitre I Etat de l'art sur les antennes imprimées et les systèmes de télécommunications mobiles

délivre un courant alternatif à l'équipement, et l'antenne émettrice, qui est alimentée par l'énergie électrique de l'équipement et produit un champ de radiofréquences. Ce dispositif doit produire une onde rayonnée afin de garantir sa propagation dans l'air. Selon la fréquence de fonctionnement et le type d'applications, les antennes peuvent prendre diverses formes et tailles, on peut citer l'antenne dipôle, l'antenne cornet et l'antenne patch...Etc [1].

L'antenne microruban se compose d'une fine bande métallique (patch) placée à une distance 'h' au-dessus d'un plan de masse, séparée par un substrat diélectrique avec une permittivité ϵ_r . De nombreux substrats peuvent être utilisés pour la conception d'antennes microruban, avec des constantes diélectriques typiques comprises entre $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$. L'utilisation d'un substrat plus épais accroît la largeur de la bande passante, mais réduit l'efficacité. Pour la conception d'antennes, les substrats les plus souhaitables sont les substrats épais à faible constante diélectrique, car ils offrent une meilleure efficacité, une plus grande largeur de bande passante et des champs non liés pour le rayonnement dans l'espace, mais au détriment d'une taille d'élément plus importante [2].

Les antennes patch se présentent sous différentes formes, chacune ayant ses propres avantages et caractéristiques. La figure I.1 présente quelques formes les plus courantes :

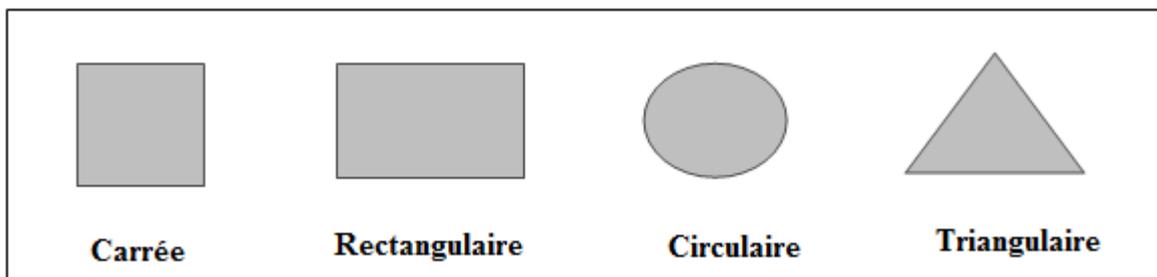


Figure I. 1: Différentes formes d'antennes patch.

Parmi toutes ces formes, les trois structures de base : rectangulaire, circulaire et triangulaire sont les plus faciles à étudier pour appréhender les mécanismes de rayonnement des antennes imprimées. Leur analyse et leur fabrication sont relativement simples.

I.2.1 Antenne patch rectangulaire

L'antenne patch microruban rectangulaire est caractérisée par une longueur L et une largeur W, comme illustré dans la figure I.2. La fréquence de résonance d'une antenne patch rectangulaire correspond à celle où son impédance d'entrée devient entièrement résistive.

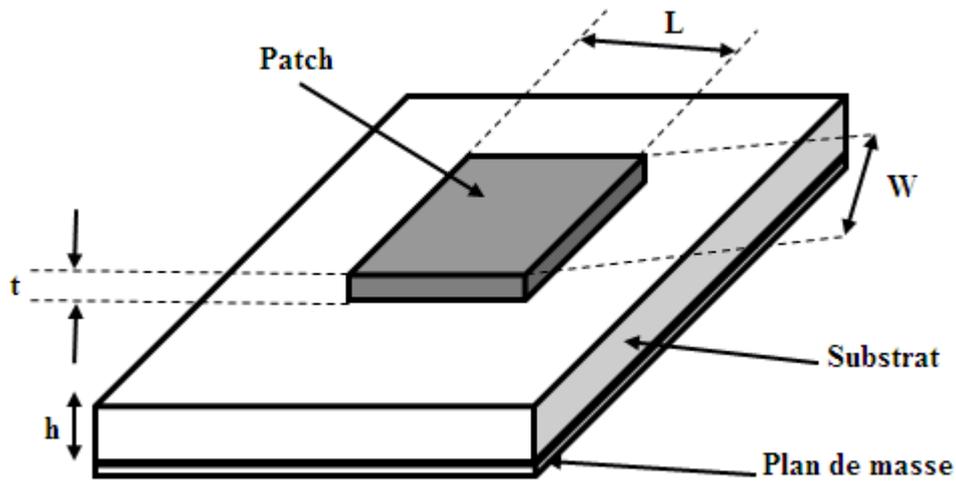


Figure I. 2 : Antenne patch de forme rectangulaire.

Calcul de la taille du patch rectangulaire :

La largeur (w) d'une antenne patch rectangulaire est déterminée par l'utilisation de la formule suivante [4] :

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (\text{I.1})$$

Avec :

C : Célérité où la vitesse de la lumière = $3 \cdot 10^8 m/s$.

f_r : Fréquence de résonance.

ϵ_r : Permittivité du substrat.

La constante diélectrique effective (ϵ_{reff}) est définie par l'équation (I.2) [4] :

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (\text{I.2})$$

La longueur électrique (ΔL) d'une antenne patch est supérieure à sa longueur physique. Cette extension normalisée de la longueur est calculée en utilisant l'équation suivante [4] :

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.8 \right)} \quad (\text{I.3})$$

La longueur effective (L_{eff}) est déterminée par l'équation (I.4) [4] :

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (\text{I.4})$$

Chapitre I Etat de l'art sur les antennes imprimées et les systèmes de télécommunications mobiles

La longueur réelle d'une antenne patch (L) est calculée à l'aide de la formule suivante [4] :

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (I.5)$$

Les équations (I.6) et (I.7) expriment respectivement la longueur (L_{gs}) et la largeur (W_{gs}) du substrat et du plan de masse.

$$L_{gs} = L + 6 \times h \quad (I.6)$$

$$W_{gs} = W + 6 \times h \quad (I.7)$$

I.2.2 Antenne patch circulaire

Les antennes patch circulaire sont l'une des formes d'antennes les plus connues et sont étudiées depuis plus d'un demi-siècle. Généralement l'élément rayonnant de l'antenne est imprimé sur une face d'un substrat diélectrique, et un plan de masse. Ces antennes sont caractérisées par leur légèreté, leur flexibilité et leur adaptabilité. La géométrie circulaire du patch est illustrée sur la figure I.3.

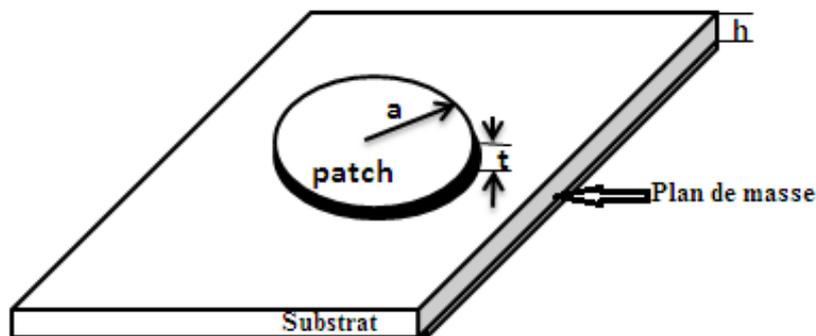


Figure I. 3: Antenne patch de forme circulaire.

Les formules utilisées pour le calcul du rayon « a » sont les suivantes [5] :

$$a = F \left\{ 1 + \frac{2h}{\pi F \epsilon_r} \left[\ln \left(\frac{\pi F}{2h} \right) + 1.7726 \right] \right\}^{-1/2} \quad (I.8)$$

Où :

$$F = \frac{8.791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (I.9)$$

Avec :

F : La fonction logarithmique de l'élément rayonnant.

h : L'épaisseur du substrat.

f_r : La fréquence de résonance où la fréquence de travail.

ϵ_r : La permittivité relative du substrat.

I.2.3 Antenne patch triangulaire

Le patch triangulaire de type équilatéral dont les trois côtés ont la même longueur 'a' est présenté par la figure I.4.

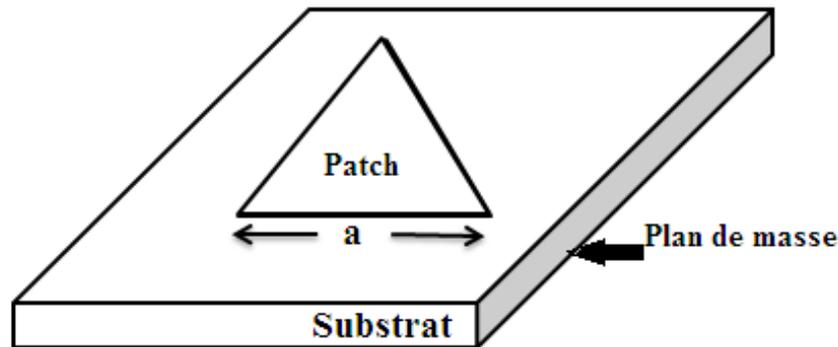


Figure I. 4: Antenne patch de forme triangulaire.

Afin de déterminer la longueur du patch triangulaire 'a', l'équation ci-dessus est utilisée [6] :

$$a = \frac{2C}{3 f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{I.10})$$

Avec :

C : La vitesse de la lumière dans le vide.

f_r : Fréquence de résonance.

a : Longueur du patch triangulaire.

ϵ_r : Constante diélectrique relative du substrat.

Il est important de noter que le choix de la forme de l'antenne patch dépend des exigences spécifiques de l'application, tels que les diagrammes de rayonnement souhaités, la polarisation, la fréquence et l'espace disponible. Chaque forme présente ses propres avantages et compromis, et les concepteurs doivent tenir compte de ces facteurs pour sélectionner la forme la plus appropriée à leurs besoins spécifiques.

I.3 Caractéristiques de l'antenne patch

I.3.1 Régions de rayonnement du champ de l'antenne

L'espace entourant une antenne est généralement subdivisé en trois régions principales appelées les régions de rayonnement du champ de l'antenne. Ces régions comprennent le champ proche réactif, le champ proche rayonnant (Fresnel) et le champ lointain (Fraunhofer). Elles sont ainsi désignées pour identifier la structure du champ dans chacune d'elles [7].

I.3.1.1 Champ proche ou région de champ proche réactif

La région de champ proche réactif est définie comme "la région du champ entourant immédiatement l'antenne dans laquelle le champ réactif prédomine". Pour la plupart des antennes, la limite extérieure de cette région est généralement considérée comme se trouvant à une distance $R < 0,62 \sqrt{D^3/\lambda}$ de l'antenne, où λ est la longueur d'onde et D la plus grande dimension de l'antenne.

I.3.1.2 Champ proche radiatif ou région de Fresnel

La région de champ proche rayonnant (Fresnel) est définie comme "la région du champ d'une antenne située entre la région de champ proche réactif et la région de champ lointain, dans laquelle les champs de rayonnement prédominent et où la distribution angulaire du champ dépend de la distance par rapport à l'antenne".

La distance radiale R sur laquelle cette région existe est de $0,62\sqrt{D^3/\lambda} \leq R < 2D^2/\lambda$ (à condition que D soit grand par rapport à la longueur d'onde). Ce critère est basé sur une erreur de phase maximale de $\pi/8$ radians ($22,5^\circ$). Dans cette région, la configuration du champ est en fonction de la distance radiale et la composante radiale du champ peut être appréciable.

I.3.1.3 Champ lointain ou région de Fraunhofer

La région de champ lointain (Fraunhofer) est définie comme "la région du champ d'une antenne où la distribution du champ angulaire est essentiellement indépendante de la distance par rapport à l'antenne". Dans cette région, la partie réelle de la densité de puissance est dominante. La distance radiale R sur laquelle cette région existe est $R \geq 2D^2/\lambda$ (à condition que D soit grand par rapport à la longueur d'onde). La limite extérieure est idéalement à l'infini. Ce critère est également basé sur une erreur de phase maximale de $\pi/8$ radians ($22,5^\circ$). Dans cette région, les composantes du champ sont essentiellement transversales à la distance radiale et la distribution angulaire est indépendante de la distance radiale.

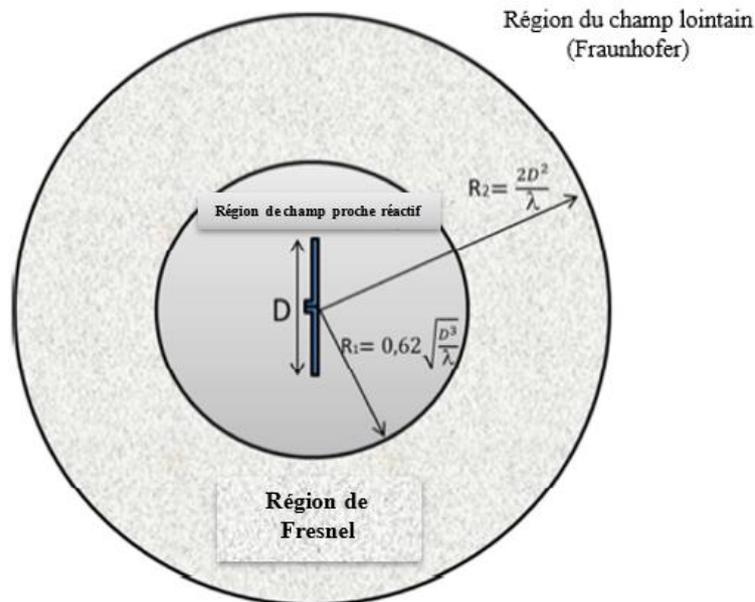


Figure I. 5: Régions de champ d'une antenne [8].

I.3.2 Coefficient de réflexion

Le paramètre $S_{1,1}$ présente le coefficient de réflexion d'une antenne. Il permet de mesurer la quantité de signal réfléchi par rapport au signal incident et souligner l'absorption de l'énergie par l'antenne. Lors de l'optimisation, on se base sur ce paramètre et plus l'antenne est adaptée, moins qu'il y a de réflexion. Par conséquent, 90% de la puissance est transmise à l'antenne et un coefficient de réflexion inférieur à -10 dB indique une bonne adaptation [9].

Le ($S_{1,1}$) peut être calculé en utilisant la formule suivante :

$$S_{1,1}(\text{dB}) = -20 * \log_{10}(|S_{11}|) \quad (\text{I.11})$$

Il est important de noter que le paramètre $S_{1,1}$ peut varier en fonction de la fréquence et que les antennes patch ont souvent une fréquence où une largeur de bande spécifique sur laquelle elles sont conçues pour fonctionner de manière optimale.

I.3.3 Rapport d'onde stationnaire ROS

Le rapport d'onde stationnaire (ROS), c'est le VSWR pour Voltage Standing Wave Ratio en anglais, indique le rapport entre la tension maximale et la tension minimale d'une onde stationnaire sur la ligne de transmission, et mesure la qualité de l'adaptation de cette ligne [10].

ROS peut également s'évaluer à partir du coefficient de réflexion par l'expression :

$$\text{ROS} = \frac{1+S_{11}}{1-S_{11}} \quad (\text{I.12})$$

Une valeur de ROS idéal serait égale à 1, ce qui signifierait une adaptation parfaite et indique que toute la puissance est transférée sans aucune réflexion d'onde. Toute augmentation du ROS provoque une désadaptation élevée et une importante perte de puissance due à la réflexion.

I.3.4 Bande passante

La largeur de bande, dans le contexte d'une antenne microruban, fait référence à la gamme de fréquences sur laquelle l'antenne peut effectivement transmettre ou recevoir des signaux avec des performances acceptables. C'est une mesure de la capacité de l'antenne à gérer une large gamme de fréquences sans dégradation significative de ses caractéristiques.

Dans la conception d'antennes microruban, la largeur de bande est généralement spécifiée en pourcentage ou en fraction de la fréquence centrale. Par exemple, si la fréquence centrale d'une antenne est de 2,4 GHz et que sa largeur de bande est de 10 %, cela signifie que l'antenne peut fonctionner efficacement dans une plage de fréquences de $\pm 10\%$ (c'est-à-dire, dans ce cas, de 2,16 GHz à 2,64 GHz) [11].

$$BP = \Delta F = f_s - f_i \quad (\text{I.13})$$

$$BP(\%) = \left[\frac{f_s - f_i}{f_c} \right] \times 100 \quad (\text{I.14})$$

f_s : Fréquence supérieure.

f_i : Fréquence inférieure.

f_c : Fréquence centrale.

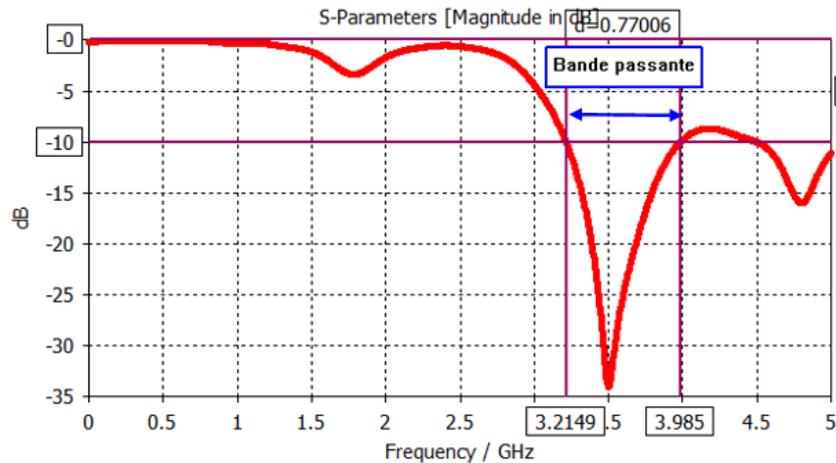


Figure I. 6: Bande passante.

La largeur de bande d'une antenne microruban est influencée par divers facteurs tels que les dimensions physiques et la forme du patch rayonnant, les propriétés du matériau du substrat, la technique d'alimentation et le réseau d'adaptation d'impédance. Les concepteurs s'efforcent d'optimiser ces paramètres afin d'obtenir une bande plus large pour améliorer les performances.

I.3.5 Impédance d'entrée

L'impédance d'entrée d'une antenne patch est généralement représentée par une impédance complexe (Z_a), spécifiée en termes de résistance (R_a) et de réactance (X_a) [13]. Le rapport de ces deux quantités est donné par l'expression :

$$Z_a = R_a + j X_a \quad (I.15)$$

Z_a = Impédance de l'antenne.

R_a = Résistance de l'antenne.

X_a = Réactance de l'antenne.

La partie réelle représente la résistance, qui est généralement comprise entre 50 et 100 ohms pour la plupart des antennes patch. La partie imaginaire représente la réactance, qui peut être capacitive ou inductive en fonction de la conception et des conditions de fonctionnement de l'antenne.

L'impédance d'entrée est influencée par divers facteurs tels que les dimensions physiques du patch, le matériau du substrat diélectrique et la fréquence de résonance.

I.3.6 Directivité et gain

- **Directivité**

La directivité $D(\theta, \phi)$ d'une antenne patch est définie par le rapport entre la puissance de rayonnement dans une direction (θ, ϕ) où une région angulaire spécifique et la puissance moyenne du rayonnement dans toutes les directions (la puissance du rayonnement d'une source isotrope)[8].

$$D(\theta, \phi) = \frac{P(\theta, \phi)}{P_{moy}} = 4\pi \frac{P}{P_r} \quad (I.16)$$

$P(\theta, \phi)$: Puissance rayonnée dans une direction.

P_{moy} : Puissance moyenne du rayonnement.

P_r : Puissance totale rayonnée.

La directivité d'une antenne patch est influencée par sa conception physique, notamment la taille et la forme du patch, et toute autre élément supplémentaire. Elle se présente généralement sous forme d'une valeur numérique, souvent en décibels (dBi).

- **Gain**

Le gain d'une antenne patch désigne sa capacité à diriger et à focaliser le rayonnement dans une direction particulière. Il s'agit d'une mesure de l'efficacité avec laquelle l'antenne convertit la puissance d'entrée en ondes électromagnétiques rayonnées dans une direction spécifique (θ, ϕ) . Il est généralement exprimé en décibels (dBi) et représente le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction particulière $P(\theta, \phi)$ et la puissance rayonnée de manière isotrope (également dans toutes les directions) par un radiateur isotrope avec la même puissance d'entrée. Le gain d'une antenne patch peut être augmenté par la méthode d'alimentation, la modification du plan de masse et la modification du patch [14].

Ce paramètre est exprimé par :

$$G(\theta, \phi) = 4\pi \frac{P(\theta, \phi)}{P_a} \quad (I.17)$$

Avec :

$P(\theta, \phi)$: Puissance rayonnée dans une direction.

P_a : Puissance rayonnée par l'antenne.

Chapitre I Etat de l'art sur les antennes imprimées et les systèmes de télécommunications mobiles

L'expression du gain en fonction du rendement et de la directivité est donnée par l'équation (I.18) :

$$G(\theta, \phi) = \eta \cdot D(\theta, \phi) \quad (\text{I.18})$$

I.3.7 Polarisation

La polarisation est définie comme l'évolution de direction du champ électrique (et donc du champ magnétique) d'une onde électromagnétique. Elle dépend à la fois des caractéristiques de l'antenne, de son alimentation et du milieu de propagation de l'onde.

Généralement, toute onde peut être définie comme une onde polarisée elliptiquement. Les cas de polarisation circulaire et linéaire peuvent en effet être considérés comme des cas particuliers de polarisation elliptique (figure I.7). L'onde est alors caractérisée par son degré d'ellipticité qui est décrit par le paramètre $x = \arctan(\text{petit axe}/\text{grand axe})$ [8]. Lorsque le petit axe de l'ellipse est nul, la polarisation est linéaire et le coefficient d'ellipticité est égal à 0° . Lorsque les deux axes sont de même longueur, la polarisation est circulaire et le coefficient d'ellipticité est égal à $\pm 45^\circ$. Si les deux axes ne répondent pas aux conditions susmentionnées, la polarisation est purement elliptique. Cette notion de polarisation est importante pour une antenne. Si, lors de la réception, le signal arrivant sur l'antenne a une polarisation différente de celle prévue pour l'antenne, il y a inadéquation de polarisation générant des pertes supplémentaires.

Dans le cas d'une polarisation linéaire, si l'angle formé par la direction du vecteur E avec le sol est égal à 0° , la polarisation est dite horizontale, s'il est égal à 90° , elle est dite verticale.

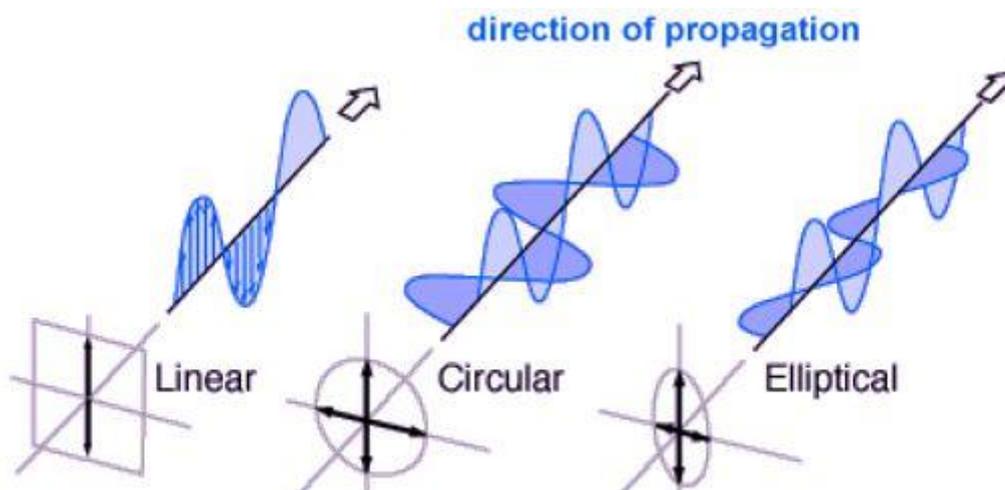


Figure I. 7 : Représentation du champ électrique pour une polarisation linéaire, circulaire et elliptique [15].

I.3.8 Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement d'une antenne (en champ lointain) est une représentation mathématique ou graphique (en 2D ou 3D) des caractéristiques de rayonnement de l'antenne en termes de coordonnées spatiales (figure I.8) [8].

Ce diagramme de rayonnement, généralement exprimé en dBi, donne des informations sur la manière dont la puissance est répartie autour de l'antenne. Il définit la direction le long de laquelle la puissance est plus efficacement rayonnée que dans les autres directions. Les diagrammes de rayonnement sont des diagrammes de champ normalisés (soit des quantités de gain ou de puissance) par rapport aux valeurs maximales. En général, les propriétés de rayonnement comprennent l'intensité de rayonnement, l'intensité de champ, la densité de flux de puissance, la phase et/ou la polarisation, et la directivité.

En général, trois diagrammes de rayonnement courants sont utilisés pour décrire les propriétés de rayonnement d'une antenne :

- **Isotrope** : une antenne qui rayonne/reçoit la puissance électromagnétique de manière égale dans toutes les directions. Cependant, ce diagramme n'existe pas dans la réalité, il est simplement appliqué à une antenne idéale (sans perte) et est souvent utilisé comme référence pour montrer les propriétés directives des antennes réelles [16].
- **Omnidirectionnelle** : une antenne qui reçoit ou émet de manière uniforme une puissance électromagnétique dans toutes les directions perpendiculaires (directions azimutales) à un axe et une puissance variable sur l'autre axe (angle d'élévation), diminuant jusqu'à zéro sur l'axe. Par exemple, l'antenne dipôle à rayonnement vertical illustrée par la figure I.8 est l'une des antennes omnidirectionnelles. Ces antennes ont généralement un faible gain puisque la puissance rayonne dans toutes les directions et conviennent à diverses applications, y compris celles des téléphones mobiles [17].
- **Directive** : une antenne qui reçoit/émet de l'énergie électromagnétique plus efficacement dans une direction que dans d'autres est appelée antenne directive. Ces antennes sont généralement utilisées pour les communications point à point (comme les antennes paraboliques et les réseaux d'antennes) en raison de leur gain élevé, la puissance étant concentrée dans une seule direction [18]. Par exemple, un réseau

Chapitre I Etat de l'art sur les antennes imprimées et les systèmes de télécommunications mobiles

d'antennes patch de quatre éléments produit un diagramme de rayonnement directif ayant un gain de 12 dBi, tel que représenté dans la figure I.9 [16].

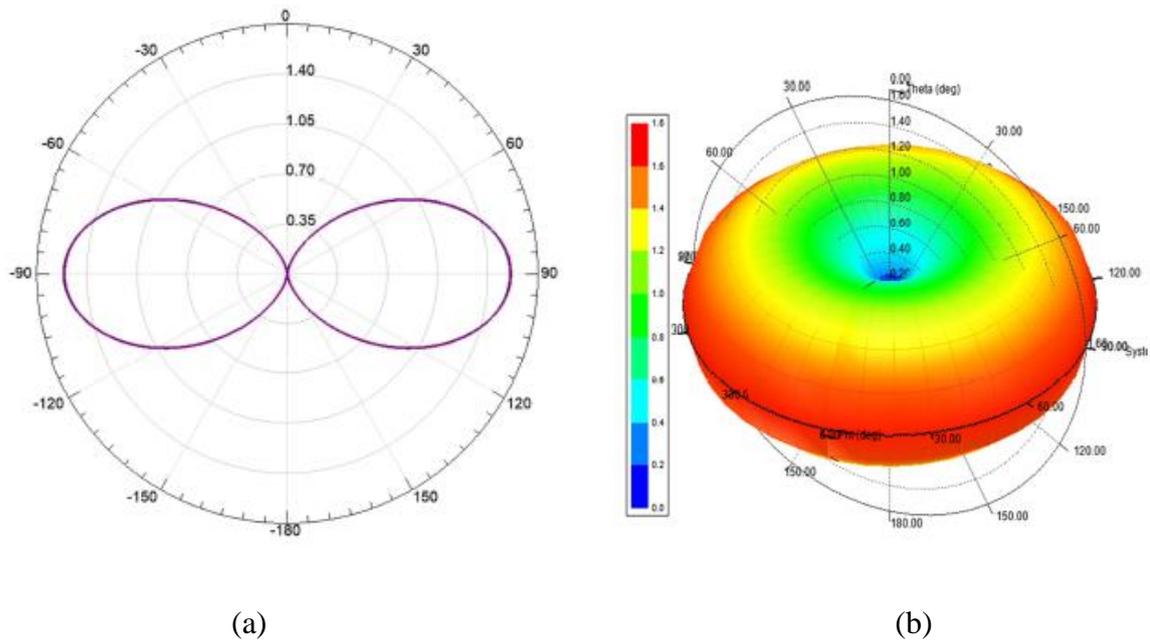


Figure I. 8: Diagramme de rayonnement d'une antenne dipôle verticale en coordonnées polaires ; a) diagramme de rayonnement en 2D, b) diagramme de rayonnement en 3D [16].

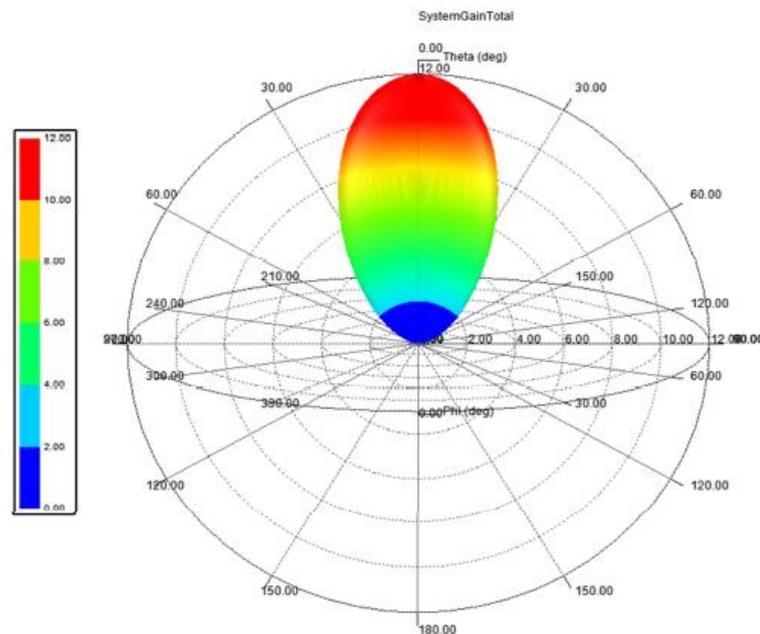


Figure I. 9 : Diagramme de rayonnement en 3D d'un réseau d'antennes à quatre patches [16].

I.4 Techniques d'adaptation

L'adaptation d'une antenne patch implique l'ajustement de l'impédance entre l'antenne et la ligne d'alimentation ou de transmission qui lui est connectée. L'adaptation d'impédance assure un transfert de puissance efficace et minimise les réflexions du signal, Cela permet d'améliorer les performances de l'antenne. Voici quelques techniques courantes utilisées pour adapter une antenne patch :

I.4.1 Adaptation par des encoches

L'adaptation d'une antenne avec des encoches se réfère à la conception et à l'optimisation des fentes ou des ouvertures dans une configuration d'antenne afin d'obtenir une adaptation d'impédance à la fréquence de travail souhaitée. Les antennes à fentes sont appréciées pour leur taille compacte, leur profil bas et leur large bande passante [19].

La longueur maximale de la fente est donnée comme suit [20]

$$L_{\text{slot}} = \frac{0.45 c}{f \sqrt{\epsilon_{\text{eff_slot}}}} \quad (\text{I.19})$$

Avec $\epsilon_{\text{eff_slot}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2}$

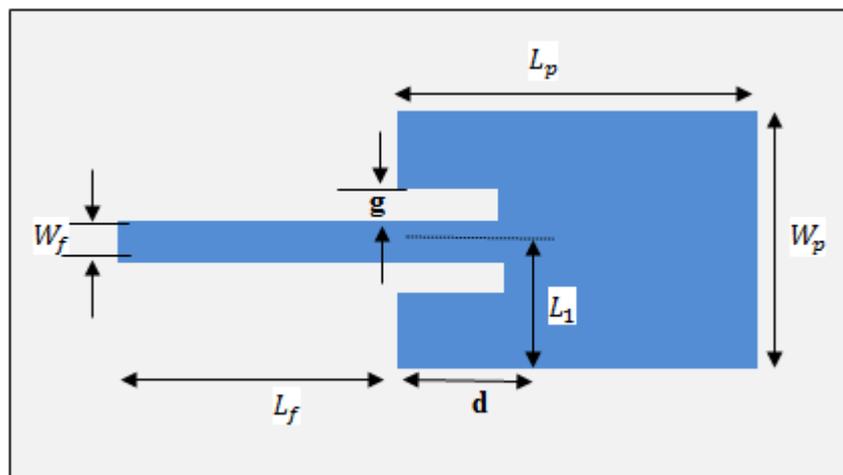


Figure I. 10: Adaptation avec des encoches.

I.4.2 Adaptation par une ligne quart d'onde

L'adaptation de l'antenne par une ligne quart d'onde consiste à concevoir l'antenne et sa ligne d'alimentation de manière à obtenir une adaptation d'impédance appropriée à la fréquence de fonctionnement. Une antenne quart d'onde est une antenne dont la longueur physique est approximativement égale à un quart de la longueur d'onde de la fréquence de fonctionnement souhaitée [22].

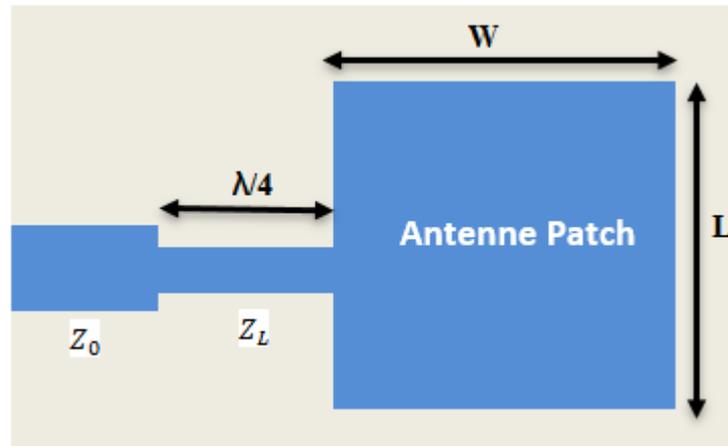


Figure I. 11: Adaptation par une ligne quart d'onde.

I.5 Différentes Techniques d'excitation de l'antenne microruban

Pour alimenter une antenne patch, différentes techniques d'alimentation peuvent être utilisées, chacune ayant ses propres avantages et inconvénients. L'antenne peut être alimentée directement (par contact) par une ligne microruban où par une sonde coaxiale. Elle peut également être alimentée indirectement (sans contact) en utilisant le couplage électromagnétique, le couplage d'ouverture et l'alimentation par un guide d'onde coplanaire. Pour le deuxième cas, il n'y a pas de contact métallique direct entre la ligne d'alimentation et le patch [24]. Nous présentons par la suite quelques principaux mécanismes couramment utilisés pour les antennes microruban :

I.5.1 Excitations par contact

1.4.0.1 Excitation par ligne microruban

Dans cette technique, une ligne de transmission microruban est connectée directement pour alimenter l'antenne patch. La ligne d'alimentation est également une bande conductrice, généralement d'une largeur bien inférieure à celle du patch placé au-dessus du substrat. Cette méthode permet d'imprimer l'alimentation sur le même substrat diélectrique ce qui la rend plus simple, facile à fabriquer et largement utilisée. Mais peut souffrir de pertes par rayonnement et d'une bande passante limitée (généralement de 2 à 5 %) [25].

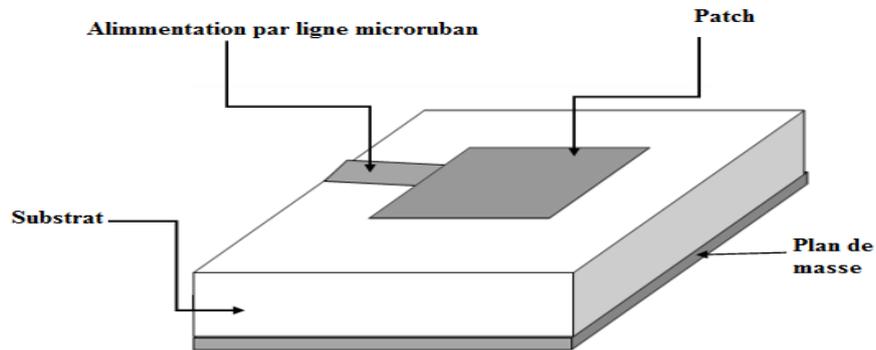


Figure I. 12: Excitation par ligne microruban (microbande).

1.4.1.2 Excitation par sonde coaxiale

L'alimentation par sonde coaxiale est largement adoptée comme l'une des techniques les plus courantes, elle est utilisée pour alimenter les antennes microruban. Cette méthode consiste à connecter le conducteur intérieur du connecteur coaxial directement à l'antenne patch. Ce dernier traverse le diélectrique et est soudé au patch rayonnant, tandis que le conducteur extérieur est relié au plan de masse. L'avantage majeur de ce mode d'alimentation réside dans la possibilité de positionner l'alimentation à n'importe quel endroit souhaité dans le patch pour correspondre à l'impédance d'entrée. Néanmoins, le principal inconvénient de l'alimentation par sonde coaxiale est sa bande passante étroite et sa complexité de modélisation, car cela nécessite de percer un trou à l'intérieur du substrat et le connecteur dépasse du plan de masse [27].

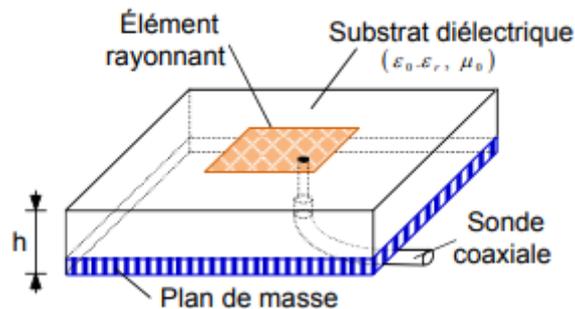


Figure I. 13 : Excitation par une sonde coaxiale [28].

1.4.2 Excitations par proximité

1.4.2.1 Excitation par couplage de proximité

L'alimentation par couplage de proximité également appelée couplage électromagnétique. L'antenne patch n'est pas directement connectée à la ligne d'alimentation, tel que deux substrats diélectriques sont utilisés de sorte que la ligne d'alimentation est placée entre les deux substrats et que le patch rayonnant est situé sur le substrat supérieur. L'alimentation par couplage de proximité offre comme avantages une bonne adaptation d'impédance, une très grande largeur de bande et elle élimine les rayonnements parasites. Cette méthode offre également la possibilité de sélectionner deux supports diélectriques distincts, l'un pour le patch et l'autre pour la ligne d'alimentation, afin d'optimiser les performances de chacun. Son principal inconvénient est qu'il est difficile à fabriquer en raison des deux couches diélectriques qui doivent être correctement alignées [29].

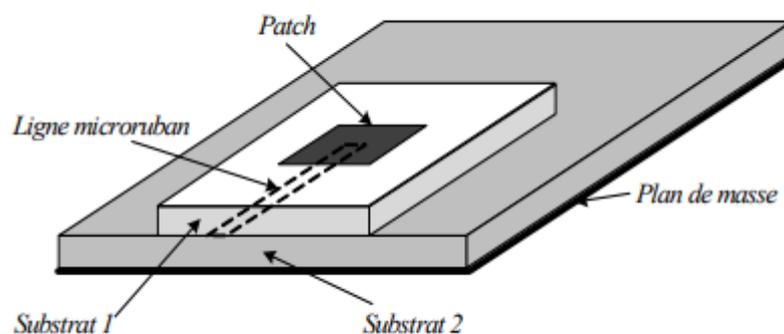


Figure I. 14 : Excitation par couplage de proximité [30].

I.5.2.2 Excitation par couplage à une ouverture dans le plan de masse

Pour ce type d'alimentation, l'antenne patch est couplée à la ligne d'alimentation par une ouverture ou une fente dans le plan de masse où cette dernière sépare le patch rayonnant et la ligne d'alimentation. En général, l'ouverture de couplage est placée au centre sous le patch afin d'optimiser le résultat en élargissant les bandes passantes et en obtenant de meilleurs coefficients de réflexion. De même, elle assure une bonne isolation entre la ligne d'alimentation et le patch, ce qui minimise les rayonnements parasites [31]. L'alimentation couplée à l'ouverture est intéressante en raison d'avantages tels que l'absence de contact physique entre l'alimentation et le radiateur, des bandes passantes plus larges de 21 % et une

Chapitre I Etat de l'art sur les antennes imprimées et les systèmes de télécommunications mobiles

meilleure isolation entre les antennes et le réseau d'alimentation. En outre, l'alimentation couplée à l'ouverture permet d'optimiser indépendamment les antennes et les réseaux d'alimentation en utilisant des substrats d'épaisseurs ou de permittivités différentes [32].

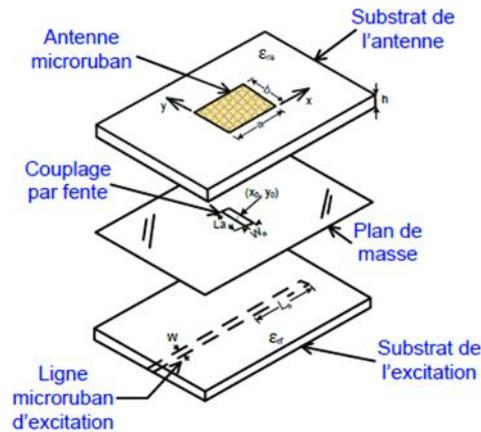


Figure I. 15: Excitation par couplage à une ouverture dans le plan de masse [28].

Sur le tableau I.1, nous allons représenter les avantages et les inconvénients des types d'alimentation de l'antenne imprimée [33] :

Méthodes		Avantages	Inconvénients
Alimentation Avec contact	Sonde	-Pas de pertes par rayonnement de la ligne. - Sélection possible d'un mode privilégié.	-Rayonnement parasite de la sonde de type mono polaire.
	Coaxiale	-Obtention d'une impédance d'entrée adéquate par positionnement de la sonde. -Prédiction aisée de l'impédance d'entrée pour des substrats à faible hauteur. -Technique de parçage simple jusqu'à 10GHz.	-Partie selfique ramenée par l'âme du connecteur à prendre en compte. -Technique de perçage et de soudure plus délicate en millimétrique. Rapidement cher et compliqué industriellement pour exciter chaque élément d'un réseau à forte directivité.

Chapitre I Etat de l'art sur les antennes imprimées et les systèmes de télécommunications mobiles

	Ligne microbande	<ul style="list-style-type: none"> -Procédé technologique le plus simple par gravure sur la même face de l'antenne et du circuit d'alimentation. -Adaptation de l'aérien possible par contact pénétrant. 	<ul style="list-style-type: none"> -Rayonnement parasite de la discontinuité de la ligne aérien. - Rayonnement parasite possible du circuit de distribution en millimétrique. -Structure figée après gravure.
Alimentation Sans contact	Par Couplage	<ul style="list-style-type: none"> -Dessin du circuit d'alimentation modifiable par rapport aux aériens. -Bande passante plus large par augmentation de la hauteur ($h_1 + h_2 > h_1$). 	<ul style="list-style-type: none"> -Deux couches de substrats requises. -Difficulté pour l'intégration de dispositifs actifs et pour la dissipation de chaleur.
	Guide d'onde coplanaire	<ul style="list-style-type: none"> -Procédé technologique simple. -Facilité pour intégrer des dispositifs actifs et dissiper la chaleur résultante. -Faible rayonnement arrière. -Transitions simples pour l'intégration de dispositifs actifs et circuits MMIC. 	<ul style="list-style-type: none"> -Génération de modes de propagation parasites sur les guides d'ondes coplanaires.
	Couplage Par fente	<ul style="list-style-type: none"> -Réalisation du circuit de distribution et de l'aérien indépendantes. -Séparation électromagnétique de deux couches. -Possibilité d'élargir la bande passante en associant la résonance de l'élément rayonnant à celle de la fente. 	<ul style="list-style-type: none"> -Technologie plus couteuse et complexe (positionnement de deux couches, quatre faces de métallisation). -Intégration sur un support mécanique nécessitant des précautions. -Rayonnement arrière parasite de la fente lorsque

			celle-ci résonne au voisinage de l'élément.
--	--	--	---

Tableau I. 1 : Avantages et inconvénients des types d'alimentation.

I.6 Avantages et inconvénients des antennes patch

De nos jours, les antennes patch sont employées dans différentes applications, y compris les réseaux de communications sans fils, les systèmes radars et les communications par satellites. La grande variété de leurs formes géométriques les rend de plus en plus importantes et adaptables à diverses situations d'intégration. Ces antennes imprimées offrent plusieurs avantages et inconvénients [34], citons :

I.6.1 Avantages

- **Taille compacte** : les antennes patch sont relativement petites par rapport à d'autres types d'antennes, telles que les antennes paraboliques. Leur facteur de forme compact les rend appropriées aux applications où l'espace est limité ou lorsqu'une conception à profil bas est requise.
- **Faible coût** : les antennes patch sont généralement rentables à fabriquer en raison de leur conception simple et de l'utilisation de matériaux peu coûteux. Elles constituent donc un choix intéressant pour la production de masse et les applications électroniques grand public.
- **Facilité d'intégration** : les antennes patch peuvent être facilement intégrées dans différents dispositifs et systèmes, y compris les cartes de circuits imprimés (PCB) et les structures planaires. Cette simplicité d'intégration permet de rationaliser les processus de conception et de fabrication.
- **Polarisation** : les antennes microruban peuvent supporter deux types de polarisation : linéaire et circulaire.

I.6.2 Inconvénients

- **Bande passante étroite** : les antennes patch ont généralement une bande passante relativement étroite, ce qui signifie qu'elles ne peuvent fonctionner que dans une gamme limitée de fréquences. Cette limitation peut restreindre leur utilisation dans des applications qui nécessitent une large couverture de fréquences.

Chapitre I Etat de l'art sur les antennes imprimées et les systèmes de télécommunications mobiles

- **Sensibilité aux facteurs environnementaux** : La présence d'objets à proximité, comme d'autres antennes ou des structures conductrices, peut influencer les performances des antennes patch. Les changements dans le milieu environnant, y compris les variations de température et d'humidité, peuvent également avoir un impact sur leurs performances.
- **Faible gain** : les antennes patch ont généralement un gain plus faible que d'autres types d'antennes, telles que les antennes paraboliques ou Yagi. Le gain correspond à la capacité d'une antenne à concentrer son énergie rayonnée dans une direction particulière. Bien que les antennes patch puissent atteindre un gain modéré, elles peuvent ne pas convenir aux applications de communication à longue portée.
- **Capacité limitée de gestion de la puissance** : les antennes patch peuvent avoir une capacité limitée de gestion de la puissance, ce qui signifie qu'elles peuvent ne pas être en mesure de gérer des signaux de forte puissance sans dégradation potentielle des performances ou dommages. Il est important de tenir compte de cette limitation dans les applications à forte puissance.

I.7 Domaines d'applications des antennes patch

L'antenne patch est réputée pour ses performances, sa conception robuste, sa fabrication fiable et son utilisation étendue. Ce dispositif est couramment utilisé dans de nombreuses applications telles que :

- La communication sans fil.
- La communication par satellite.
- Les applications médicales.
- Les systèmes radars.

Et bien sûr, également dans les systèmes militaires, tout comme dans :

- Les fusées.
- Les avions.
- Les missiles...etc

L'utilisation des antennes microruban connaît une forte croissance dans les applications commerciales en raison de leur faible coût du matériau du substrat et de la fabrication [34].

I.8 Systèmes de télécommunications mobiles

Les systèmes de télécommunications mobiles sont des réseaux qui permettent la communication sans fil entre les appareils mobiles comme les ordinateurs portables, les tablettes, et les smartphones. Ces systèmes fournissent des services vocaux et de données via une connexion sans fil, permettant aux utilisateurs de passer des appels, d'envoyer des messages, de naviguer sur l'internet et d'accéder à diverses applications et services. Au cours des dernières décennies, Les systèmes de communications mobiles sans fils ont connu plusieurs étapes d'évolution après l'introduction du réseau mobile de première génération au début des années 1980. En raison de la forte demande de connexion dans le monde entier, les normes de communications mobiles ont progressé rapidement pour prendre en charge un plus grand nombre d'utilisateurs [35].

La communication mobile sans fil notamment la téléphonie mobile a évolué de manière remarquable en très peu de temps. Voici un bref aperçu des principales étapes de l'évolution des communications mobiles sans fils :

I.8.1 Première génération (1G)

La première génération des réseaux de communications mobiles est introduite dans les années 1980. Il s'agit d'un système analogique qui utilise un signal radio analogique d'une fréquence de 150 MHz. Elle permettait principalement les appels vocaux avec une capacité et une couverture limitée, comme exemples, on peut citer le système de téléphonie mobile avancé (AMPS) en Amérique du Nord et le téléphone mobile nordique (NMT) en Europe. Cette génération est peu fiable, et sans sécurité [36].

I.8.2 Deuxième génération (2G)

La deuxième génération (2G), a été introduite pour la première fois à la fin des années 1980 et lancée commercialement en Finlande en 1991. La communication numérique a remplacé la technologie analogique dans la 2G, ce qui a considérablement amélioré la communication sans fil. Le système numérique présente plusieurs avantages par rapport au système analogique. Elle utilise des signaux numériques pour la transmission de la voix tel que le système mondial de communications mobiles (GSM), d'augmenter la capacité et d'introduire des services de données de base tel que le service de messages courts (SMS) [37].

I.8.3 Troisième génération (3G)

La troisième génération est introduite au début des années 2000. Elle a apporté des débits de données plus rapides, permettant aux opérateurs de réseaux de proposer aux utilisateurs une gamme élargie de services multimédias avancés tels que les appels vidéo, la navigation sur l'internet mobile et un son de meilleure qualité. Les technologies 3G permettent une vitesse de connexion plus élevée d'où le réseau est passé d'un réseau mobile conventionnel à des appareils multimédias portables (par exemple, ordinateurs, consoles de jeu et tablettes). La 3G offre une meilleure sécurité grâce à des fonctions d'authentification de l'utilisateur [38].

I.8.4 Quatrième génération (4G)

La 4G désigne la quatrième génération, elle a été introduite à la fin des années 2000. Elle a permis d'améliorer considérablement les débits de données, la capacité et les performances globales. La 4G augmente également la bande passante et réduit le coût des ressources. Le système mobile de quatrième génération a introduit l'évolution à long terme (LTE) en tant que technologie 4G dominante. En utilisant la 4G, nous pouvons accéder à l'internet grâce à l'une des technologies comme le Wi-Fi, le Wi-MAX, le GPRS et l'EDGE...etc. L'objectif principal de la technologie 4G est de fournir des services à haut débit, à haute qualité, à haute capacité, sécurisés et à faible coût pour les services vocaux et de données, le multimédia et l'internet sur IP [39].

I.9 La technologie 5G

La cinquième génération (5G) représente la dernière génération de la technologie de réseau cellulaire, et de communication sans fil, introduite dans les années 2020 [40][41]. Cette nouvelle technologie est en cours de déploiement dans le monde entier dont l'objectif est de répondre aux demandes croissantes des clients. Elle offre plusieurs avantages et améliorations essentielles par rapport à son prédécesseur, tels que l'amélioration du haut débit mobile et la communication ultra-fiable à faible latence. La technologie 5G opère sur diverses plages de fréquences, comprenant notamment des fréquences inférieures à 6 GHz et des fréquences millimétriques. Cependant, en raison de leur fréquence élevée, les signaux 5G ont une portée limitée et rencontrent des difficultés pour traverser des objets solides. Par conséquent, il est essentiel de déployer des stations de base 5G à des intervalles rapprochés, généralement toutes les quelques centaines de mètres, pour assurer une couverture étendue [42].

I.9.1 Caractéristiques et avantages de la technologie 5G

La technologie de la cinquième génération de réseaux sans fil présente de nombreuses avancées technologiques [43] [44].

- **Amélioration des débits de données :** l'un des objectifs fondamentaux de la 5G est de garantir des débits de données considérablement supérieurs à ceux des générations précédentes, facilitant des téléchargements et des téléversements plus rapides. Ainsi, l'augmentation de manière significative l'efficacité spectrale en introduisant de nouvelles techniques.
- **Réduction du temps de latence :** un autre bénéfice anticipé de la 5G réside dans la diminution du temps de latence à des niveaux sans précédent, dont elle garantit une communication ultra-fiable. Ce paramètre est crucial et revêt une importance capitale pour des applications telles que les véhicules autonomes.
- **Amélioration de la connectivité :** l'intégration de fréquences d'ondes millimétriques dans la 5G augmente la qualité des connexions, et les rendent plus rapides et plus fiables, particulièrement dans les zones urbaines densément peuplées. La technologie 5G devrait entraîner une augmentation notable du nombre d'objets connectés par unité de surface, tels que les capteurs et les appareils IoT. Cette expansion est en partie rendue possible grâce à l'utilisation de protocoles de connexion à haut débit qui tirent parti d'une petite fraction de la bande passante disponible.
- **Attribution du spectre :** l'attribution du spectre pour la 5G fait référence au processus par lequel les autorités réglementaires attribuent des fréquences particulières du spectre électromagnétique aux opérateurs de télécommunications en vue du déploiement et de l'exploitation des réseaux 5G. Généralement, ces attributions sont effectuées par des organismes gouvernementaux compétents responsables de la gestion du spectre radioélectrique. L'objectif est de garantir une utilisation efficiente du spectre, d'éviter les interférences et de favoriser le déploiement fluide de la technologie 5G. La 5G utilise une combinaison de bandes de fréquences, où elle couvre une plage variée du spectre électromagnétique, allant des ondes millimétriques aux bandes de fréquences inférieures à 6 GHz. Le spectre destiné à la 5G est subdivisé en plusieurs bandes afin de satisfaire différentes exigences, notamment celles liées à la capacité élevée, à la couverture étendue et à la faible latence.

Chapitre I Etat de l'art sur les antennes imprimées et les systèmes de télécommunications mobiles

- **Bandes de fréquences :** les bandes de fréquences pour la 5G sont divisées en deux gammes de fréquences différentes en fonction de la région et des décisions réglementaires adoptées par chaque pays, Il s'agit notamment des bandes suivantes [45] :
 - **1^{ère} Gamme de fréquences :** comprend les bandes de fréquences inférieures à 1 GHz et les bandes de fréquences inférieures à 6 GHz.
 - **Bandes inférieures à 1 GHz :** présente les bandes de fréquences plus basses qui sont moins de 1 GHz, elles offrent une couverture plus étendue et une meilleure pénétration à travers les obstacles mais avec des vitesses plus faibles.
 - **Bandes inférieures à 6 GHz :** présente la bande moyenne qui comprend les bandes de fréquences allant de 410 MHz à 7125 MHz. Les fréquences couramment utilisées dans cette plage pour la 5G incluent 3,5 GHz et 2,5 GHz. Ce spectre de fréquences de milieu de gamme assure un équilibre entre la couverture et la capacité.
 - **2^{ème} Gamme de fréquences (ondes millimétriques) :** présente la bande haute. Elle se réfère généralement à la gamme de fréquences allant de 24,25 GHz à 71,0 GHz, comprennent les 24 GHz, 28 GHz, 39 GHz et 47 GHz. Les fréquences d'ondes millimétriques offrent des débits de données extrêmement élevés. Cependant, elles présentent une portée plus limitée et sont plus sensibles aux obstacles.

I.9.2 Inconvénients de la technologie 5G

Le déploiement futur du réseau 5G suscite toutefois des préoccupations, en particulier en ce qui concerne l'exposition aux ondes. Le débat sur l'impact des radiofréquences sur la santé et l'environnement persiste, et l'avènement de la 5G, tout comme celui de la 4G, entraînera inévitablement une augmentation de l'exposition aux ondes, nécessitant l'installation de nouvelles antennes pour garantir une couverture étendue du territoire en 5G. Afin d'évaluer l'impact potentiel de la 5G sur notre santé, les expérimentations pilotes visent à mesurer les niveaux d'exposition du public aux ondes. Voici quelques-uns des principaux inconvénients associés à la 5G [46]:

- **Coûts élevés de déploiement :** les besoins en infrastructure pour déployer les réseaux 5G impliquent des mises à niveau substantielles, comprenant l'installation de nouvelles stations de base, de petites cellules, et de câbles à fibre optique, cela peut entraîner des coûts élevés pour les opérateurs de télécommunications et prendre beaucoup de temps.

Chapitre I Etat de l'art sur les antennes imprimées et les systèmes de télécommunications mobiles

- **Couverture limitée** : initialement, la portée de la 5G pourrait être limitée aux zones urbaines, avec une disponibilité potentiellement insuffisante dans les zones rurales. De plus, les ondes millimétriques employées par certaines implémentations de la 5G présentent une portée plus limitée et sont susceptibles d'être obstruées par des obstacles physiques tels que les murs. Cela exige un déploiement plus étendu d'antennes afin de garantir une couverture fiable, notamment dans les zones urbaines densément peuplées.
- **Impact sur la santé** : bien que la plupart des études scientifiques n'aient pas démontré de risques significatifs sur les organes et la santé humaine liés aux ondes radiofréquences émises par les antennes 5G, des inquiétudes sont soulevées par certaines études, nécessitant une compréhension complète de ces effets.

Il est essentiel de souligner que plusieurs de ces inconvénients sont susceptibles d'évoluer avec les avancées technologiques et des mesures d'atténuation appropriées. La recherche continue et la collaboration entre l'industrie, les organismes de régulation et la communauté scientifique sont indispensables pour traiter ces préoccupations et optimiser les avantages de la 5G tout en réduisant les risques potentiels.

I.9.3 Domaines d'application des antennes 5G

La technologie 5G offre un large éventail d'applications dans divers domaines. Voici quelques-unes des applications clés de la 5G [47] :

- **Communication Mobile Avancée** : les antennes 5G sont déployées pour assurer des services de communication mobile de haute qualité. Elles apportent des améliorations significatives en termes de vitesse de transmission de données, de capacité et de fiabilité, procurant ainsi des expériences utilisateurs plus rapides et plus fluides.
- **Internet des Objets (IoT)** : les antennes 5G rendent possible la connectivité à grande échelle des objets intelligents et d'un vaste nombre d'appareils IoT, favorisant ainsi la communication entre une multitude d'appareils dans divers environnements.
- **Véhicules Connectés** : dans le secteur automobile, la communication entre les véhicules autonomes, les infrastructures routières intelligentes et d'autres services du système de transport connecté dépend largement des antennes 5G.
- **Santé Connectée** : Dans le domaine de la télémédecine et des applications de santé connectée, les antennes 5G facilitent une transmission rapide des données médicales,

Chapitre I Etat de l'art sur les antennes imprimées et les systèmes de télécommunications mobiles

soutenant ainsi les dispositifs médicaux connectés et d'autres applications de santé numérique. Elles favorisent également l'innovation dans les soins de santé.

Les antennes 5G peuvent être utilisées dans d'autres domaines tels que les villes intelligentes, l'industrie, les réseaux fixes sans fil, l'éducation en ligne, la sécurité et la surveillance, les jeux en ligne, l'agriculture intelligente, ...etc. La diversité de ces domaines d'application met en évidence la polyvalence de la technologie 5G et son influence potentielle sur de nombreux aspects de notre vie quotidienne. En résumé, les antennes 5G jouent un rôle crucial pour le déploiement réussi de la prochaine génération de réseaux de communication, ouvrant ainsi la voie à une connectivité avancée et à de nombreuses applications innovantes.

I.10 La technologie WI-FI

Wi-Fi, abréviation de Wireless Fidelity, est le terme couramment utilisé pour décrire la norme industrielle 802.11b d'Ethernet sans fil, définie par l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), et dédiée aux réseaux locaux sans fil (WLAN). Il englobe la technologie qui facilite la transmission radio des données du protocole Internet, permettant ainsi le transfert sans fil de la connexion Internet vers les différents appareils sans avoir recours à des câbles physiques. Cette technologie novatrice est largement adoptée pour la création de réseaux locaux sans fil dans des contextes professionnels et domestiques. Elle opère dans les bandes de fréquences publiques de 5 GHz et 2,4 GHz [48].

I.10.1 Evolution des normes Wi-Fi

Plusieurs normes Wi-Fi, établies par l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), régissent les réseaux locaux sans fil (WLAN). Les standards Wi-Fi reposent sur les spécifications de l'IEEE 802.11. Chaque norme est identifiée par une lettre et un chiffre, où chaque lettre dans l'acronyme 802.11 représente une nouvelle version ou une amélioration de la technologie, détaillant ainsi ses caractéristiques spécifiques et précisant le type de norme. Comme évoqué précédemment, le véritable nom du WiFi est, en fait, 802.11. C'est sous cette dénomination que chaque nouvelle norme WiFi est présentée [49]. Voici les principales normes WiFi utilisées par le grand public, ainsi que leurs caractéristiques principales :

- **Wi-Fi (802.11) :** est apparue pour la première fois en 1997, fonctionnant sur la bande de fréquence de 2,4 GHz et offrant un débit de 2 Mbps sur une portée de 20 m [50].

Chapitre I Etat de l'art sur les antennes imprimées et les systèmes de télécommunications mobiles

- **Wi-Fi -1 (802.11b)** : Définie en 1999, cette norme opère dans la bande de fréquence 2,4 GHz et propose un débit de données maximal théorique de 11 Mbps sur une portée de 35 m [51].
- **Wi-Fi -2 (802.11a)** : Également apparue en 1999, cette norme utilise la bande de fréquence 5 GHz et offre un débit de données maximal théorique de 54 Mbps sur une portée de 35 m [52].
- **Wi-Fi -3 (802.11g)** : Apparue en 2003, elle permet d'atteindre des vitesses allant jusqu'à 54 Mb/s dans la bande de fréquence de 2,45 GHz, sur une portée de 38 m. Cette norme utilise la modulation de signal OFDM, pour une meilleure performance et une compatibilité avec la norme 802.11b [53].
- **Wi-Fi -4 (802.11n)** : introduite en 2009, ce standard exploite les fréquences de 2,4 GHz et 5 GHz, apportant une amélioration significative du débit de données, allant de 72,2 Mbps jusqu'à 450 Mbps, sur une portée de 70 m [54].
- **Wi-Fi -5 (802.11ac)** : présentant la norme Wi-Fi la plus couramment utilisée actuellement, opérant sur la bande de fréquence de 5 GHz. Cette norme est apparue en deux vagues : la première en 2014 avec un débit de données de 866,7 Mbps, suivie de la deuxième vague en 2016 qui offre des débits de données bien plus élevés, atteignant 1,73 Gbps sur une portée de 35 mètres [55].
- **Wi-Fi -6 (802.11ax)** : correspondant à l'avant-dernière évolution des normes Wi-Fi en 2019, elle fonctionne dans les bandes de fréquences 2,4 GHz et 5 GHz, ainsi que dans la bande de 6 GHz, offrant un débit théorique allant jusqu'à 9.6 Gbps. Cette norme vise à améliorer la performance dans des environnements comportant de nombreux appareils connectés [56].
- **Wi-Fi -7 (802.11be)** : c'est la dernière version de la norme Wi-Fi, qui devrait être commercialisée courant 2024. Elle est actuellement en cours de développement et devrait offrir un débit encore plus élevé, atteignant jusqu'à 30 Gbps dans les bandes de fréquences de 2,4 GHz, 5 GHz et 6 GHz, avec une meilleure stabilité et une réduction des interférences [57].

I.10.2 Avantages des technologies Wi-Fi-5 et Wi-Fi-6

En raison de ses avantages par rapport aux communications traditionnelles, les antennes micro-ruban dédiées aux applications Wi-Fi-5 et Wi-Fi-6 jouent un rôle important dans les technologies sans fil actuelles. Parmi les avantages, on peut citer [58]:

- Un débit de données plus élevé.
- Une bonne qualité de transmission des signaux.
- Compacte et de faible profil.
- Une sécurité renforcée grâce à des améliorations dans les protocoles de sécurité.
- Résoudre le problème d'encombrement de la bande de fréquence de 2.4 GHz, en utilisant d'autres canaux de fréquences différents (5,15 GHz à 7,125 GHz)

Il s'agit donc d'un meilleur choix pour les applications cellulaires sans fils portables et les applications WLAN à haut débit.

I.10.3 Inconvénients des technologies Wi-Fi-5 et Wi-Fi-6

Bien que les antennes Wi-Fi 5 (802.11ac) et Wi-Fi 6 (802.11ax) offrent de nombreux avantages, elles présentent également certains inconvénients. Voici quelques-uns associés aux antennes Wi-Fi 5 et Wi-Fi 6 :

- La mise à niveau des appareils qui utilisent les technologies Wi-Fi-5 et Wi-Fi-6 peut entraîner un coût initial de l'installation plus élevé.
- Les anciens dispositifs pourraient ne pas être compatibles pour bénéficier pleinement des nouvelles fonctionnalités de Wi-Fi-5 et Wi-Fi-6.
- Bien que les technologies Wi-Fi-5 et Wi-Fi 6 soient conçues pour offrir généralement une meilleure couverture, une puissance de signal accrue, et une gestion améliorée des interférences, les obstacles et la présence d'autres dispositifs électroniques opérant dans la même bande de fréquence peuvent encore avoir un impact sur les performances, tels que la réduction de la vitesse, de la fiabilité et des problèmes potentiels de connectivité.

I.10.4 Performances et applications des technologies Wi-Fi-5 et Wi-Fi-6

Les différentes technologies Wi-Fi sont devenues essentielles pour de nombreuses applications dans divers secteurs. Parmi les applications notables, on peut citer :

- **Les antennes micro-ruban** : les technologies Wi-Fi 5 et Wi-Fi 6 offrent des débits de données plus élevés que les générations précédentes. Cela est bénéfique pour les

Chapitre I Etat de l'art sur les antennes imprimées et les systèmes de télécommunications mobiles

applications nécessitant des vitesses de transfert de données plus élevées, telles que la diffusion de vidéos haute définition, les transferts de fichiers volumineux et la communication en temps réel. Les antennes Wi-Fi 5 et Wi-Fi 6 trouvent des applications dans divers domaines en raison de leur vitesse et de leurs performances améliorées, notamment pour gérer un plus grand nombre d'appareils simultanément, ce qui les rend adaptés aux environnements à forte densité d'appareils connectés. Ceci est avantageux pour les applications où de nombreuses antennes micro-ruban peuvent être déployées, comme dans les zones urbaines encombrées ou lors de grands événements [59].

- **Le secteur industriel** : les technologies Wi-Fi jouent un rôle crucial dans l'adoption des solutions de l'industrie. Cela implique l'interconnexion d'appareils, de capteurs et de robots pour effectuer l'analyse des données en temps réel, mettre en œuvre la maintenance prédictive et permettre la prise de décision automatisée. Cette approche vise à accroître l'efficacité et à réduire les coûts opérationnels. Elles sont également utilisées pour la communication machine à machine, la surveillance des équipements et la facilitation de la connectivité dans les usines intelligentes [60].
- **L'agriculture intelligente** : notamment utilisé dans l'agriculture de précision, a fait d'importants progrès grâce aux technologies Wi-Fi, Ces avancées comprennent la gestion à distance de l'irrigation, la surveillance du bétail et l'analyse en temps réel des sols. Cela se traduit par une utilisation plus efficace des ressources, un rendement accru des cultures et une réduction de l'impact sur l'environnement [61].
- **Les systèmes de transport** : les réseaux Wi-Fi jouent un rôle bénéfique dans les systèmes de transport, offrant aux passagers une connectivité internet fiable pendant leurs déplacements et trajets, que ce soit dans les bus, les trains ou les avions. Cette amélioration de la connectivité n'optimise pas seulement l'expérience de voyage, mais facilite également le suivi et la communication en temps réel entre les véhicules et les centres de contrôle centraux. Cela contribue ainsi à accroître l'efficacité opérationnelle et renforcer la sécurité [62].
- **Les villes intelligentes (smart cities en anglais)** : les technologies Wi-Fi facilitent l'intégration de systèmes intelligents qui améliorent la circulation, renforcent la sécurité publique et optimisent la gestion de l'énergie. Ces réseaux connectent des appareils dans l'ensemble de l'environnement urbain, fournissant ainsi aux urbanistes et aux

Chapitre I Etat de l'art sur les antennes imprimées et les systèmes de télécommunications mobiles

administrateurs des informations précieuses pour rationaliser les services municipaux et prendre des décisions plus éclairées [63].

- **Événements et lieux** : dans des espaces de grande envergure tels que les stades, les centres de conférence et les lieux d'événements, la technologie Wi-Fi est déployée pour fournir aux participants une connexion Internet à haut débit, leur permettant de partager des mises à jour en temps réel, d'accéder à des informations sur l'événement de vivre des expériences immersives qui améliorent leur appréciation de l'événement [64].

I.11 Conclusion

Ce chapitre a permis d'explorer en profondeur l'état de l'art des antennes patch microruban et leurs applications dans les systèmes de télécommunications mobiles. Nous avons présenté les principes fondamentaux des antennes patch tels que les caractéristiques radioélectriques comme le coefficient de réflexion, la bande passante, le diagramme de rayonnement...etc. Nous avons décrit ainsi leurs différentes techniques d'adaptation et d'excitation qui ont été proposées dans la littérature, et leurs avantages et inconvénients. A la fin nous avons présenté les divers domaines d'applications et les systèmes de télécommunications mobiles, notamment la nouvelle technologie 5G et les réseaux Wi-Fi 5 et Wi-Fi 6.

Les informations fournies aideront les chercheurs et les ingénieurs à développer des solutions innovantes pour répondre aux exigences croissantes des réseaux de communication sans fil.

La forte demande de la part des opérateurs industriels pour l'utilisation d'antennes miniatures les rend de plus en plus nécessaires pour la conception des différents composants électroniques. Le chapitre suivant, va être consacré à l'étude théorique de la technologie des antennes miniatures et leurs applications.

Chapitre II

Technologie des antennes miniatures

II Technologie des antennes miniatures

II.1 Introduction

Ces dernières décennies, la technologie des antennes imprimées a connu un développement radical. La miniaturisation fait partie des préoccupations majeures dans la conception d'antennes patch micro-ruban. Bien que la plupart des éléments des systèmes de communications aient vu leur taille considérablement réduite grâce à la technologie de conception, la réduction de la taille des antennes reste une tâche très difficile et présente un réel challenge dans le domaine de microondes et de radiofréquences.

Ce chapitre commence par un aperçu des limitations fondamentales des petites antennes dites électriquement petites comme une contrainte majeure de la miniaturisation des antennes, le facteur de qualité et le facteur de miniaturisation de l'antenne seront également présentés. Par la suite une présentation des principales techniques de miniaturisation de l'antenne patch micro-ruban qui ont été l'objet d'études approfondies depuis plus de 70 ans, ainsi qu'à leur faisabilité, leurs caractéristiques et les effets de chaque technique seront présentés et discutés. Finalement, nous donnerons quelques méthodes couramment utilisées pour l'amélioration des performances des antennes patch miro-ruban qui doivent être prise en compte lors de la miniaturisation de la taille d'une antenne. Conformément à plusieurs théories et études qui ont été mené par de nombreux chercheurs qui s'intéressent à ce domaine, la diminution de la taille peut entraîner une réduction de la largeur de bande et du gain de l'antenne, et nous finirons par la présentation de quelques exemples de systèmes réels qui utilisent des techniques de miniaturisation d'antennes.

II.2 Définition

Actuellement, les systèmes de communications, notamment les antennes patch miniatures sont devenues les dispositifs les plus importants de la section radiofréquence (RF) à cause de leur poids faible, leur volume réduit, leur faible coût et leur facilité d'intégration qui sont quelques-unes des caractéristiques qui doivent être respectées dans les équipements de télécommunications modernes. La miniaturisation des antennes patch microruban implique la réduction de la taille physique de l'antenne tout en conservant ses caractéristiques de performance. La plupart des études ont abouti à la conclusion que réduire la taille de l'antenne entraîne également une diminution de ses performances, telles que le gain et la largeur de bande,

alors il est très important à les prendre en compte lors de la miniaturisation. La réduction de la taille des antennes peut être réalisée par plusieurs techniques en fonction du type d'élément[65].

II.3 Limites théoriques de la miniaturisation des antennes planaires

Dans les années quarante, Wheeler [66], et Chu [67] ont posé les bases des limites théoriques et fondamentales pour une antenne en termes de facteur de qualité, d'efficacité et de bande passante, même lorsque ses dimensions sont bien inférieures à la longueur d'onde λ_0 . Ces limitations peuvent être exprimées par des formules simples. Ils ont introduit également le concept des antennes électriquement petites (AEP) et déterminent les relations entre la taille électrique de l'antenne et la bande passante (ou son facteur de qualité) et celle entre le volume de l'antenne qu'elle s'occupe et son efficacité. Wheeler a identifié qu'une diminution de la taille, voire une miniaturisation de l'antenne, conduit à une baisse des performances acceptables. Cela nécessite de trouver un équilibre entre ces performances et les dimensions minimales désirées.

II.3.1 Antenne Électriquement Petite

Il existe diverses définitions de ce qu'est une antenne électriquement petite (AEP), la plus courante étant celle proposée par Wheeler en 1947 [66]. Une antenne miniature, également connue sous le nom d'antenne électriquement petite, est caractérisée par la dimension maximale inférieure à la "longueur du radian" qui est égale à $\frac{\lambda}{2\pi}$ où λ désigne la longueur d'onde de l'antenne dans le vide à sa fréquence de travail. Cette relation est souvent exprimée par la condition suivante :

$$K.a \leq 1 \quad (\text{II.1})$$

D'autre part, CHU [67] a donné sa première définition qui est associée à la sphère minimale qui entoure l'antenne entière, également connue sous le nom de sphère CHU. Elle est définie par le rayon "a". Elle peut également correspondre à la limite entre le champ proche et le champ lointain d'une antenne. La figure II.1 représente cette définition.

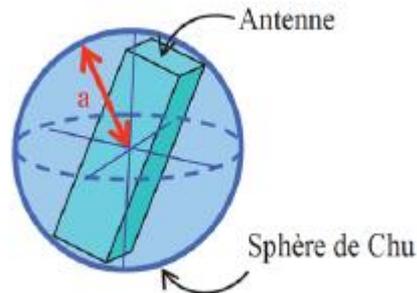


Figure II. 1 : Sphère de Chu: Sphère minimale qui englobe l'antenne [68].

II.3.2 Facteur de qualité d'une antenne

Le facteur de qualité (Q) d'une antenne patch micro-ruban est un paramètre important généralement défini comme le rapport entre l'énergie maximale stockée et la puissance totale rayonnée. Ce facteur fait actuellement l'objet de l'intérêt de plusieurs chercheurs dont l'objectif est de limiter la miniaturisation d'une antenne et garder ses performances et ces caractéristiques électromagnétiques en termes de gain et de bande passante. Par conséquent, la miniaturisation des antennes vise à trouver un meilleur compromis entre la taille, la largeur de bande et le gain. L'expression du facteur de qualité définie dans la littérature par (Wheeler) [66] est donnée par la forme suivante :

$$Q = \frac{2\omega * \max(W_e, W_m)}{P_r} \quad (\text{II.2})$$

Avec :

ω : présente la pulsation à la fréquence angulaire de fonctionnement.

W_e et W_m : sont respectivement les énergies électriques et magnétiques moyennes stockées.

P_r : présente la puissance rayonnée par l'antenne.

II.3.3 Facteur de miniaturisation

En théorie, un facteur de miniaturisation (FM) est le rapport de la grandeur caractéristique de l'antenne miniaturisée (L_{miniat}) par rapport à celle de l'antenne en espace libre (L_{splib}) pour une fréquence spécifique donnée. Ce facteur est utilisé pour l'évaluation de la réduction d'une antenne, il est calculé par l'équation suivante [69] :

$$FM = \frac{L_{\text{miniat}}}{L_{\text{splib}}} \quad (\text{II.3})$$

Chapitre II Technologie des antennes miniatures

Avec FM exprimé en %.

En pratique [70], cela implique la réalisation d'une antenne miniaturisée de telle manière que ses performances électromagnétiques s'approchent au maximum de celles de l'antenne initiale, tout en établissant un rapport de comparaison entre les dimensions des deux antennes. Ainsi qu'à évaluer la comparaison des rapports de fréquences, que ce soit à un niveau d'adaptation spécifique ou à un niveau de gain dans une direction particulière

II.4 Techniques de miniaturisation

Les techniques de miniaturisation font référence aux processus et méthodes utilisées pour réduire la taille de divers appareils, composants ou systèmes tout en maintenant, voire en améliorant, leurs performances et fonctionnalités. L'objectif de la miniaturisation est de créer des produits plus petits, plus compacts et plus efficaces, ce qui présente de nombreux avantages, notamment la portabilité, la réduction des coûts, l'efficacité énergétique et l'amélioration des performances. Ce concept est répandu dans divers domaines, notamment l'électronique, la fabrication, la médecine et les nanotechnologies.

II.4.1 Modification de la géométrie

II.4.1.1 Ajout de fentes

La modification de la forme du patch ou l'introduction de fentes sur le patch est une technique couramment utilisée pour miniaturiser l'antenne patch microruban tout en conservant des caractéristiques de performances acceptables. En introduisant les fentes ou en changeant les fentes, les chemins électriques pour le courant augmentent et cela peut être fait en utilisant un algorithme génétique dans une méthode de calcul à haute performance [71]. Une fente est une ouverture étroite introduite dans l'élément patch, qui modifiée la distribution du courant et les champs électromagnétiques de l'antenne. Grâce à cette modification, les dimensions de l'antenne peuvent être réduites tout en obtenant une résonance à la fréquence souhaitée.

En 2017, **A. Kaur, G. Singh, et M. Kaur** ont proposé une antenne microstrip multi-bande miniaturisée pour les applications sans fils. L'antenne proposée contient des fentes en forme de C qui sont intégrées dans le patch rectangulaire, et un plan de masse partiel de l'autre côté. L'antenne caractérise quatre bandes aux fréquences de résonances de 3.39, 4.29, 5.46 et 5.77 GHz; ce qui lui permet de fonctionner dans les bandes opérationnelles souhaitées (WLAN et WiMAX) [72].

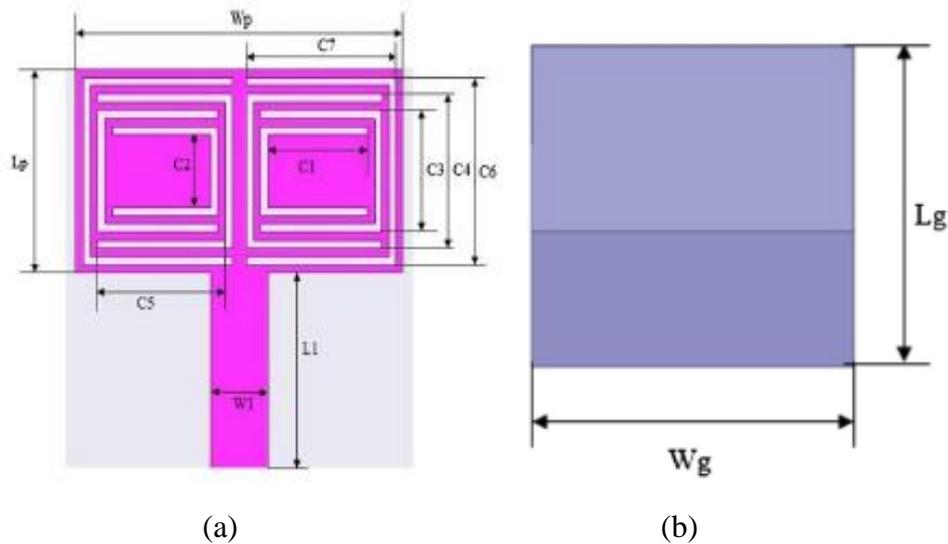


Figure II. 2: Antenne miniature avec fentes de forme C : (a) vue d'avant : le patch, (b) vue d'arrière : plan de masse [72].

II.4.1.2 Technique de modification du plan de masse (DGS)

La technique de la modification du plan de masse (DGS) est un moyen efficace de parvenir à la miniaturisation et de réduire la taille de l'antenne. Dans la littérature, il y a eu un certain nombre d'approches utilisant la technique de miniaturisation DGS. Différentes formes ont été gravées dans le plan de masse.

En 2018, F. Chetouah, S. Aidel, N. Bouzit1 et I. Messaoudene ont présenté une antenne monopôle imprimée de type rectangulaire très petite et compacte pour les applications de réseaux locaux sans fils (WLAN) dans la norme 802.11a. La taille totale de l'antenne est de $10 \times 6 \text{ mm}^2$, se compose d'un patch rectangulaire et d'un plan de masse en "L" inversé alimentée par une ligne de transmission microruban. La technique de DGS est utilisée pour réaliser la miniaturisation [73].

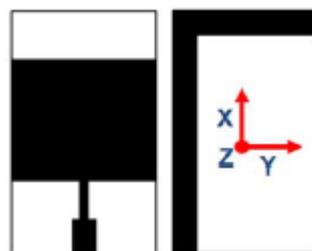


Figure II. 3 : Antenne miniature avec la technique DGS [73].

Il est essentiel de noter que si les techniques de fentes peuvent contribuer à la miniaturisation des antennes patch, il peut y avoir des compromis, tels qu'une réduction du gain,

de la bande passante ou une augmentation de la complexité de la conception. En outre, l'efficacité de technique de fentes dépend de l'application, de la fréquence souhaitée et des exigences de performances. La conception et l'optimisation des antennes patch miniaturisées utilisant la technique de fentes impliquent souvent des simulations et des logiciels de modélisation électromagnétique afin d'obtenir les performances électriques souhaitées tout en réduisant la taille physique globale de l'antenne.

II.4.1.3 Technique de formes fractales

Le terme fractal été introduit à l'origine par le mathématicien français Mandelbrot en 1975. Les fractales sont une classe de formes géométriques composées de multiples itérations d'une seule forme élémentaire. Les éléments fondamentaux des fractales sont les versions mises à l'échelle de la forme fractale [74].

La miniaturisation des antennes patch avec des fractales est une technique qui permet de réduire la taille physique de l'antenne tout en conservant ses performances radioélectriques. Les fractales sont des motifs géométriques complexes [75]. Il existe de nombreuses propriétés qui caractérisent les fractales, tels que les propriétés d'autosimilarité/d'auto-affinité et de remplissage de l'espace qui présentent un intérêt en termes de conception d'antennes. Les structures fractales peuvent améliorer leurs caractéristiques électriques, tels que la bande passante, le gain et l'adaptation d'impédance, tout en réduisant leurs dimensions physiques [76].

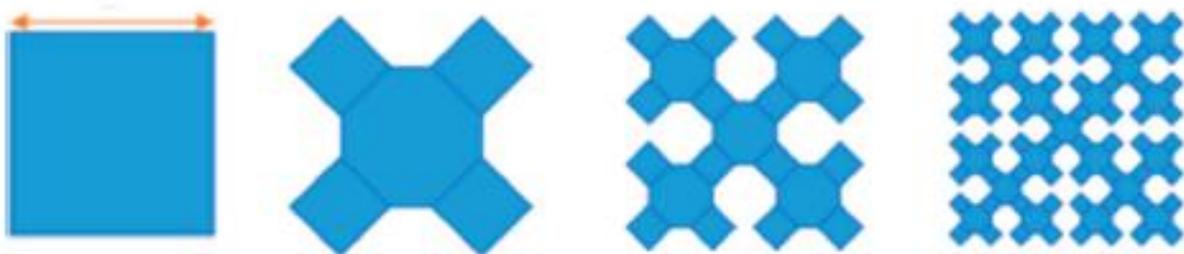


Figure II. 4 : Description des différents processus de conception de la courbe de Sierpinski [76].

En 2022, Neeraj Rao donne la description mathématique du Sierpinski modifié ainsi que son utilisation dans l'antenne patch microruban. L'antenne miniature proposée présente un

comportement multibande. La conception proposée est une géométrie fractale de Sierpinski modifiée avec une surface de patch réduite de moitié [77].

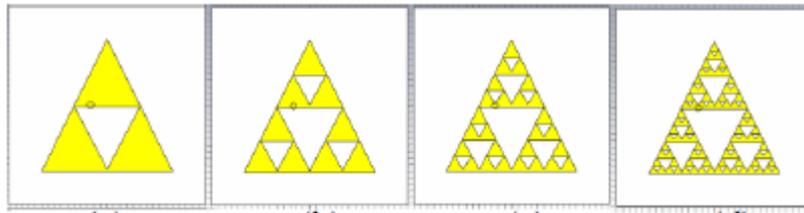


Figure II. 5 : Quatre itérations des fractales de Sierpinski [77].

II.4.2 Ajout de courts-circuits

L'une des méthodes proposées pour réduire la taille d'une antenne et d'obtenir des performances élevées c'est l'utilisation de courts-circuits. Cette méthode est basée sur l'application d'une plaque métallique de court-circuit tout en enroulant cette bande à l'extrémité ouverte de l'antenne [82], le court-circuitage du patch avec le plan de masse, où le champ potentiel est de zéro au milieu du patch, permet de miniaturiser la structure totale de l'antenne de moitié ou plus. Il s'agit donc d'une antenne microruban mise en œuvre avec une longueur de $\lambda/4$ (quart d'onde) [83]. Le court-circuitage du patch modifié effectivement la distribution du courant sur le patch, ce qui entraîne une réduction de la fréquence de résonance de l'antenne et, par conséquent, de sa taille. Voici quelques types de courts-circuits couramment utilisés pour miniaturiser les antennes patch microruban :

II.4.2.1 Fil de court-circuit (shorting pin)

Un fil de court-circuit est un petit fil métallique inséré dans le patch et connecté au plan de masse. Ce fil fournit une connexion électrique directe entre le patch et le plan de masse, court-circuitant ainsi une partie du patch. L'emplacement exact et la taille de ce fil déterminent le degré de miniaturisation atteint. Le court-circuitage d'une partie du patch entraîne une réduction de la fréquence de résonance et de la taille physique de l'antenne [85].

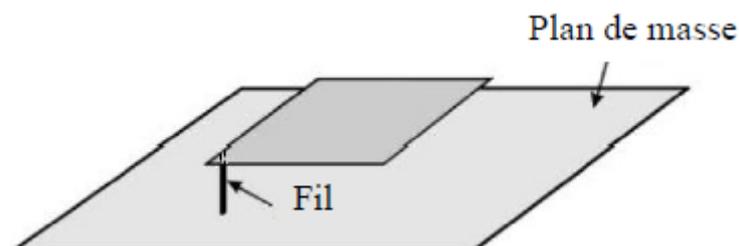


Figure II. 6: Fil de court-circuit [86].

En 2014, H.Oraizi, M.Hamidkhani et S.Hedayati ont proposé une antenne circulaire à plaque métallique alimentée par une sonde coaxiale et suspendue par trois fils de court-circuit au-dessus d'une plaque de masse, qui sert à sa miniaturisation et à ses caractéristiques à large bande pour des applications à très large bande. En augmentant la hauteur du patch au-dessus du plan de masse, la largeur de bande de l'antenne augmente considérablement. Les diagrammes de rayonnement sont également stables sur la bande passante UWB [87].

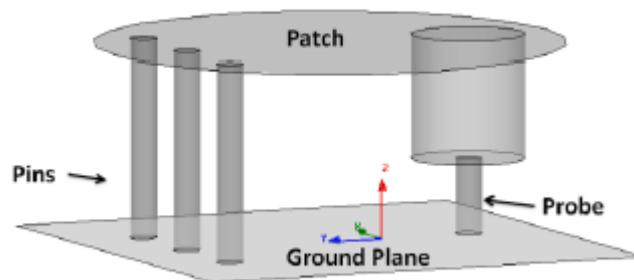


Figure II. 7: Antenne miniature avec trois fils de court-circuit [87].

II.4.2.2 . Languette de court-circuit (shorting plate)

Cette méthode est généralement utilisée pour la création d'une connexion conductrice entre le plan de masse et le patch rayonnant. Elle doit être placée verticalement sur le plan de masse à un endroit stratégique pour modifier la distribution du champ électromagnétique et équilibrer le courant. Grâce à cette structure, les performances en termes de la largeur de bande et le diagrammes de rayonnement seront considérablement améliorées et une miniaturisation très importante sera obtenue [88].

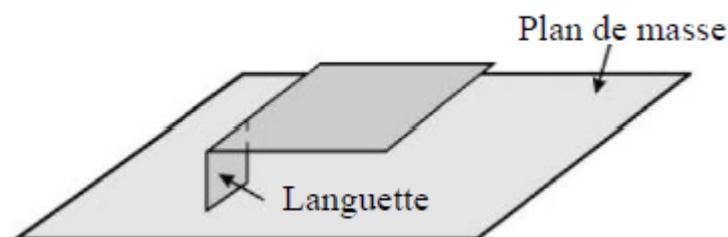


Figure II. 8: Languette de court-circuit [86].

En 2015, M. Hosseini, D.M. Klymyshyn, G.Wells, et X.Liu ont ajouté des languettes de court-circuit dans les antennes EBG (antennes à résonateur à bande interdite électromagnétique) afin de réduire la taille et d'obtenir des performances élevées. La méthode est basée sur l'application d'une languette métallique de court-circuit à l'extrémité ouverte de

l'antenne qui réduit la résonance. Il est démontré que la connexion de la dernière cellule de la cascade au plan de masse avec une languette de court-circuit peut entraîner une réduction considérable de la résonance et une miniaturisation de la structure rayonnante [89].

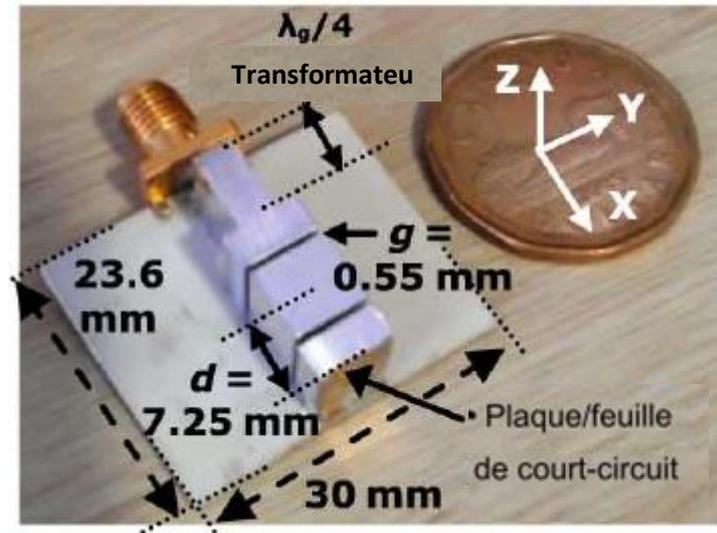


Figure II. 9: Antenne miniature avec une languette de court-circuit [89].

II.4.3 Repliants et méandres

II.4.3.1 Repliants

La technique de miniaturisation de l'antenne patch par repliants (ou "folded patch antenna" en anglais) est une méthode qui consiste à plier une partie du patch par la création d'une encoche ou d'une fente tout en identifiant la zone du patch que nous souhaitons plier préalablement choisie selon la direction souhaitée. Il s'agit d'un simple pli en L, en U ou d'autres formes [90] ou également de le replier sur lui-même en modifiant sa forme pour réduire l'encombrement. Cette technique est efficace pour miniaturiser les antennes patch, elle a peu d'effet sur l'efficacité de l'antenne lorsqu'elle est correctement appliquée. Cependant, elle réduit considérablement le gain et la directivité et elle complique la géométrie en la rendant parfois non plane [91].

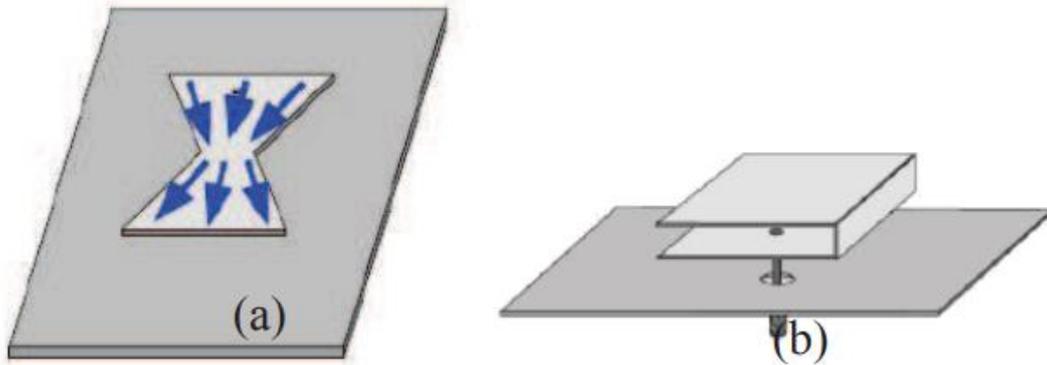


Figure II. 10: (a) Antenne repliée, (b) Repliection vertical [84].

En 2008, A.Holub et M.Polivka ont proposé une technique simple pour réduire encore la taille d'un S-P plié, basée sur le pliage vertical multiple du patch, qui permet de diminuer la dimension originale du patch court-circuité (quart de longueur d'onde) par le facteur $1/N$ où N est un nombre de plaques de patch placées verticalement au-dessus du plan de masse tout en conservant une longueur de résonance d'un quart de longueur d'onde. Le principe de fonctionnement de l'antenne est expliqué par la distribution du champ E à l'intérieur de la structure et la distribution du courant de surface sur les parties conductrices de l'antenne [92].

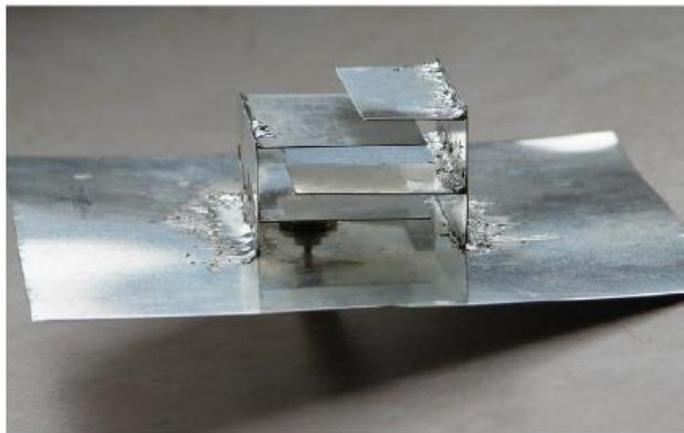


Figure II. 11: Antenne repliée pour les applications RFID [92].

II.4.3.2 Méandres

Un certain nombre de techniques ont été proposées pour réduire la taille physique d'un patch. Dans ce paragraphe, nous présenterons la technique de méandre, permettant de miniaturiser l'antenne patch microruban par la diminution de sa longueur physique tout en augmentant la longueur électrique [93]. Les performances des antennes miniaturisées par cette technique, notamment en termes de bande-passante, rayonnement, polarisation ; sont influencées par le nombre de méandres utilisés. Cependant, il est important de noter que le

principal inconvénient de cette méthode de miniaturisation est l'accroissement des pertes métalliques, entraînant une diminution de l'efficacité de rayonnement globale de l'antenne [94].

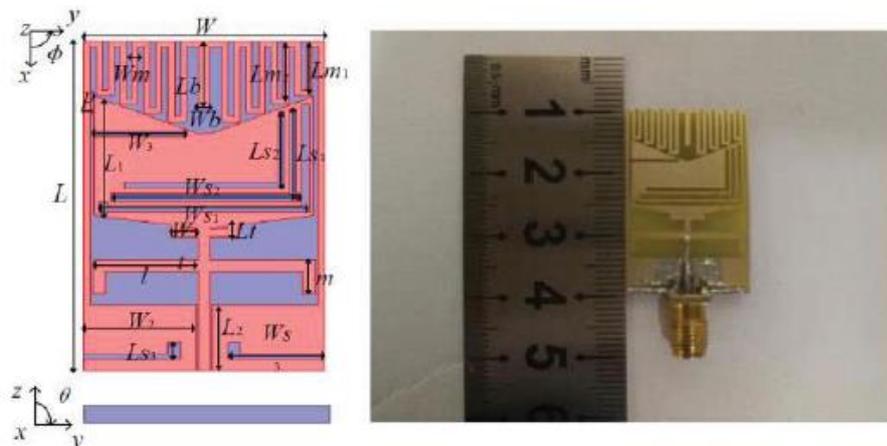


Figure II. 12: Antenne miniaturisée à fente méandré [95].

En 2018, Y. Huang, X.Fang, D. Inserra, J. Li, G. Wen ,H. Zhang, et L. Zuo ont présenté une antenne miniaturisée à fente méandré alimentée par CPW et dotée d'un patch monopôle central en forme de Y. Les résultats de la simulation sont confrontés aux mesures et un bon accord est obtenu. Une largeur de bande de 39,3 % (de 2,39 GHz à 3,56 GHz) est obtenue, avec un gain supérieur à 0,6 dBi. Pour cette raison la conception proposée peut être un choix valable pour les applications LAN sans fil 2,4-2,7 GHz et Wi-MAX 2,5/3,5 GHz [95].

II.4.4 Résonateurs parasites

L'une des méthodes employées pour miniaturiser les antennes patch micro-ruban est celle de résonateurs parasites qui présente une approche pratique pour réduire la taille de l'antenne jusqu'à obtenir des dimensions importantes pour les utilisées et les intégrées dans plusieurs applications notamment le domaine de la téléphonie mobile et les systèmes de communications sans fils où l'espace est limité, tout en préservant, voire en améliorant, les performances de l'antenne en termes de largeur de bande et de gain. La miniaturisation par cette technique se fait par deux méthodes, la première en utilisant les pavés qui sont juxtaposés [96] dans un plan commun comme illustré dans la figure II.13 ou bien ils sont disposés en empilement les uns au-dessus des autres (figure II.14) [97].

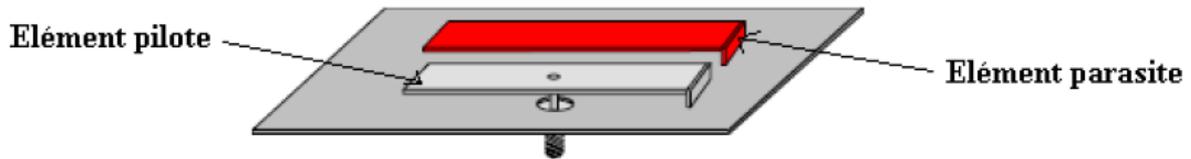


Figure II. 13: Résonateur parasite juxtaposé [96]

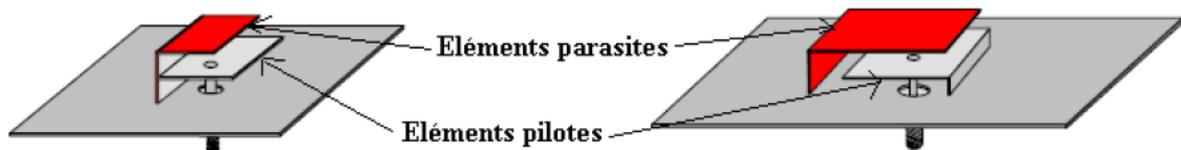


Figure II. 14: Résonateur parasite superposé [97]

La combinaison de ces deux méthodes de résonateurs parasites peut également se produire, mais cela ne convient généralement pas aux antennes miniatures, car elle entraînerait une augmentation significative du volume total de l'antenne, ce qui n'est pas souhaitable.

II.4.5 Utilisation d'un matériau diélectrique à haute permittivité

La longueur d'onde d'un signal électromagnétique est plus courte dans les matériaux à haute permittivité. La permittivité du substrat d'une antenne est un paramètre important qui affecte la taille physique de l'antenne. Une permittivité plus élevée raccourcit la longueur d'onde du champ électromagnétique ce qui permettrait une réduction spectaculaire de la taille de l'élément rayonnant [78]. Cependant, la haute permittivité peut également réduire la largeur de bande de l'antenne et augmenter son facteur de qualité. Cela est dû à la forte concentration du champ électrique dans la région à permittivité élevée [79]. Une antenne intégrée dans un matériau à haute permittivité sera plus petite qu'une antenne intégrée dans un matériau à permittivité inférieure ce qui est essentielle pour la conception et l'intégration du système. Les matériaux tels que la céramique, certains polymères et les matériaux composites peuvent avoir des valeurs de permittivité élevées [80]. Ces matériaux diélectriques avec une permittivité relative élevée généralement de l'ordre de 10 ou plus, offrent la possibilité de réduire les dimensions physiques de l'antenne sans altérer sa géométrie, tout en maintenant la fréquence de résonance désirée. Cela implique la diminution de la longueur d'onde guidée (λ_g) dans le matériau conformément à l'équation suivante [98] .

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (\text{II.4})$$

Avec :

Chapitre II Technologie des antennes miniatures

λ_0 : La longueur d'onde dans le vide.

μ_r : La perméabilité relative du matériau.

ϵ_r : La permittivité relative du matériau.

Il est donc important de choisir la permittivité du substrat en fonction des exigences spécifiques de l'application.

En 2014, WF. Hoon, MF.bin Abd. Malek, LH. Fang, LY. Seng et I. Zahid ont présenté les résultats d'une étude sur la conception d'une antenne patch microruban en titanate de bismuth (BiT). Le BiT est un type de matériau céramique à permittivité élevée égale à 15, il permet de réduire considérablement la taille de l'antenne [81].

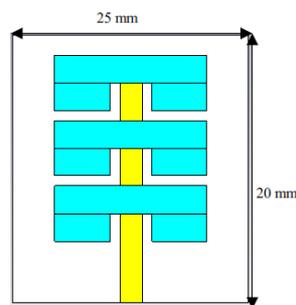


Figure II. 15 : Réseau d'antennes à base du matériau céramique en titanate de bismuth (BiT) [81].

En 2000, CY. Huang et MH. Lin ont donné une comparaison entre les dimensions d'une antenne patch avec deux substrats de permittivités différentes. Le premier substrat, avec une permittivité $\epsilon_{r1}=2.98$, a été utilisé pour la conception d'un patch dont les dimensions sont : $54.35 \times 54.35 \text{ mm}^2$, fonctionnant à une fréquence de 1.575 GHz et offrant une bande passante de l'ordre de 32 MHz. En revanche, en utilisant un substrat de permittivité plus élevée, $\epsilon_{r2}=28.2$, ils ont montré que, pour la même fréquence de résonance, les dimensions de l'élément rayonnant peuvent être réduites à $15.8 \times 15.93 \text{ mm}^2$. Cependant, cette réduction s'accompagne d'une diminution de la bande passante, pouvant aller jusqu'à 13 MHz [99].

II.4.6 Utilisation d'un matériau magnétique

La miniaturisation des antennes ne se limite pas uniquement à la modification de leur géométrie. L'utilisation de matériaux magnétiques à haute perméabilité (μ_r) qui sont connus pour réduire de la taille des antennes microruban et offrir des bandes passantes plus larges et une adaptation améliorée. Bien que cette observation est largement reconnue, il est rare de trouver des discussions approfondies dans la littérature qui tentent d'expliquer les principes physiques qui le sous-tendent [100]. Cependant, l'emploi de matériaux magnétiques à haute

perméabilité est souvent peu pratique, que ce soit en raison de leurs pertes élevées où de leur coût élevé.

II.4.7 Utilisation d'un matériau magnéto-diélectrique

Les matériaux dits «magnéto-diélectriques» sont des matériaux ayant des valeurs de perméabilité μ_r et de permittivité ϵ_r supérieures à un (1) ainsi qu'à d'autres propriétés avantageuses. Récemment, des substrats magnéto diélectriques ont été suggérés pour la miniaturisation des antennes imprimées sans compromettre ses performances en termes de largeur de bande, généralement utilisés pour les applications FM et DVB-H à des fréquences de l'ordre du MHz. Toutefois, l'emploi de substrats magnéto-diélectriques est restreint aux basses fréquences en MHz, en raison d'une limite fondamentale qui limite leur utilisation aux fréquences en GHz [101]. Pour surmonter cette limitation, des solutions potentielles ont été proposées pour y remédier, en illustrant l'utilisation d'un substrat à base de nickel-zinc-cobalt-ferrite dans le contexte d'une antenne micro-ruban à couplage d'ouverture et mettant en évidence la capacité de miniaturisation offerte par les substrats magnéto-diélectriques [102].

En 2000, R. C. Hansen et M. Burke ont démontré qu'en utilisant un matériau magnéto-diélectrique avec à la fois une perméabilité (μ_r) et une permittivité (ϵ_r) supérieures à 1 dans une antenne patch, il est possible d'atteindre une bande passante (BP) plus large, à taille équivalente, par rapport à un substrat purement diélectrique [103]. En effet, en se basant sur l'expression de la bande passante telle qu'elle était déterminée par l'équation :

$$BP = \frac{96 \times \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \times \frac{d}{\lambda_0}}{\sqrt{2} \times (4 + 17\sqrt{\epsilon_r \mu_r})} \quad (II.5)$$

Avec d : la hauteur du substrat.

Nous pouvons observer qu'avec un indice de réfraction n donné, l'incorporation d'un matériau magnéto-diélectrique entraîne une augmentation de la bande passante d'une antenne patch par un facteur $\sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}}$. De plus, les matériaux magnéto-diélectriques permettent de réaliser une combinaison entre la miniaturisation et l'optimisation des performances d'une antenne patch, ce qui les distinguent des matériaux purement diélectriques.

II.4.8 Miniaturisation à l'aide des méta- matériaux

Les métamatériaux sont des matériaux composites artificiels conçus pour offrir des propriétés électromagnétiques qu'on ne retrouve pas dans un matériau naturel et qui ne sont pas facilement disponibles dans le commerce. Les cellules unitaires de métamatériaux sont de petites structures bidimensionnelles [91]. En électromagnétisme, diverses catégories de

Chapitre II Technologie des antennes miniatures

métamatériaux sont disponibles, les métamatériaux dont la permittivité est proche de zéro, dont la permittivité où la perméabilité est négative, où dont la permittivité et la perméabilité présentent simultanément des valeurs négatives. Les plus courantes sont ceux qui utilisent les cellules unitaires métamatériaux, comme les structures SRR, CSRR...etc [104]. Ces structures ont été utilisées pour la miniaturisation des antennes pour créer une variété d'antennes microruban de petite taille, avec des performances améliorées tels qu'un gain élevé et une efficacité du rayonnement accrue [105].

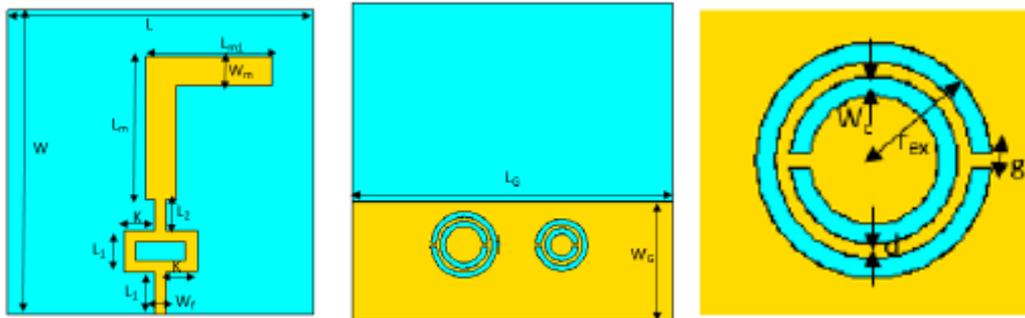


Figure II. 16 : Antenne triple bande basée sur des cellules CSRR [106].

En 2022, FZ.MOUSSA, S.FEROUANI and Y.BELHADEF ont présenté une nouvelle structure d'antenne patch miniature à base de métamatériaux avec 8 cellules CSRR gravés dans le plan de masse. Cette antenne résonne à 3,5 GHz pour les applications mobiles 5G [107].

II.5 Techniques d'amélioration des performances des antennes miniatures

Depuis la création des antennes patch micro-ruban, ils réussissent à susciter un intérêt beaucoup plus grand de la part des chercheurs pour leur bonne utilisation dans divers d'applications. Ces dispositifs doivent offrir des meilleurs caractéristiques tels qu'un gain élevé et une bande passante adéquate à la bande de fréquence de travail [108]. Malheureusement, lors de la miniaturisation et la réduction des paramètres de l'antenne patch, ces deux paramètres caractéristiques se diminués encore plus, il est nécessaire donc d'appliquer les différentes techniques d'amélioration des performances des antennes micro-ruban miniatures [109]. L'optimisation d'une antenne patch pour améliorer les performances est une tâche complexe et passe par l'amélioration de divers aspects. Par la suite, nous allons présenter quelques stratégies spécifiques qui ont été envisagées pour l'élargissement de la bande passante et l'augmentation

du gain. Ces différentes techniques que nous pouvons les employées dépendent des exigences et des contraintes des applications souhaitées.

- **Modification du plan de masse (DGS) : (DGS : Defected Ground Structures en anglais) :** la DGS est une configuration par défaut basée sur la création ou l'insertion des différentes formes de fentes périodiques ou non périodiques sur le plan de masse de l'antenne patch. La forme de fente peut être modifiée d'une forme simple à une forme complexe afin d'avoir une meilleure performance [110]. Ces fentes modifient la trajectoire des courants en établissant de nouveaux chemins. Cette technique est la plus répandue par les antennistes à cause de leur facilité de fabrication et leur faible coût [111].
- **Ajout de fentes :** les différentes formes de fentes intégrées dans l'élément rayonnant ou même sur le plan de masse de l'antenne permettent d'améliorer sa bande passante et/ou son gain, grâce à leurs paramètres tels que leur forme, ses dimensions ou bien leur emplacement [112]. Ces fentes apportent une modification à la distribution du courant, entraînant ainsi un changement dans la longueur du trajet du courant et de l'impédance au point d'entrée, de sorte que la nouvelle fréquence de résonance résultant se rapproche de celle de l'antenne. En ajoutant plus de fentes, deux ou plusieurs régions de résonances sont créées, ce qui, après une optimisation appropriée, permet d'obtenir une largeur de bande et un gain amélioré [113].
- **Méta-matériaux :** les matériaux artificiels ou les métamatériaux présentent de nombreux avantages, notamment utilisés pour la miniaturisation des antennes micro-ruban mais également peuvent être utilisés pour l'amélioration de leurs performances tels que l'élargissement de la bande passante et l'amélioration du gain [114], en raison de leur flexibilité et leurs propriétés qui permettent de les utiliser de plus en plus ces dernières années.
- **Substrats de haute permittivité :** l'utilisation d'un substrat à haute permittivité est une technique parmi les techniques qui peuvent avoir plusieurs effets bénéfiques sur les performances de l'antenne, notamment une augmentation du gain et une amélioration de la bande passante [115]. En outre, le choix du matériau du substrat et sa permittivité doivent être soigneusement étudiés pour adapter les performances de l'antenne aux bandes de fréquences souhaitées. Cependant, cette technique est peu utilisée à cause de son encombrement et ses difficultés de mise en œuvre.

II.6 Applications des antennes miniatures

Les antennes patch microruban se distinguent par leur minceur, leur légèreté, leur profil bas, leur poids réduit, leur résistance mécanique et sa facilité de fabrication, ce qui les rend idéales pour les différentes applications :

- **Les systèmes de communication ultra large bande** (en anglais **UWB**) : l'antenne miniature présente une nécessité majeure pour la transmission de signaux à large bande efficacement grâce au développement des dispositifs et des systèmes sans fils notamment domestiques, militaires et industrielles. Cette technologie a suscité un vif intérêt en raison de ses perspectives prometteuses [116].
- **La montre intelligente** (en anglais **Smartwatch**) : Les antennes utilisées pour la montre intelligente doivent être à profils bas, hautement directives, avec un taux d'absorption spécifique (SAR) faible et résistant à l'effet de charge dû au corps humain [117].
- **Les applications Biomédicales** : Avec le progrès de la technologie, les dispositifs médicaux implantables deviennent de plus en plus courants à mesure. Parmi eux, l'antenne implantable qui est un élément essentiel du système de bio-communication entre les dispositifs médicaux implantables et les instruments extérieurs, elle est implantée seule ou dans d'autres dispositifs à des fins de diagnostic (détection de maladies) ou de traitement, comme un capteur pour la surveillance de la récurrence des tumeurs du mammaires, et une antenne planaire pour un stimulateur cardiaque sans fil. L'antenne implantable doit répondre à certaines exigences essentielles: miniaturisation, biocompatibilité, sécurité du patient et efficacité [118].
- **Les cartes micro SD** : l'antenne miniature dans ce cas est utilisée pour assurer une connectivité sans fil entre un smartphone doté d'un emplacement pour carte micro SD et des dispositifs médicaux, dans le cadre d'applications thérapeutiques, de détection ou de télémétrie [119].
- **Les applications mobiles** : les téléphones mobiles modernes autorisent les utilisateurs du monde entier à se connecter à Internet et à communiquer, quel que soit leur emplacement. La compacité de ces appareils est rendue possible grâce aux performantes des petites antennes microruban pour les différentes bandes de fréquences comme l'UMTS , la Wi-Fi, le GPS ou le Bluetooth [120] et la nouvelle génération 5G [121].
- **Internet des objets (Internet Of Things IOT en anglais)** : les antennes miniaturisées qui présentent généralement des dimensions réduites, facilitent leur intégration dans les

Chapitre II Technologie des antennes miniatures

dispositifs IoT. En outre, elles contribuent à améliorer les performances globales tel que le facteur de qualité, ce qui permet une adaptation de l'antenne aux bandes étroites nécessaires aux systèmes IoT et une réduction des interférences [122]. Les antennes patch microruban sont couramment utilisées dans les applications IoT en raison de leur compatibilité, de leur faible profil, de leur légèreté et de leur précision dans la plage des fréquences micro-ondes [123].

II.7 Conclusion

Ce chapitre, nous a permis de présenter un état de l'art sur la technologie des antennes imprimées miniatures. La première partie du chapitre présente les limites théoriques de la miniaturisation des antennes planaires établies par WHELEER et CHU. Une brève description de l'antenne micro-ruban miniature (électriquement petite AEP) a été fournie, puis le facteur de qualité et le facteur de miniaturisation sont présentés. La deuxième partie du chapitre est consacrée aux principales techniques de miniaturisation appliquées aux antennes micro-ruban telles que les techniques classiques comme l'ajout de fente et le repliement ainsi que les techniques innovantes comme les matériaux magnéto-diélectrique et les métamatériaux ont été présentés et discutés. A la fin de ce chapitre, nous sommes intéressés aux différentes techniques d'améliorations des performances des antennes imprimées qui font l'objectif de plusieurs recherches et investigation qui consistent à développer de nouvelles structures d'antennes compactes et performantes tout en respectant les contraintes liées au volume occupé, à la bande passante et au gain, telles qu'elles sont requises pour l'application envisagée. Finalement, nous avons cité les applications des antennes miniatures dans différents domaines tels que les systèmes de communication ULB, les applications biomédicales, les téléphones mobiles ...Etc.

Chapitre III

Technologie des métamatériaux

III Technologie des métamatériaux

III.1 Introduction

Les avancées dans le domaine de la conception et de la miniaturisation des dispositifs électroniques en hyperfréquences, tels que les antennes patch micro-ruban, motivent les chercheurs à explorer divers matériaux. L'objectif est d'optimiser leur utilisation et de développer des structures performantes tout en maîtrisant le coût. Au cours des récentes années un matériau a révolutionné et considérablement amélioré les propriétés électromagnétiques des composants conçus. Ce matériau innovant est le "métamatériau", caractérisé par une structure composite et artificielle qui diffère des substances naturelles. Le secret des métamatériaux réside dans leur structure qui leur permet de défier les lois conventionnelles de l'électromagnétisme et en optique. Dans ce chapitre, Nous allons commencer par l'historique de ce type de matériau ainsi que leurs propriétés principales. Puis nous présenterons la définition du concept des métamatériaux adoptée dans cette thèse et nous rappellerons les classifications et la terminologie des métamatériaux. Ensuite, nous introduirons la structure des métamatériaux et les différentes configurations géométriques des résonateurs SRR. Enfin, nous clôturerons par un aperçu des applications dans les divers domaines ainsi que des techniques d'extraction des paramètres effectifs.

III.2 Historique et contexte

En 1898, J.C. Bose [124] a mené la première expérience en micro-ondes pour étudier le concept de matériaux artificiels. Il a tenté de modifier la polarisation des ondes électromagnétiques émises par un liquide, comme une solution de sucre, en utilisant des fibres synthétiques torsadées. H. Lamb [125] et H. C. Pocklington [126] en 1904 et 1905, ont apporté des précisions sur le concept de l'opposition entre la vitesse de phase et la vitesse de groupe dans quelques systèmes mécaniques qui reposent sur des chaînes chargées et tendues. Lindman en 1914, [127] a examiné des matériaux artificiels chiraux composés d'un regroupement de petits fils en spirale orientés de manière aléatoire au sein de l'environnement principal. La première exploration de la possibilité d'une réfraction négative, impliquant une divergence entre les vitesses de phase et les vitesses de groupe, a été menée en 1944 par L.I. Mandelshtam [128]. Le premier schéma de la réfraction négative est présenté dans la figure III.1.

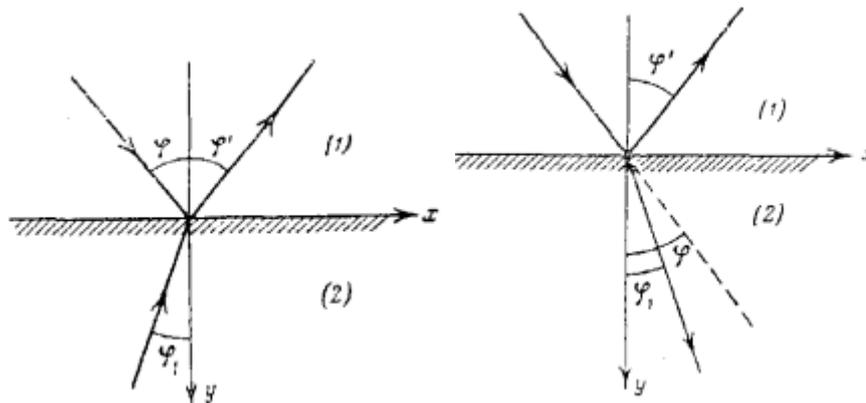


Figure III. 1 : Premier schéma illustrant le concept de la réfraction négative, publié en 1950 par L.I. Mandelshtam.[128].

Ensuite, en 1951, Malyuzhinets a étudié des cas théoriques sur les structures 1D infinies qui supportaient des ondes arrière à base de capacités connectées en série à des inductances en parallèle [129]. De plus, en 1957 et lors d'une recherche portant sur des matériaux présentant des paramètres négatifs, Sivukhin a donné une remarque sur la propriété de rétro-propagation avec une explication de la relation entre la permittivité et la perméabilité négative, ainsi que la manifestation de la réfraction négative [130]. En 1959, Pafomov [131] a présenté une étude plus détaillée sur ça. Ainsi, il a traité l'effet Doppler et la radiation de Vavilov Cerenkov dans les milieux présentant des valeurs négatives pour ϵ et μ . En outre, R. A. Silin [132] a rapporté le phénomène de réfraction négative observé dans des milieux périodiques 2D.

C'est dans les années 60 que l'histoire des métamatériaux a commencé lorsque le physicien chercheur russe Victor Veselago a exploré l'idée de matériaux dotés de propriétés qui n'existent pas dans la nature où la permittivité et la perméabilité sont simultanément négatives dans une même plage de fréquences. Ces premiers travaux théoriques se sont souvent concentrés sur le concept d'indice de réfraction négatif [133]. Ces matériaux ont ensuite été désignés sous le nom de Main Gauche, « MG » (Left-Handed Materials, en anglais « LHM »). Ce terme provient pour exprimer le fait qu'ils permettraient la propagation d'ondes électromagnétiques, car le champ électrique E , le champ magnétique H et le vecteur d'onde k forment un trièdre indirect, conformément à la règle de la main gauche (figure III.2). Il a également étudié de nouvelles caractéristiques telles que l'inversion de l'effet Doppler, l'inversion du rayonnement de Vavilob-Cerenkov, l'inversion des conditions limites relatives aux composantes normales des champs électriques et magnétiques à l'interface entre un milieu conventionnel/droitier (RH) et un milieu gaucher (LH), l'inversion de la loi de Snell, la

Chapitre III Technologie des métamatériaux

réfraction négative subséquente à l'interface entre un milieu RH et un milieu LH. Par conséquent, les ondes électromagnétiques antiparallèles ou les ondes rétrogrades sont supportées par les LHM, ce qui signifie que les ondes électromagnétiques se déplacent dans la direction opposée au flux d'énergie [134]. Cependant, la réalisation du premier prototype de métamatériaux a pris plus de 30 ans en raison du manque de vérification expérimentale. La première révolution a eu lieu en 1996 lorsque Sir Pendry et son équipe ont avancé l'idée d'un milieu présentant une permittivité effective négative à l'aide d'une grille de tiges métalliques. En 1999, trois ans après, cette équipe a développé de nouvelles configurations connues sous le nom de résonateurs à anneau fendu (SRR: Split Ring Resonators) qui permettent d'obtenir une perméabilité négative. J. Pendry [135] a suggéré la création d'un milieu à indice négatif en superposant deux métamatériaux ayant des permittivités et des perméabilités effectives négatives. Il est envisageable de démontrer que seul un milieu à double négativité ou à double positivité permet un régime de propagation donné. En revanche, les milieux qui ne présentent qu'une permittivité ou une perméabilité négative sont caractérisés par des modes de propagation évanescents. Sur cette base, de nombreuses études ont cherché à définir des métamatériaux à double négativité capables de couvrir l'intégralité du spectre électromagnétique, des micro-ondes à l'optique. En 2000, J. B. Pendry [136] a proposé le concept la quête de la superlentille où son principe consiste à obtenir une focalisation avec une résolution nettement inférieure à la longueur d'onde est entravée par les effets néfastes des pertes. Cependant, en 2001, D.R. Smith [137] et son équipe ont démontré expérimentalement pour la première fois que le matériau composite, constitué d'anneaux concentriques coupés, appelés résonateurs à anneau fendu (SRR), combinés avec de tiges métalliques continus, peut créer un matériau à main gauche exhibant simultanément une permittivité et une perméabilité négatives, induisant ainsi un indice de réfraction négatif. Ces métamatériaux présentent l'inconvénient inévitable d'une grande perte et d'une bande passante étroite, et ces inconvénients limitent les applications des métamatériaux. C'est pourquoi les scientifiques recherchent d'autres caractéristiques que la réfraction négative. La deuxième révolution dans le domaine des métamatériaux a eu lieu en 2005, avec la découverte que le milieu à gradient d'indice de réfraction permettait de courber les ondes électromagnétiques par Smith et son équipe [138]. En 2006, Pendry et son équipe [139] ont proposé une transformation optique visant à fabriquer des caches invisibles pour contrôler la propagation des ondes électromagnétiques grâce à l'utilisation de métamatériaux. Par conséquent, les métamatériaux possèdent une portée beaucoup plus vaste que les matériaux à indice négatif, car ils ne nécessitent pas forcément une permittivité et/ou une perméabilité négative, ouvrant ainsi un tout nouveau champ de possibilités et de nouvelles perspectives

d'application. L'âme du métamatériau réside dans leur capacité de contrôler les ondes électromagnétiques [140]. Après la mise en place expérimentale de caches invisibles dans le secteur des micro-ondes, l'intérêt pour les métamatériaux et la transformation optique a connu une croissance exponentielle. De nombreux articles scientifiques ont été publiés dans diverses revues et magazines [141].

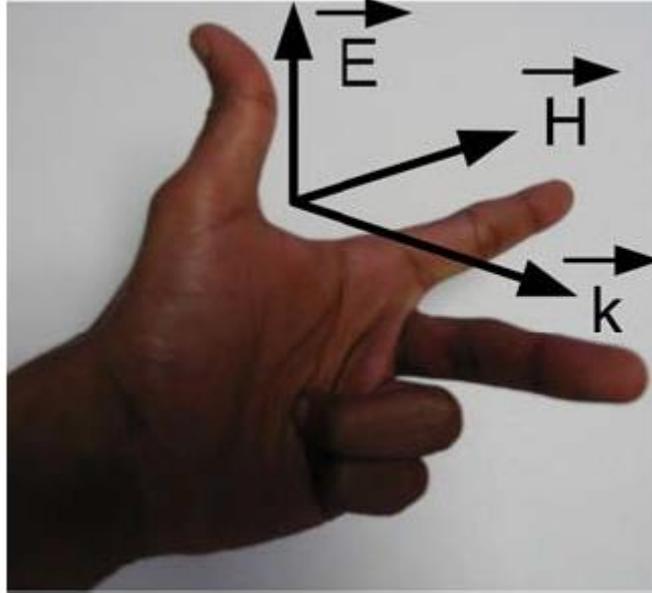


Figure III. 2 : Trièdre indirect défini par la règle de la main gauche [142].

III.3 Définition des métamatériaux

Pour introduire et définir ce que l'on appelle les métamatériaux (MTM), il s'agit de matériaux artificiels caractérisés par des réponses électromagnétiques techniques non aisément trouvables dans la nature, il faut tenir compte des différents aspects et degrés de flexibilité, périodicité et exotique ainsi que la pseudo homogénéité. Pour une structure considérée comme métamatériaux, les problématiques essentielles sont ceux qui concernent la périodicité et l'exotique des propriétés électromagnétiques. Par conséquent, les chercheurs ont adopté une définition plus vaste des métamatériaux, où ces deux aspects ne sont pas considérés comme essentiels et ils considèrent les métamatériaux comme des "structures périodiques ou quasi-périodiques créées artificiellement [143].

En physique, le terme "métamatériaux" fait référence à un matériau artificiel pseudo-homogène conçu pour avoir des propriétés électromagnétiques que l'on ne trouve pas dans les substances naturelles. La propriété distinctive qui a rendu les métamatériaux célèbres est la capacité d'avoir simultanément une perméabilité et une permittivité négatives [137]. Ces matériaux sont créés en arrangeant ou en structurant leurs éléments constitutifs d'une manière précise à une échelle inférieure à la longueur d'onde guidée du phénomène qu'ils sont censés

Chapitre III Technologie des métamatériaux

manipuler. On admet généralement que la limite d'homogénéité est établie pour des tailles inférieures à $\lambda/4$. Les métamatériaux sont généralement conçus pour contrôler et manipuler les ondes électromagnétiques, les ondes sonores ou d'autres phénomènes physiques de manière unique [144]. Les métamatériaux, comme leur nom l'indique, se composent des mots : "méta" et "matériaux". « Meta » est un préfixe grec (μετά) signifiant « au-delà » ou « un niveau au-dessus », similaire à son utilisation dans des termes tels que métaphysique ou métalogue. En d'autres termes, les métamatériaux sont des matériaux qui présentent des propriétés « au-delà » de celles que l'on trouve dans les matériaux naturels.

La caractéristique d'un matériau pseudo-homogène sur une plage de fréquences implique que la taille de la cellule unitaire de base "P" doit être inférieure à la longueur d'onde guidée (λ).

$$P \ll \lambda$$

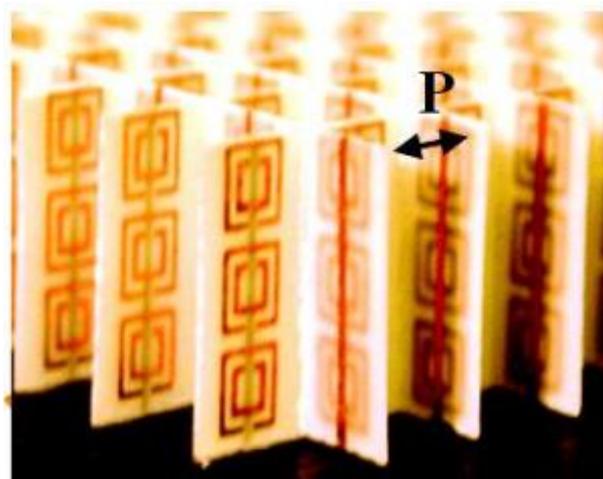


Figure III. 3 : Une structure pseudo-homogène bi-dimensionnelle composée d'un réseau périodique d'anneaux résonnants et de fils [145].

En 1999, à l'université du Texas à Austin, Rodger M. Walser a synthétisé le terme métamatériau. Il a initialement défini les métamatériaux comme des composites macroscopiques ayant une architecture cellulaire synthétique, périodique, artificielle et tridimensionnelle, conçus pour générer une combinaison optimisée, non présente dans la nature, de deux réponses ou plus à une excitation spécifique [146].

III.4 Classification des métamatériaux

Les matériaux classiques présentent des caractéristiques particulières et peuvent être classés en fonction du signe de l'indice de réfraction η et des deux paramètres ϵ_r et μ_r .

Chapitre III Technologie des métamatériaux

L'équation qui définit cet indice formé par ces deux paramètres est donnée par la relation suivante [147] :

$$\eta = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (\text{III. 1})$$

Où :

ϵ_r et μ_r présentent respectivement la permittivité et perméabilité relatives du matériau. À partir de l'équation (III.1) de l'indice de réfraction η , nous pouvons constater que cet indice peut prendre différents signes, cela grâce au signe de ϵ_r et μ_r . La figure III.8 illustre toutes les configurations possibles :

- **Les matériaux doublement positifs (DPS) ou milieu droitier, RHM** : les ondes ne peuvent se propager que dans les matériaux des régions dont les paramètres ϵ et μ sont tous les deux positifs (+,+), correspond aux matériaux ordinaires tels que les matériaux diélectriques isotropes. L'utilisation de l'expression "main droite" fait référence au fait qu'il est nécessaire d'utiliser la main droite pour déterminer le trièdre direct (\vec{E} , \vec{H} , \vec{K}) (figure III.4.(a)).
- **Les matériaux doublement négatifs (DNG) ou milieu gaucher, LHM** : ces matériaux sont caractérisés par une permittivité (ϵ) et une perméabilité (μ) tous les deux négatives (-,-), ce qui se traduit par un indice de réfraction négatif. Ce fait affecte également les équations de champ dans les formules de Maxwell pour une onde plane :

$$\vec{K} \times \vec{E} = \omega \mu \vec{H} \quad (\text{III.2})$$

$$\vec{K} \times \vec{H} = -\omega \epsilon \vec{E} \quad (\text{III.3})$$

D'après ces deux équations de Maxwell, Veselago a remarqué que dans ce milieu, le champ électrique \vec{E} , le champ magnétique \vec{H} et le vecteur d'onde \vec{K} forment un trièdre indirect caractérisé par la règle de la main gauche et il a établi les propriétés physiques suivantes :

- Le vecteur de Poynting \vec{P} et vecteur d'onde \vec{K} sont opposés (figure 4.(b)).
- Le vecteur de Poynting \vec{P} est donné par l'équation :

$$\vec{P} = \frac{1}{2} \vec{E} \times \vec{H} \quad (\text{III.4})$$

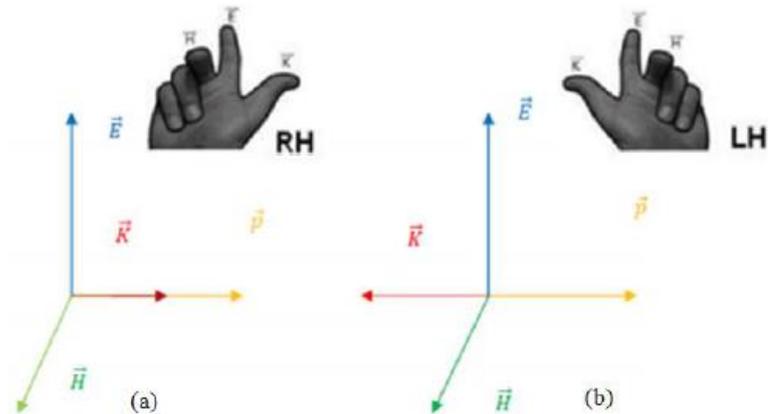


Figure III. 4 : Représentation vectorielle d'une onde électromagnétique plane. (a) Trièdre direct (matériaux main droite). (b) Trièdre indirect (matériaux main gauche) [148].

- **Matériaux à permittivité négative ENG :** ce sont les régions où se trouvent les ondes évanescentes non propagatrices, nous avons $\varepsilon < 0$ (-, +) (epsilon négatif, ENG) correspond aux plasmas ainsi qu'aux métaux à des fréquences optiques. Il est bien connu que les plasmas sont décrits par une fonction de permittivité qui devient négative en dessous d'une fréquence de plasma (ω_p), pour cela et selon le modèle de Drude, les métaux ne sont plus des milieux préparatifs au-dessus de cette fréquence de plasma électrique et donc les ondes ne peuvent pas se propager dans les métaux ou les semi-conducteurs où ils présentent une permittivité négative. La fréquence du plasma s'étend du spectre visible au proche ultraviolet dans le cas des métaux. Tandis que pour les semi-conducteurs, elle se situe dans la plage des ondes millimétriques à l'infrarouge du spectre électromagnétique [149]. La permittivité aux métaux est donnée par l'équation suivante :

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\omega p_e^2}{\omega^2 + i\omega_c} \quad (\text{III.5})$$

Avec : p_e : la pulsation du plasma électrique.

ω_c : la pulsation de collision.

Où : la fréquence de plasma donnée par J. Pendry [142] est présentée par :

$$\omega p^2 = \frac{\rho e^2}{\varepsilon_0 m_{eff}} \quad (\text{III. 6})$$

ρ : La densité des électrons.

e : La charge des électrons.

m : La masse effective des électrons.

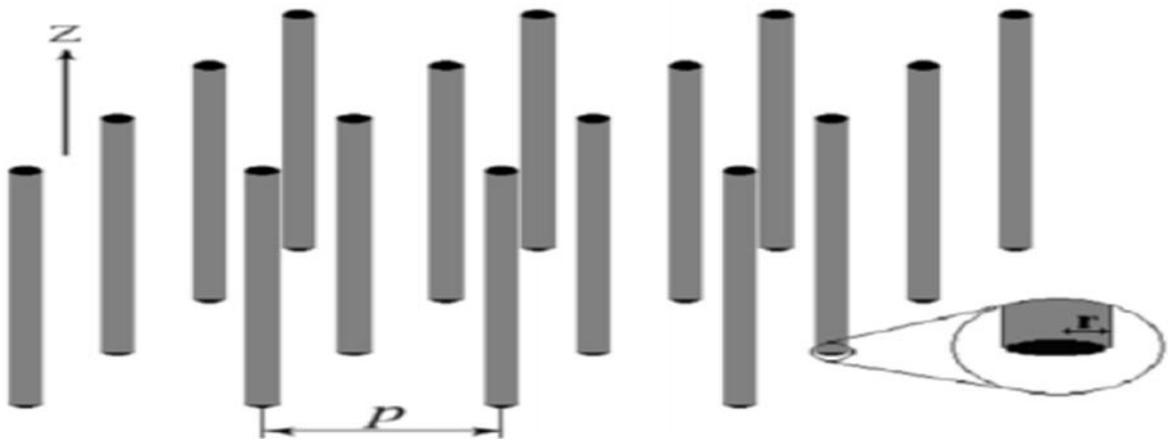


Figure III. 5 : Réseau de tiges métalliques formant les métamatériaux ENG [140].

- **Les matériaux à perméabilité négative (MNG)** : correspond aux matériaux ferromagnétiques et composites antiferromagnétiques qui peuvent présenter une perméabilité négative $\mu < 0$ (+,-) (mu négatif, MNG) dans le domaine des microondes. Cependant, des bandes passantes très petites et des fortes pertes magnétiques sont présentées par ces matériaux qui sont généralement rares, et lourds [150].

En 1999, Pendry et ses collaborateurs introduisaient la structure de rouleau suisse (swiss-roll), où ils incarnent l'idée de créer des milieux non-magnétiques avec une réponse magnétique et la rendre possible. En réalité, le terme "rouleau suisse" fait référence à une structure métallique artificielle qui présente une résonance magnétique sans nécessiter la présence de composants magnétiques présentée dans la figure III.6. Un cylindre de rayon "R" avec une spirale conductrice isolée et enroulée autour de ses tours "N" constituent chaque rouleau suisse individuel. La distance entre deux tours successifs est notée "d". Ainsi, il n'y a pas de contact électrique entre les couches. Lorsqu'un champ magnétique est appliqué le long de l'axe du cylindre, cela induit un courant dans le conducteur. De plus, la capacité créée complète le circuit résonant et permet la circulation du courant. La relation pour le calcul de la perméabilité effective est la suivante [III.13] :

$$\mu_{eff} = 1 - \frac{F}{1 + \frac{2\sigma i}{\omega R \mu_0 (N-1)} - \frac{d C_0^2}{2\pi^2 R^3 \omega^2 (N-1)}} \quad (\text{III. 7})$$

Où

C_0 : la vitesse de la lumière dans le vide.

ω : la pulsation angulaire.

Chapitre III Technologie des métamatériaux

σ : La conductivité de feuille spirale.

Le taux de remplissage de matériau qui est magnétiquement actif présenté par F avec 'a' l'espacement entre les structures dans un réseau.

$$F = \frac{\pi r^2}{a^2} \quad (\text{III.8})$$

Où F représente le volume fractionnaire du côté de la cellule occupée par l'intérieur du cylindre.

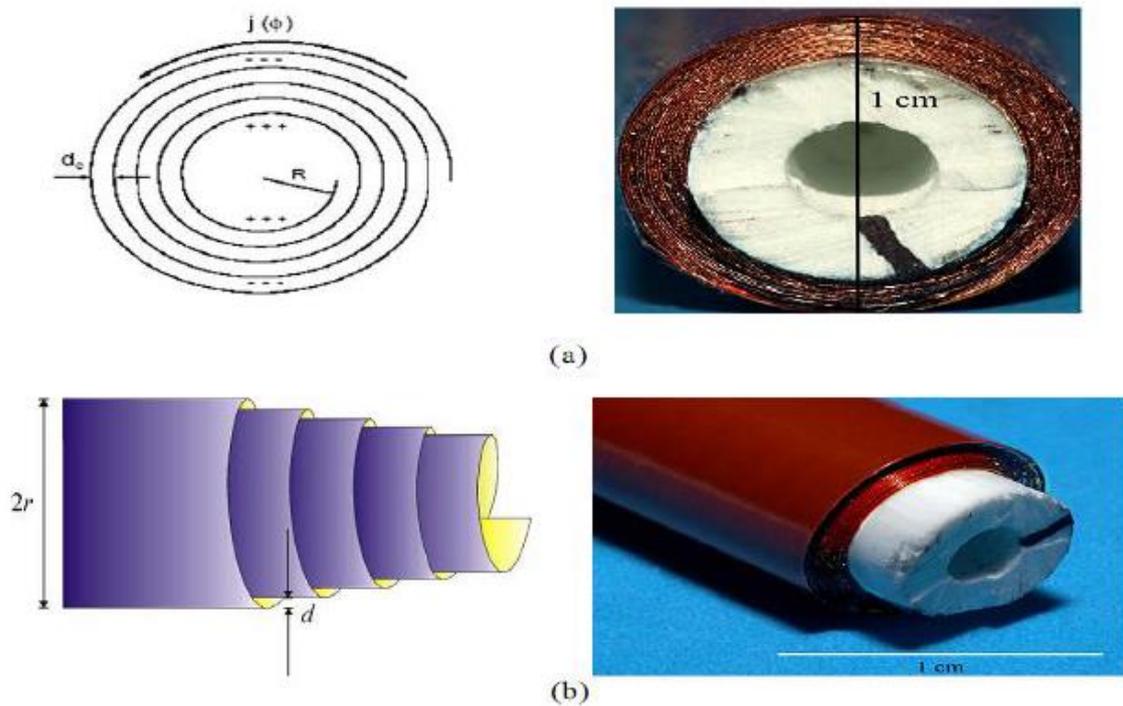


Figure III. 6: Géométrie de rouleau suisse, proposée par Pendry: (a) vue de face. (b) vue de profil [135].

Ces recherches se concentrent sur le magnétisme généré par une inclusion métallique connue sous le nom de résonateur en anneau fendu (RAF) ou split ring resonator (SRR).

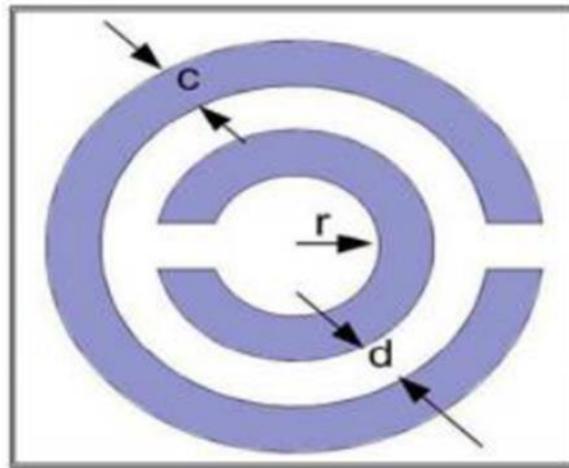


Figure III. 7. Résonateur en Anneau Fendu « RAF » (Split Ring Resonator « SRR ») introduit par Pendry [138].

Finalement, d'autres régions d'intérêt peuvent également être prises en compte, comme celle de l'*epsilon* proche de zéro (ENZ), où $0 < |\epsilon| < 1$, et celle du *mu* proche de zéro (MNZ), où $0 < |\mu| < 1$ [129].

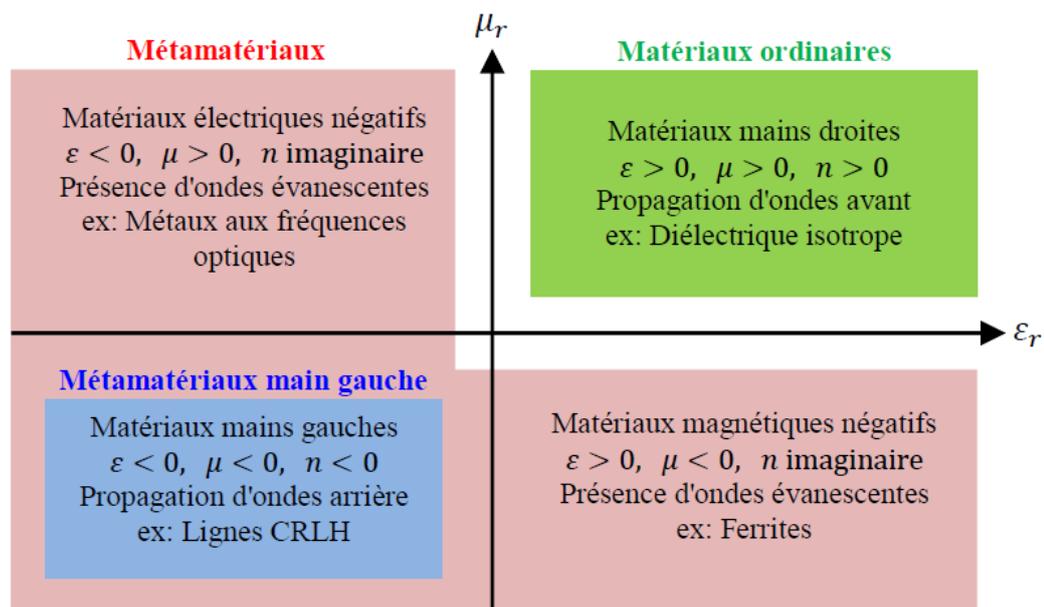


Figure III. 8 : Classement des matériaux en fonction du signe de leur permittivité ϵ et de leur perméabilité μ [151].

III.5 Terminologie des métamatériaux

Les métamatériaux et particulièrement ceux connus sous le nom de matériaux main gauche comportent divers synonymes de métamatériaux utilisés dans la littérature. Ces synonymes peuvent être résumés de la manière suivante [152] :

- **Matériaux main gauche (MMG) (Left-handed materials)** : cette terminologie met en évidence la caractéristique essentielle des métamatériaux, à savoir l'opposition entre la vitesse de phase et la vitesse de groupe.
- **Matériaux doublement négatif (Double negative materials)** : le terme "double négatif" fait référence au fait que la permittivité et la perméabilité du matériau sont toutes les deux négatives.
- **Matériaux à indice de réfraction négatif (negative refractive index materials)** : ce terme est utilisé pour décrire les matériaux 2D et 3D dont l'indice de réfraction pour une onde électromagnétique a une valeur négative sur une certaine plage de fréquences.
- **Matériaux de Veselago (Veselago medium)** : ce sont les métamatériaux connus sous le nom du physicien Victor Veselago qui les a inventés en 1968, lorsqu'il a prédit qu'un milieu avec un indice de réfraction négatif pourrait exister et il n'a donné aucune propriété ou information physique sur ce matériau.
- **Matériaux à onde inversée (Backward wave materials)** : cette appellation met en avant une autre caractéristique et elle est utilisée parce que la vitesse de phase de l'onde est opposée à la direction du flux d'énergie.

Les métamatériaux constituent un domaine de recherche interdisciplinaire en plein essor qui fait appel à la physique, au génie électrique, à la science des matériaux, à l'optique et aux nanosciences. Ils ont de nombreuses applications potentielles, notamment dans le développement de nouveaux types d'antennes, de capteurs et de dispositifs d'occultation.

La concrétisation du premier métamatériau a été rendue possible par une évolution en trois étapes. Tout d'abord, la création d'un milieu présentant une permittivité négative. Ensuite, l'établissement d'un milieu doté d'une perméabilité négative. Enfin, la superposition de ces deux milieux afin d'obtenir un milieu doublement négatif [153].

III.6 Structure des métamatériaux

III.6.1 Structure et modèle du SRR

La structure du résonateur à anneau fendu (SRR) a été proposée par Pendry pour créer un milieu métamatériel [135] et a été retravaillée par le groupe de Martin pour les lignes en microruban. Cette approche particulière est appelée lignes de transmission à métamatériaux de type résonant basées sur des résonateurs sub-longueur d'onde. Ces résonateurs consistent en deux anneaux fendus concentriques, imprimés sur un substrat diélectrique conventionnel à des fréquences micro-ondes. Lorsqu'un flux magnétique variable dans le temps dirigé le long de

l'axe Z entre en jeu, la coupure de chaque anneau provoque un courant qui passe d'un anneau à l'autre à travers l'espace entre les deux anneaux, sous la forme d'un fort courant de déplacement qui se produit entre les deux anneaux [154]. Les fentes entre les anneaux se comportent donc comme une capacité distribuée. Près de la résonance, la particule réagit à un champ magnétique externe non seulement comme un dipôle magnétique fort, mais aussi comme un dipôle électrique fort. En effet, lorsque la particule SRR est excitée à la résonance, les charges dans la moitié supérieure de la particule SRR doivent être les images des charges dans sa moitié inférieure, comme la montre la figure III.9. Ainsi, deux dipôles électriques parallèles dirigés le long de l'axe y sont générés dans chaque demi-anneau de SRR. En conséquence, la résonance SRR peut également être excitée par un champ électrique externe dirigé le long de l'axe y. En résumé, les topologies de base des RAF (résonateur à anneau fendu) présentent des effets de polarisation croisée. Cela signifie que les SRR et les CSRR peuvent être excités magnétiquement et/ou électriquement si les anneaux sont correctement orientés [155].

Le modèle sans perte de la structure SRR est présenté dans la figure III.9 (b). L'inductance représente l'effet d'auto-induction des bandes métalliques des anneaux fendus, tandis que la capacité reflète la capacité entre les deux lignes de chaque demi-anneau. Cette modélisation est valable lorsque le périmètre de l'anneau est considéré comme étant relativement petit par rapport à une demi-longueur d'onde, et lorsque la capacité due aux coupures sur chaque anneau peut être négligée.

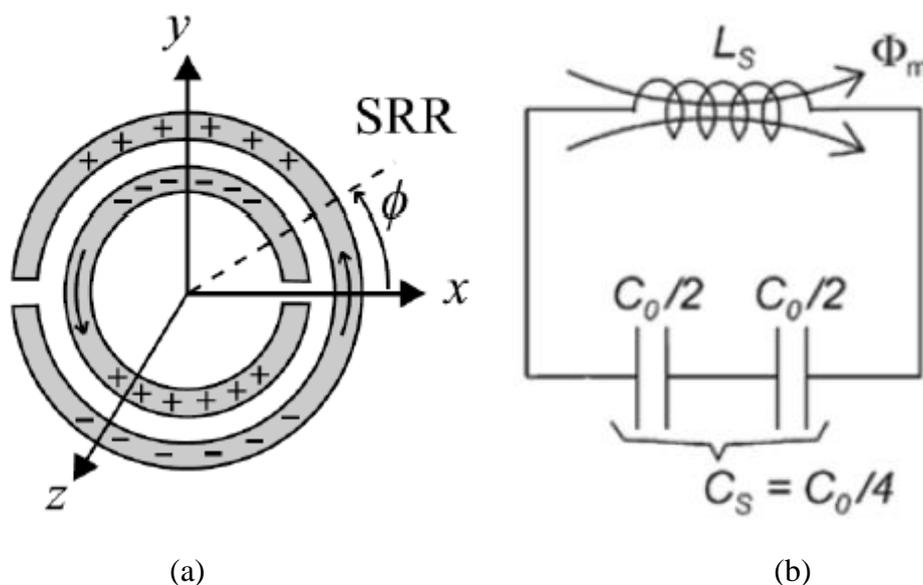


Figure III. 9 : Représentation de la structure appelée Split Ring Resonator (SRR) (la couleur grise représente les bandes métalliques); (b) : Modèle LC du SRR [154].

III.6.2 Structure et modèle du CSRR

Les lignes de transmission artificielle de type résonant peuvent également être mises en œuvre avec des résonateurs à anneau fendu complémentaire (CSRR). Ces résonateurs peuvent être excités par un courant électrique variable dans le temps. Afin de garantir une telle excitation, les CSRR sont généralement gravés sur le plan de masse d'une ligne microruban [156]. La structure SRR présentée dans le paragraphe précédent a son complément. Cette structure double est appelée résonateur à anneau fendu complémentaire (RAFC) (CSRR en anglais), également connu sous le nom de résonateur à double anneau fendu, elle est illustrée à la figure III.10. La forme du CSRR est utilisée pour créer des fentes dans le plan de masse, en remplaçant les parties métalliques de la structure originale par des fentes, et les fentes par des plaques métalliques. En raison de considérations de symétrie, on peut démontrer que si l'épaisseur de la plaque métallique est nulle et que sa conductivité est nulle, c'est-à-dire qu'elle présente les caractéristiques d'un conducteur électrique parfait, alors les fentes se comportent comme des conducteurs magnétiques parfaits [154].

Selon le principe de Babinet, dans de telles structures complémentaires, les champs électriques et magnétiques, les courants, etc. échangent leurs rôles [156]. Ainsi, si la structure SRR peut être considérée comme un dipôle magnétique résonant, excité par une structure magnétique axiale, le CSRR peut être considéré comme son double, c'est-à-dire comme un dipôle électrique qui résonne à la même fréquence et peut être excité par un champ électrique tout en présentant des valeurs négatives de la permittivité diélectrique autour de sa résonance. En gravant les anneaux complémentaires dans le plan de masse sous une bande de signal, une composante importante de l'onde électrique se produit parallèlement à l'axe des anneaux, comme souhaité, pour exciter le CSRR. La figure III.10. (b) présente le modèle du CSRR dont il est composé d'un circuit résonant LC. Un condensateur C_c généré par un disque de rayon égal à $r_0 - c/2$, remplace l'inductance L_S de la structure SRR présenté dans la figure précédente. De plus, les deux capacités en série, $C_0/2$, du modèle SRR sont substituées par deux inductances en dérivation $L_0/2$. Ces inductances de dérivation sont les inductances par unité de longueur des deux lignes coplanaires reliant le disque intérieur au plan de masse [154].

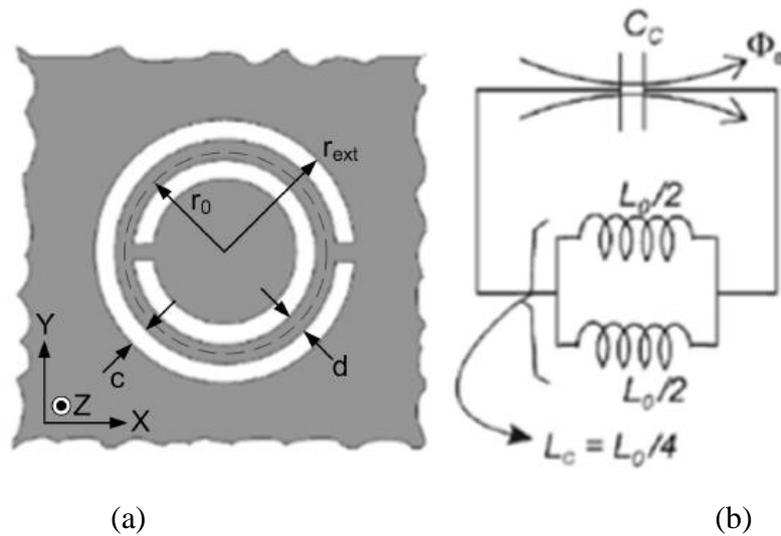
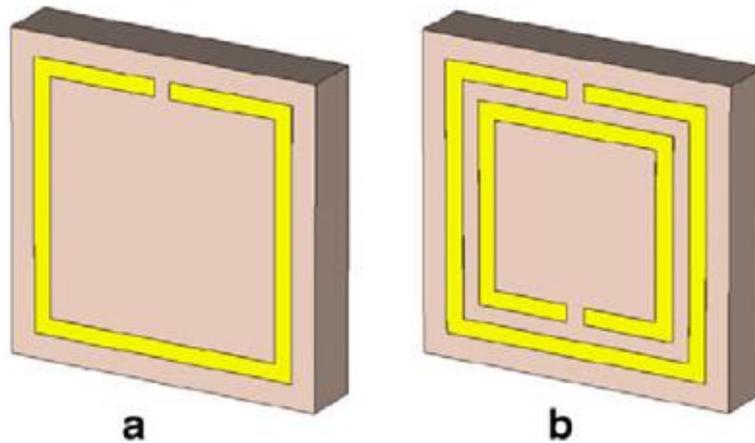


Figure III. 10: (a) Vue en 3D du résonateur à double anneau fendu complémentaire (la couleur grise représente la couche métallique), (b) le model LC de CSRR [154].

III.7 Différentes configurations géométriques des résonateurs des métamatériaux SRR

Les différentes configurations géométriques des résonateurs des métamatériaux de type SRR magnétiques (Split Ring Resonator) incluent des formes telles que : des structures à un seul anneau ou à anneaux multiples de forme circulaire ou carrée, les résonateurs SRR modifiés en forme d'oméga [148].



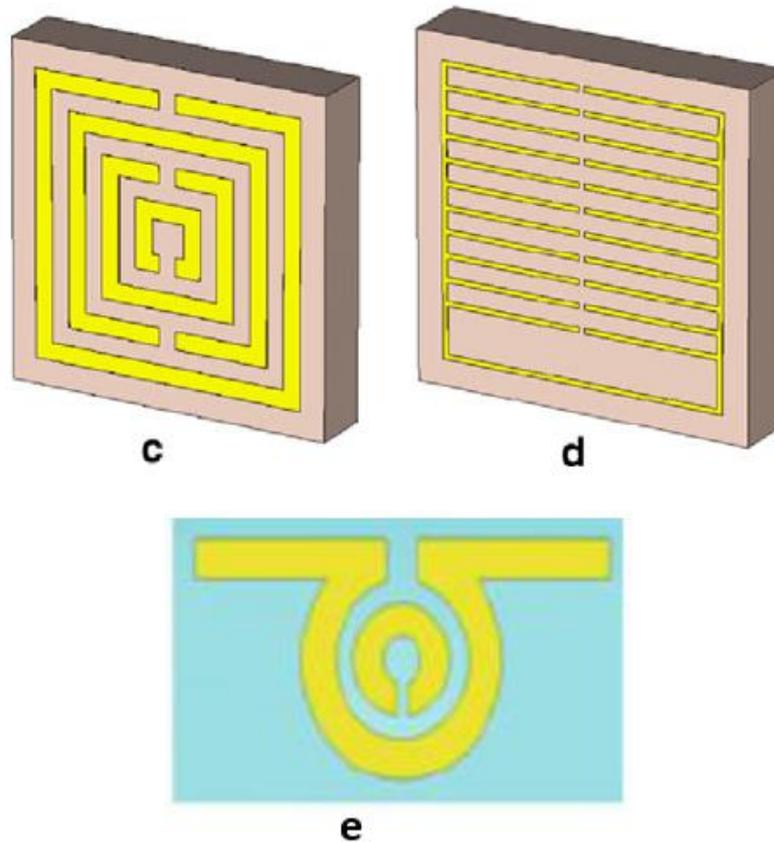


Figure III. 11 : Exemples de résonateurs magnétiques SRR (a) structure à un seul anneau (b) à deux anneaux (c) à anneaux fendus multiples (d) structure SRR imbriquée (e) SRR modifié en forme d'oméga [157].

III.8 Applications des métamatériaux

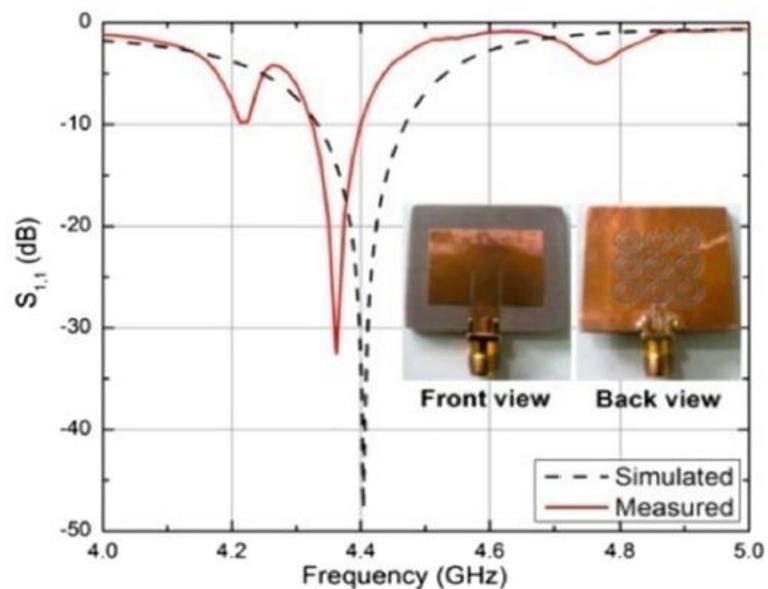
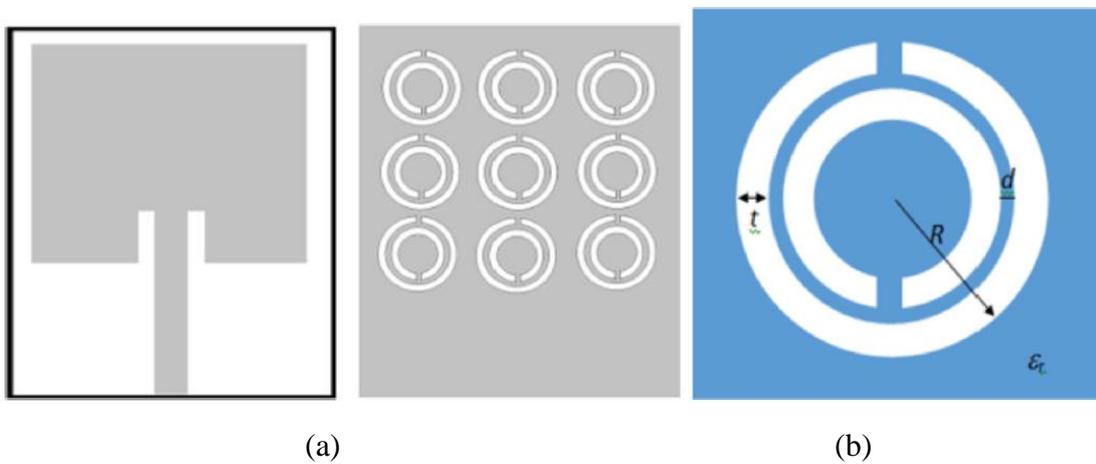
Les métamatériaux possèdent des caractéristiques physiques uniques que l'on ne trouve pas dans la nature. Ils présentent un large éventail d'applications potentielles dans divers domaines, notamment :

- **Les antennes** : l'une des applications les plus importantes des métamatériaux est la conception d'antennes. Ses caractéristiques distinctives permettent de concevoir de nouvelles antennes qui ne sont pas possibles avec les matériaux présents dans la nature. De plus, ils visent l'amélioration des performances globales en termes de bande passante, de gain, et de directivité [158]. D'après plusieurs études scientifiques, les chercheurs ont montré que l'introduction des métamatériaux dans la conception de l'antenne non seulement peut améliorer plusieurs paramètres importants, mais également peut réduire le volume global de l'antenne, autrement dit : la minimisation de leur taille tout en augmentant la puissance rayonnée [140]. Par ailleurs, ces matériaux peuvent être intégrés dans les antennes afin de minimiser le rayonnement des lobes latéraux et postérieurs ainsi que pour limiter le débit d'absorption spécifique (DAS) dans

Chapitre III Technologie des métamatériaux

les scénarios où ils sont portés sur le corps [150]. Selon la conception spécifique de l'antenne, diverses structures et applications de ces matériaux peuvent être utilisées.

Une stratégie de conception globale d'antennes patch miniaturisées en utilisant des résonateurs en anneaux fendus complémentaires (CSRR) a été présentée. Le réseau des cellules métamatériaux CSRR est placé sur le plan de masse de l'antenne (figure III.12 (a)), cela permet la réduction de la taille de l'antenne d'une manière significative tout en conservant les performances de la structure conventionnelle. Un taux de miniaturisation de 11,6 % est obtenu grâce à la charge des cellules métamatériaux. Cette méthodologie peut être étendue à la conception des autres métamatériaux électromagnétiques en vue de la miniaturisation de la taille de l'antenne [159].



(c)

Figure III. 12 : (a) Antenne patch miniaturisée. (b) Cellule métamatériaux RAFC(CSRR). (c) Coefficient de réflexion simulé et mesuré de l'antenne patch miniaturisée à 11,6 % de taille de l'antenne traditionnelle [159].

L'utilisation d'antennes à base de métamatériaux a été récemment introduite comme solution de rechange pour diverses bandes de communication afin d'améliorer les performances globales de l'antenne. Les métamatériaux sont intégrés dans l'antenne, soit en disposant leurs cellules unitaires de manière à entourer l'élément rayonnant de l'antenne, soit en les utilisant comme un plan de masse qui charge ou grave l'antenne. Il existe différentes façons d'utiliser les structures de métamatériaux pour améliorer le gain de l'antenne, quelle que soit la méthode utilisée, le type ou le nombre de cellules unitaires utilisés jouent tous un rôle important dans l'amélioration du gain. Les cellules métamatériaux peuvent être disposées de différentes manières, par exemple gravées sur l'élément rayonnant, sur le plan de masse de l'antenne ou chargées sur les deux côtés. Pour que le métamatériau ait des propriétés physiques uniques qui correspondent à la fréquence de résonance de l'antenne, la taille des cellules doit être correctement conçue. En raison de leurs caractéristiques de perméabilité négative, les cellules unitaires peuvent être simplement intégrées aux composants rayonnants. La directivité et le gain de l'antenne traditionnelle peuvent être considérablement augmentés en intégrant des métamatériaux dans la conception de l'antenne. Le nombre de cellules unitaires et la distance entre eux jouent un rôle clé sur le gain et la directivité de l'antenne conventionnelle [160]. Outre l'amélioration du gain et de la directivité des antennes classiques, les métamatériaux peuvent également être utilisés pour augmenter la largeur de la bande passante des antennes patch en suivant le même principe utilisé pour l'amélioration du gain [161].

- **Absorbeurs :** Les métamatériaux peuvent être utilisés pour créer des matériaux qui absorbent les rayonnements électromagnétiques, avec une grande efficacité dans une gamme spécifique de fréquences tels que les micro-ondes et les rayonnements infrarouges. Le premier absorbeur à base de métamatériaux de Landy (2008) utilise trois couches, deux couches métalliques et un diélectrique, il présente une absorptivité simulée de 99 % à 11,48 GHz, comme la montre la figure III.13. La différence entre les résultats simulés et mesurés est due à des erreurs de fabrication [162].

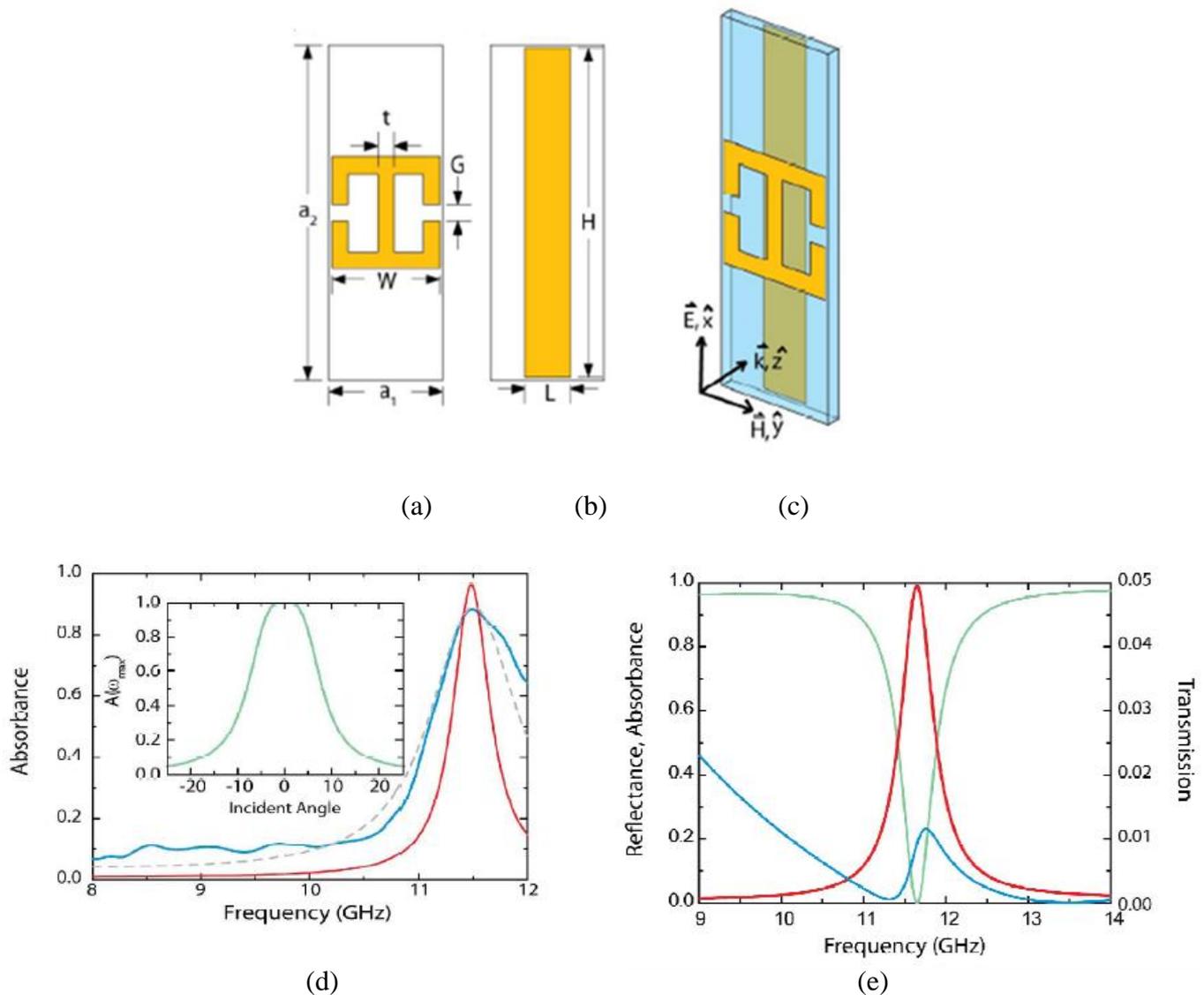


Figure III. 13: (a),(b) & (c) Absorbeur à métamatériaux et sa cellule unitaire, (d) Résultats de fabrication (e) Résultats de simulation [162].

- **Superlentilles** : le terme "superlentille" désigne généralement une lentille capable de focaliser la lumière au-delà de la limite de diffraction, ce qui permet d'obtenir des images d'une résolution supérieure à celle des lentilles traditionnelles. La réfraction du faisceau sur la forme courbe de lentille permet cette focalisation. Les métamatériaux jouent un rôle crucial dans le développement et les applications des superlentilles où elles peuvent être utilisées en microscopie optique et en imagerie [163]. Il est important de noter que le développement de superlentilles à base de métamatériaux est un domaine de recherche actif, et que les progrès continus dans ce domaine peuvent conduire à des applications supplémentaires et à des améliorations des technologies existantes.

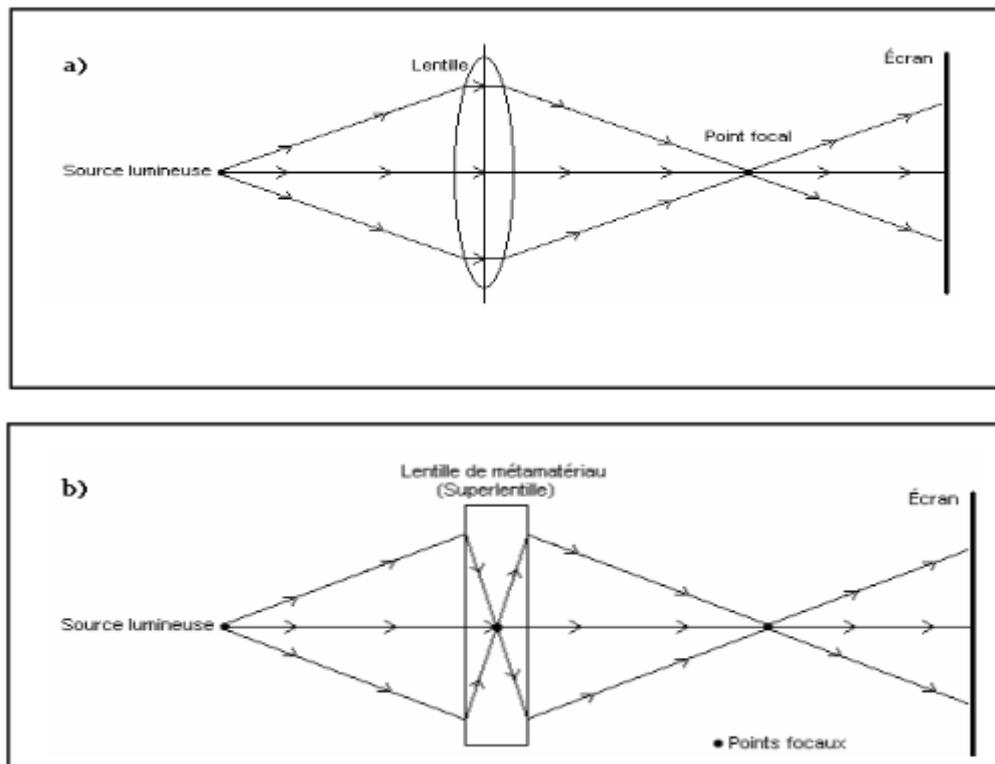


Figure III. 14 : (a) Focalisation avec une lentille ordinaire. (b) Focalisation avec une super lentille [162].

- **Cape d'invisibilité :** parmi les applications qui a suscité un vif intérêt par les chercheurs est la technologie de la cape d'invisibilité, également connue sous le nom de "Cloaking". La première fabrication a été développée par John Pendry en 2006. Il a suggéré la création d'un métamatériau permettant de contrôler et manipuler les champs électromagnétiques. Cette cape d'invisibilité a la capacité de dévier les ondes centimétriques ou micro-ondes, et de rendre un objet invisible en l'entourant d'un réseau de métamatériau tout en contrôlant les propriétés électromagnétiques de la lumière à travers un nouveau matériau optique. Cette technologie présente un potentiel important dans divers domaines, notamment la défense, la sécurité et l'optique avancée [164].

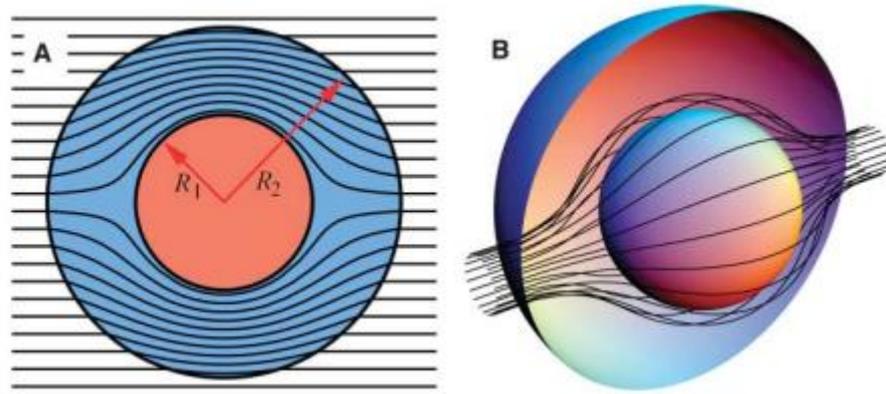


Figure III. 15 : Principe du Cloaking, les rayons contournent la sphère (objet) et se reconstruisent en aval, un observateur en aval ne voit pas l'objet. (A) Coupe transversale en 2D (B) vue 3D [139].

- **Dispositifs médicaux :** les métamatériaux peuvent être utilisés pour créer des dispositifs médicaux, tels que des bobines d'imagerie par résonance magnétique (IRM), et pour développement de capteurs biomédicaux sensibles [165].
- **Énergie :** tels que les capteurs solaires plus efficaces capables de capter l'énergie de diverses sources, telles que l'énergie solaire et thermique, ainsi que des dispositifs de conversion d'énergie améliorés [166].
- **Acoustique :** les métamatériaux peuvent être employés dans la conception de matériaux permettant de contrôler et filtrer les sons, tels que les casques antibruit, les dispositifs d'isolation phonique [167].

Ceux sont que quelques domaines d'applications potentielles des métamatériaux qui montrent la diversité des applications et leurs caractéristiques distinctives qui en font des matériaux attirants pour une variété d'utilisations dans divers secteurs.

III.9 Méthodes d'extraction des paramètres effectifs

III.9.1 Méthode de transmission-réflexion TR (Transmission-Réflexion method)

Il existe plusieurs méthodes pour extraire les paramètres effectifs des métamatériaux (ϵ et μ), pour cela, on considère l'élément unitaire d'un métamatériau avec des vecteurs de réseau dans les trois dimensions. Des conditions aux limites et des excitations appropriées sont attribuées aux différentes surfaces de l'élément unitaire tridimensionnel pour simuler le métamatériau périodique et l'excitation de ce métamatériau afin d'extraire les paramètres S. La méthode d'extraction consiste à développer une méthode pour extraire les paramètres électromagnétiques effectifs des métamatériaux inhomogènes [168].

La méthode des paramètres S est la méthode la plus courante, elle consiste à calculer les coefficients de transmission et de réflexion des ondes électromagnétiques d'épaisseur d_{eff} qui sont exprimés en fonction de l'indice de réfraction N_{eff} et de l'impédance Z_{eff} du matériau. Ces paramètres S de système peuvent être écrits comme suit :

$$S_{11} = \frac{R_{01}(1 - e^{i2N_{eff}k_0d_{eff}})}{1 - R_{01}^2(1 - e^{i2N_{eff}k_0d_{eff}})} \quad (III.9)$$

$$S_{21} = \frac{(1 - R_{01}^2)e^{i2N_{eff}k_0d_{eff}}}{1 - R_{01}^2(1 - e^{i2N_{eff}k_0d_{eff}})} \quad (III.10)$$

Où :

$$e^{iN_{eff}k_0d_{eff}} = \frac{S_{21}}{1 - S_{11}R_{01}} \quad (III.11)$$

Et :

$$R_{01} = \frac{(Z_{eff} - 1)}{(Z_{eff} + 1)} \quad (III.12)$$

Avec :

$Z_{eff}(\omega)$: Impédance complexe de l'onde incidente.

k_0 : Nombre d'onde dans l'espace libre.

d_{eff} : Epaisseur de substrat en mètre.

La résolution des équations (III.9) et (III.10) donne :

$$Z_{eff} = \pm \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}} \quad (III.13)$$

Avec le signe du côté droit de l'équation déterminé par le fait que :

Chapitre III Technologie des métamatériaux

$\text{Re}(Z_{eff}) \geq 0$ et $\text{Im}(N_{eff}) \geq 0$ en d'autre terme.

$$|e^{i2 N_{eff} k_0 d_{eff}}| \leq 1 \quad (\text{III.14})$$

Étant donné que l'indice de réfraction N est complexe, il peut être exprimé de la manière suivante :

$$N_{eff} = \frac{1}{k_0 d_{eff}} \left[\{ [\ln(e^{i N_{eff} k_0 d_{eff}})]' + 2m\pi \} - i [\ln(e^{i N_{eff} k_0 d_{eff}})]'' \right] \quad (\text{III.15})$$

Où $(.)''$ représente la composante complexe.

$(.)'$ représente la composante réelle du nombre complexe.

$$N_{eff} = N'_{eff} - iN''_{eff} \quad (\text{III.16})$$

Où :

$$N'_{eff} = \frac{\text{Re}(\ln(e^{i2 N_{eff} k_0 d_{eff}}))}{k_0 d_{eff}} + \frac{2m\pi}{k_0 d_{eff}} \quad (\text{III.17})$$

$$N''_{eff} = \frac{\text{Im}(\ln(e^{i2 N_{eff} k_0 d_{eff}}))}{k_0 d_{eff}} \quad (\text{III.18})$$

Avec : m est un nombre entier.

La permittivité (ϵ) et la perméabilité (μ) sont donc liées à l'indice de réfraction et à l'impédance par les expressions suivantes :

$$\epsilon_{eff} = \frac{N_{eff}}{Z_{eff}} \quad (\text{III.19})$$

$$\mu_{eff} = N_{eff} Z_{eff} \quad (\text{III.20})$$

III.9.2 Méthode de Nicolson-Ross-Weir (NRW)

La méthode de Nicolson-Ross-Weir (NRW) est une technique largement utilisée pour extraire les paramètres S des métamatériaux. Elle repose sur l'utilisation des formules inversés de Fresnel qui expriment les coefficients de réflexion et de transmission d'une couche de matériau composite en fonction de son impédance d'onde et de son indice de réfraction. Cette méthode a été utilisée pour la première fois dans le domaine des métamatériaux par Smith et ses collaborateurs [169],[170]. Les conditions de validité de cette méthode sont les suivantes : pour attribuer un indice à un matériau, il est nécessaire qu'un seul mode de propagation existe à la fréquence considérée. L'extraction des paramètres effectifs est réalisable uniquement

Chapitre III Technologie des métamatériaux

lorsque la longueur d'onde incidente est nettement supérieure aux dimensions et aux distances entre les composants élémentaires du milieu composite.

La méthode NRW est basée sur le calcul classique d'interférence pour obtenir la transmission et la réflexion d'une couche de matériau en fonction de son indice (effectif), de son impédance (effective) et de son épaisseur. Dans une étude menée par Smith en [171], il a été démontré qu'il est possible d'obtenir les valeurs de N_{eff} et Z_{eff} en fonction de l'épaisseur d'une couche simulée, à partir des coefficients de transmission S_{21} et de réflexion S_{11} , en inversant les formules de Fresnel.

$$\text{Im}(N_{eff}) = \pm \text{Re} \left(\frac{\arccos \left(\frac{1}{2S_{21}} [1 - (S_{11}^2 - S_{21}^2)] \right)}{k_0 d_{eff}} \right) + \frac{2\pi m}{k_0 d_{eff}} \quad (\text{III.21})$$

$$\text{Im}(N_{eff}) = \pm \text{Im} \left(\frac{\arccos \left(\frac{1}{2S_{21}} [1 - (S_{11}^2 - S_{21}^2)] \right)}{k_0 d_{eff}} \right) \quad (\text{III.22})$$

$$Z_{eff} = \pm \sqrt{\frac{(1+S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1-S_{11})^2 - S_{21}^2}} \quad (\text{III.23})$$

À partir de l'indice et de l'impédance effective, on peut également obtenir les paramètres effectifs :

$$\varepsilon_{eff} = \frac{N_{eff}}{Z_{eff}} \quad (\text{III.24})$$

$$\mu_{eff} = N_{eff} Z_{eff} \quad (\text{III.25})$$

III.9.3 Méthode de Smith

Le premier métamatériau doublement négatif (à double négativité) (DNG), constitué de fines bandes et d'un résonateur métallique en anneau fendu, conçu et développé selon le concept de Pendry et ses collaborateurs en 1999, a été réalisé et testé par Dr. Smith et ses collaborateurs en 2000. Ils ont donc analysé leurs travaux en utilisant une méthode bien définie, basée sur l'extraction des paramètres effectifs tels que la permittivité ε_r et la perméabilité μ_r à partir des paramètres S_{ij} , ainsi que de l'impédance Z_{eff} et de l'indice de réfraction N_{eff} . Cette approche permet une extraction sans ambiguïté des paramètres effectifs grâce à la nature multidimensionnelle de la fonction cosinus inverse [172].

L'impédance Z est définie par l'équation suivante :

$$Z_{eff} = \pm \sqrt{\frac{(1+S_{11})^2 + S_{21}^2}{(1-S_{11})^2 + S_{21}^2}} \quad (\text{III.26})$$

Chapitre III Technologie des métamatériaux

Avec la relation suivante, l'indice de réfraction N est calculé à partir de la fonction cosinus inverse comme suit :

$$N_{eff} = \frac{1}{k_0 d_{eff}} \cos^{-1} \left[\frac{(1 - S_{11}^2 + S_{21}^2)}{2S_{21}} \right] \quad (\text{III.27})$$

Une fois que l'impédance Z_{eff} et l'indice de réfraction N_{eff} sont calculés, la permittivité et la perméabilité effectives ϵ_{eff} et μ_{eff} peuvent être obtenues en utilisant les relations suivantes :

$$\epsilon_{eff} = \frac{N_{eff}}{Z_{eff}} \quad (\text{III.28})$$

$$\mu_{eff} = N_{eff} Z_{eff} \quad (\text{III.29})$$

III.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un état de l'art sur la technologie des métamatériaux. En premier lieu, nous avons exposé et examiné leurs diverses structures et leurs propriétés distinctives qui ne se retrouvent pas naturellement, notamment la présence simultanée de perméabilité et de permittivité négatives pour une meilleure compréhension de ces matériaux. En seconde lieu, diverses configurations géométriques des résonateurs de métamatériaux ont été évoquées. Par la suite, nous avons cité quelques applications potentielles des métamatériaux dans les différents domaines, jouant un rôle significatif dans les nouvelles technologies. En conclusion, nous avons présenté les méthodes d'extraction des paramètres effectifs.

Dans les prochains chapitres, nous proposons plusieurs structures d'antennes patch microrubans miniatures à base des métamatériaux, élaborées et simulées à l'aide du logiciel de conception CST-MWS pour les différentes applications des systèmes de télécommunications mobiles.

Chapitre IV

**Conception et validation
expérimentale d'une antenne patch
miniature à base des métamatériaux
pour la 5G**

IV Conception et validation expérimentale d'une antenne patch miniature à base des métamatériaux pour la 5G

IV.1 Introduction

La croissance exponentielle des communications mobiles requiert l'émergence de nouvelles générations de systèmes, notamment la 5G, qui jouera un rôle prépondérant. C'est la génération actuelle qui ne se limite plus à s'intéresser exclusivement au domaine des opérateurs de téléphonie mobile et des communications grand public [173]. Cette technologie vise à répondre à la demande croissante en améliorant considérablement l'efficacité spectrale du système, la triplant par rapport à l'évolution à long terme (LTE). De plus, la 5G promet d'atteindre un débit de données maximal de 20 Gbps, marquant une avancée significative dans la vitesse de transmission [174]. Elle propose diverses applications, parmi lesquelles celles qui concernent les applications des antennes 5G, telles que les antennes miniatures basées sur les cellules métamatériaux CSRR. Ces antennes peuvent être déployées pour connecter les véhicules autonomes, facilitant ainsi la progression de l'Internet des Objets (IoT) [175] et encourageant l'innovation dans des secteurs variés tels que la santé, l'industrie, les transports, et bien d'autres.

Ce chapitre se focalise sur la simulation, la réalisation et la mesure des prototypes des antennes proposées pour la nouvelle technologie 5G en recourant à deux techniques de miniaturisation différentes : les métamatériaux et les fentes. Dans ce cas, une antenne patch miniature de forme rectangulaire, basée sur des cellules métamatériaux CSRR et destinée aux applications mobiles 5G, est étudiée et présentée dans ce travail. Toutes les étapes de conception par le logiciel CST-MWS seront présentées et discutées. Cette étude aboutira à la réalisation de l'antenne de base et de ses versions miniaturisées en utilisant des métamatériaux et des fentes. Cela permettra une comparaison entre les résultats de simulations et les résultats expérimentaux.

IV.2 Présentation du logiciel CST MWS

CST MWS (CST Microwave Studio) est un logiciel de modélisation électromagnétique 3D. Il est utilisé pour concevoir, analyser et optimiser des composants et des systèmes électromagnétiques tels que les filtres, les guides d'ondes, les composants RF/microwave, la conception d'antennes...etc. Fondé par la société allemande CST (Cumputer Simulation Technology) en 1992. Grâce à une technologie révolutionnaire, CST a continuellement renforcé

Chapitre IV Conception et validation expérimentale d'une antenne patch miniature à base des métamatériaux pour la 5G
sa position de leader du marché et de la technologie dans le domaine de la simulation 3D EM Time Domain [176].

IV.3 Structure initiale de l'antenne patch rectangulaire

En général, l'élaboration d'une antenne nécessite des simulations afin d'explorer différentes solutions et les optimiser de manière efficace. Une fois que l'antenne satisfait le cahier des charges, une phase expérimentale devient indispensable pour valider les résultats obtenus par la simulation. En pratique, les résultats mesurés d'une antenne peuvent souvent différer légèrement des résultats simulés en raison de divers facteurs tels que l'emplacement des connecteurs, la qualité des soudures, etc.

IV.3.1 Géométrie de l'antenne patch initiale

L'antenne patch proposée dans cette étude est d'une forme rectangulaire, conçue par le logiciel CST Microwave Studio répondant à un cahier de charge défini comme suit :

- Un substrat diélectrique est utilisé de type **FR4** présentant une permittivité $\epsilon_r = 4,3$ et une épaisseur **h=1,5** mm.
- Ligne quart d'onde adaptée à 50 Ohm comme un type d'alimentation.
- Fréquence de résonance : 3.5 GHz.
- Un patch et un plan de masse de type "Copper".

La taille totale de l'antenne proposée est de ($W_g \times L_g = 35,32 \times 50,89$ mm). La figure IV.1 illustre la géométrie initiale de l'antenne. Cette géométrie a été obtenue par l'utilisation d'une technique d'adaptation qui est l'insertion des encoches aux coins du patch rectangulaire afin d'atteindre notre objectif d'amélioration de l'adaptation à la fréquence désirée. Le tableau IV.1 présente les dimensions optimales obtenues.

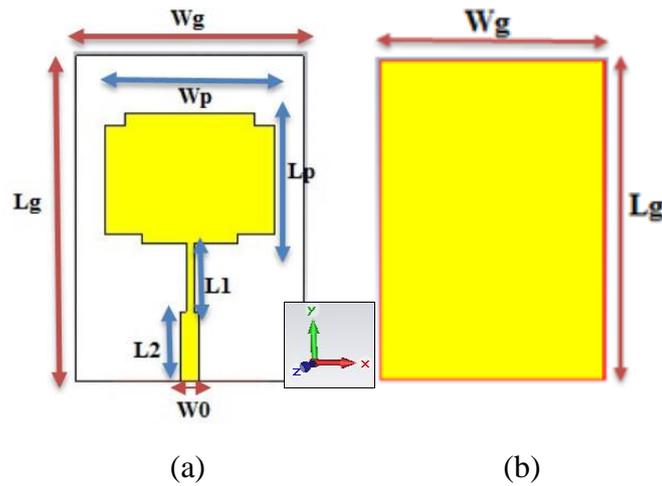


Figure IV. 1 : Antenne patch initiale : (a) vue de face (patch) , (b) vue d'arrière (plan de masse) [107].

Paramètres	Valeurs [mm]
Largeur du patch : W_p	26.32
Longueur du patch : L_p	20.25
Largeur de la ligne : W_0	2.92
Longueur de la ligne : L_1	10.82
Longueur de la ligne : L_2	10.82
Largeur de l'antenne : W_g	35.32
Longueur de l'antenne : L_g	50.89

Tableau IV. 1 : Paramètres de l'antenne patch initiale [109].

IV.3.2 Résultats de simulation

La figure IV.2 illustre les résultats de simulation, montrant un coefficient de réflexion S_{11} inférieure à -17,22 dB à la fréquence de résonance 3,5 GHz, et la figure IV.3 présente le diagramme de rayonnement de l'antenne en 2D et en 3D. Il convient de mentionner que le rayonnement est quasi omnidirectionnel.

Chapitre IV Conception et validation expérimentale d'une antenne patch miniature à base des métamatériaux pour la 5G

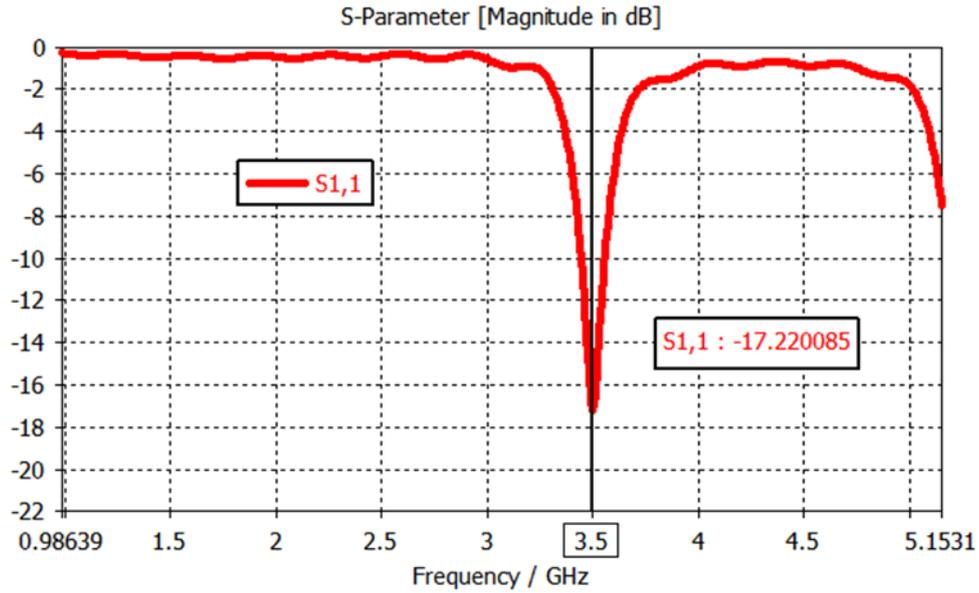
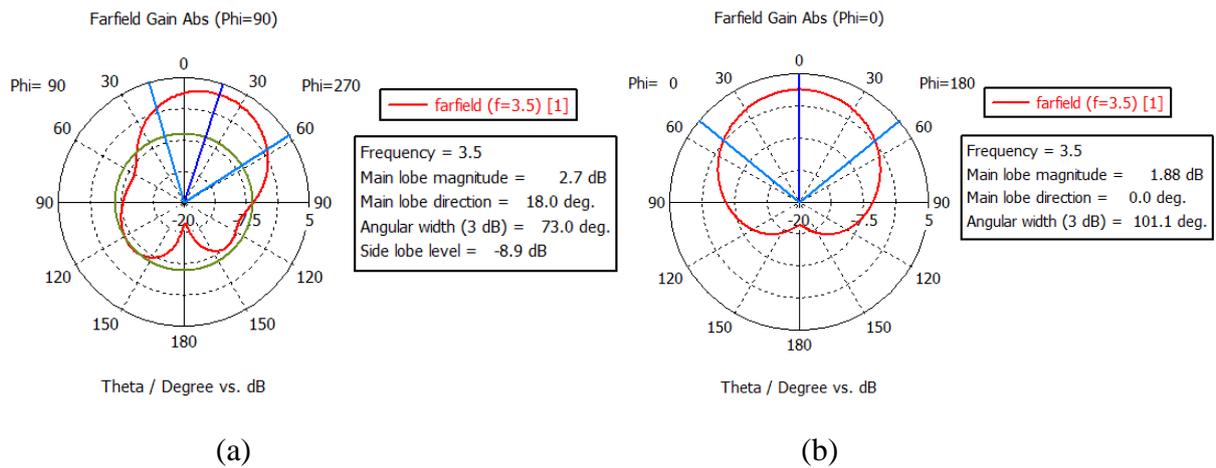
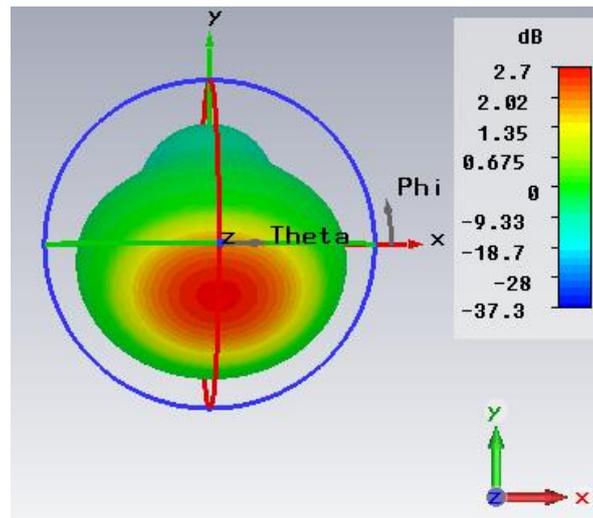


Figure IV. 2 : Coefficient de réflexion de l'antenne initiale proposée [107].





(c)

Figure IV. 3 : Diagrammes de rayonnement de l'antenne initiale proposée (a) et (b) en 2D , (c) en 3D [107].

IV.4 Miniaturisation de l'antenne patch proposée à base des cellules métamatériaux CSRR

IV.4.1 Conception des cellules CSRR adaptés pour la 5G

Dans notre travail, nous nous concentrons sur l'étude d'un résonateur en anneau fendu complémentaire (CSRR) et son utilisation pour réduire la taille de l'antenne patch proposée. Ce résonateur en cuivre est positionné sur un substrat diélectrique de type FR-4, doté d'une permittivité relative $\epsilon_r = 4.3$ et une épaisseur $h = 1,5 \text{ mm}$. Les deux anneaux en forme carré de la cellule CSRR sont placés de manière concentrique et séparés par un espace de 0,9 mm. L'anneau extérieur mesure 5,2 mm sur le côté extérieur, tandis que l'anneau intérieur mesure 4 mm sur le côté extérieur. La bande de chaque anneau a une largeur de 0,3 mm, avec une découpe sur l'un de ses côtés créant un espace de 0,59 mm. Ces dimensions ont été définies de manière à obtenir une permittivité négative dans les environs de la fréquence de résonance. La cellule CSRR est alimentée par deux ports, l'un situé à gauche et l'autre à droite, comme indiqué dans la figure IV.4. Les valeurs du coefficient de transmission S_{21} et du coefficient de réflexion S_{11} sont données dans la figure IV.5.

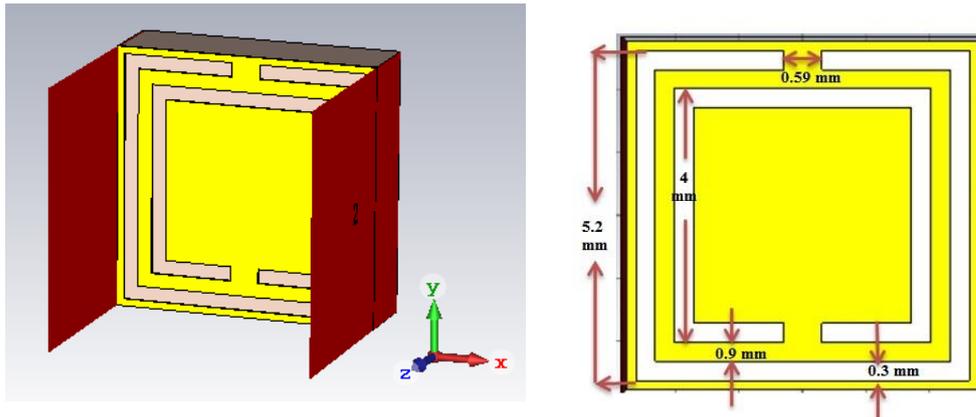


Figure IV. 4 : Cellule CSRR proposée [107].

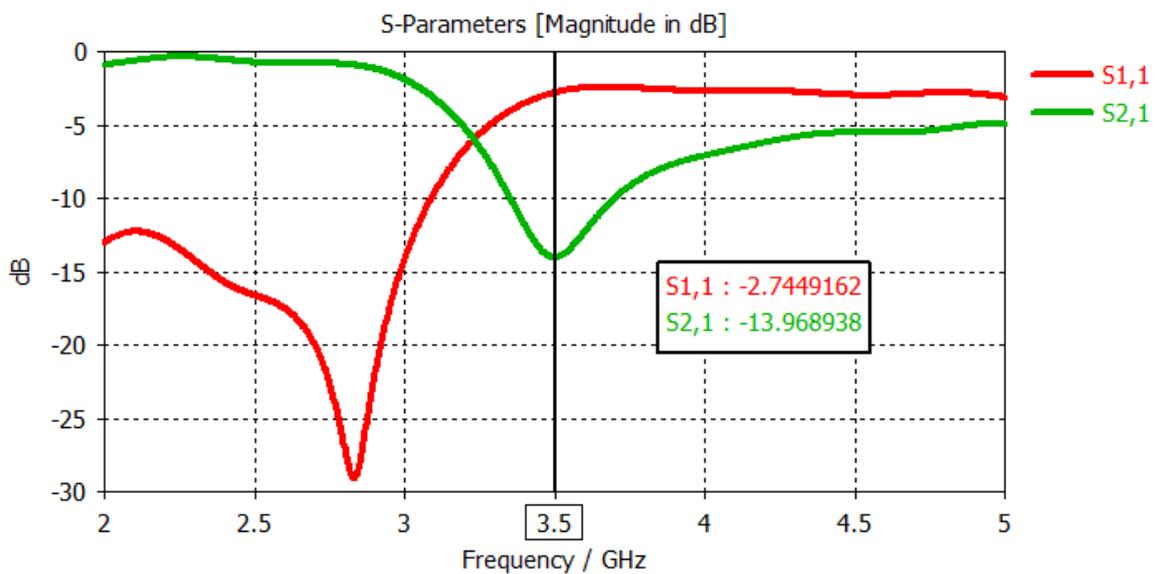
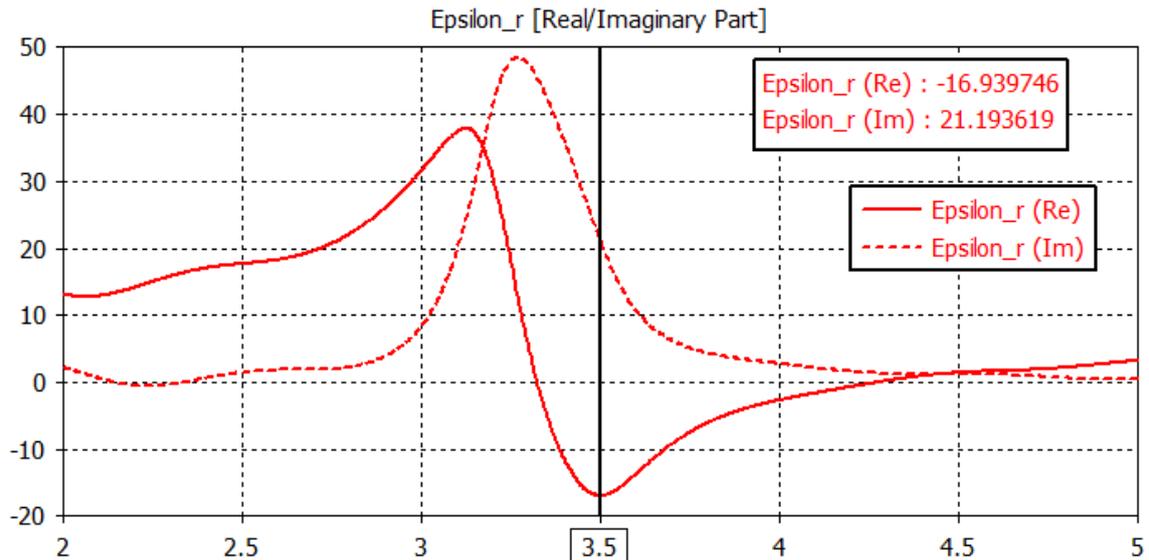


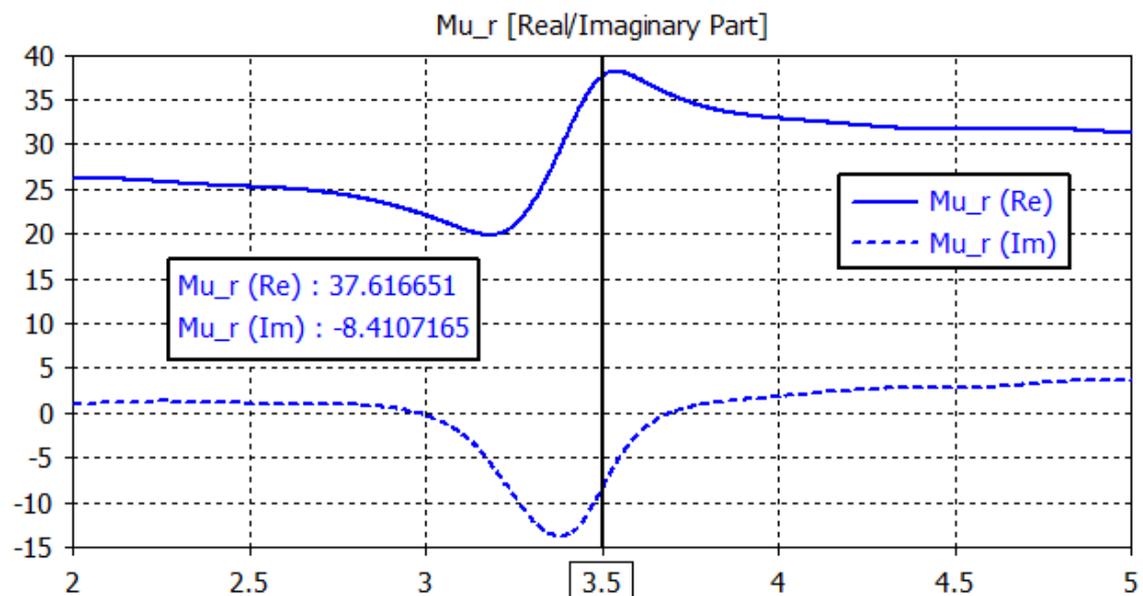
Figure IV. 5 : Coefficients de réflexion et de transmission de la cellule CSRR [107].

Les résultats obtenus, illustrés par la figure IV.5, sont satisfaisants en termes de coefficient de réflexion S_{11} qui donne une valeur inférieure à $-2,74$ dB, tandis que le coefficient de transmission S_{21} est approximativement de $-13,97$ dB à la fréquence de $3,5$ GHz.

La figure IV.6 illustre la permittivité relative (ϵ_r) et la perméabilité relative (μ_r) déduites des paramètres (S). Dans la figure IV.6 (a), on observe que la partie réelle de la permittivité relative (ϵ_r) est négative dans la bande de fréquence autour de la résonance de $3,5$ GHz, tandis que dans la figure IV.6 (b), la partie réelle de la perméabilité relative (μ_r) reste positive sur toute la bande de travail.



(a)



(b)

Figure IV. 6 : Permittivité et la perméabilité de la cellule CSRR proposée.

IV.4.2 Insertion des cellules CSRR sur le plan de masse de l'antenne patch proposée

La figure IV.7 expose la configuration géométrique de notre antenne patch rectangulaire avec la gravure d'un réseau de cellules métamatériaux CSRR sur le plan de masse. Dans ce cas, différentes configurations de la cellule élémentaire du CSRR au niveau du plan de masse ont été étudié afin de choisir la disposition la plus favorable en vue de la miniaturisation de l'antenne.

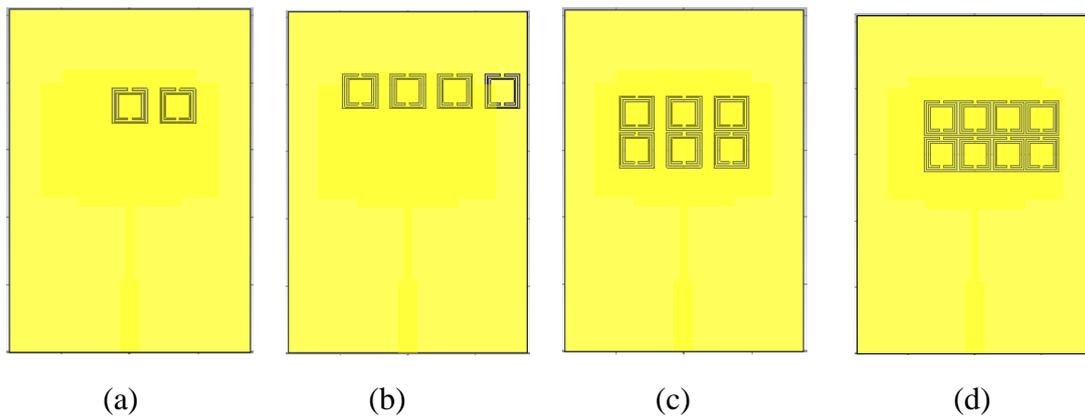


Figure IV. 7 : Insertion des cellules CSRR sur le plan de masse, (a) 2 cellules, (b) 4 cellules, (c) 6 cellules et (d) 8 cellules [107].

La figure IV.8 présente les étapes d'intégration des cellules CSRR dans le plan de masse afin d'atteindre une fréquence aussi basse que possible, soit 3,5 GHz, permettant ainsi d'obtenir un taux de miniaturisation élevé tout en revenant à la fréquence 3,5 GHz.

- **Insertion de 2 cellules CSRR :** On constate un pic du coefficient de réflexion de -24.203 dB à la fréquence 3.225 GHz. En conséquence, la fréquence trouvée est inférieure à la fréquence de fonctionnement 3.5 GHz.
- **Insertion de 4 cellules CSRR :** On constate un pic du coefficient de réflexion de -31.761 dB à la fréquence 3.155 GHz. De même, cette bande de fréquence est inférieure à la fréquence de travail désirée.
- **Insertion de 6 cellules CSRR :** On constate un coefficient de réflexion avec une crête de -16.11 dB à la fréquence 2.98 GHz, laquelle est inférieure à la fréquence de fonctionnement 3.5 GHz.
- **Insertion de 8 cellules CSRR :** On constate un pic du coefficient de réflexion de -42.225 dB à la fréquence 1.96 GHz, donc cette dernière est inférieure à la fréquence souhaitée.

En conséquence, l'insertion d'un réseau de 8 cellules CSRR conduit à une fréquence d'environ 2 GHz, ce qui est très satisfaisant dans notre cas. Ce résultat obtenu signifie que l'antenne peut être miniaturisée tout en maintenant sa fréquence initiale 3,5 GHz avec un taux de miniaturisation de 48 %.

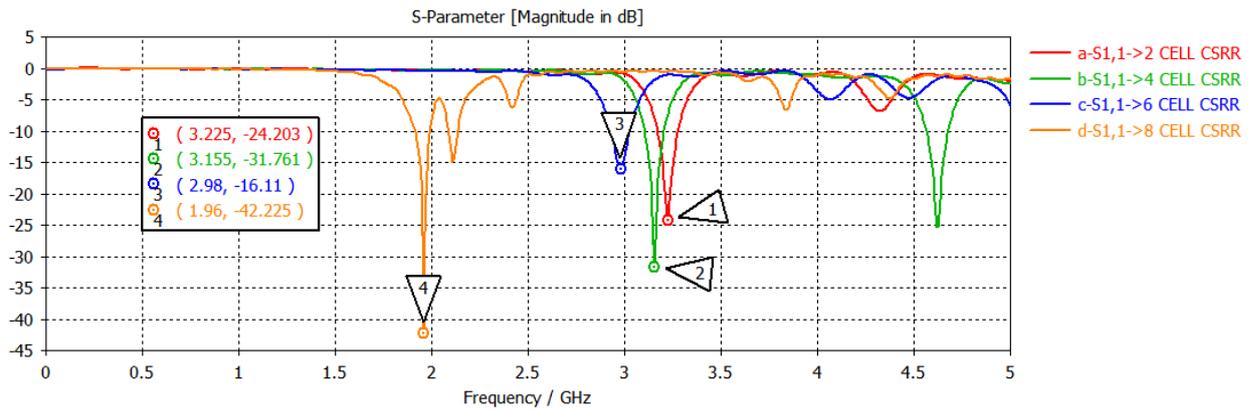


Figure IV. 8 : Coefficients de réflexion des quatre antennes proposées à base des métamatériaux [107].

IV.4.3 Adaptation de l'antenne patch miniature proposée

La géométrie et les dimensions finale de l'antenne miniature de forme rectangulaire sont présentées respectivement à la figure IV.9 et dans le tableau IV.2.

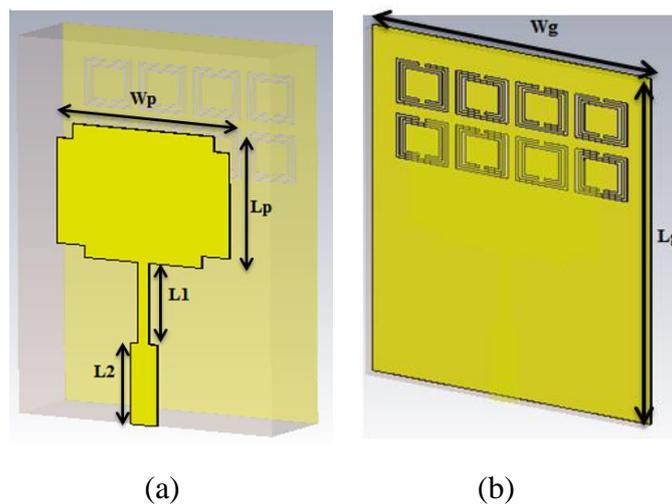


Figure IV. 9 : Structure géométrique de l'antenne miniaturisée équipée d'un réseau de 8 CSRR. (a) vue d'avant : patch, (b) vue d'arrière : plan de masse [107].

Paramètres	Dimensions [mm]
L_p	14.45
W_p	19
L_1	8.85
L_2	8.85
L_g	41.15
W_g	28

Tableau IV. 2: Dimensions de l'antenne miniature de forme rectangulaire proposée [107].

La figure IV.10 présente une étude paramétrique effectuée sur l'espacement entre les 8 cellules CSRR dans le but de déterminer la meilleure configuration et la position la plus

Chapitre IV Conception et validation expérimentale d'une antenne patch miniature à base des métamatériaux pour la 5G appropriée pour atteindre une bonne adaptation de notre antenne miniature proposée à la fréquence de résonance 3.5GHz.

- **Pour un espacement de 0.5 mm** : On constate un pic de -28.914 dB autour de la fréquence 3.385 GHz, ce qui montre une inadaptation à la fréquence désirée.
- **Pour un espacement de 1 mm** : On constate un pic de -46.03 dB à la fréquence 3.5 GHz, ce qui donne une puissance réfléchie nulle à la fréquence de résonance souhaitée.
- **Pour un espacement de 1.5 mm** : On constate un pic de -25.35 dB autour de la fréquence 3.575 GHz, ce qui présente également une désadaptation à la fréquence de fonctionnement.

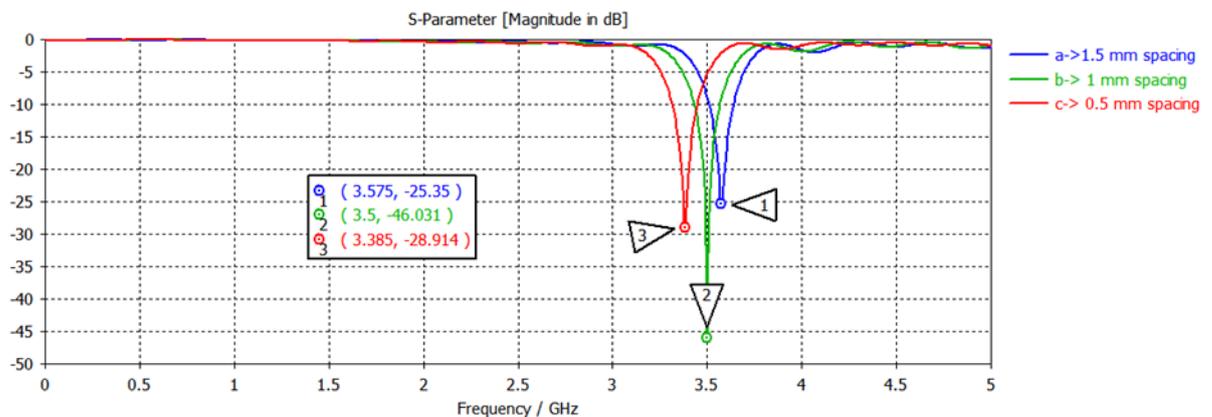


Figure IV. 10 : Influence de l'espacement entre les 8 cellules CSRR sur l'adaptation de l'antenne [107].

D'après l'étude paramétrique effectuée sur l'espacement des cellules CSRR, on remarque que le coefficient de réflexion de l'antenne miniature finale proposée est de -46,03 dB, cela montre que cette structure est idéalement adaptée à la fréquence de fonctionnement de 3,5 GHz pour les applications 5G. Ce résultat est illustré sur la figure IV.11.

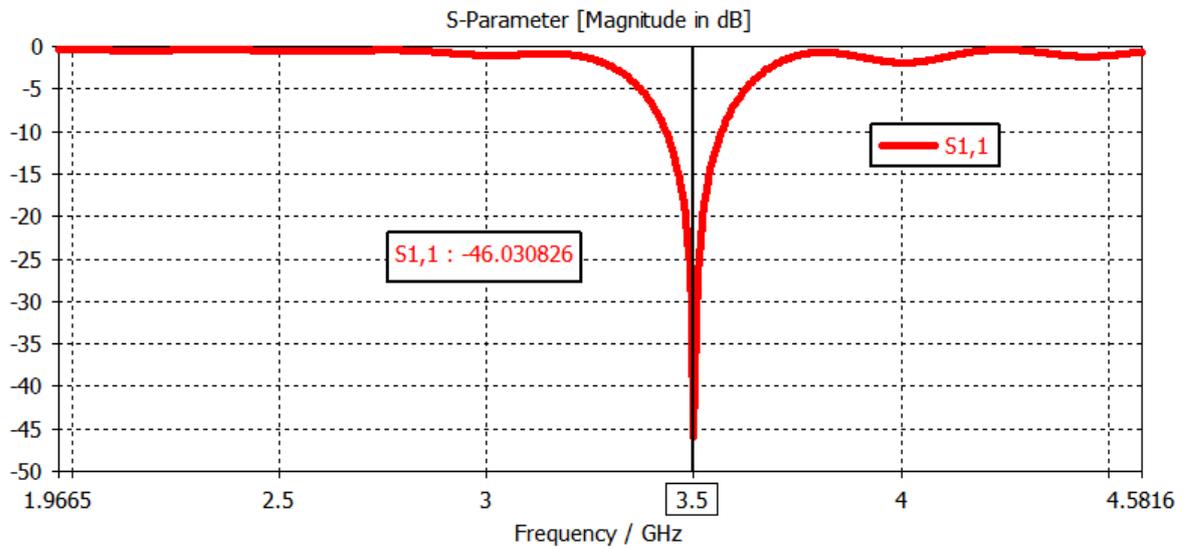


Figure IV. 11 : Coefficient de réflexion de l'antenne miniature proposée [107].

Le taux d'onde stationnaire (VSWR) de l'antenne finale miniaturisée, montré par la figure IV.12, est de 1,0103 à la fréquence de résonance 3.5 GHz. Comme observé, il est inférieur à 2, ce qui est très satisfaisant en termes d'adaptation.

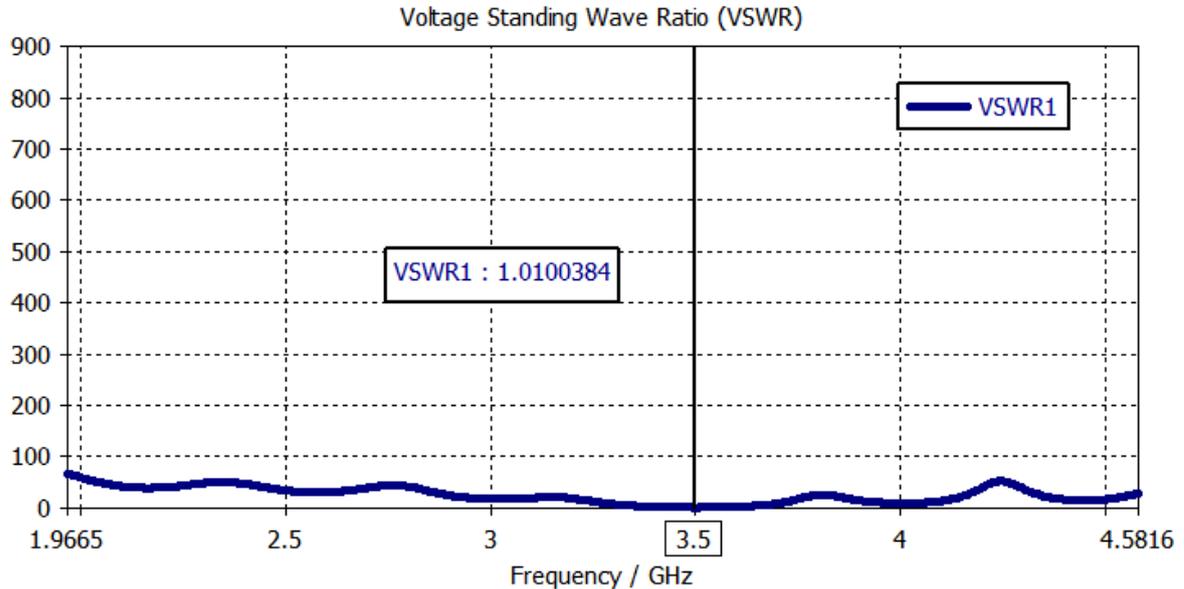


Figure IV. 12 : Taux d'onde stationnaire de l'antenne miniature proposée [107].

D'après les résultats de simulation, des performances satisfaisantes ont été obtenues par l'antenne miniature conçue à la fréquence de travail en termes de coefficient de réflexion, qui est bien adapté à 3.5 GHz. Cependant, il convient de noter que la bande passante obtenue est relativement étroite (135 MHz). Pour élargir la largeur de bande de l'antenne miniature, nous

Chapitre IV Conception et validation expérimentale d'une antenne patch miniature à base des métamatériaux pour la 5G

avons utilisé la technique du plan de masse partiel (DGS : Defected Ground Structure), la plus couramment utilisée pour améliorer les performances de l'antenne.

IV.4.4 Elargissement de la bande passante de l'antenne miniature avec la technique DGS

Notre antenne miniature proposée est spécifiquement conçue pour les applications 5G qui fonctionne dans la plage de fréquence [3,4-3,8] GHz. Cependant, l'inconvénient notable est la relative étroitesse de sa bande passante avec une valeur de 135 MHz. Cela pourrait entraîner des limitations dans son utilisation pour les applications 5G. Afin d'améliorer la largeur de bande, nous avons utilisé la méthode du plan de masse partiel (DGS en anglais), comme indiqué dans la figure IV.13, où nous avons inséré trois fentes de forme rectangulaire sur le plan de masse en modifiant sa géométrie. Cette technique a favorisé l'augmentation de la bande passante de 135 MHz à 774 MHz.

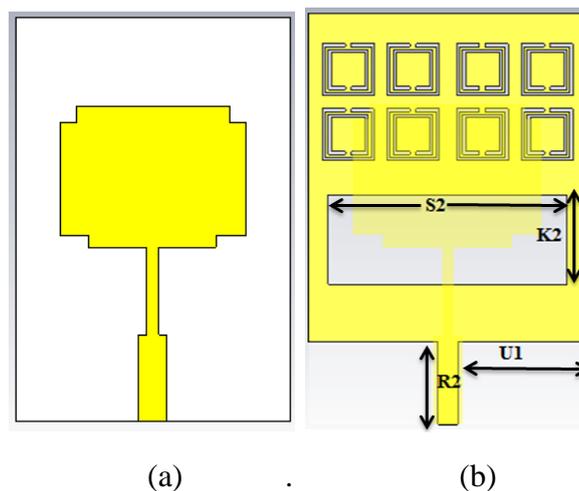


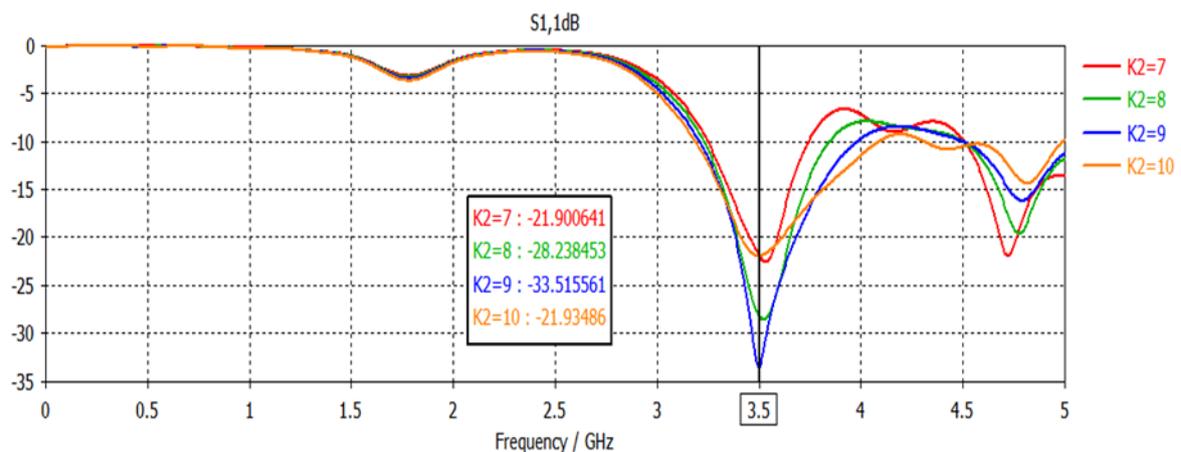
Figure IV. 13 : Antenne miniature proposée avec DGS, (a) vue avant : patch, (b) vue arrière : plan de masse [107].

Pour assurer une bonne adaptation en termes de largeur de bande, plusieurs études paramétriques ont été menées en variant la largeur et la longueur des fentes DGS insérées dans le plan de masse de notre antenne miniature. La figure IV.14 illustre les études paramétriques qui ont été réalisées pour les différentes valeurs des longueurs K2 et R2 et des largeurs S2 et U1. On remarque bien l'influence de ces paramètres sur la variation du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence de résonance.

Chapitre IV Conception et validation expérimentale d'une antenne patch miniature à base des métamatériaux pour la 5G

• Etude paramétrique de la longueur K2

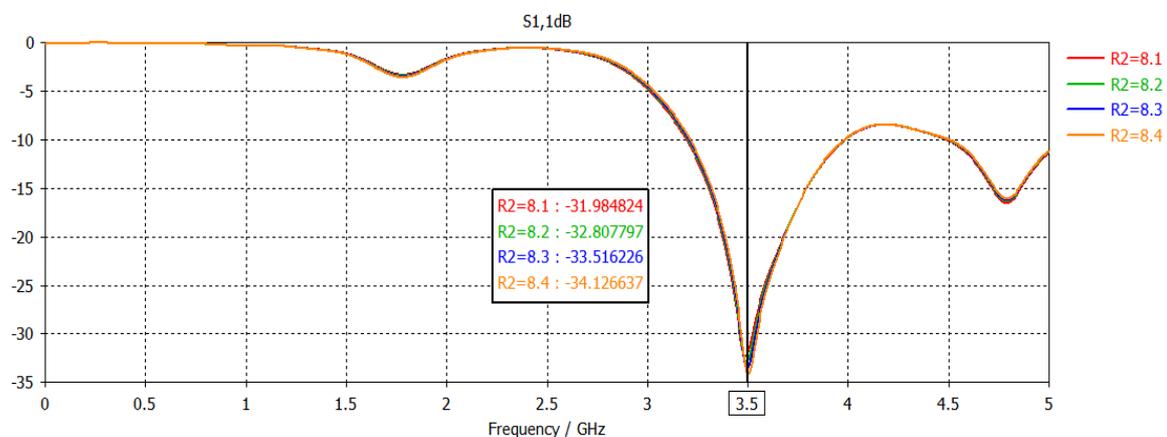
Les courbes présentées dans la figure IV.14 (a) illustrent la variation de la longueur K2 de la fente rectangulaire ajoutée au plan de masse de l'antenne miniature proposée. Les résultats obtenus montrent que l'augmentation de la longueur K2 conduit à une amélioration significative de l'adaptation de l'antenne, avec un coefficient de réflexion atteignant -33.51 dB à la fréquence souhaitée, ainsi qu'un élargissement de la bande passante. Ces résultats optimaux correspondent à $K2 = 9$ mm.



(a)

• Etude paramétrique de la longueur R2

La Figure IV.14 (b) illustre la variation de la longueur R2 des deux fentes insérées à l'extrémité du plan de masse de l'antenne miniature proposée. On peut clairement constater que l'augmentation du coefficient de réflexion et l'élargissement de la bande passante sont légèrement améliorées par l'augmentation de la longueur R2 de la fente, et la valeur qui semble la plus prometteuse est pour $R2 = 8.4$ mm (Figure IV.14 (b)).

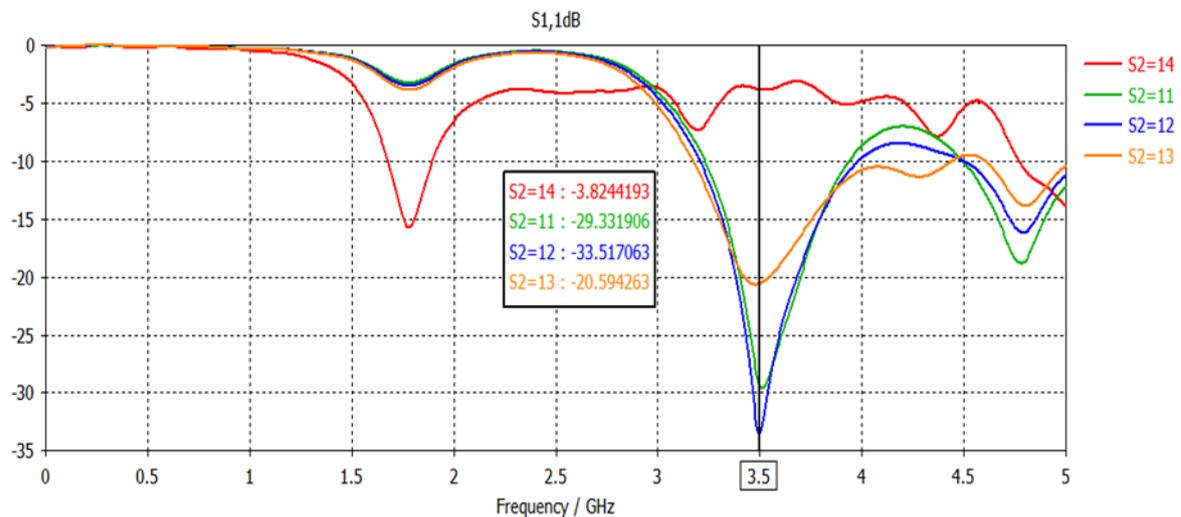


(b)

Chapitre IV Conception et validation expérimentale d'une antenne patch miniature à base des métamatériaux pour la 5G

• Etude paramétrique de la largeur S2

Les résultats de la Figure IV.14 (c) montrent que l'augmentation de la largeur S2 de la fente rectangulaire ajoutée au plan de masse de l'antenne miniature proposée entraîne deux effets principaux. Premièrement, le coefficient de réflexion augmente à mesure que la largeur de la fente diminue. Cela signifie que plus la fente est large, plus une partie du signal est réfléchi au lieu d'être transmise par l'antenne. Deuxièmement, l'élargissement de la bande passante est observé avec une augmentation de la largeur de la fente. Cela indique que l'antenne peut fonctionner sur une gamme plus large de fréquences à mesure que la fente devient plus large. En résumé, la dimension optimale en termes d'adaptation de coefficient de réflexion et d'élargissement de la bande passante est de $S2=12$ mm.

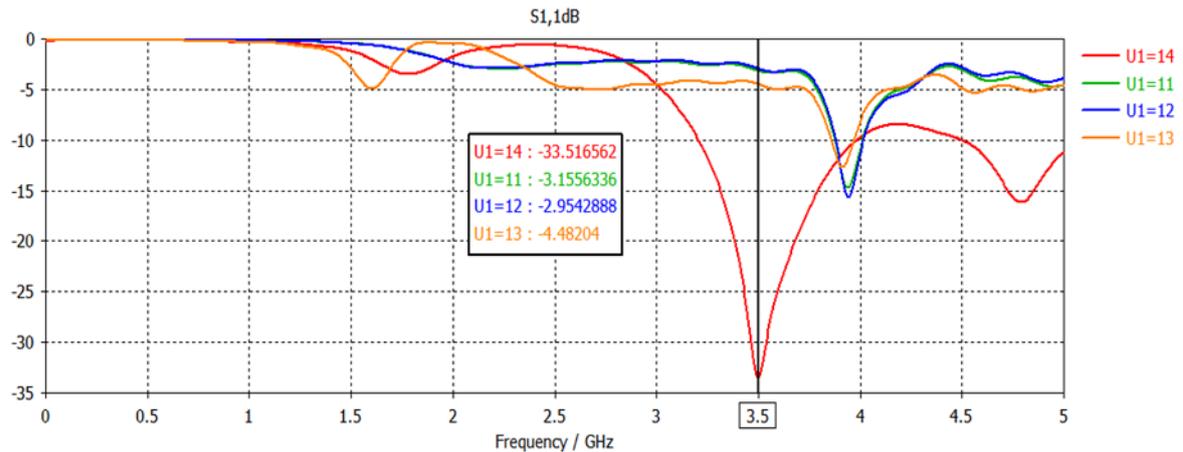


(c)

• Etude paramétrique de la largeur U1

En se basant sur les données fournies dans la figure IV.14 (d), il est observé que l'augmentation de la largeur U1 des deux fentes ajoutées à l'extrémité du plan de masse de l'antenne miniature proposée élargit la bande passante de l'antenne. La largeur U1 qui donne le meilleur résultat est égale à 14 mm.

Chapitre IV Conception et validation expérimentale d'une antenne patch miniature à base des métamatériaux pour la 5G



(d)

Figure IV. 14: Coefficients de réflexions pour différentes valeurs de la longueur K2 (a) et R2 (b), et pour différentes valeurs de la largeur S2 (c) et U1 (d) [107].

Les dimensions finales obtenues des fentes sont indiquées dans le tableau IV.3 ci-dessous.

Paramètres	Dimensions [mm]
K2	9
S2	12
U1	14
R2	8.4

Tableau IV. 3 : Dimensions finales des différents paramètres du DGS [107]

Les figures IV.15, IV.16 et IV.17 présentent respectivement le coefficient de réflexion, le taux d'onde stationnaire et le gain après l'amélioration de la bande passante. Ces résultats montrent que le niveau de la puissance réfléchie S11 est autour de 34,01 dB et le VSWR présente une valeur de 1,04 qui est inférieur à 2. Ceci est signifié que l'adaptation est bien réalisée à la fréquence désirée. Le gain est d'environ 3,44 dB à la fréquence opérationnelle de 3,5 GHz.

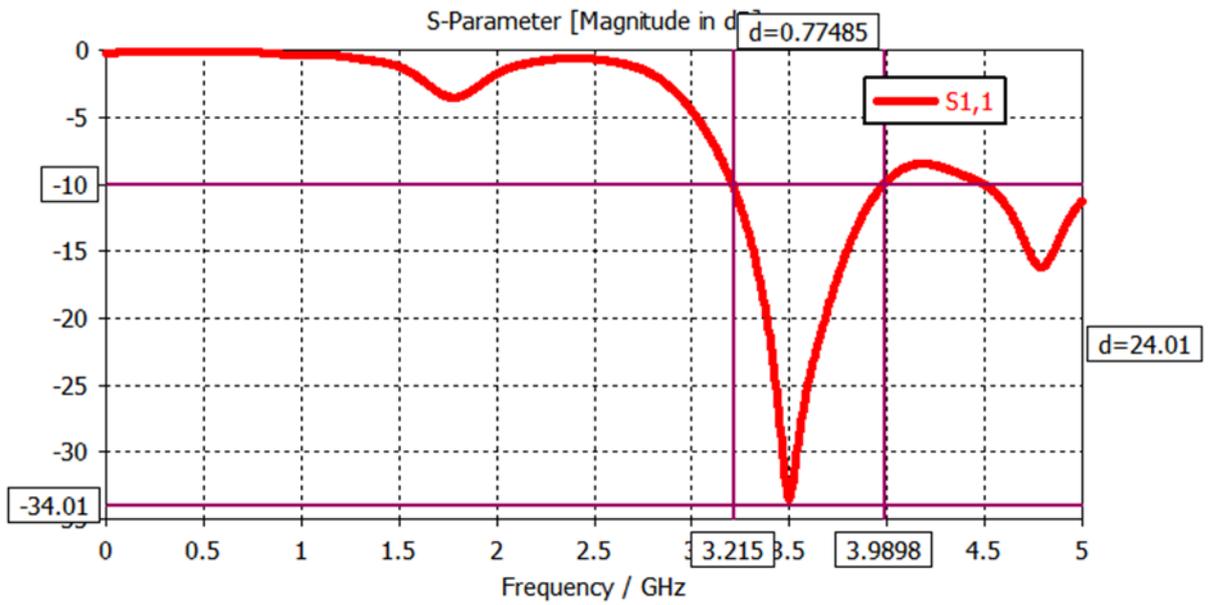


Figure IV. 15 : Coefficient de réflexion de l'antenne miniature finale proposée [107].

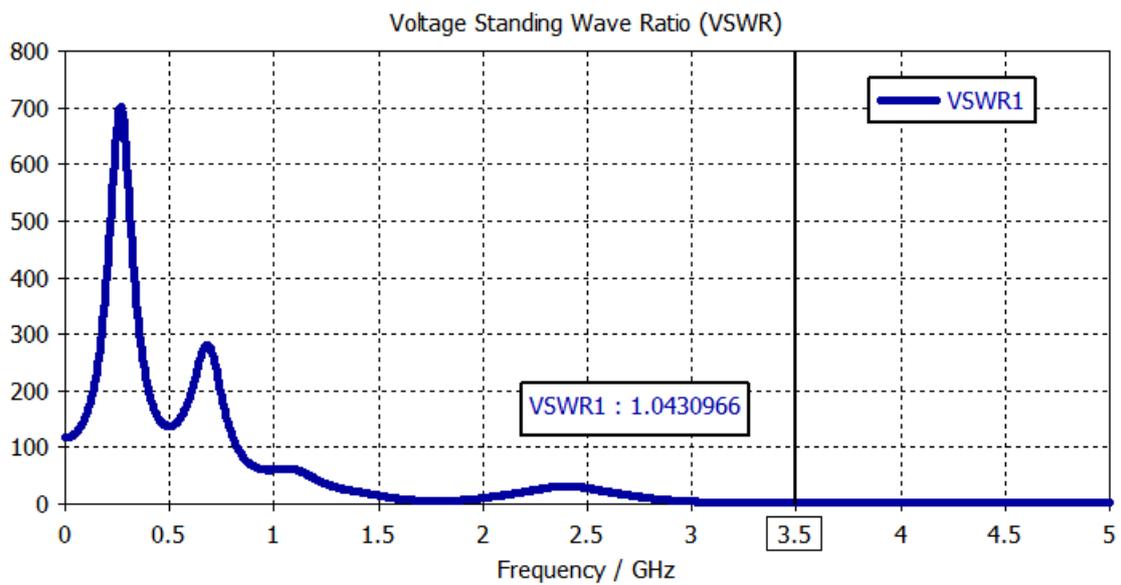


Figure IV. 16 : Taux d'onde stationnaire de l'antenne miniature finale proposée [107].

Chapitre IV Conception et validation expérimentale d'une antenne patch miniature à base des métamatériaux pour la 5G

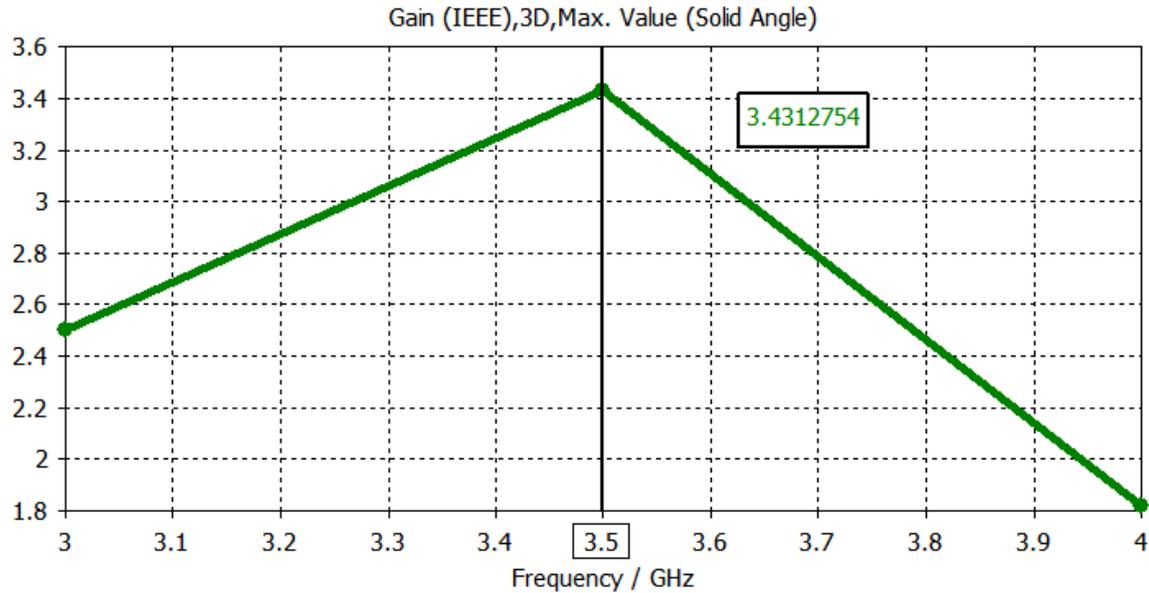
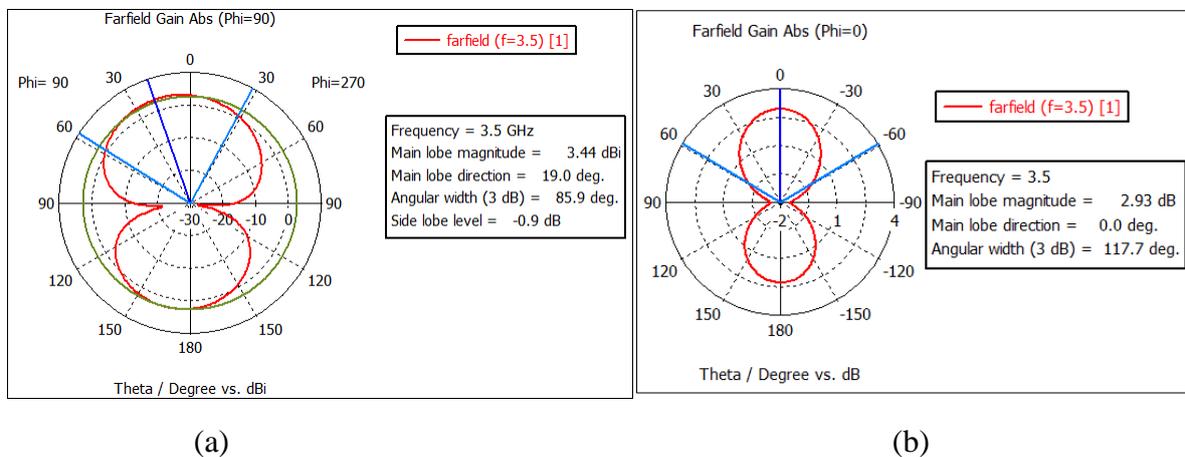
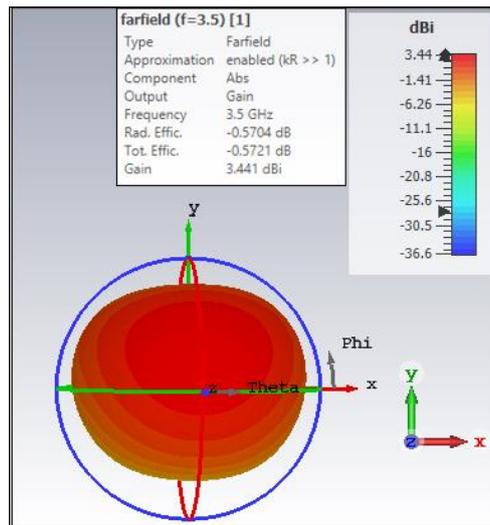


Figure IV. 17 : Gain de l'antenne miniature finale proposée [107].

Dans la figure IV.18, nous présentons les diagrammes de rayonnement polaires en 2D et en 3D de l'antenne finale proposée à la fréquence de résonance de 3,5 GHz, respectivement. Nous pouvons observer que l'antenne présente un rayonnement bipolaire dans le plan E ($\varphi = 0^\circ$) et la plan H ($\varphi = 90^\circ$).



Chapitre IV Conception et validation expérimentale d'une antenne patch miniature à base des métamatériaux pour la 5G



(c)

Figure IV. 18 : Diagrammes de rayonnement de l'antenne proposée (a) et (b) en 2D, (c) en 3D [107].

Le tableau IV.4 ci-dessus résume les résultats de la simulation concernant le coefficient de réflexion, le gain, la largeur de bande et l'efficacité de l'antenne miniature finale proposée à base des métamatériaux.

	Antenne initiale	Antenne miniature avec 8 cellules CSRR
Wp×Lp (patch) [mm]	26.32 × 20.25	19 × 14.45
Fréquence [GHz]	3.5	3.5
S11 [dB]	-17.22	-33.51
BP [MHz]	110	774
Gain [dB]	2.7	3.44
Efficacité %	39%	86%

Tableau IV. 4 : Résultats de simulation de l'antenne miniature proposée à base des métamatériaux [107].

Le tableau IV.5 présente une comparaison des résultats de la simulation de notre travail avec d'autres travaux de la littérature. Nos résultats sont très satisfaisants pour les applications 5G.

Références	Fréquence de résonance [GHz]	Dimensions de substrat (W×L) [mm × mm]	Bande passante [MHz]	Gain [dB]
[177]	3.5	30 × 45	200	5.82
[178]	3.597	65.68 × 39.4	101.5	2.93
Travail proposé	3.5	28 × 41.15	774	3.44

Tableau IV. 5 : Comparaison des résultats de la simulation avec d'autres travaux de la littérature [107].

IV.5 Résultats de mesures et validations expérimentales

IV.5.1 Antenne rectangulaire initiale proposée

Afin de valider notre étude complète de simulation réalisée par le logiciel CST MWS, il est indispensable de faire la fabrication de notre antenne proposée. Le prototype de notre antenne patch initiale proposée de forme rectangulaire est montré sur la figure IV.19. Comme il est présenté sur la figure IV.20, le coefficient de réflexion demeure pratiquement le même lorsqu'il est mesuré et simulé. La légère différence entre les résultats de simulation et les mesures expérimentales s'explique principalement par les tolérances de fabrication, l'inégalité de la soudure, ainsi que la qualité du connecteur SMA.

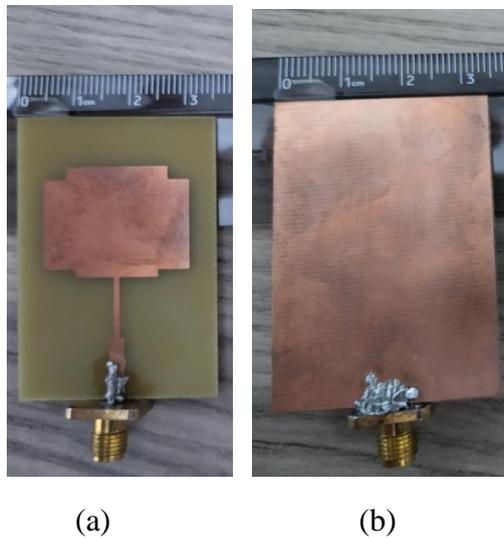


Figure IV. 19: Prototype de l'antenne rectangulaire initiale proposée, (a) vue du patch, (b) vue de plan de masse [107].

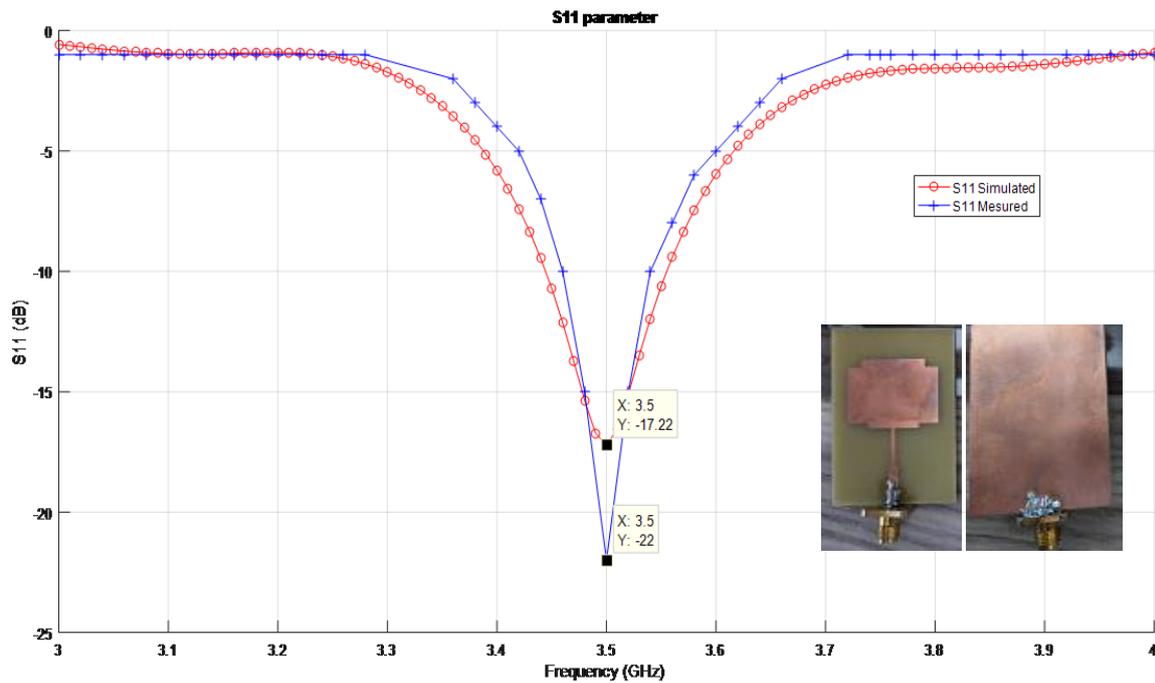
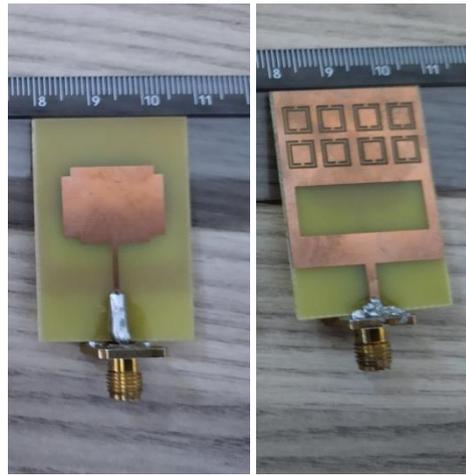


Figure IV. 20 : Coefficient de réflexion simulé et mesuré de l'antenne patch de forme rectangulaire initiale [107].

IV.5.2 Antenne miniature finale à base des métamatériaux et la technique DGS

L'antenne miniature finale proposée à base des cellules métamatériaux CSRR et la technique DGS, est fabriquée et mesurée. Le prototype et le coefficient de réflexion simulé et mesuré sont présentés par la figure IV.21 et la figure IV.22 respectivement. Le résultat mesuré indique que l'antenne miniature proposée présente un coefficient de réflexion autour de -28 dB à la fréquence de résonance de 3.5 GHz. Donc cette nouvelle configuration géométrique trouve leur application dans les réseaux mobiles 5G.



(a)

(b)

Figure IV. 21 : Prototype de l'antenne miniature proposée à base des cellules métamatériaux CSRR et la technique DGS, (a) vue du patch, (b) vue de plan de masse [107].

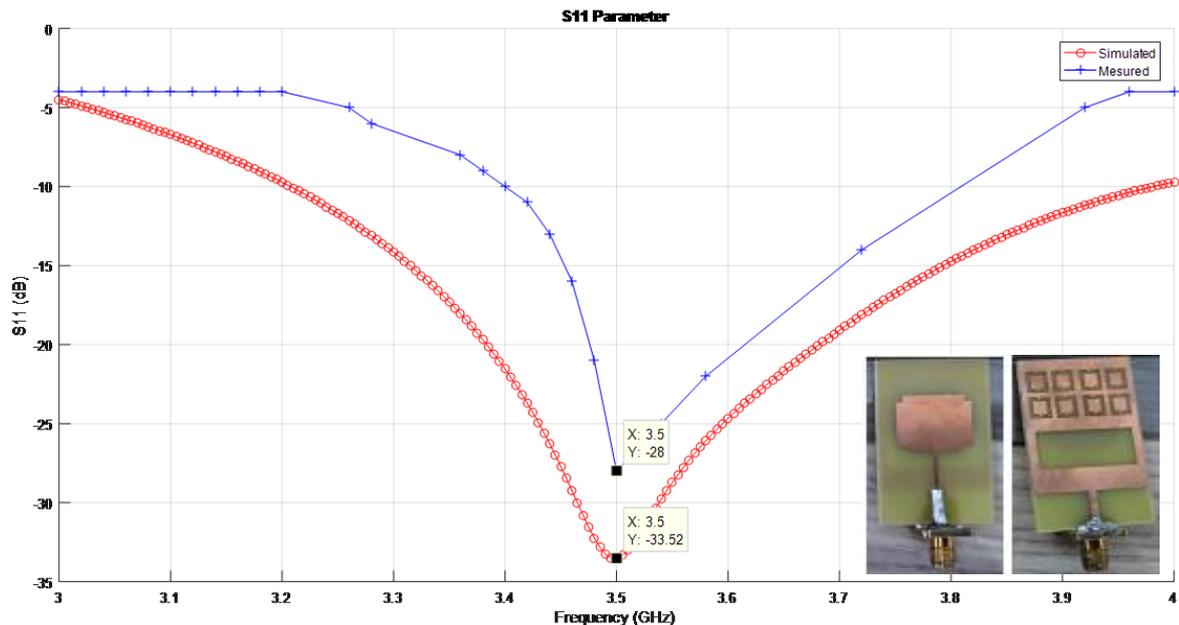


Figure IV. 22: Coefficients de réflexion simulé et mesuré de l'antenne miniature avec des métamatériaux et la technique DGS [107].

IV.6 Comparaison entre l'antenne patch miniature à fentes et l'antenne miniature finale à base des métamatériaux

Dans cette partie, nous allons présenter une comparaison entre l'antenne patch rectangulaire miniaturisée par les cellules métamatériaux CSRR, et la même antenne miniaturisée par des fentes afin d'observer l'effet des métamatériaux sur la miniaturisation des antennes micro-ruban. La figure IV.23 et le tableau IV.6 montrent la géométrie et les paramètres de l'antenne miniature à fentes respectivement.

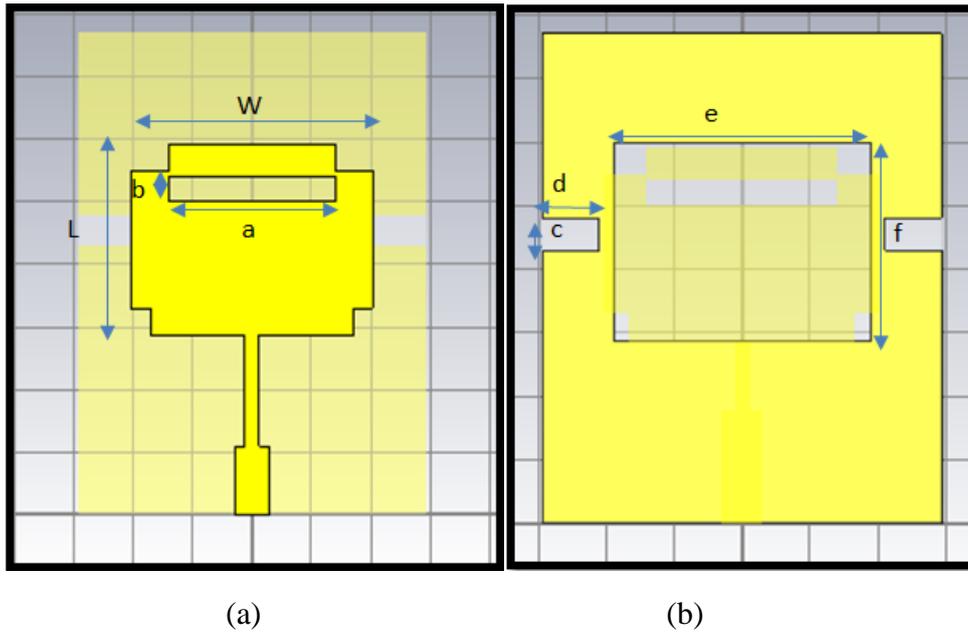


Figure IV. 23 : Antenne miniature proposée avec fentes : (a) Vue d'avant (patch), (b) vue d'arrière (plan de masse) [179].

Paramètres	Dimensions [mm]
L	15.25
W	20.32
a	14
b	2
C	2.5
d	4.5
e	18.94
f	15.75

Tableau IV. 6 : Paramètres de l'antenne patch miniaturisée par fentes [179].

La figure IV.24 montre le prototype de l'antenne miniature à fentes. Les résultats de simulation et de mesure sont présentés par la figure IV.25. Le coefficient de réflexion simulé est de -15.79 dB, tandis que sa valeur mesurée est d'environ -18.32 dB.

Chapitre IV Conception et validation expérimentale d'une antenne patch miniature à base des métamatériaux pour la 5G

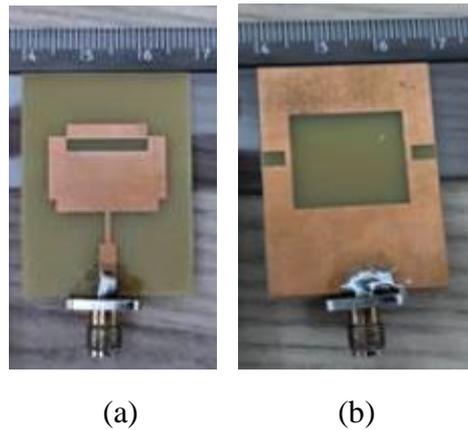


Figure IV. 24: Prototype de l'antenne miniature à fentes, (a) vue du patch, (b) vue de plan de masse [107].

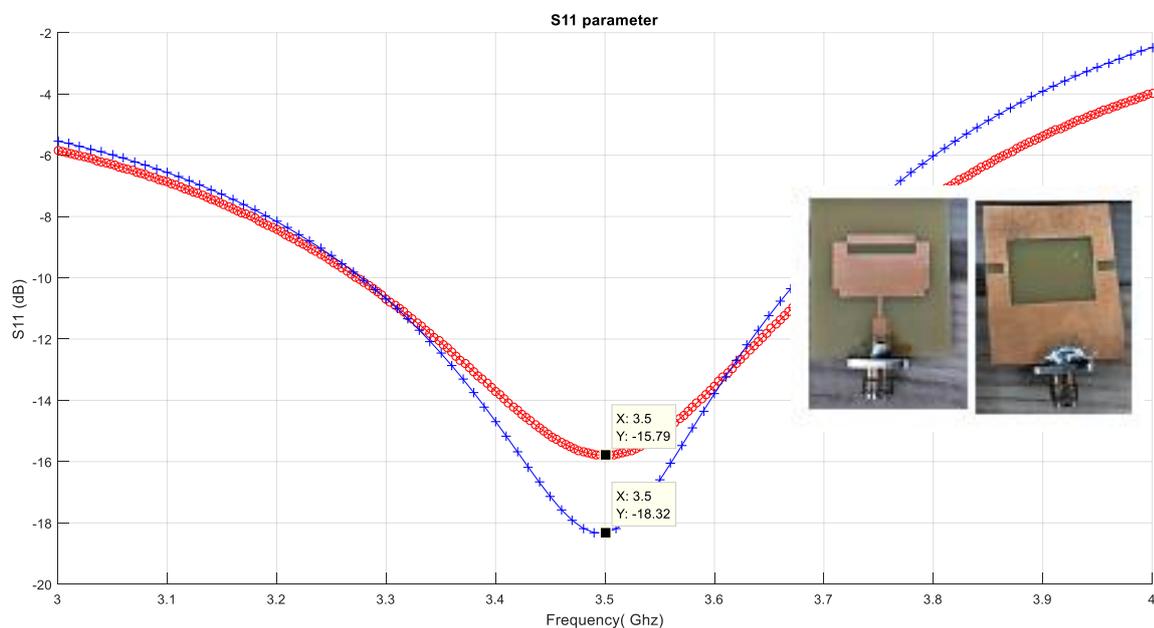
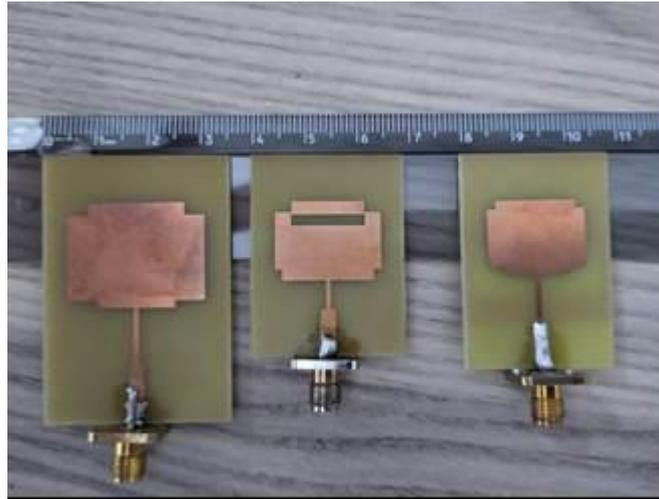
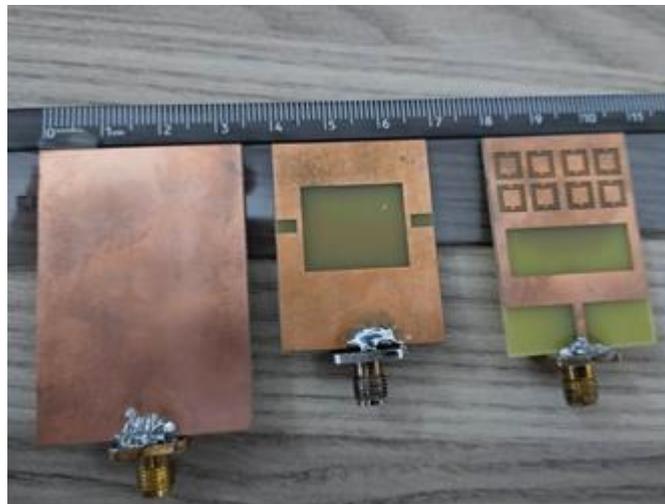


Figure IV. 25 : Coefficient de réflexion simulé et mesuré de l'antenne patch miniature avec fentes [107].

La comparaison entre les prototypes de l'antenne patch rectangulaire initiale, de l'antenne miniature avec fentes et de l'antenne miniature avec les résonateurs CSRR est présentée par la figure IV.26. La figure IV.27 illustre les mesures de trois antennes par l'analyseur de réseau. Il est notable que l'antenne miniature à base de métamatériaux présente une taille réduite par rapport à l'antenne miniaturisée par la méthode des fentes, grâce aux propriétés spécifiques des métamatériaux. Cette comparaison suggère que la miniaturisation en utilisant les cellules CSRR offre une perspective prometteuse pour obtenir des antennes plus petites tout en maintenant les performances électromagnétiques optimales, notamment en termes de coefficient de réflexion, de bande passante, de diagramme de rayonnement...etc.

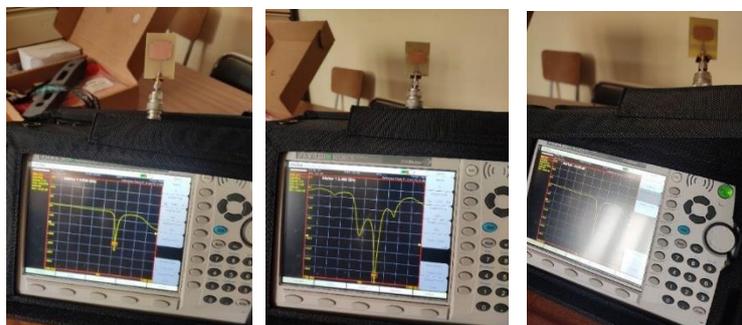


(a)



(b)

Figure IV. 26 : Comparaison entre les prototypes de l'antenne initiale, de l'antenne miniature avec fentes et de l'antenne miniature avec métamatériau respectivement : (a) vue d'avant : patch, (b) vue d'arrière : plan de masse [107].



(a)

(b)

(c)

Figure IV. 27 : Mesures des prototypes par l'analyseur de réseau : (a) antenne initiale, (b) antenne miniature avec fentes et (c) antenne miniature avec métamatériaux [107].

Chapitre IV Conception et validation expérimentale d'une antenne patch miniature à base des métamatériaux pour la 5G

La comparaison entre les coefficients de réflexions de l'antenne miniature à fentes et l'antenne miniature à base des résonateurs CSRR, simulées par le logiciel CST MWS, est illustrée par la figure IV.28. En revanche, les coefficients de réflexions mesurés sont présentés dans la figure IV.29. On remarque que les résultats obtenus par la méthode des métamatériaux sont très important à ceux obtenus par la méthode de fentes, où la première méthode a donné un taux de miniaturisation de 48%. Par contre, en deuxième méthode nous avons trouvé un taux de miniaturisation de 42%.

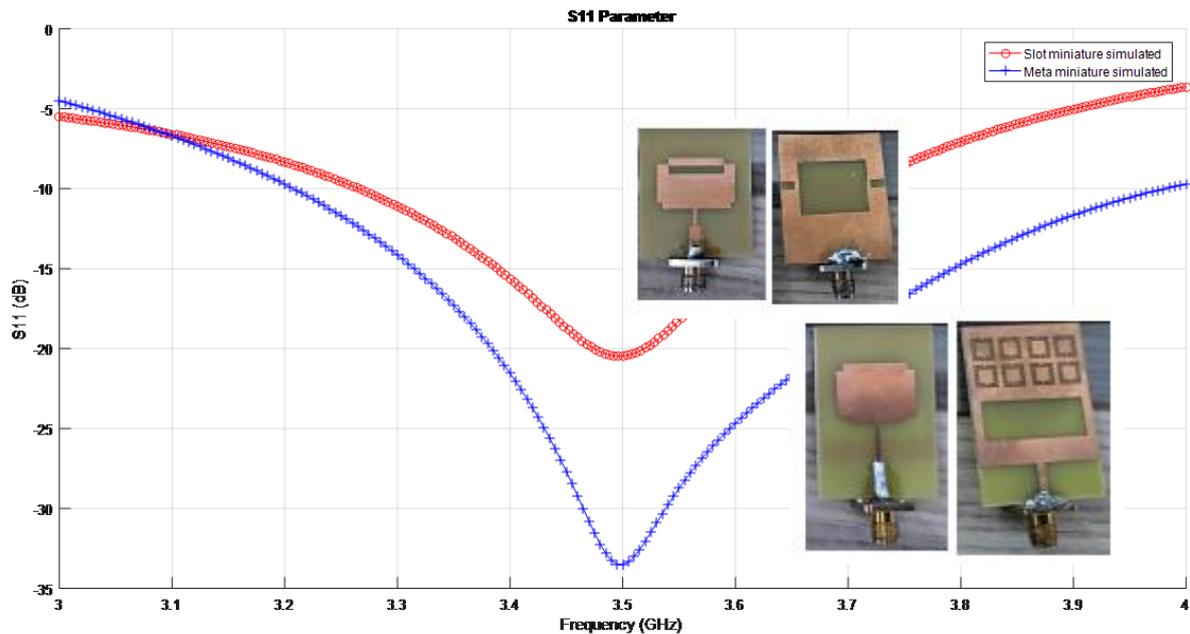
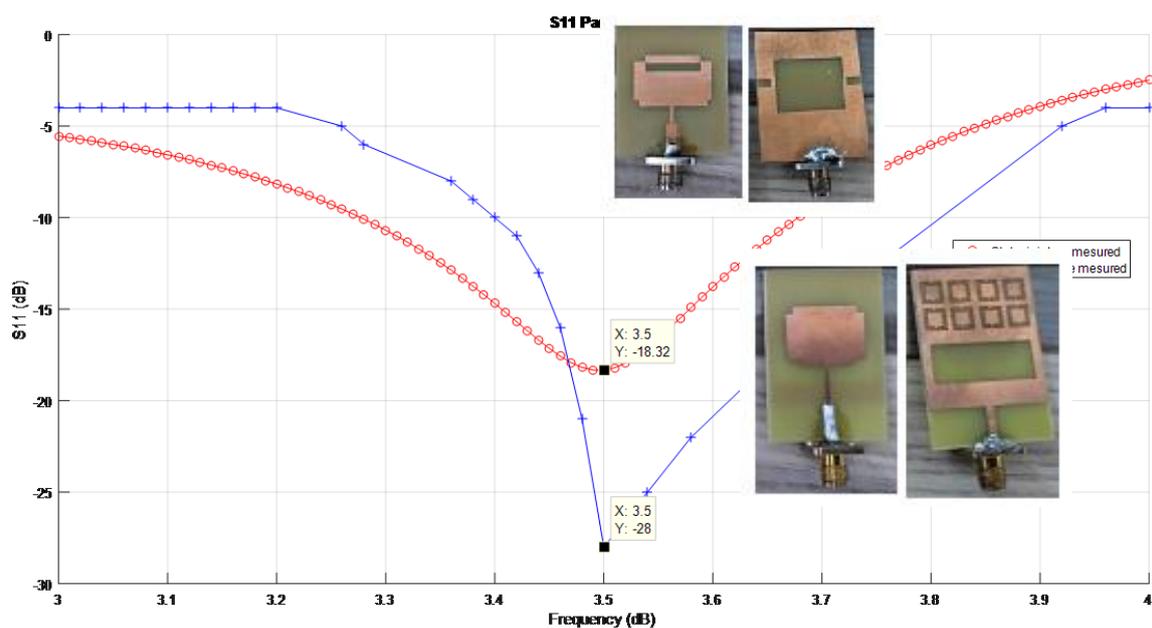


Figure IV. 28: Coefficients de réflexions simulés des antennes miniatures avec métamatériaux et avec fentes [107].



Chapitre IV Conception et validation expérimentale d'une antenne patch miniature à base des métamatériaux pour la 5G

Figure IV. 29: Coefficients de réflexions mesurés des antennes miniatures à base des métamatériaux et à fentes [107].

Sur le tableau IV.7, on représente les résultats de simulation et de mesure obtenus des antennes miniatures proposées avec les deux méthodes de miniaturisation à fentes et à base des métamatériaux.

Antenne miniature	Avec fentes [179]	Avec métamatériaux[107]
Fréquence [GHz]	3.5	3.5
$W_p \times L_p$ (patch) [mm×mm]	20.32×15.25	19×14.45
Coefficient de réflexion S_{11} simulé [dB]	-20.46	-33.51
Coefficient de réflexion S_{11} mesuré [dB]	-18.32	-28.94
Bande passante simulée [GHz]	3.4 - 3.8	3.21 - 3.98
Bande passante mesurée [GHz]	3.28 - 3.67	3.38 - 3.72
Gain [dB]	1.78	3.44
Taux de miniaturisation [%]	42	48

Tableau IV. 7 : Analyse comparative des résultats obtenus [107].

IV.7 Conclusion

Ce chapitre s'est concentré sur l'étude de structures d'antennes miniatures dédiées aux applications mobiles 5G. Nous avons employé le simulateur CST Microwave Studio pour étudier notre antenne miniature proposée, à base des résonateurs en anneaux fendus complémentaires de forme carré (RAFC) (CSRR en anglais), qui présentent une perméabilité négative autour de la fréquence de travail de 3.5 GHz. Dans ce cas, nous avons inséré 8 cellules métamatériaux CSRR sur le plan de masse de l'antenne patch qui est composée d'un substrat FR4 présentant une permittivité relative $\epsilon_r = 4.3$, pour atteindre notre objectif avec un bon taux de miniaturisation. Les études paramétriques ont permis d'approfondir notre compréhension de l'impact de ces cellules CSRR sur la miniaturisation de l'antenne patch. Les dimensions finales de notre antenne miniature proposée sont de 19 mm \times 14,45 mm, avec un taux de miniaturisation d'environ 48%. Les résultats sont satisfaisants en termes de coefficient de réflexion, de bande passante, de gain, et de diagrammes de rayonnement. Enfin, une comparaison a été rétablie entre deux techniques de miniaturisation utilisées : les métamatériaux et les fentes insérés sur la même géométrie de l'antenne patch proposée. Finalement, des réalisations pratiques et des mesures ont été faites pour valider les résultats de simulation.

Dans le chapitre suivant, nous concevrons d'autres structures d'antennes miniatures utilisant des métamatériaux pour les systèmes de communications mobiles.

Chapitre V

Conception des antennes patch miniatures à base des résonateurs CSRR pour les systèmes de Télécommunications modernes

V Conception des antennes patch miniatures à base des résonateurs CSRR pour les systèmes de Télécommunications modernes

V.1. Introduction

Ces derniers temps, le domaine des communications cellulaires a connu une croissance considérable, permettant aux appareils mobiles modernes tels que les smartphones d'offrir des services répondant aux exigences des utilisateurs en matière de voix et de données. Grâce aux avancées technologiques dans le domaine de l'ingénierie, les antennes jouent un rôle vital en tant que l'un des composants les plus sensibles de tout équipement de communication sans fil [180]. Le rôle important que joue ces technologies notamment le Wi-Fi et la 5G pour nous permettre de rester connectés rend son utilisation essentielle dans notre vie quotidienne. La miniaturisation des antennes patch a été très importante au cours de la dernière décennie pour faciliter leur intégration dans différents dispositifs électroniques.

Dans ce chapitre, nous visons à concevoir des structures antennaires miniatures à base des métamatériaux CSRR pour la nouvelle technologie 5G et les réseaux sans fils Wi-Fi-5 et Wi-Fi-6. Dans la première partie de ce chapitre, l'étude porte sur une nouvelle antenne patch miniature de forme pentagone basée sur un réseau de deux cellules métamatériaux CSRR gravées sur le plan de masse et fonctionne dans la fréquence de résonance 3.5 GHz. Les résultats de la simulation valide l'utilisation de cette antenne proposée dans les applications mobiles 5G. Dans la seconde partie, une antenne patch circulaire miniature basée sur des cellules métamatériaux CSRR est présentée. Cette dernière est capable de fonctionner dans les deux bandes de fréquences 5.12 et 6.22 GHz selon les applications Wi-Fi-5 et Wi-Fi-6 respectivement, tout en tenant compte de tous les facteurs critiques et en maintenant les mêmes performances que l'antenne initiale proposée. Finalement, nous avons réussi à miniaturiser l'antenne initiale proposée, avec un taux de miniaturisation de 43,88 %. Nous montrons également que l'utilisation de la technique du plan de masse partiel a amélioré le gain et élargi la bande passante de l'antenne miniature proposée afin de satisfaire aux exigences de la bande Wi-Fi-5 (IEEE-802.11ac) et la bande Wi-Fi-6 (IEEE-802.11ax).

V.2 Conception de l'antenne patch pentagone proposée

Dans la figure V.1, on trouve la représentation géométrique de l'antenne patch de forme pentagone proposée. L'élément rayonnant est gravé sur un substrat FR4 ayant une permittivité diélectrique de 4,3 et une hauteur $h = 1,5 \text{ mm}$. L'antenne est alimentée par une ligne micro-ruban d'impédance caractéristique de 50 Ohms. La taille globale de l'antenne est $35,32 \times 47,89$

mm^2 . Cette structure est conçue pour fonctionner dans la gamme de fréquences [3,4-3,8] pour les applications mobiles de la 5ème génération. Le logiciel de simulation CST Microwave Studio est utilisé pendant le processus de conception. Le tableau V.1 présente les dimensions de cette antenne initiale proposée.

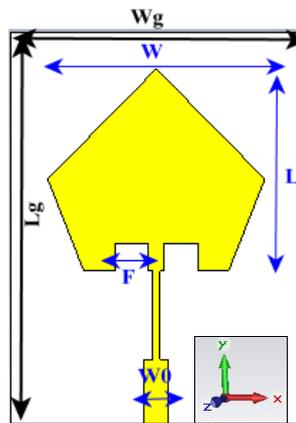


Figure V. 1 : Géométrie de l'antenne initiale de forme pentagone proposée [121].

Paramètres	Dimensions (mm)
Lg	47.89
Wg	35.32
L	20.25
W	26.32
W0	2.92
F	4

Tableau V. 1 : Dimensions de l'antenne patch de forme pentagone proposée [121].

V.2.1 Résultats et discussions

Le coefficient de réflexion simulé est illustré par la figure V.2. D'après ce résultat, nous observons que l'antenne a une adaptation parfaite à la fréquence de résonance de 3.5 GHz avec un pic de coefficient de réflexion inférieur à -43.59 dB. La largeur de bande passante est de 0.09 GHz.

La figure V.3 montre le rapport d'onde stationnaire (VSWR) de l'antenne proposée, où sa valeur est égale à 1,013 à la fréquence de 3,5 GHz. Ce résultat indique une bonne adaptation à la fréquence désirée.

La figure V.4 illustre le gain de l'antenne proposée, qui est d'environ 2,26 dB à la fréquence de résonance de 3,5 GHz.

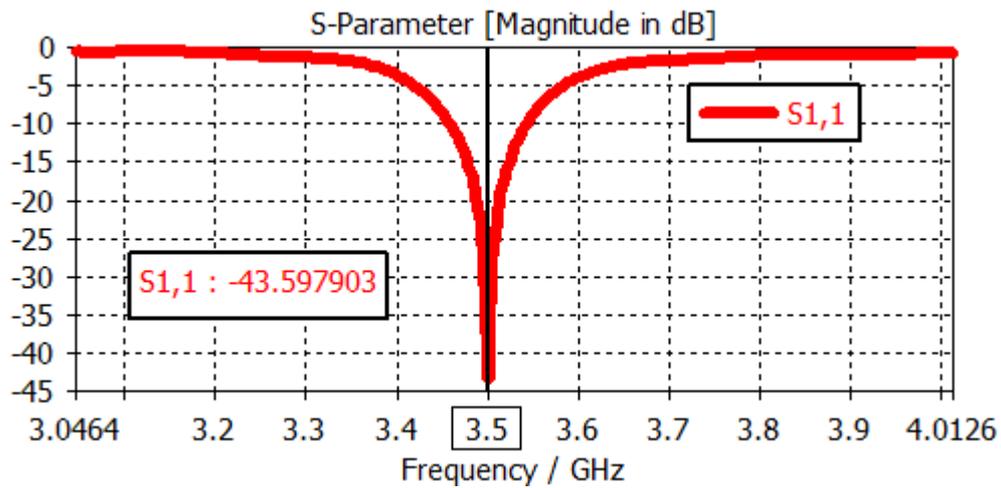


Figure V. 2 : Coefficient de réflexion de l'antenne patch de forme pentagone proposée [121].

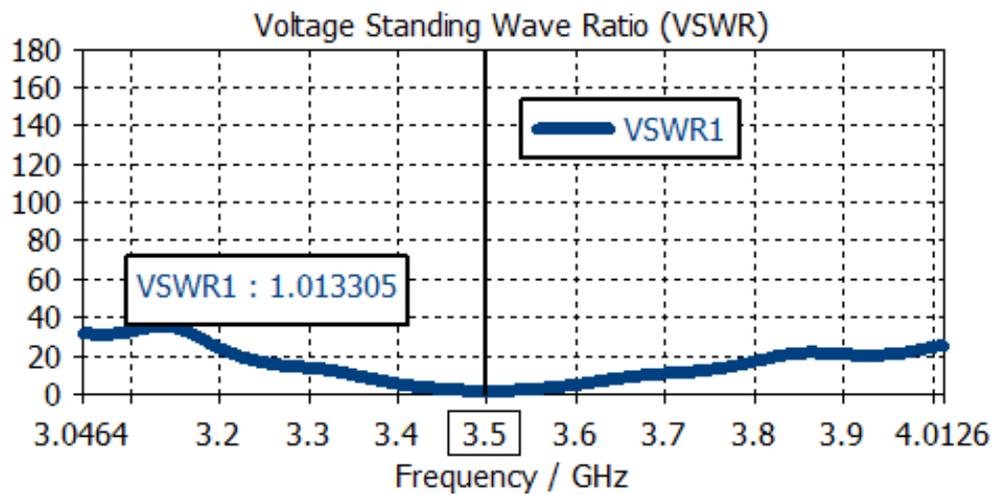


Figure V. 3 : Taux d'onde stationnaire de l'antenne patch de forme pentagone proposée.

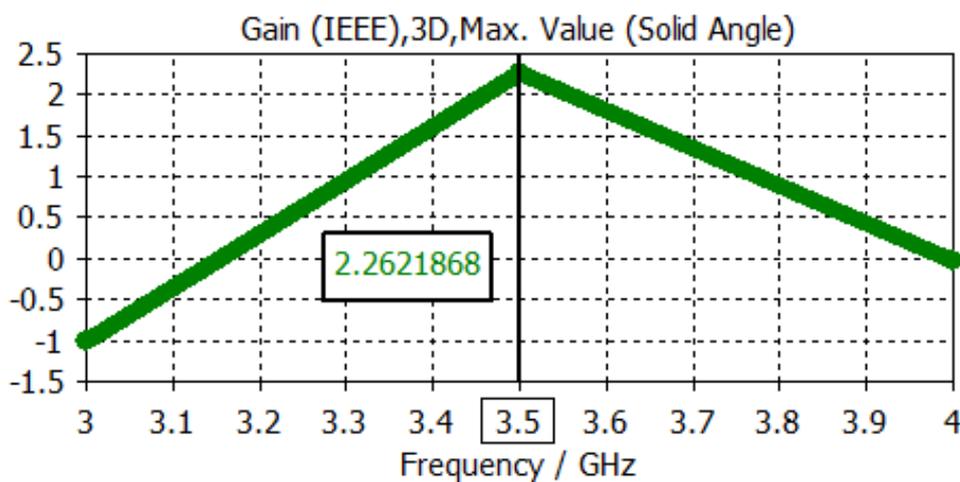
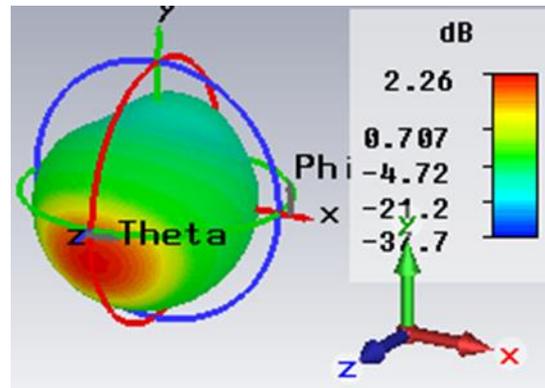


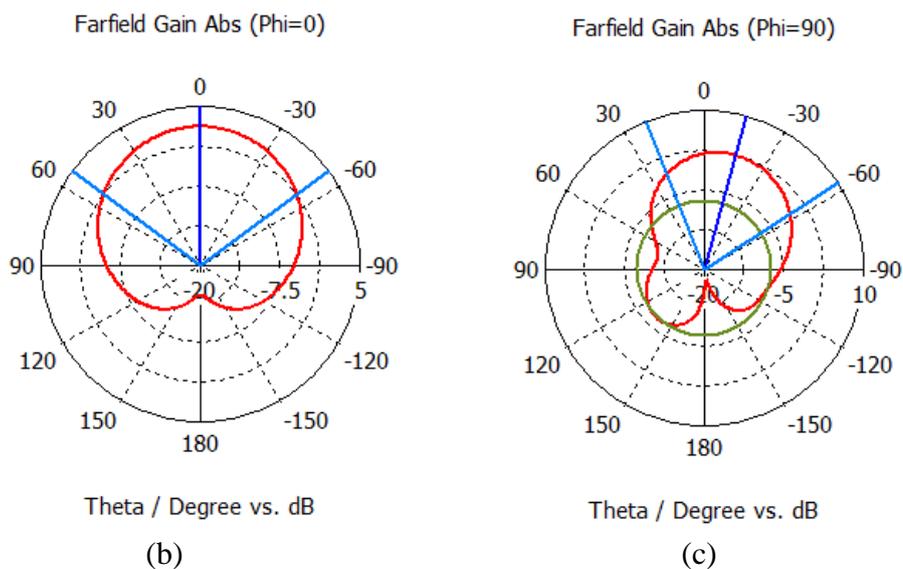
Figure V. 4: Gain de l'antenne patch de forme pentagone proposée [121].

La figure V.5 présente les diagrammes de rayonnement en 3D et polaires en 2D à la fréquence de résonance 3,5 GHz, où les diagrammes de rayonnement polaires sont composés

de deux lobes avec des ouvertures différentes dans le plan H ($\Phi=90^\circ$) et d'un lobe à grande ouverture dans le plan E ($\Phi=0^\circ$) dans l'hémisphère supérieur. En conséquence, l'antenne présente un diagramme de rayonnement quasi omnidirectionnel dans les plans E et H. Ces tracés sont confirmés par le diagramme de rayonnement en 3D.



(a)



(b)

(c)

Figure V. 5: Diagrammes de rayonnement de l'antenne pentagone initiale proposée : (a) 3D, (b) et (c) polaires en 2D [121].

V.2.2 Miniaturisation de l'antenne patch pentagone proposée

V.2.2.1 Cellule métamatériaux CSRR

La cellule CSRR proposée dans ce travail est utilisée pour réduire la taille de l'antenne initiale à la fréquence de résonance de 3,5 GHz, tout en conservant ses performances initiales en termes de coefficient de réflexion, de gain, de diagramme de rayonnement et de bande

passante, etc. La figure V.6 présente les dimensions de la cellule CSRR proposée, tandis que la figure V.7 illustre ses coefficients de réflexion et de transmission. De même, la figure V.8 présente respectivement la permittivité relative et la perméabilité relative de la cellule CSRR.

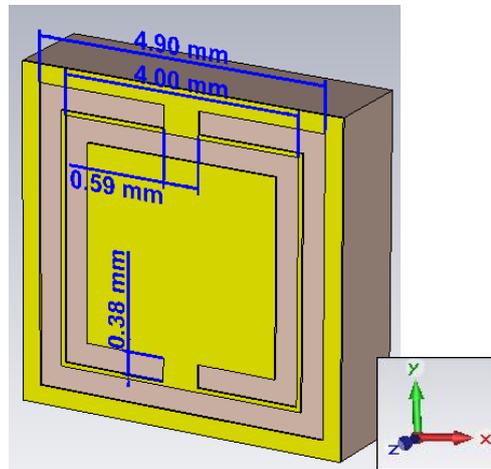


Figure V. 6 : Cellule CSRR proposée [121].

D'après la figure V.7, on remarque bien que les coefficients de réflexion S_{11} et de transmissions S_{21} de la cellule CSRR présentent des valeurs convenables à la fréquence de travail 3.5 GHz où la puissance réfléchie est maximale ($S_{11} = -2.18\text{dB}$) et la puissance transmise est nulle ($S_{21} = -15\text{dB}$) à la fréquence souhaitée. En outre, les résultats présentés dans la figure V.8 indiquent que la partie réelle de la permittivité relative (ϵ_r) a une valeur négative, tandis que la partie réelle de la perméabilité relative (μ_r) a une valeur positive à la fréquence de résonance, ce qui est satisfaisant pour la cellule métamatériaux proposée.

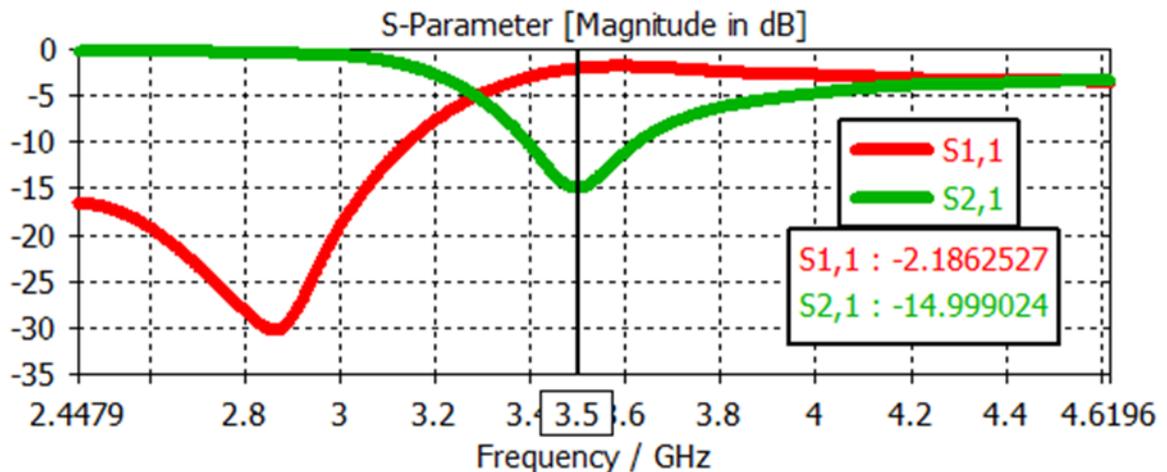
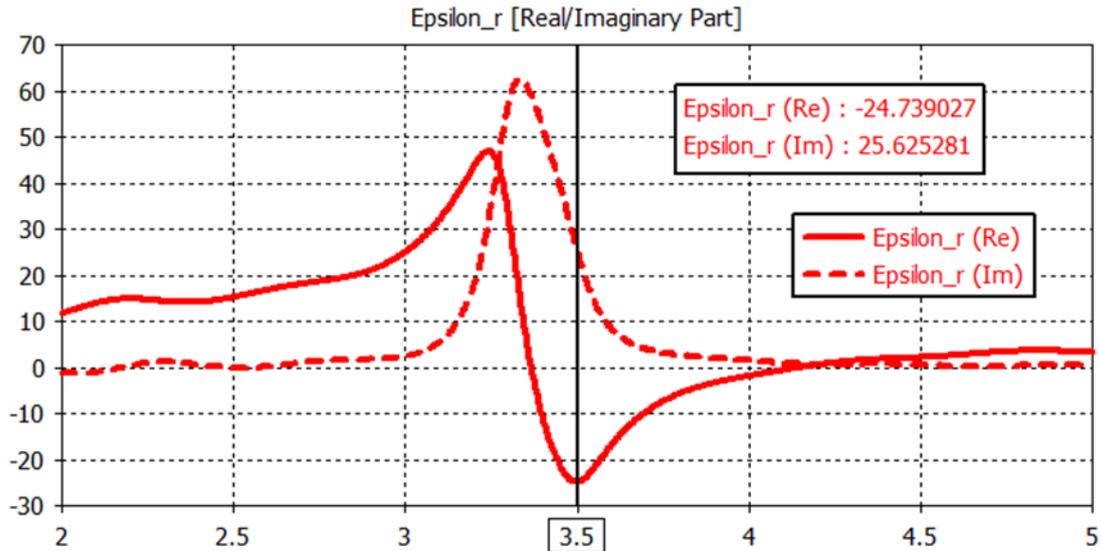
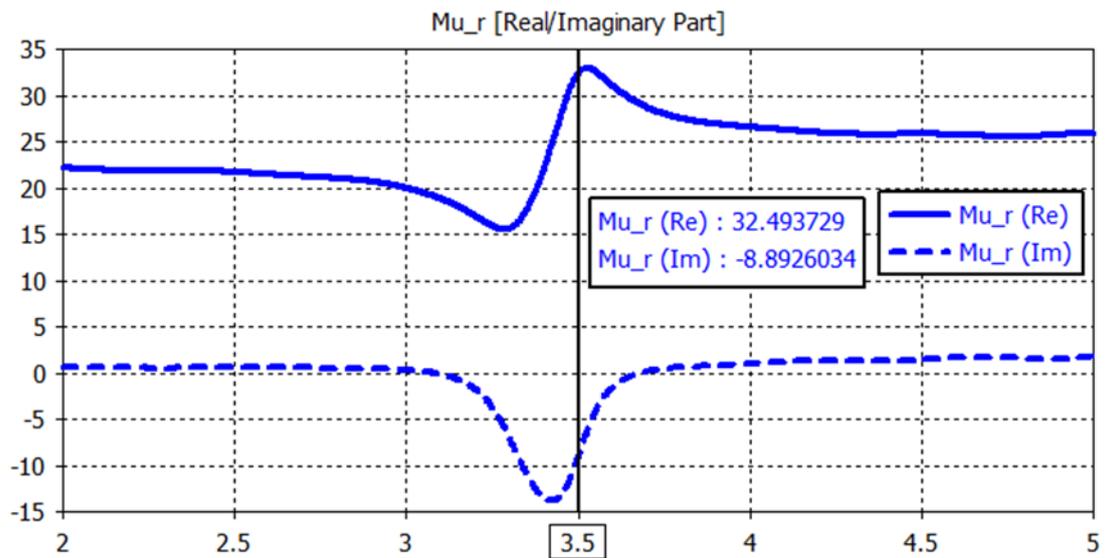


Figure V. 7 : Coefficients de réflexion et de transmission de la cellule CSRR proposée [121].



(a)



(b)

Figure V. 8 : (a) la permittivité relative et (b) la perméabilité relative de la cellule CSRR proposée.

V.2.2.2 Géométrie de l'antenne patch pentagone miniature

Tout d'abord, nous avons utilisé la même structure précédemment présentée dans ce travail. Ensuite, nous avons inséré deux cellules CSRR dans le plan de masse de notre antenne pentagone proposée comme il est illustré dans la figure V.9. Les cellules CSRR ont été placées aux emplacements optimaux ($x_1=3$, $y_1=29$) et ($x_2=4$, $y_2=29$) à la suite d'un certain nombre d'études paramétriques sur leurs positions.

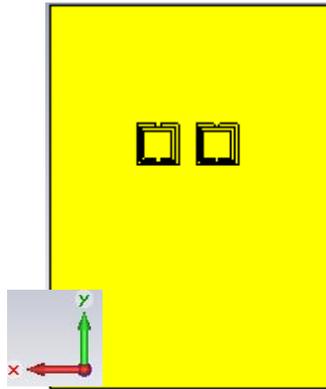


Figure V. 9 : Géométrie de l'antenne patch de forme pentagone avec deux cellules CSRR insérées dans le plan de masse [121].

Afin d'obtenir les résultats finaux de l'antenne miniature proposée, plusieurs études paramétriques ont été réalisées sur la largeur et la longueur de l'élément rayonnant. La figure V.10 illustre l'effet de ces paramètres géométriques sur le coefficient de réflexion de l'antenne miniature. Cette analyse nous a permis de revenir à la fréquence de résonance de 3,5 GHz en réduisant la taille de l'antenne. La figure V.11 illustre la géométrie finale de l'antenne miniature de forme pentagone proposée qui présente un taux de miniaturisation d'environ 17,93 %. Les dimensions finales de l'antenne miniature sont répertoriées dans le tableau V.2.

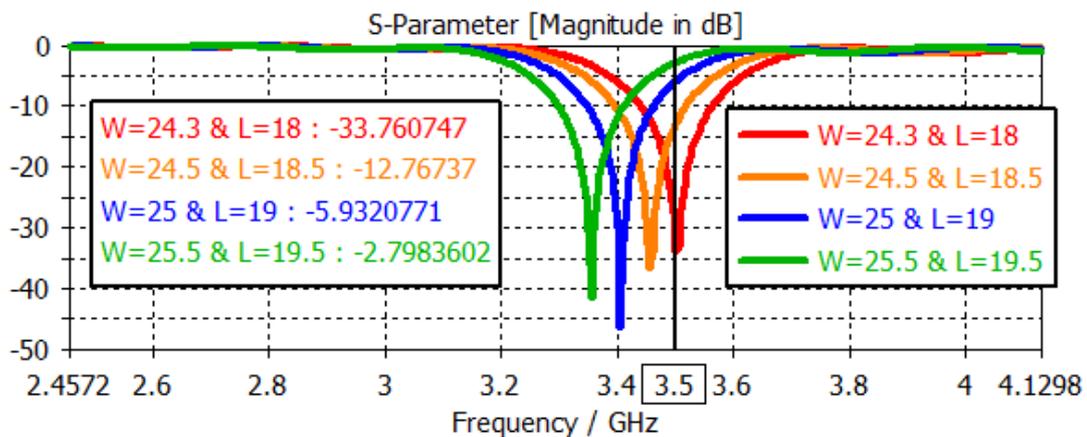


Figure V. 10 : Variation de la largeur et de la longueur de l'antenne patch pentagone proposée en fonction de la fréquence [121].

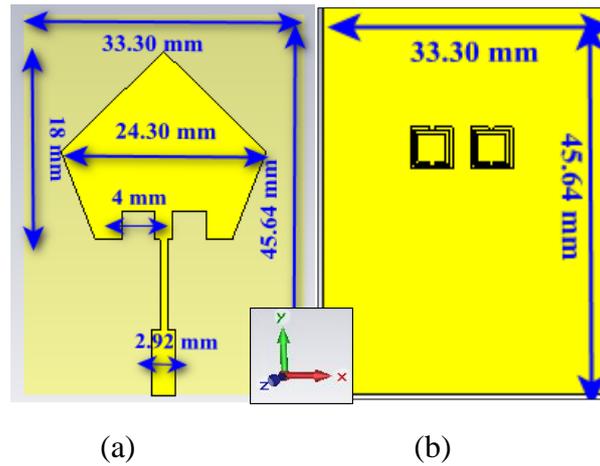


Figure V. 11 : Antenne patch miniature à base des cellules CSRR (a) Vue de face (Patch), (b) Vue d'arrière (plan de masse) [121].

Paramètres	Dimensions (mm)
Lg	45.64
Wg	33.3
L	18
W	24.3
W0	2.92
F	4

Tableau V. 2 : Dimensions finales de l'antenne patch miniature de forme pentagone [121].

Sur les figures V.12 et V13, on représente respectivement le coefficient de réflexion et le taux d'onde stationnaire de l'antenne miniature proposée. On remarque que le coefficient de réflexion atteint un pic d'environ -33,76 dB à la fréquence de résonance 3.5GHz. De même, le taux d'onde stationnaire a une valeur autour de 1.04 à la fréquence de fonctionnement de 3,5 GHz. Un gain maximal de 1,69 dB est également observé, tel qu'illustré sur la figure V.14.

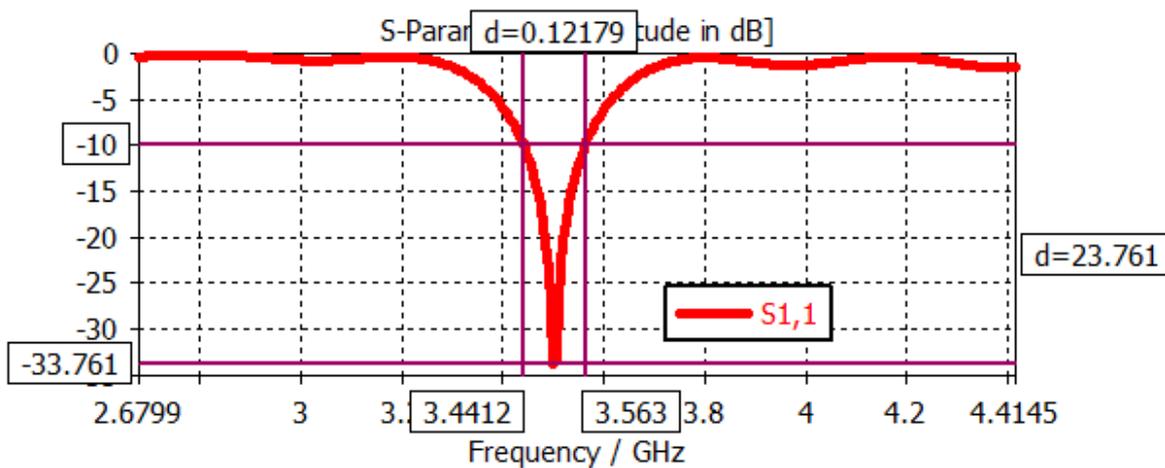


Figure V. 12 : Coefficient de réflexion de l'antenne patch miniature de forme pentagone proposée [121].

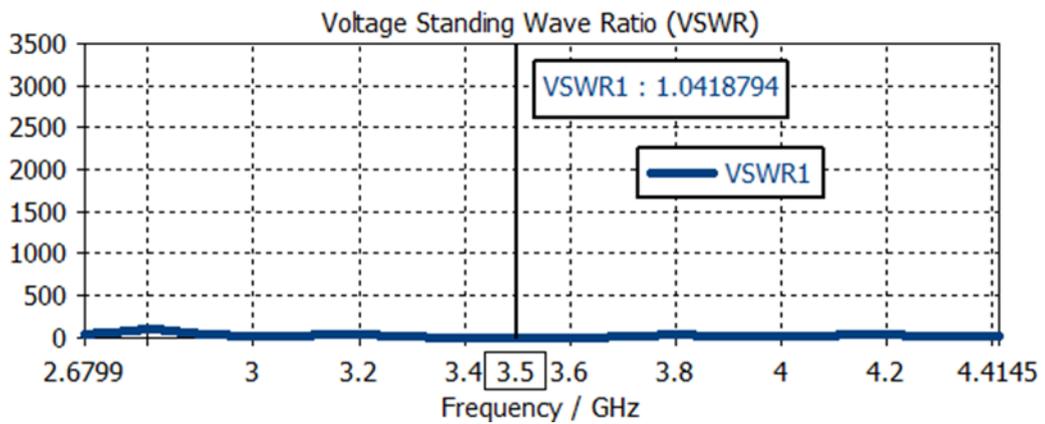


Figure V. 13 : Taux d'onde stationnaire de l'antenne patch miniature de forme pentagone proposée.

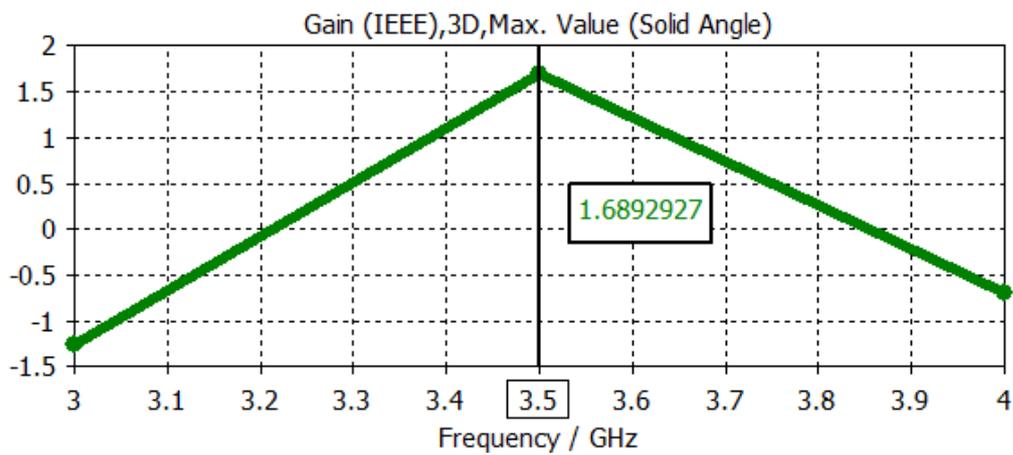
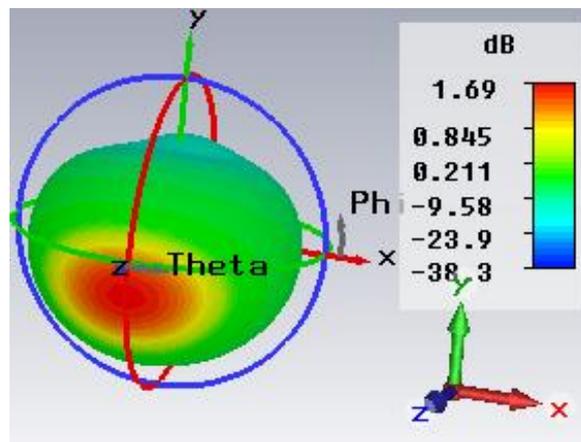


Figure V. 14: Gain de l'antenne miniature de forme pentagone proposée [121].

Le diagramme de rayonnement en 3D et les diagrammes polaires en 2D sont présentés dans la Figure V.15.



(a)

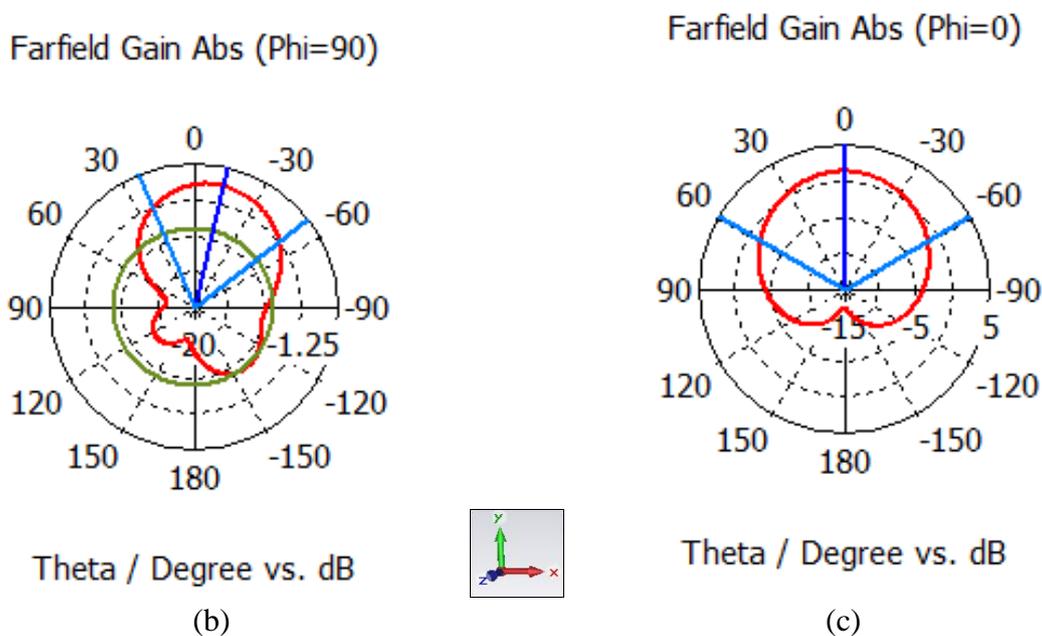


Figure V. 15 : Diagrammes de rayonnement de l'antenne miniature proposée : (a) en 3D, (b) et (c) polaires en 2D [121].

Ces résultats soulignent que l'antenne miniature proposée affiche un gain d'environ 1,69 dB, ce qui demeure relativement faible. En conséquence, nous avons opté pour son amélioration afin d'obtenir de meilleurs résultats que ceux obtenus précédemment. Comme on peut observer, les diagrammes de rayonnement dans les plans E ($\Phi=0^\circ$) et H ($\Phi=90^\circ$) de l'antenne miniature semblent être quasi-omnidirectionnel.

V.2.2.3 Amélioration du gain et de la bande passante de l'antenne miniature de forme pentagone proposée

Le gain et la largeur de bande des antennes patch peuvent être améliorés grâce à diverses méthodes. La méthode DGS est l'une d'entre elles qui contribue de manière significative à l'amélioration des performances des antennes imprimées contemporaines. Afin de déterminer comment la technique DGS affecte les performances de l'antenne miniature proposée, nous avons créé des fentes dans le plan de masse de l'antenne. La figure V.16 montre les différentes

fentes insérées sur le plan de masse (a) : insertion de 3 fentes rectangulaires, (b) fente en L et (c) fente en U.

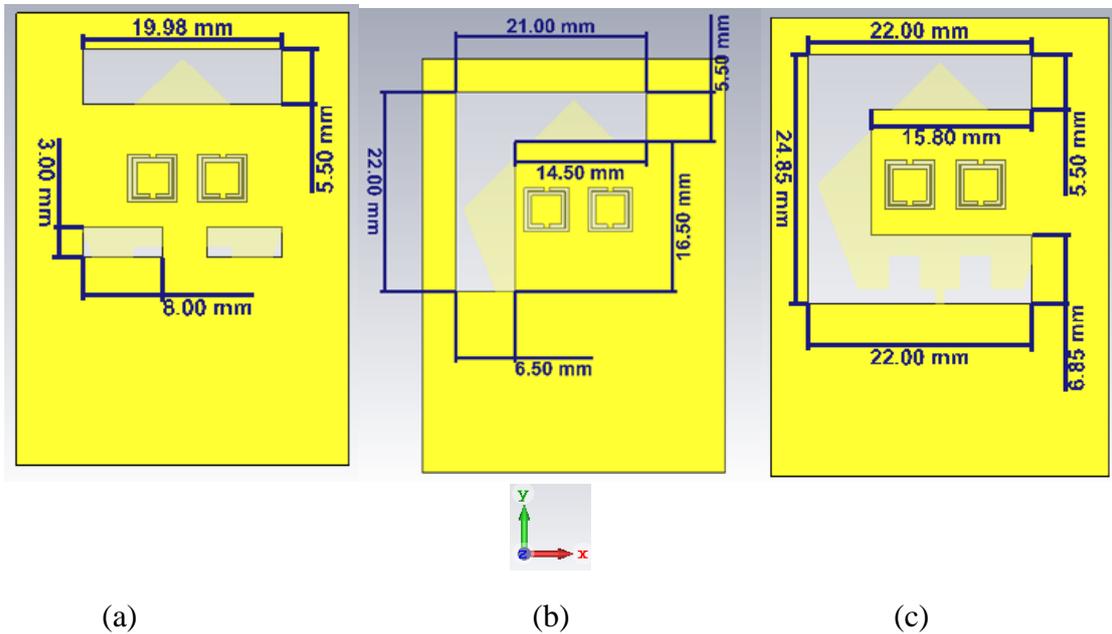


Figure V. 16 : Fentes de différentes formes insérées dans le plan de masse de l'antenne miniature proposée : (a) 3 fentes rectangulaires, (b) fente en L et (c) fente en U [121].

Les coefficients de réflexion des trois configurations conçues et simulées sont présentés dans la figure V.17. Nous remarquons que la fente en forme U donne de meilleurs résultats en termes de largeur de bande que les deux autres formes. La figure V.18 montre les taux d'ondes stationnaires des trois structures, qui ont des valeurs de VSWR satisfaisantes à la fréquence de résonance de 3.5 GHz.

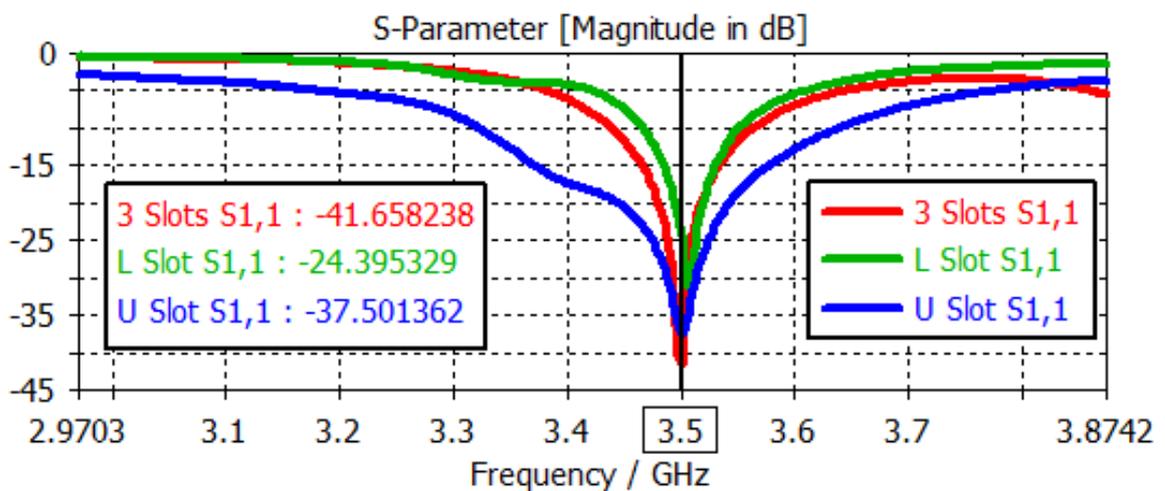


Figure V. 17 : Coefficients de réflexion des trois configurations avec la technique DGS [121].

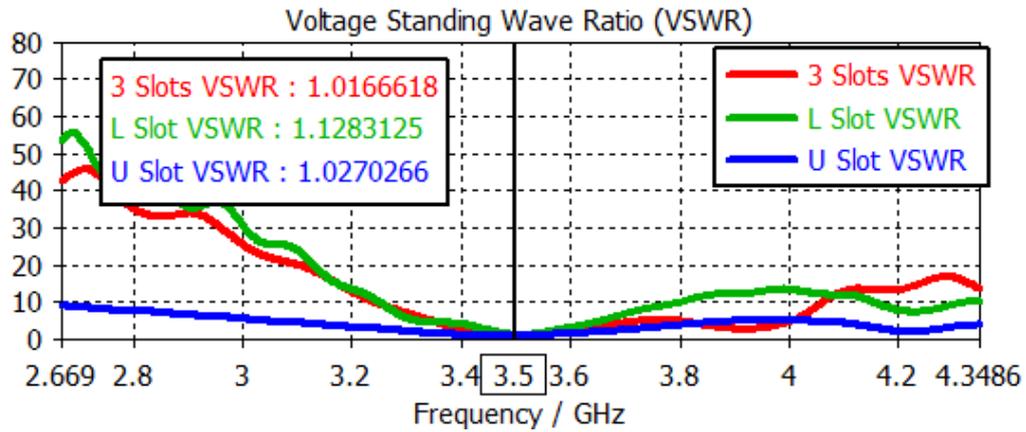


Figure V. 18 : Taux d'ondes stationnaires des trois configurations avec la technique DGS.

Les gains simulés à l'aide du logiciel CST MWS à la fréquence de résonance 3,5 GHz des trois structures sont illustrés sur la figure V.19.

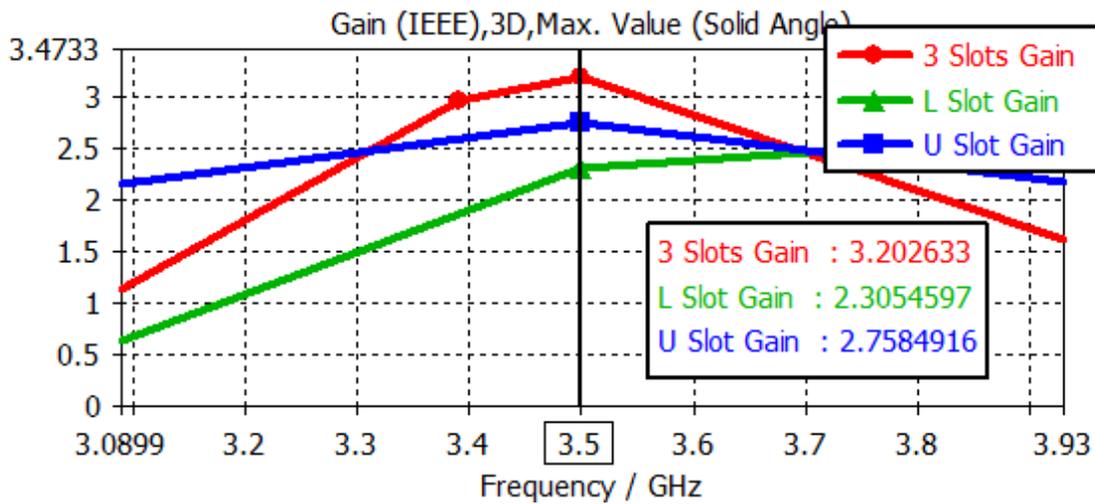


Figure V. 19 : Gains des trois configurations avec la technique DGS [121].

Les figures V.20 et V.21 montrent les diagrammes de rayonnement en 3D et en 2D des trois structures avec la technique DGS. Comme on peut le constater, l'insertion de trois fentes de formes rectangulaires dans le plan de masse permet d'obtenir un gain de 3,2 dB à la fréquence

de travail 3.5 GHz, alors que les valeurs de 2,31 dB et 2,76 dB sont obtenues pour les formes en L et en U respectivement.

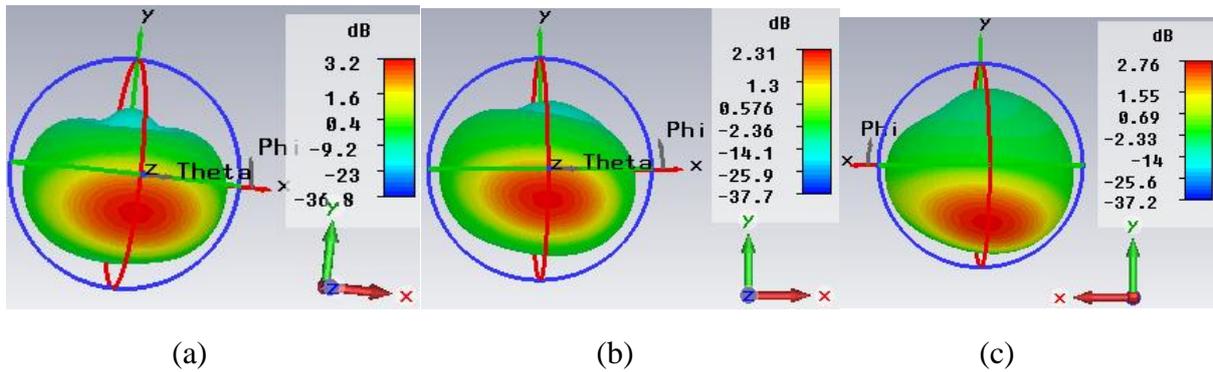


Figure V. 20 : Diagrammes de rayonnement en 3D des trois structures d'antennes miniatures avec la technique DGS : (a) trois fentes rectangulaires, (b) fente en L et (c) fente en U [121].

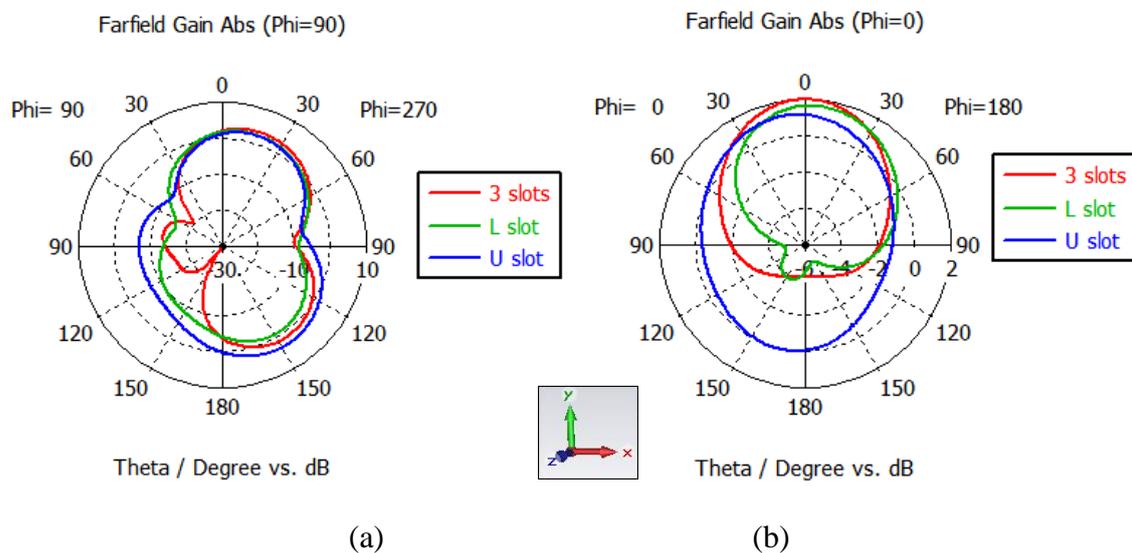


Figure V. 21 : Diagrammes de rayonnement polaires en 2D des trois structures d'antennes miniatures avec la technique DGS, (a) $\phi=90$ et (b) $\phi=0$ [121].

En résumé, l'ajout de 3 fentes rectangulaires sur le plan de masse permet d'obtenir un meilleur résultat en termes de gain, d'environ 3,2 dB par rapport aux deux autres structures d'antennes avec des fentes en formes de L et de U, affichant des gains autour de 2,31 dB et 2,76 dB respectivement. De même, la fente en forme de U entraîne une augmentation significative de la largeur de bande passante dans la gamme de fréquences [3.32-3.63] GHz d'après la figure V.17.

V.3 Conception de l'antenne patch circulaire de base proposée

La figure V.22 montre la structure de base de l'antenne patch proposée, composée d'un élément rayonnant de forme circulaire, alimenté par une ligne microruban de longueur L_0

=21,04 mm et de largeur $W_0 = 2,15$ mm. Un patch et une ligne d'alimentation qui sont imprimés sur un substrat diélectrique de type Rogers RT 5880 avec une permittivité relative $\epsilon_r = 2,2$ et une épaisseur h de 1,57 mm. La taille totale de l'antenne est de $52,9 \times 31,5 \text{ mm}^2$. Le rayon de l'élément rayonnant a été calculé à la fréquence de résonance 5,16 GHz par les deux équations théoriques suivantes [5]:

$$R = F \left\{ 1 + \frac{2h}{\pi F \epsilon_r} \left[\ln \left(\frac{\pi F}{2h} \right) + 1.7726 \right] \right\}^{-1/2} \quad (\text{V.1})$$

Avec :

$$F = \frac{8.791 \times 10^9}{fr\sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{V.2})$$

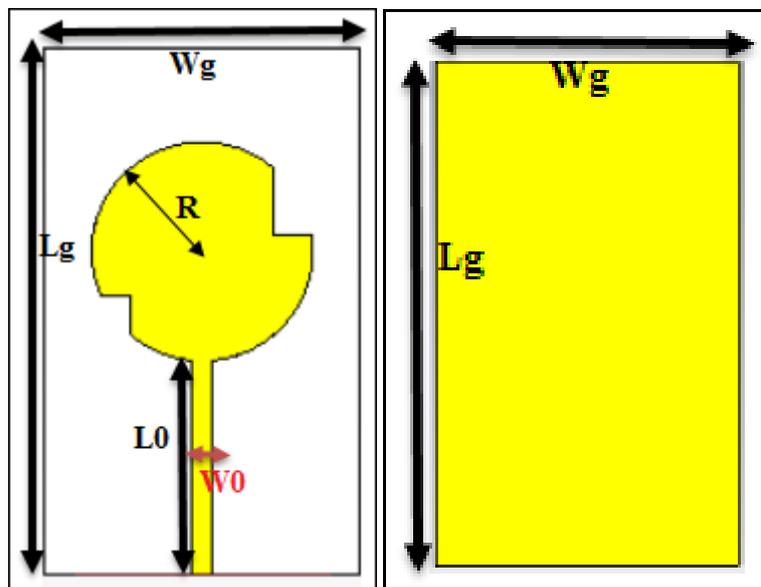


Figure V. 22: Antenne patch circulaire proposée [181].

Les dimensions de l'antenne patch proposée sont indiquées dans le tableau V.3.

Paramètres	Valeurs (mm)
Rayon (R)	11.04 mm
W_0	2.15 mm
L_0	21.04 mm
W_g	31.5 mm
L_g	52.9Mm

Tableau V. 3 : Dimensions de l'antenne patch circulaire proposée [181].

V.3.1 Résultats et discussion

Les résultats de simulation ont été réalisés à l'aide du logiciel de simulation électromagnétique 3D CST Microwave Studio. Le résultat en termes de coefficient de réflexion S_{11} est donné par la figure V.23. D'après cette courbe, on observe que l'antenne fonctionne à la

fréquence de résonance de 5,16 GHz où la valeur du coefficient de réflexion est égale à -35 dB, cela dénote une bonne adaptation à la fréquence désirée. Une largeur de bande d'environ 332 MHz [4,94 - 5,27] GHz est obtenue autour de 5.16 GHz. De plus, le taux d'onde stationnaire, évalué à environ 1,03, montre que l'adaptation est bien réalisée d'après la figure V.24.

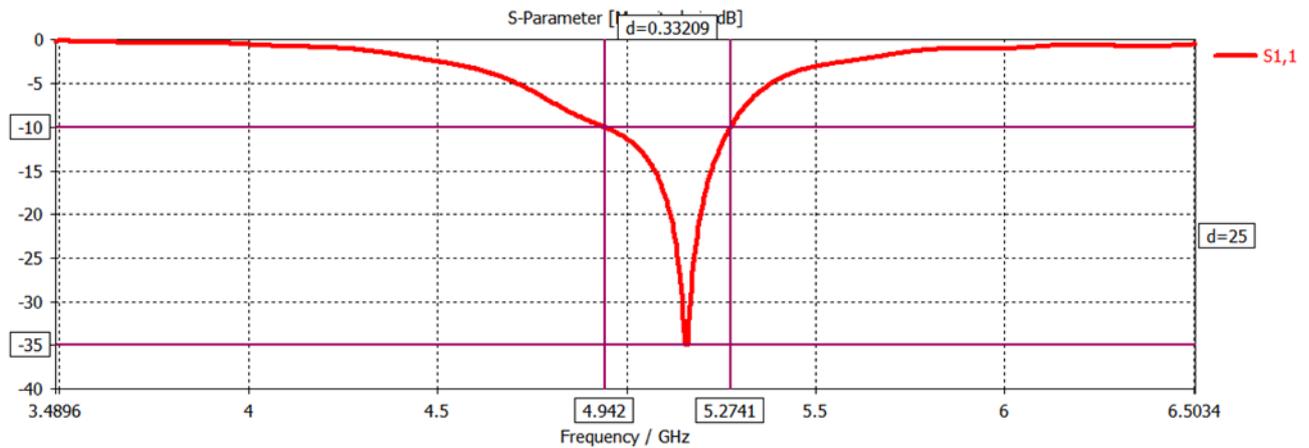


Figure V. 23: Coefficient de réflexion de l'antenne patch circulaire proposée [181].

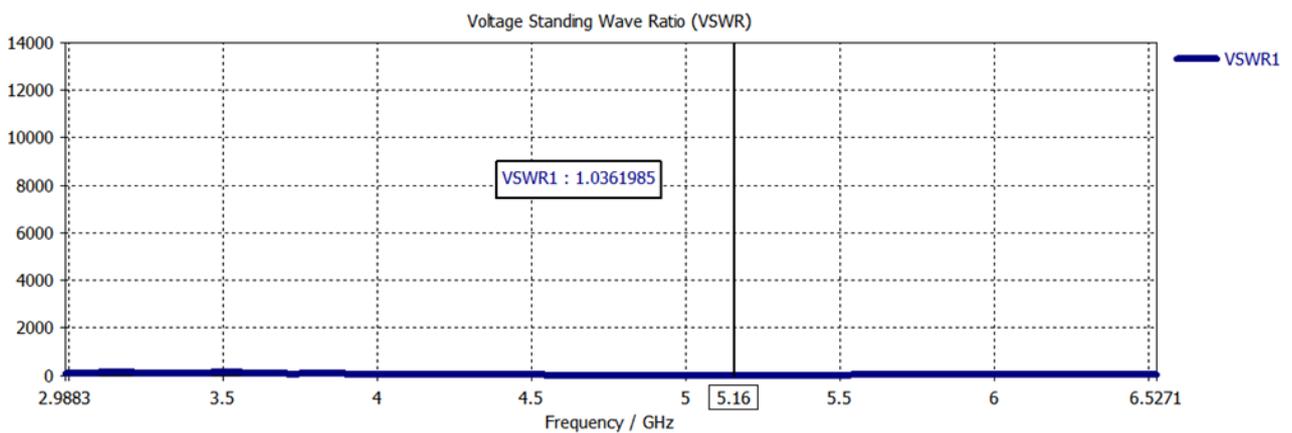


Figure V. 24: Taux d'onde stationnaire de l'antenne patch circulaire proposée [181].

Le gain de cette structure antennaire de base, qui est d'environ 7,46 dB à la fréquence de résonance de 5.16 GHz, est représenté sur la figure V.25. Les diagrammes de rayonnement polaires en 2D donnent un rayonnement quasi omnidirectionnel pour le plan E ($\varphi=0^\circ$) et le plan H ($\varphi=90^\circ$). Ces données sont corroborées par le diagramme de rayonnement en 3D selon la figure V.25.

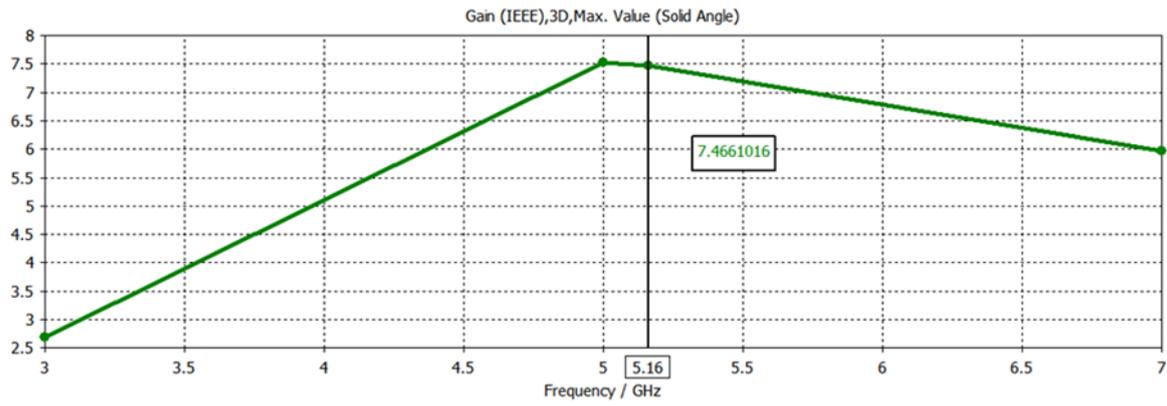
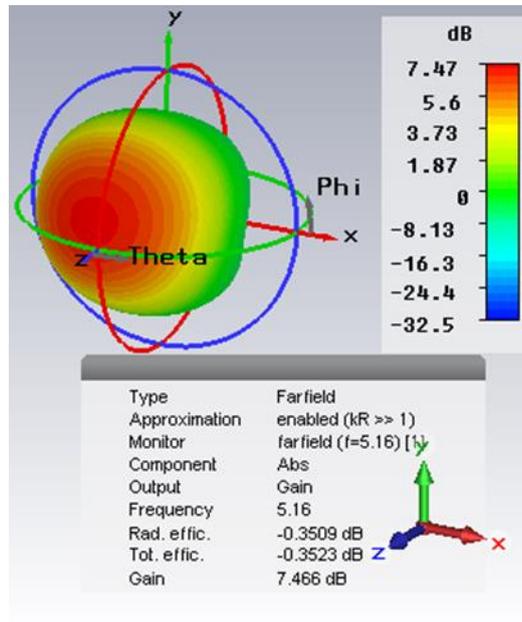
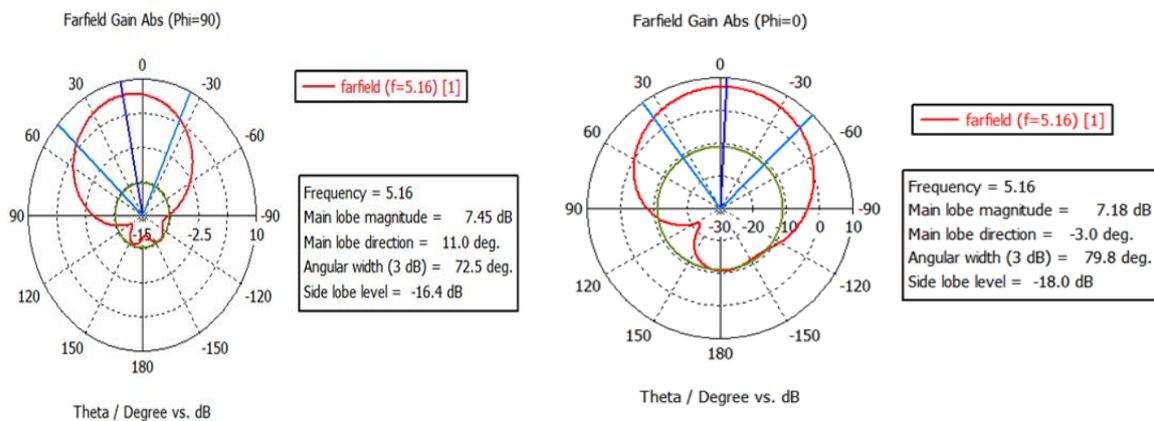


Figure V. 25: Gain de l'antenne patch circulaire proposée [181].



(a)



(b)

(c)

Figure V. 26: Diagrammes de rayonnement de l'antenne patch circulaire proposée : (a) 3D, (b) et (c) polaires en 2D [181].

V.3.2 Miniaturisation de l'antenne patch circulaire proposée

V.3.2.1 Cellule CSRR proposée

La figure V.27 montre la structure de la cellule CSRR proposée qui se compose de trois anneaux rectangulaires partageant la même largeur de fente avec des longueurs de 4.87 mm, 3.70 mm et 2.70 mm respectivement et espacés par un gap de 0.70 mm. Cette cellule est simulée à la fréquence de résonance de 5.16 GHz.

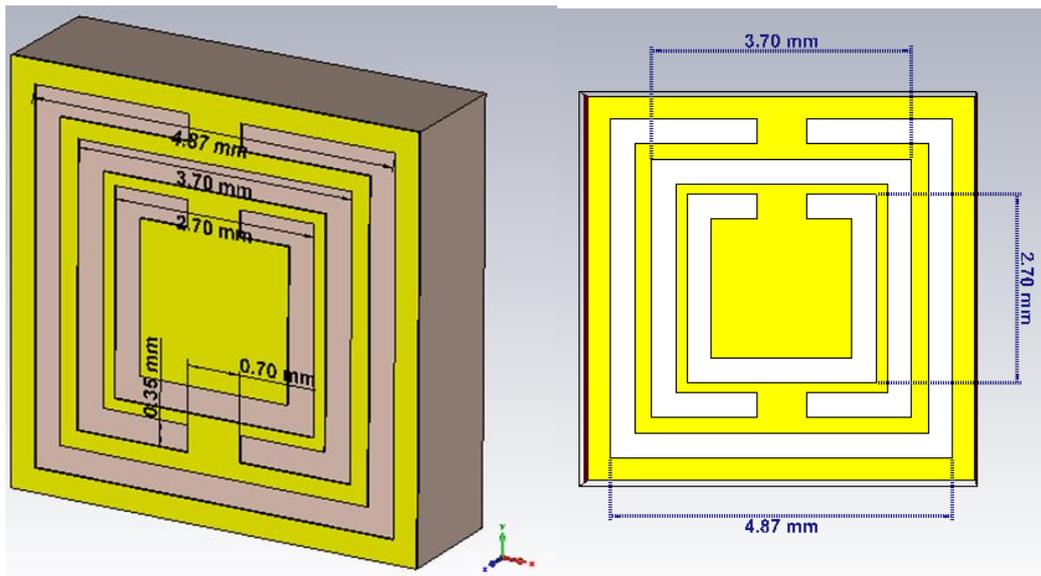


Figure V. 27 : Cellule CSRR proposée [181].

Les résultats de simulation de la cellule CSRR proposée, en termes de coefficient de réflexion S11 et de coefficient de transmission S21 à la fréquence de résonance 5,16 GHz sont illustrés sur la figure V.28. Quant à ses paramètres diélectriques du substrat en termes de la permittivité relative et de la perméabilité relative, ils sont présentés sur la figure V.29. On constate que la partie réelle de la permittivité relative (ϵ_r) présente une valeur négative dans la bande de fonctionnement autour de la résonance. Cependant, la partie réelle de la perméabilité relative (μ_r) demeure positive sur l'intégralité de la bande de travail, comme présenté dans la figure V.29.(b).

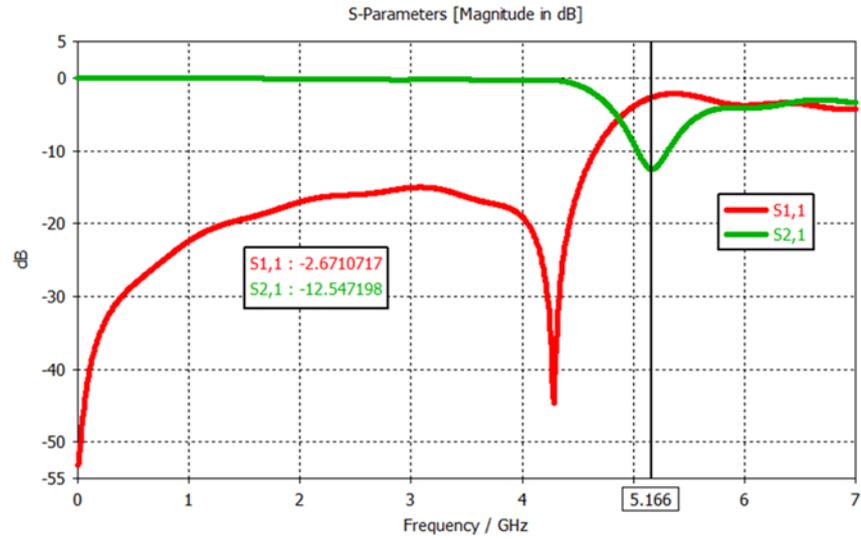
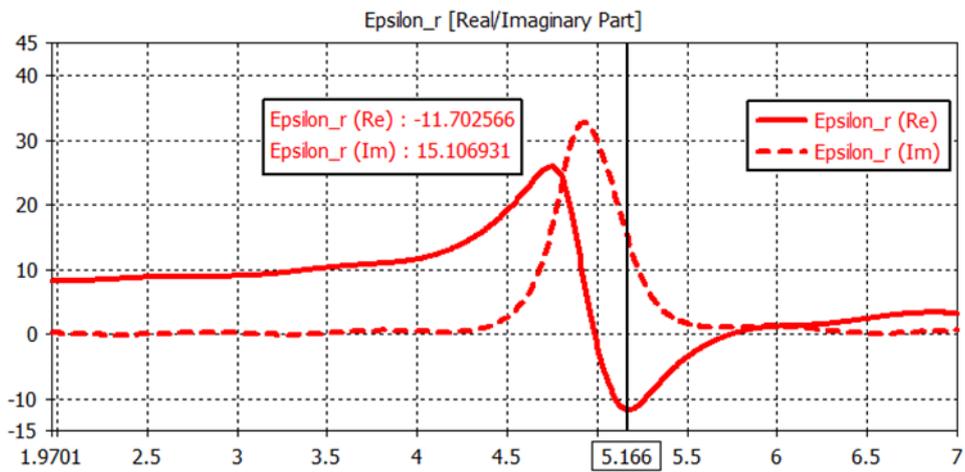
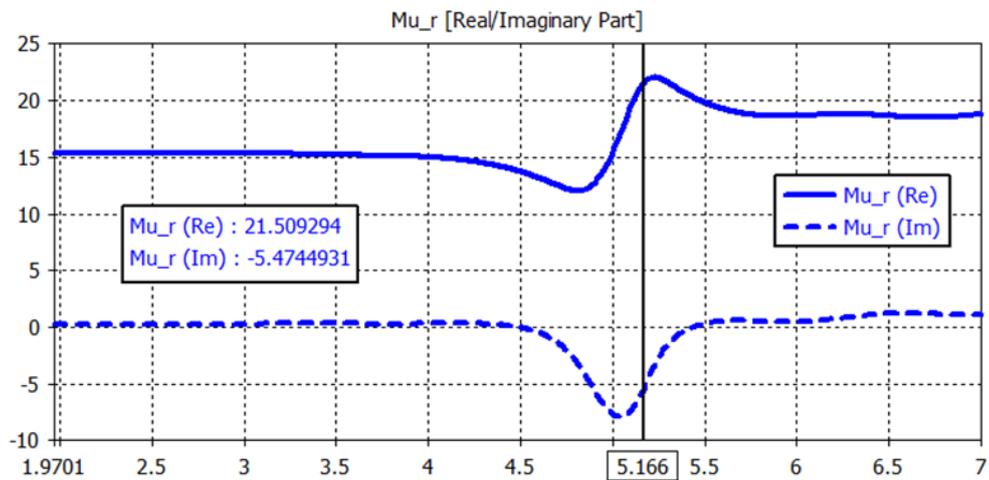


Figure V. 28: Coefficients de réflexion et de transmission de la cellule CSRR proposée [181].



(a)



(b)

Figure V. 29 : Paramètres diélectriques de la cellule CSRR proposée, (a) La permittivité relative et (b) la perméabilité relative.

V.3.2.2 Géométrie de l'antenne miniature

En ce qui concerne la miniaturisation de notre antenne circulaire, nous avons utilisé les cellules métamatériaux CSRR afin de réduire l'encombrement de l'antenne de base, tout en gardant les performances initiales de l'antenne en termes de S11, de largeur de bande et de gain. En effet, nous avons inséré un réseau de 12 cellules CSRR (3 x 4) sur le plan de masse, avec une séparation de 1,13 mm entre elles. La configuration finale de l'antenne miniature proposée est illustrée sur la figure V.30. Le tableau V.4 présente les dimensions finales obtenues après les études paramétriques, avec un taux de miniaturisation obtenu atteignant environ 43.88 %.

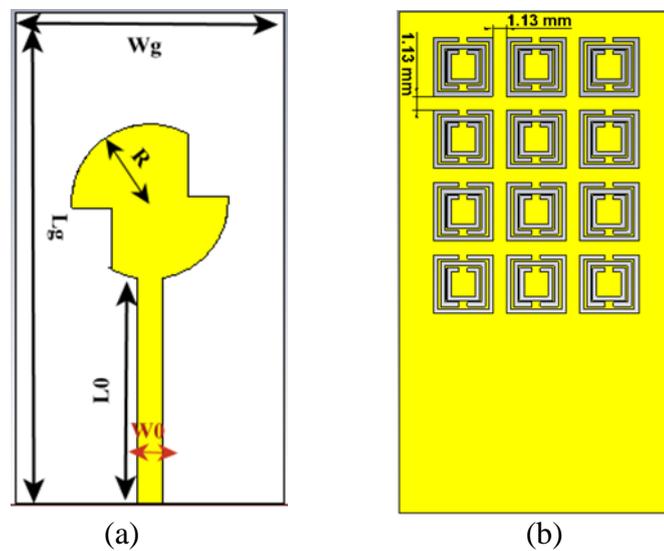


Figure V. 30 : Antenne patch miniature avec des cellules CSRR (a) Vue de patch, (b) Vue de plan de masse [181].

Paramètres	Valeurs (mm)
Rayon (R)	6.55 mm
W0	2.15 mm
L0	19 mm
Wg	22.52 mm
Lg	41.52 mm

Tableau V. 4 : Dimensions de l'antenne miniature proposée [181].

Il est intéressant de montrer comment le rayon R de l'élément rayonnant affecte l'adaptation de l'antenne miniature à la fréquence de résonance de 5,16 GHz. L'impact de ce paramètre est illustré sur la figure V.31. Nous pouvons constater que la variation du rayon R en fonction de la fréquence influence sur l'amélioration du niveau d'adaptation de l'antenne

conçue à la fréquence de résonance 5,16 GHz. La meilleure valeur de la puissance réfléchie est de -14.53 dB pour R = 6.55 mm.

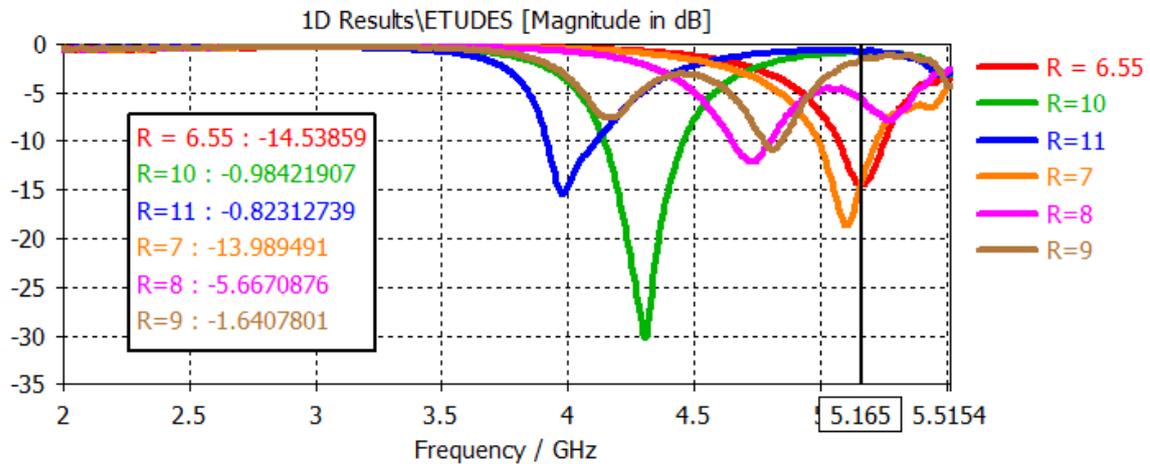


Figure V. 31: Variation du rayon R de l'élément rayonnant en fonction de la fréquence [181].

Les figures V.32, V.33, V.34 et V.35 montrent respectivement le coefficient de réflexion, le taux d'onde stationnaire, le gain, ainsi que les diagrammes de rayonnement en 2D et en 3D de l'antenne miniature proposée. Les résultats de simulation obtenus présentent une bonne adaptation à la fréquence de résonance de 5,16 GHz, avec un coefficient de réflexion de -14,54 dB et une largeur de bande d'environ 182 MHz, comme illustré sur la figure V.32. Le taux d'onde stationnaire de cette antenne est de 1,46, et le gain maximal est d'environ 3,41 dB à la fréquence souhaitée. Le diagramme de rayonnement en 2D se compose de deux lobes avec des ouvertures différentes dans le plan H ($\Phi=90^\circ$), ce qui donne un rayonnement dipolaire. Tandis que dans le plan E ($\Phi=0^\circ$), le rayonnement est presque quasi omnidirectionnel. Ces figures sont observées sur le diagramme de rayonnement en 3D.

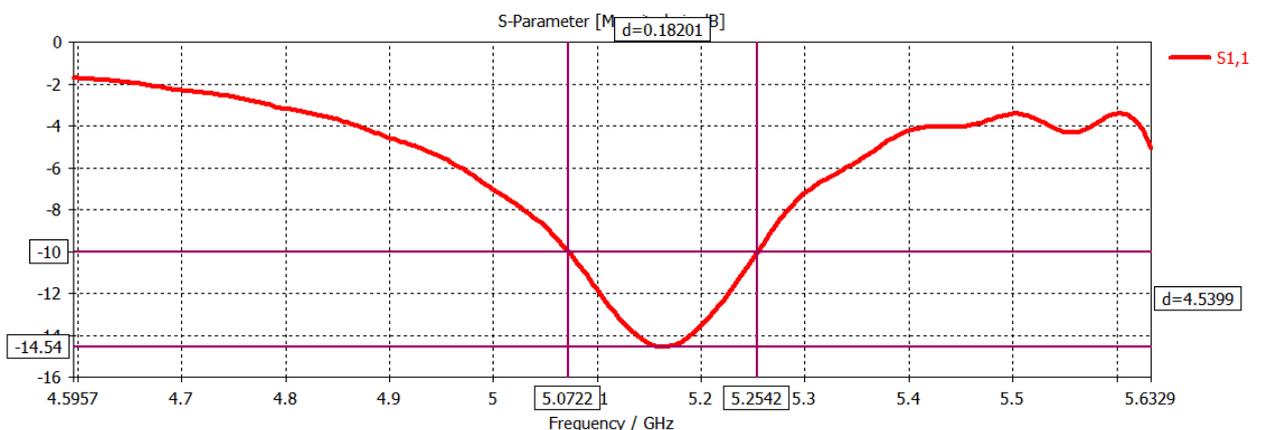


Figure V. 32: Coefficient de réflexion de l'antenne miniature proposée [181].

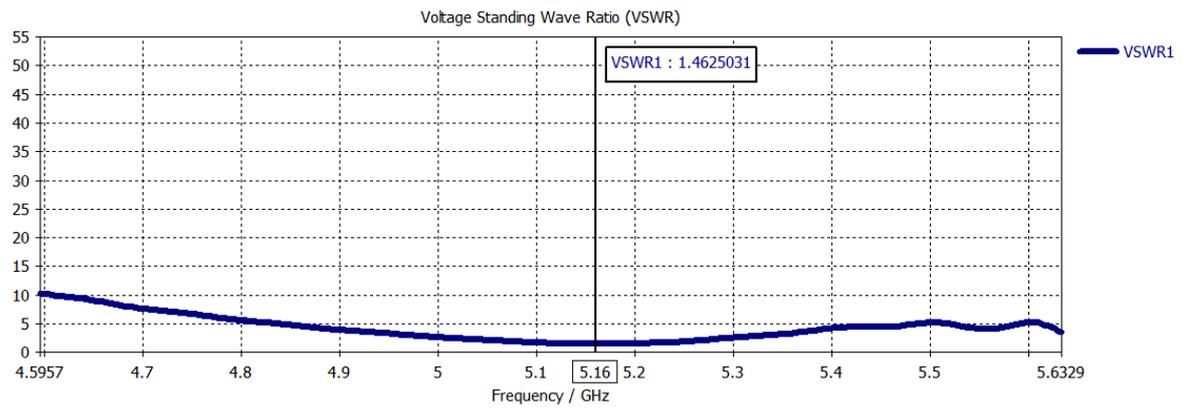


Figure V. 33: Taux d'onde stationnaire de l'antenne miniature proposée [181].

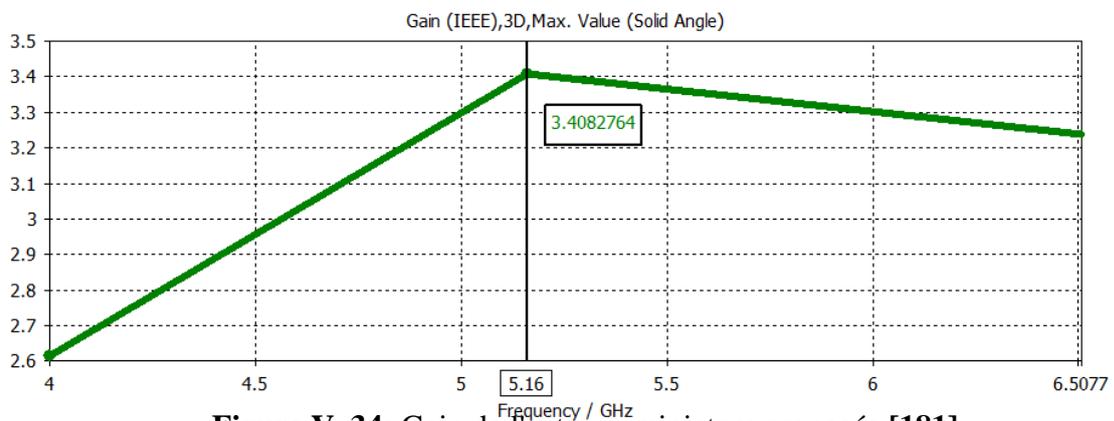
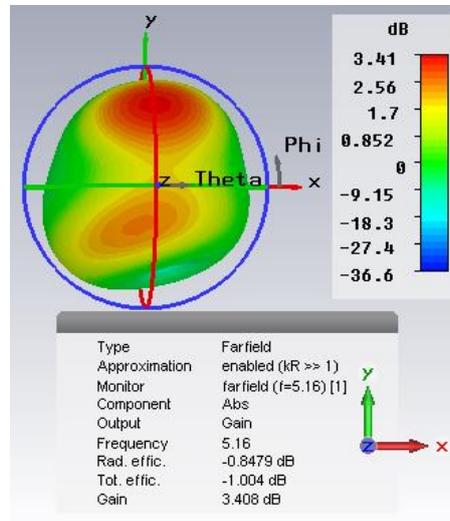


Figure V. 34: Gain de l'antenne miniature proposée [181].



(a)

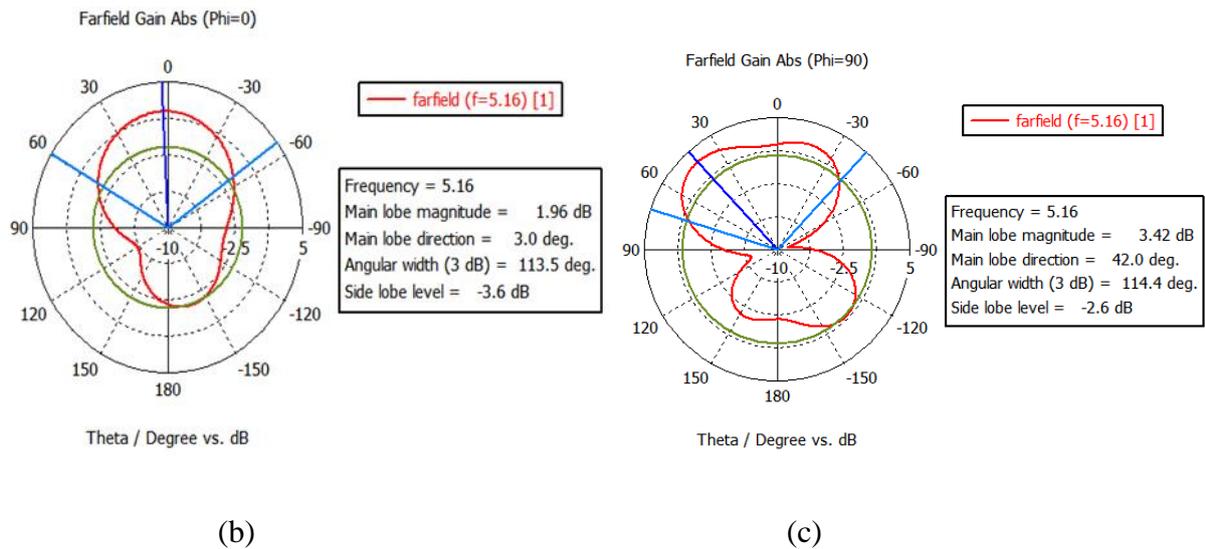


Figure V. 35: Diagrammes de rayonnement de l'antenne miniaturisée proposée : (a) en 3D, (b) et (c) en 2D [181].

V.3.2.3 Amélioration du gain et élargissement de la bande passante

Afin d'obtenir de meilleures performances de l'antenne miniaturisée proposée avec un fonctionnement bi-bandes qui répond aux exigences des applications WiFi-5 et WiFi-6, nous avons choisi la technique DGS pour améliorer son gain et d'élargir sa bande passante. À cet effet, nous avons modifié la géométrie du plan de masse en insérant deux fentes de formes rectangulaires. La nouvelle géométrie du plan de masse est illustrée sur la figure V.36, et les dimensions des fentes sont indiquées dans le tableau V.5.

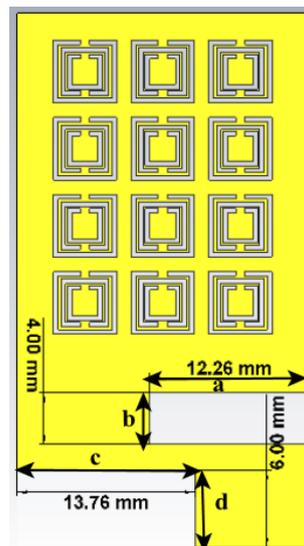


Figure V. 36: Antenne miniaturisée finale proposée avec deux fentes de formes rectangulaires insérées dans le plan de masse [181].

Paramètres	Valeurs (mm)
A	12.26
B	4
C	13.76
D	6

Tableau V. 5 : Dimensions des fentes insérées dans le plan de masse.

Pour garantir le bon fonctionnement de l'antenne miniature conçue, plusieurs études paramétriques ont été réalisées. Nous avons réussi à obtenir une adaptation satisfaisante en termes de coefficient de réflexion, avec deux pics inférieurs aux -28,29 dB et -52,51dB, tout en élargissant la bande passante jusqu'à 453MHz et 760 MHz aux deux fréquences de résonances de 5,16 GHz et 6,22 GHz, comme illustré sur la figure V.37.

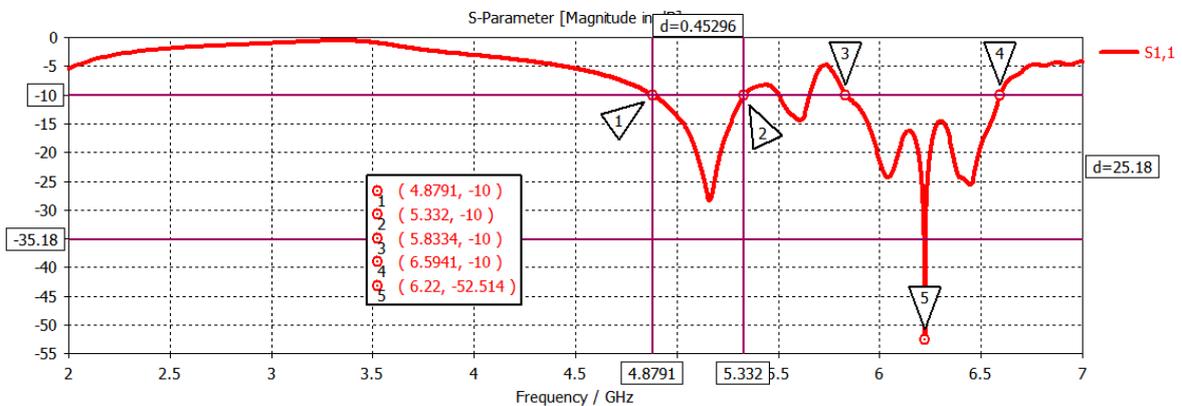


Figure V. 37: Coefficients de réflexion de l'antenne miniature finale proposée [181].

La qualité de l'adaptation de l'antenne miniature finale proposée est également indiquée par le taux d'onde stationnaire présenté dans la figure V.38. Nous observons que le VSWR est autour de 1,08 à 5,16 GHz et de 1 à 6,22 GHz, les deux fréquences de résonance. Ceci montre que le taux d'onde stationnaire est inférieur à 2 aux deux fréquences désirées, cela démontre une adaptation satisfaisante de l'antenne bi-bandes conçue. De plus, le gain de l'antenne miniature finale proposée est d'environ 5 dB à 5,16 GHz et de 3,38 dB à 6,22 GHz, comme indiqué dans la figure V.39. En conséquence, cette structure trouve leurs applications dans les normes de communications sans fils Wi-Fi 5 et Wi-Fi 6.

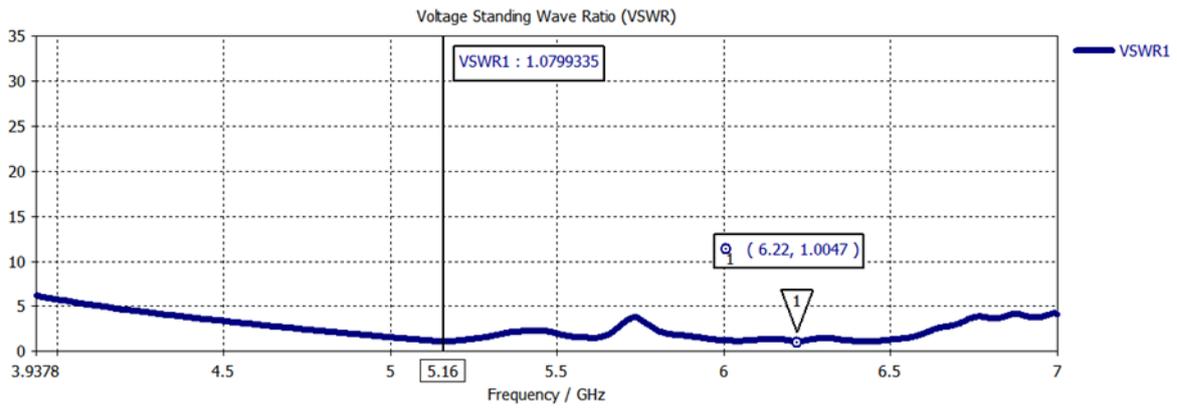


Figure V. 38: Taux d'onde stationnaire de l'antenne miniature finale proposée [181].

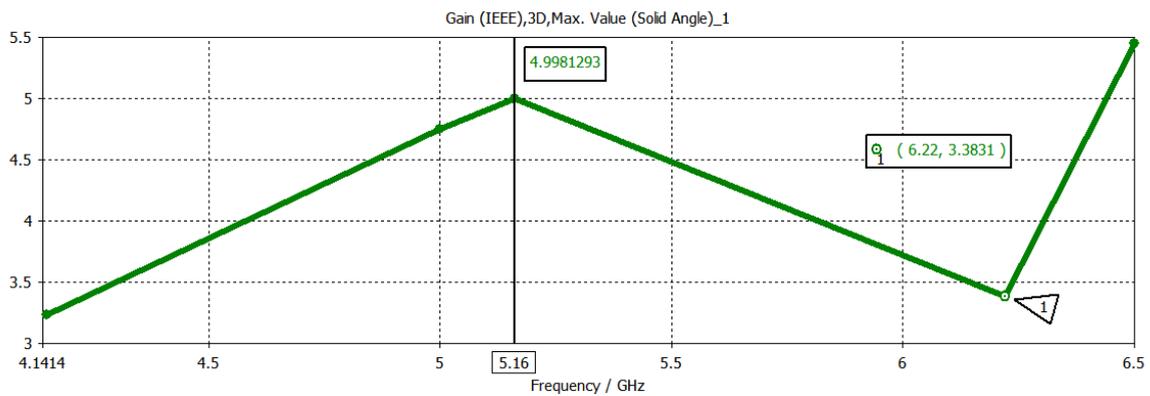
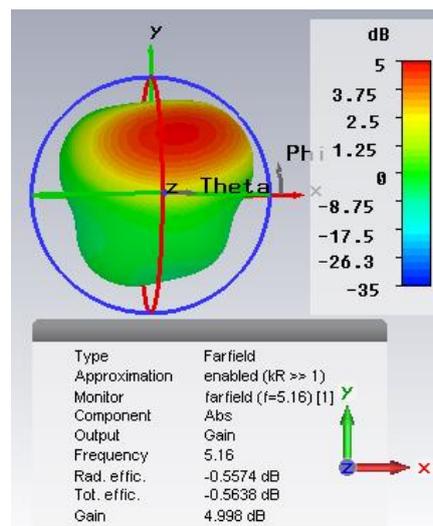


Figure V. 39: Gain de la structure finale proposée basée sur la technique DGS [181].

Les figures V.40 et V.41 présentent les diagrammes de rayonnement en 3D et en 2D obtenus lors de la simulation pour les fréquences de résonances 5,16 et 6,22 GHz respectivement.



(a)

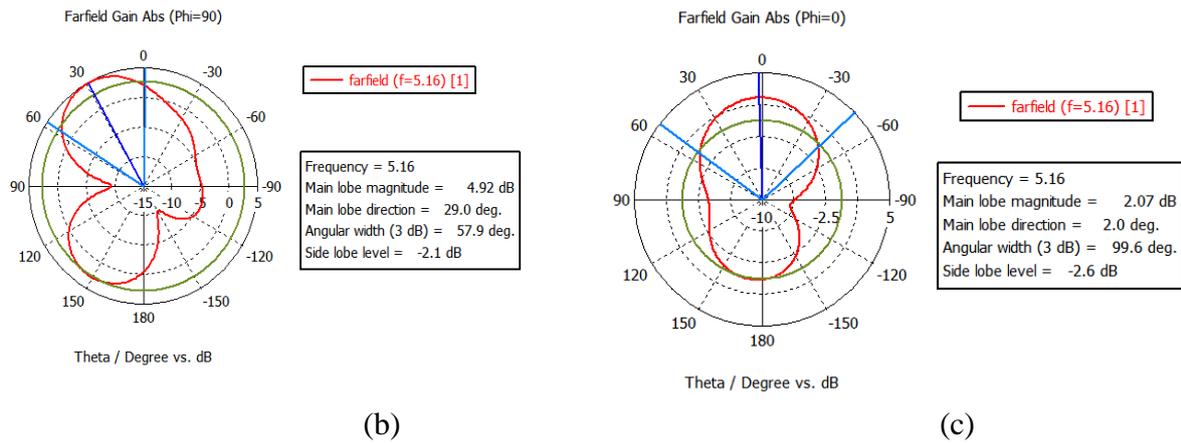
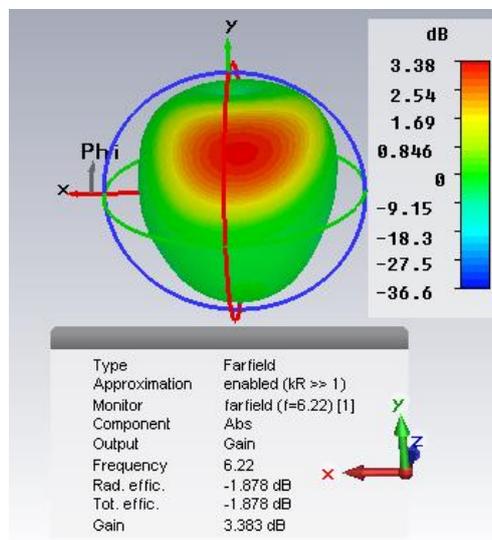


Figure V. 40: Diagrammes de rayonnement de l'antenne miniature à fentes proposée : (a) en 3D, (b) et (c) en 2D à la fréquence de résonance de 5,16 GHz [181].



(a)

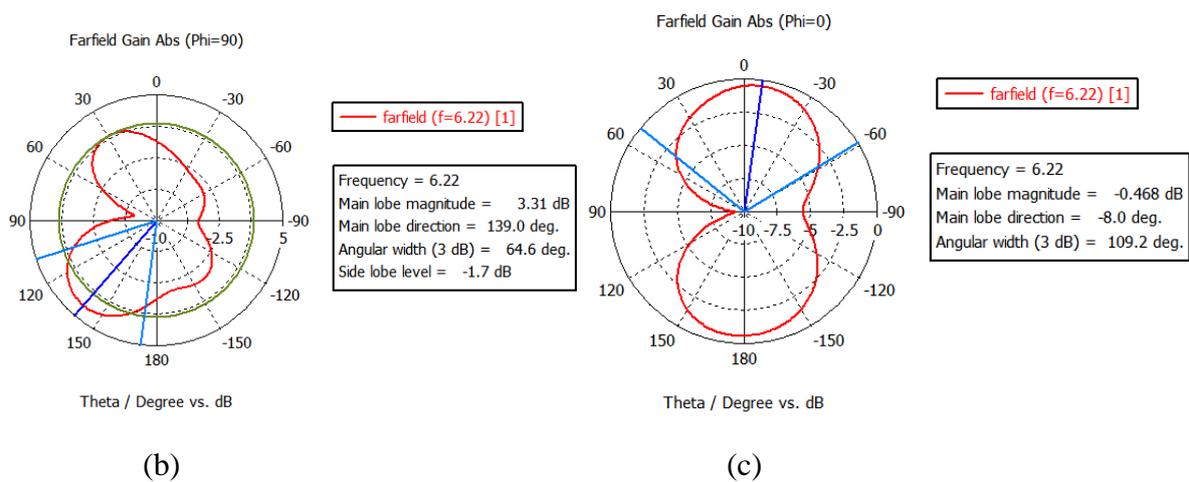


Figure V. 41: Diagrammes de rayonnement de l'antenne miniature à fentes proposée : (a) en 3D, (b) et (c) en 2D à la fréquence de résonance de 6,22 GHz [181].

Le tableau V.6 résume les résultats de simulation obtenus pour les deux antennes proposées selon les applications Wi-Fi-5 et Wi-Fi-6. Après avoir comparé les résultats de simulation, nous avons constaté que la taille de l'antenne patch circulaire est réduite avec un taux de miniaturisation de l'ordre de 43.88 % par rapport à l'antenne de base, tout en présentant des performances améliorées.

	L'antenne circulaire de base proposée	L'antenne circulaire miniature finale proposée
Rayon ' R '	11.04 mm	6.55 mm
Wg x Lg	52.9x31.5 mm ²	41.52x22.52 mm ²
Fréquence	5.16 GHz	5.165 GHz & 6.22 GHz
Coefficient de réflexion S _{1,1}	-35 dB	-28.29 dB & -52.51 dB
Bande passante	332 MHz	453 MHz & 760 MHz
Gain	7.47 dB	5 dB & 3.38 dB

Tableau V. 6: Comparaison entre l'antenne patch proposée et l'antenne miniature finale proposée [181].

Le tableau V.7 présente une comparaison entre l'antenne miniature finale proposée et les structures d'antennes présentées dans d'autres travaux de la littérature :

Paramètres	Notre travail proposé	[182]	[183]	[184]	[185]
Taille (W x L x h) mm ³	41.52x22.52x1.57	34x20x0.79	60x76x2	40 x40x0.79	40 x 40x1.5
Substrat	ROGER RT 5880	ROGER RT 5880	ROGER RT 5880	Rogers RT 5880	FR-4
La bande de fréquence (GHz)	[4.8791-5.3321], [5.8334 – 6.5941]	[5.1697-7.5388]	[5.5128-5.8121]	[2.2–3.18], [4.81–7.21]	[2.314-2.492], [5.586–6.06]
Fréquence central (GHz)	5.16, 6.22	6.33	5.688	2.54, 5.64	2.4, 5.8
Coefficient de réflexion (dB)	-28.29, -52.51	-36.033	-28.01	-24, -52	-32.7, -25.9
La bande passante (GHz)	0.453 ,0.760	2.3691	0.2993	0.98, 2.4	0.178, 0.474
Gain (dB)	5, 3.38	4.1	11.1	2.62, 5.85	3.4, 4.5

Tableau V. 7 : Comparaison de l'antenne miniature finale avec d'autres travaux similaires [181].

V.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons conçu et simulé deux nouvelles structures d'antennes miniatures à base des métamatériaux pour les réseaux de communications sans fils et mobiles.

Dans un premier temps, notre étude porte sur la conception et la simulation d'une nouvelle antenne patch miniature de forme pentagonale basée sur les métamatériaux et destinée aux applications de la 5G. Les performances de l'antenne, notamment en termes de coefficient de réflexion, de gain et de largeur de bande, sont optimisés en utilisant des cellules complémentaires CSRR gravées sur le plan de masse. Cela nous a permis de réduire l'encombrement de l'antenne et d'offrir une solution prometteuse pour répondre aux besoins croissants des réseaux mobiles 5G. L'antenne miniature proposée est bien adaptée à la fréquence de résonance de 3,5 GHz et peut donc être intégrée dans des appareils mobiles tels que les smartphones et les ordinateurs.

Dans un second temps, nous avons concentré sur la conception et la simulation d'une antenne patch de forme circulaire à substrat de type Rogers RT 5880, fonctionnant dans les réseaux de communications sans fils Wi-Fi-5 et Wi-Fi-6. L'ajout d'un réseau de cellules métamatériaux complémentaires CSRR a permis une réduction des dimensions de l'antenne conventionnelle proposée avec un taux de miniaturisation d'environ 43.88%. Dans le but d'améliorer les performances de l'antenne en termes de bande passante et de gain, nous avons utilisé la technique de modification de plan de masse (DGS). En effet, le dispositif antennaire modélisé se distingue principalement par sa compacité et par son diagramme de rayonnement omnidirectionnel.

En tant que perspectives de ce travail, il est très important de réaliser et de mesurer ces structures afin de comparer les résultats de simulation obtenus avec les résultats expérimentaux.

Conclusion Générale et Perspectives

Conclusion Générale et Perspectives

Au fil des années, les réseaux mobiles et sans fils ont été marqués par une évolution exponentielle dans le domaine de télécommunications. Cet essor est le reflet de la demande croissante des utilisateurs dans ce domaine. Les nouvelles technologies, notamment la 5G, offrent un large éventail de services et d'applications afin d'ouvrir la voie à un avenir connecté. Cette évolution, même si elle est jalonnée de défis tels que la capacité, la latence, et la sécurité, il sera donc crucial de surmonter ces obstacles. Cela s'est manifesté par une série de transitions entre les générations de réseau, chacune apportant des améliorations importantes en termes de performance et de fonctionnalité. Cette transition est définie par le passage des réseaux de la 2G aux réseaux de la 3G, puis aux réseaux de la 4G, et maintenant la nouvelle technologie 5G, représente des étapes marquantes dans l'histoire des communications mobiles. Chaque génération a permis d'augmenter et d'améliorer les performances telles que le débit des données, la qualité des services et de fournir de nouvelles fonctionnalités aux utilisateurs. Parallèlement au développement des réseaux cellulaires, le déploiement des réseaux sans fil tels que le Wi-Fi a contribué à étendre la couverture et à fournir une connectivité haut débit dans des environnements spécifiques.

Parmi les solutions prometteuses, l'utilisation des antennes micro-ruban miniatures à base de métamatériaux est couramment mise en œuvre pour répondre aux différentes exigences imposées par les nouvelles technologies des réseaux 5G, Wi-Fi 5 et Wi-Fi 6, notamment en ce qui concerne les vitesses de données et la connectivité accrues. De plus, elles se caractérisent par leur faible coût de fabrication et d'intégration.

L'objectif principal de cette thèse est la contribution à la conception, à la simulation et à la miniaturisation de différentes structures antennaires basées sur les métamatériaux. Ces structures proposent des solutions novatrices pour répondre aux exigences croissantes des réseaux de télécommunications mobiles et sans fil, notamment la nouvelle génération des réseaux mobiles 5G, le Wi-Fi 5 et le Wi-Fi 6. La thèse contribue également au développement des méthodes pour augmenter le gain et la bande passante de ces antennes.

Tout d'abord, l'état de l'art présenté dans le chapitre 1 de cette étude nous a permis d'identifier les différentes formes d'antennes imprimées les plus répandus dans le domaine des télécommunications, tout en introduisant les notions de base et les caractéristiques

Conclusion Générale et Perspectives

radioélectriques des antennes imprimées qui mettent en évidence les diverses possibilités offertes par ces types d'antennes. Ainsi, dans ce premier chapitre, il était indispensable de présenter non seulement leurs avantages, mais aussi de donner un aperçu des problèmes qui subsistent dans le développement de cette structure. À la fin de ce premier chapitre, nous avons présenté plus en détail les systèmes de télécommunications mobiles et sans fils, notamment la nouvelle technologie 5G et les réseaux sans fil Wi-Fi 5 et Wi-Fi 6.

Dans le chapitre 2, une rapide définition des antennes électriquement petites a été présentée. Par la suite, nous avons exposé leurs principales caractéristiques, leurs limites théoriques et les techniques de miniaturisation les plus utilisées dans le domaine des télécommunications, enrichies par des travaux de la littérature. À cette fin, les techniques d'amélioration des performances des antennes miniatures ont également été discutées, ainsi que les applications courantes de ce type d'antenne ont été présentées et commentées.

Ensuite, le chapitre 3, se concentre principalement sur l'étude de la technologie des métamatériaux. Premièrement, nous avons donné une introduction suivie d'un historique et d'une définition de ces métamatériaux. Ensuite, nous avons présenté leur classification, leur terminologie et les structures les plus répandues par les chercheurs dans le domaine des antennes micro-ruban. Dans ce même chapitre, nous avons également étudié la diversité de leurs applications ainsi que les différentes méthodes d'extraction des paramètres effectifs des métamatériaux.

La démonstration théorique de la miniaturisation des antennes patch pour les applications 5G est initialement validée dans le chapitre 4 en utilisant l'outil de simulations (CST Microwave Studio). Effectivement, nous avons choisi une forme rectangulaire basée sur un réseau de huit (8) cellules CSRR insérées sur le plan de masse. Elles sont utilisées pour réduire la taille de la structure proposée tout en conservant les performances de l'antenne en termes de coefficient de réflexion (S_{11}), de bande passante et de gain. Ce chapitre détaille les étapes de miniaturisation en utilisant les cellules métamatériaux CSRR, ainsi qu'en optimisant leur position. Cela a été réalisé à travers plusieurs études paramétriques qui ont conduit à la miniaturisation de l'antenne, soit une réduction de 48% de la surface occupée par l'élément rayonnant. Les performances de notre antenne miniature proposée ont été améliorées en utilisant la technique de plan de masse partiel (DGS), ce qui a permis d'obtenir un coefficient de réflexion de -34,01 dB, une bande passante de 774 MHz et une valeur de gain de l'ordre de 3.44 dB. Ces résultats valident la faisabilité de l'utilisation de l'antenne miniature proposée pour les applications de la 5G à la fréquence de résonance 3.5 GHz. Dans la seconde partie du

Conclusion Générale et Perspectives

chapitre, nous avons présenté une autre technologie de miniaturisation par fentes afin de comparer les résultats de simulation obtenus de cette dernière avec les résultats obtenus par la technologie des métamatériaux. L'ajout de fentes sur le plan de masse de la géométrie de l'antenne conventionnelle a permis de réduire les dimensions de l'antenne d'environ 42%. À ce stade, nous avons constaté que l'utilisation des cellules CSRR est plus efficace en termes de miniaturisation des antennes imprimées que la technique de fentes.

Pour valider nos résultats de simulation obtenus précédemment, la conception des prototypes des antennes proposées et la mesure de leurs performances sont nécessaires afin de confirmer expérimentalement l'intérêt de ces antennes. Des résultats très satisfaisants ont été obtenus pour les trois structures proposées, à savoir l'antenne conventionnelle, l'antenne miniature à base de métamatériaux et l'antenne miniature par fentes en termes de coefficient de réflexion. Nous avons également validé en mesure, le rôle de la technique DGS qui améliore les performances de l'antenne. Ces antennes fonctionnent à 3.5 GHz dans la bande de fréquences de [3.4-3.8] GHz, ce qui les rend adaptées aux applications des réseaux mobiles 5G.

Pour conclure, le chapitre 5 et le dernier chapitre, a montré en simulation la conception des nouvelles structures d'antennes miniatures à base de métamatériaux. Nous avons, d'une part, commencé par la miniaturisation d'une antenne de forme pentagone par l'utilisation des cellules de résonateurs en anneaux fendus complémentaire (CSRR) dédiée aux applications des réseaux 5G. L'élément rayonnant de cette antenne a été gravé sur un substrat de type FR4 Lossy d'une permittivité de 4.3 et une épaisseur de 1.5 mm. Les dimensions de l'antenne ont été réduites de 17.93 % avec une amélioration importante dans les performances de l'antenne proposée en termes de gain et de bande passante grâce à l'utilisation de la technique de plan de masse partielle, autrement dit modification de plan de masse (DGS). En outre, un gain maximal de 3.2 a été obtenu à la fréquence de résonance 3.5 GHz. D'autre part, nous avons étudié une nouvelle forme d'antenne miniature de type circulaire à base d'un réseau de 12 cellules métamatériaux CSRR gravé sur son plan de masse. Le substrat utilisé dans cette étude est de type Rogers RT-5880 avec une permittivité de 2.2 et une épaisseur de 1.57 mm. L'antenne est conçue pour fonctionner dans les deux bandes Wi-Fi 5 et Wi-Fi 6 avec des bandes passantes qui sont autour de 453 MHz et 760 MHz respectivement. Les gains maximaux de l'antenne sont de l'ordre de 5 dB et 3.38 dB obtenus sur les mêmes bandes de fréquences respectivement. Cette technique de miniaturisation proposée a permis d'atteindre un taux de miniaturisation de 43.88% par rapport à l'antenne conventionnelle proposée.

Perspectives

Nos travaux réalisés dans le cadre de cette thèse ouvrent la voie à un ensemble de perspectives prometteuses dans le domaine des télécommunications mobiles et sans fil. Avec les progrès réalisés dans ce domaine, la miniaturisation des antennes micro-ruban pour la nouvelle technologie 5G, Wi-Fi 5 et Wi-Fi 6 devient un domaine de recherche en pleine expansion avec un fort potentiel d'innovation, offrant ainsi des améliorations considérables en termes de connectivité, de couverture et de performances. En perspectives, il serait donc intéressant d'exploiter les résultats obtenus dans notre thèse pour réaliser et mesurer les prototypes des structures d'antennes simulées, puis de les intégrer dans des appareils plus petits et plus compacts, tels que les smartphones et les tablettes. De plus, le développement des nouvelles structures élémentaires et des réseaux d'antennes en intégrant des techniques de miniaturisation innovantes pour un fonctionnement large bande et multibandes représente un défi intéressant pour les chercheurs dans le domaine de télécommunications.

Bibliographie

Bibliographie :

- [1] O.Picon, L. Cirio, C. Ripoll, et al. « Les antennes: Théorie, conception et applications ». Dunod, Paris, 2009, ISBN 978-2-10-054245-1.
- [2] D. M. Pozar, « Microstrip Antennas». Proceedings of the IEEE, vol. 80, no 1, pp. 79-91, 1992.
- [4] L. C. Paul and N. Sultan, « Design, simulation and performance analysis of a line feed rectangular micro-strip patch antenna». International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies, vol. 4, no 2, pp.117-126. 2013.
- [5] A. S. Kirar, V. S. Jadaun, and P. K. Sharma, « Design a circular microstrip patch antenna for dual band». International Journal of Electronics Communication and Computer Technology (IJECCCT), vol. 3, no 2, 2013.
- [6] R. Afandi, and D. R. Hadi, « Design and bandwidth optimization on triangle patch microstrip antenna for WLAN 2.4 GHz». In MATEC Web of Conference., EDP Sciences, vol. 164, pp. 01042, 2018, doi: 10.1051/mateconf/201816401042.
- [7] C. A. Balanis, « Antenna theory : A Review ». Proceedings of the IEEE, vol. 80, no. 1, pp. 7–23, 1992.
- [8] C.A.Balanis, « Antenna theory: analysis and design». John Wiley & Sons, 2016.
- [9] Z. Hamouda, « Antenne microondes souples ultra large bandes à base de matériaux composites». Thèse de Doctorat, Spécialité Aéronautique, Université SAAD DAHLEB de Blida 1, le Mai 2016
- [10] A. Arora, A. Rana, A. Yadav, and R. L. Yadava, « Design of microstrip patch antenna at 2.4 GHz for Wi-Fi and Bluetooth applications». In Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1921, No. 1, pp. 012023, IOP Publishing, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1921/1/012023.
- [11] D. Athina, S. Vuyyavula, and S. Ravi, « Bandwidth and gain improvement of printed antennas with different slots for wireless applications». In 2022 International Mobile and Embedded Technology Conference (MECON), IEEE, pp. 401–407, 2022, doi: 10.1109/MECON53876.2022.9752159.
- [13] A. Synak, « Design and implementation of UHF patch antenna». Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya. 2014.
- [14] H.Chorfi, «Conception d'un nouveau système d'antenne réseau conforme en onde millimétrique». Université du Québec en Abitibi-Temiscamingue, Canada, 2012.
- [15] “Antenna Polarisation - Electronics For You,” <https://www.electronicsforu.com/technology-trends/learn-electronics/antenna-polarisation> (accessed Jun. 21, 2023).
- [16] I. A.Tunio, « Study of impedance matching in antenna arrays». Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2020.
- [17] G.Augustin, P. C. Bybi , V. P.Sarin, P.Mohanan, , C. K.Aanandan, and K. Vasudevan, « A compact dual-band planar antenna for DCS-1900/PCS/PHS, WCDMA/IMT-2000, and WLAN applications». IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol.7, pp.

Bibliographie

- 108-111,2008.
- [18] H. Wang, X. B. Huang, and D. G. Fang, « A single layer wideband U-slot microstrip patch antenna array». *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 7, pp. 9-12, 2008.
- [19] H. Errifi, A. Baghdad, A. Sahel, and A. Badri, « Etude comparative de l'influence des deux méthodes d'adaptation d'impédance sur la performance de l'antenne patch rectangulaire à la fréquence 10 GHz ». *researchgate.net*, no. pp. 1-2. May, 2014.
- [20] R. Mishra, R. G. Mishra, and P. Kuchhal, « Analytical study on the effect of dimension and position of slot for the designing of ultra wide band (UWB) microstrip antenna». In *2016 international conference on advances in computing, communications and informatics (ICACCI)*, pp. 488-493. IEEE. 2016, doi: 10.1109/ICACCI.2016.7732093.
- [22] M. Singh, A. Basu, and S. K. Koul, « Circular patch antenna with quarter wave transformer feed for wireless communication». In *2006 annual IEEE India conference*, pp. 1-5. IEEE. 2006, September.
- [24] A. P. Zhao, and A. V. Raisanen, « Application of a simple and efficient source excitation technique to the FDTD analysis of waveguide and microstrip circuits». *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 44, no 9, pp. 1535-1539. 1996.
- [25] G. Christina, « A review on novel microstrip patch antenna designs and feeding techniques». *IRO Journal on Sustainable Wireless Systems*, vol. 4, no. 2, pp. 110–120, 2022, doi: 10.36548/jsws.2022.2.005.
- [27] A. Kumar, J. Kaur, and R. Singh, « Performance analysis of different feeding techniques». *International journal of emerging technology and advanced engineering*, vol. 3, no. Issue 3, pp. 884-890. (ISSN 2250-2459, ISO 9001:2008 Certified Journal), 2013, [Online]. Available: www.ijetae.com
- [28] A.Fouque, « Contribution à la conception d'un récepteur mobile faible coût et faible consommation dans la bande Ku pour le standard DVB-S». (Thèse de doctorat, Bordeaux 1). 2012.
- [29] A. Kumar, N. Gupta, and P. C. Gautam, « Gain and bandwidth enhancement techniques in microstrip patch antennas-a review». *International Journal of Computer Applications*, vol. 148, no. 7, pp. 9–14, 2016, doi: 10.5120/ijca2016911207.
- [30] Y. Tighilt, « Identification des antennes microrubans multicouches par la méthode spectrale et les réseaux de neurones». Thèse de doctorat, Université FERHAT ABBAS -Setif , 2018.
- [31] A. Arora, A. Khemchandani, Y. Rawat, S. Singhai, and G. Chaitanya, « Comparative study of different feeding techniques for rectangular microstrip patch antenna». *International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering*, vol. 3, no. 5, pp. 32-35, 2015, doi: 10.17148/IJIREEICE.2015.3509.
- [32] H. K. Varshney, M. Kumar, A. K. Jaiswal, R. Saxena, and K. Jaiswal, « A survey on different feeding techniques of rectangular microstrip patch antenna». *International Journal of Current Engineering and Technology*, vol. 4, no. 3, pp. 1418–1423, 2014.
- [33] A. Boufrioua, « Contribution à l'étude des antennes a patch résistifs et parfaitement conducteur tenant compte d'une source d'excitation et des nouvelles formes

Bibliographie

- asymptotiques de courant». Thèse de doctorat, Institut d'électronique, Université de Constantine, 11 /2006.
- [34] I. Singh and V. S. Tripathi, « Micro strip patch antenna and its applications: a survey». *Int. J. Comp. Tech. Appl*, vol. 2, no. 5, pp. 1595–1599, 2011.
- [35] M. M. Soliman, and M. L. Hakim, « Design and simulation of micro strip patch antennas for 5G wireless communication». October, 2019.
- [36] A. A. Salih, S. R. Zeebaree, A.S. Abdulaheem, R. R. Zebari, M. A. Sadeeq, and O. M. Ahmed, « Evolution of mobile wireless communication to 5G revolution ». *Technology Reports of Kansai University*, vol. 62, no 5, pp. 2139-2151. June, 2020.
- [37] S. Mondal, A. Sinha, and J. Routh, « A survey on evolution of wireless generations 0G to 7G». *International Journal of Advance Research in Science and Engineering (IJARSE)*, vol. 1, no 2, pp. 5-10, 2015.
- [38] S. Alraih, I. Shayea, M. Behjati, R. Nordin, N. F. Abdullah, A. Abu-Samah, and D. Nandi, « Revolution or evolution? Technical requirements and considerations towards 6G mobile communications». *Sensors*, vol. 22, no 3, pp. 762, 2022.
- [39] M. Meraj and S. Kumar, « Evolution of mobile wireless technology from 0G to 5G». *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, vol. 6, no. 3, pp. 2545–2551, 2015.
- [40] A.U. Gawas, (2015), « An overview on evolution of mobile wireless communication networks: 1G-6G». *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, vol. 3, no 5, pp. 3130-3133, 2015.
- [41] O. O. FAGBOHUN, « Comparative studies on 3G,4G and 5G wireless technology». *IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering*, vol. 9, no 3, pp. 88-94, 2014, doi: 10.9790/2834-0925133139.
- [42] S. Hossain, « 5G Wireless Communication Systems». *American Journal of Engineering Research (AJER)*, vol. 2, no. 10, pp. 344–353, 2013.
- [43] M. Dahiya, «Need and Advantages of 5G wireless Communication Systems». *International Journal*, vol. 5, no .6, 2017.
- [44] S.Sébastien, « Les enjeux de la 5G Publication du rapport». Arcep, p. 9, 2018.
- [45] M. Pant and L. Malviya, « Design, developments, and applications of 5G antennas: A review». *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, vol. 15, no. 1, pp. 1-27, 2022, doi: 10.1017/S1759078722000095.
- [46] H. S. Ho, and D. Carpentier, «Analyse de l'impact de la 5G sur les smart cities européennes». 2021. Available at: <http://hdl.handle.net/2078.1/thesis:31659>.
- [47] M. G. Kachhavay and A. P. Thakare, « 5G technology-evolution and revolution». *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, vol. 3, no. 3, pp. 1080–1087, 2014.
- [48] A. I. Al-Alawi, « WiFi Technology : Future Market Challenges and Opportunities». *Journal of computer science*, vol. 2, no. 1, pp. 13–18, 2006.
- [49] E. Firdus, R. Aghababayev, V. Aliyev, G. Mustafayeva, R. Mayilov, I. Sardarova, and S. Bakhshaliyeva, « WiFi from past to today , consequences that can cause and measures

Bibliographie

- of prevention from them , WiFi security protocols». In E3S Web of Conferences, vol. 474, pp. 02004, EDP Sciences, 2024.
- [50] R. K. Saha, « Coexistence of Cellular and IEEE 802.11 Technologies in Unlicensed Spectrum Bands -A Survey». IEEE Open Journal of the Communications Society, vol. 2, pp. 1996–2028, 2021, doi: 10.1109/OJCOMS.2021.3106502.
- [51] M. Andriani and M. Irhamsyah, « Analysis of Energy Efficiency for Wi-Fi 802 . 11b Multi-Hop Networks». In 2013 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (COMNETSAT), pp. 64–68, 2013, doi: 10.1109/COMNETSAT.2013.6870862.
- [52] G. A. G. Vimala, « IoT Based Smart Home Appliance Control for detecting the speed using Wifi 802.11 a in Comparison with Wi-Max». In 2022 4th International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICAC3N), pp. 2011–2014, IEEE,2022, doi: 10.1109/ICAC3N56670.2022.10074175.
- [53] M. Risdiana, and M. W. Perdana, « Local Area Network (LAN) Design For Services Video Conference With Standard WIFI 802.11G». International Journal Cister, vol. 1, no 3, 2022.
- [54] H. J. Zhu and D. Kidston, « The Impact of Link Adaptation on WiFi 802 . 11n». In 2016 IEEE International Conference on Networking, Architecture and Storage (NAS), pp. 1–5, 2016, doi: 10.1109/NAS.2016.7549424.
- [55] L. Verma, , M. Fakharzadeh, ,and S. Choi, « Wifi on steroids: 802.11 ac and 802.11 ad». IEEE Wireless Communications, vol. 20, no 6, pp. 30–35, 2013.
- [56] A. K. Sharma, «Study of 2x2 MIMO Circular patch Antenna for WiFi-6 or WiFi-6e in IEEE 802 . 11ax Applications». In 2023 International Conference on Artificial Intelligence and Applications (ICAIA) Alliance Technology Conference (ATCON-1), pp. 1–5, 2023, doi: 10.1109/ICAIA57370.2023.10169640.
- [57] C. Deng, X. Fang, X. Han, X. Wang, L. Y an, R. He, ... and Y. Guo, « IEEE 802.11 be Wi-Fi 7: New challenges and opportunities». IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2020, vol. 22, no 4, pp. 2136-2166.
- [58] T. Addepalli, « Compact MIMO Diversity Antenna for 5G Sub: 6 GHz (N77/N78 and N79) and WLAN (Wi-Fi 5 and Wi-Fi 6) Band Applications». Wireless Personal Communications., vol. 132, no. 3, pp. 2203–2223, 2023, doi: 10.1007/s11277-023-10718-4.
- [59] B. Yang, H. Huang, B. Feng, and L. Deng, «An Omnidirectional Antenna with Wide Bandwidth and High Gain for WiFi-5 and WiFi-6 Applications». In 2020 IEEE 3rd International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT), pp. 714–716, 2020, doi: 10.1109/ICEICT51264.2020.9334314.
- [60] M. Wollschlaeger, T. Sauter, and J. Jasperneite, A. Technology, « The future of industrial communication: Automation networks in the era of the internet of things and industry 4.0». vol. 11, no 1, p. 17-27, 2017.
- [61] H. M. Jawad, R. Nordin, S. K. Gharghan, A. M. Jawad, and M. Ismail, « Energy-Efficient Wireless Sensor Networks for Precision Agriculture : A Review». vol. 17, no 8, pp. 1781. 2017, doi: 10.3390/s17081781.
- [62] I. Sammour, « Performance Enhancement in Wi-Fi Networks using Machine Learning».

Bibliographie

- Thèse de doctorat. Université Clermont Auvergne. 2023.
- [63] L. García, J. M. Jiménez, M. T. A. ABDULLAH, and J. Lloret, « Wireless Technologies for IoT in Smart Cities». *Network Protocols and Algorithms*, vol. 10, no. 1, pp. 23–64, 2018, doi: 10.5296/npa.v10i1.12798.
- [64] N. Levallet, N. O'Reilly, E. Wanless, M. Naraine, E. Alkon, and W. Longmire, « Enhancing the Fan Experience at Live Sporting Events : The Case of Stadium Wi-Fi». *Case Studies in Sport Management*, vol. 8, no 1, pp. 6-12., 2019, doi: 10.1123/cssm.2018-0015.
- [65] M.Tarbouch, A.Elamri, H.& Terchoune,. «Contribution to the miniaturization of antennas: state of the art». *Transactions on Networks and Communications*, vol. 4, no 5, p. 48, 2016.
- [66] H. A. Wheelert, «Fundamental limitations of small antennas». *Proceedings of the IRE*, vol. 35, no 12, p. 1479-1484, 1947.
- [67] L. J. Chu,. «Physical limitations of omni-directional antennas». *Journal of applied physics*, vol. 19, no 12, p. 1163-1175. , 1948.
- [68] N. Kristou, «Étude et conception de métamatériaux accordables pour la miniaturisation d'antennes aux fréquences micro-ondes».Thèse de doctorat, Rennes 1. 2018.
- [69] M. Pigeon, «Etude et réalisation d'antennes Ultra-compactes à base de métamatériaux. application à la réalisation d'une antenne GNSS miniature». Thèse de doctorat. 2011.
- [70] J.Valleau, «Miniaturisation d'antennes très large bande pour appllication spatiales». Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT.2016.
- [71] G. Bhatia, «Miniaturization techniques for next generation small antennas : Review». *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR)*,vol. 3, no. 11, pp. 1394–1398, 2016.
- [72] A. Kaur, G. Singh, and M. Kaur, «Miniaturized multiband slotted microstrip antenna for wireless applications», *Wireless Personal Communications*, vol. 96, no. 1, pp. 441–453, 2017, doi: 10.1007/s11277-017-4177-4.
- [73] F. Chetouah, S. Aidel, N. Bouzit, & I. Messaoudene. «A miniaturized printed monopole antenna for 5.2-5.8 GHz WLAN applications». *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 28, no 5, e21250. 2018, doi: 10.1002/mmce.21250.
- [74] S. Shrestha, S. J. Han, S. K. Noh, S. Kim, H. B. Kim, and D. Y. Choi, «Design of modified sierpinski fractal based miniaturized patch antenna». In *The International Conference on Information Networking (ICOIN)*, pp. 274-279. IEEE., 2013, doi: 10.1109/ICOIN.2013.6496389.
- [75] A. A. Rakholiya and N. V Langhnoja. «A review on miniaturization techniques for microstrip patch antenna». *International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education*, vol. 3, no 2, pp. 4281–4287, 2017.
- [76] D.Froumsia, S.W. Yao, E. D. Jean-François, H. Alphonse, KOLYANG, & Inc, M . «A review of the miniaturization of microstrip patch antenna based on fractal shapes». vol. 30, no. 5, pp. 1–13, 2022, doi: 10.1142/S0218348X22401612.

Bibliographie

- [77] N. Rao. «Modified sierpinski and its use in fractal patch antenna for miniaturization and multiband behavior». In 2022 IEEE Microwaves, Antennas, and Propagation Conference (MAPCON), pp. 1804–1809, 2022, doi: 10.1109/MAPCON56011.2022.10047750.
- [78] P. Deepthi, & M. Dhinakaran. «Patch antenna miniaturization technique for biomedical implant». In 2020 Fourth International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC), pp. 509-513. IEEE 2020 doi: 10.1109/ICCMC48092.2020.ICCMC-00095.
- [79] Z. Bendahmane, S. Ferouani, and C. Sayah. «High permittivity substrate and DGS technique for dual-band star-shape slotted microstrip patch antenna miniaturization». Progress In Electromagnetics Research C, vol. 102, pp. 163–174, 2020.
- [80] D. Upadhyay and R. P. Dwivedi. «Antenna miniaturization techniques for wireless applications». In 2014 Eleventh International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN), pp. 1–4, IEEE. 2014, doi: e10.1109/WOCN.2014.6923083.
- [81] W. F. Hoon, M. F. B. Abd Malek, L. H. Fang, L. Y. Seng, and L. Zahid. «The miniaturization of high permittivity DRA with array patches». In 2013 1st International Conference on Artificial Intelligence, Modelling and Simulation, pp. 443–445, IEEE 2013, doi: 10.1109/AIMS.2013.80.
- [82] P. Kumar and G. Singh. «Microstrip antennas loaded with shorting post». Engineering, vol. 1, no 1, p. 41., 2009.
- [83] H. Hazarathaiyah, A. Heddallikar, R. Pinto, & K. M. Bhurchandi. «Design of compact dual band microstrip antenna using DGS and shorting post methods». In 2022 2nd International Conference on Emerging Frontiers in Electrical and Electronic Technologies (ICEFEET)., vol. 3, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICEFEET51821.2022.9848175.
- [84] S. S. ElKadri. «Contribution à l'étude d'antennes miniatures reconfigurables en fréquence par association d'éléments actifs», Thèse de doctorat. Université de Grenoble, 2011.
- [85] Y. Cheng, Y. Dong, and Y. Pan. «Miniaturized circularly polarized metal antenna with a shorting pin for low cost RFID application». In 2019 IEEE MTT-S International Wireless Symposium(IWS), pp. 1–3, IEEE, 2019.
- [86] N.Seladji-Hassaine.«Conception d'antennes microrubans miniatures pour différents standards de communications sans fil», Thèse de doctorat, Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen, 2020.
- [87] H. Oraizi, M. Hamidkhani, and S. Hedayati. «Miniaturized ultra-wideband circular metallic plate antenna suspended by shorting pins». In Proceedings of 2014 Mediterranean Microwave Symposium (MMS2014), pp. 1–4, IEEE 2014, doi: 10.1109/MMS.2014.7088963.
- [88] G. Li, & F. S. Zhang. «A compact broadband and wide beam circularly polarized antenna with shorted vertical plates». *IEEE Access*, vol. 7, pp. 90916–90921, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2927284.
- [89] M. Hosseini, D. M. Klymyshyn, G. Wells, and X. Liu. « Short and open circuited EBG resonator antennas : Miniaturization with a shorting plate and dielectric loading» *IEEE Transactions on Antennas and Propagation.*, vol. 63, no. 10, pp. 4305–4314, 2015, doi: 10.1109/TAP.2015.2463714.

Bibliographie

- [90] W. L. Roh and J. M. Woo. «Miniaturization of microstrip antenna using folded structure with attaching plates for satellite communication terminal», In 2007 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium., vol. 3, pp. 4709–4712, 2007, doi: 10.1109/APS.2007.4396595.
- [91] M. U. Khan, M. S. Sharawi, and R. Mittra. «Microstrip patch antenna miniaturisation techniques : a review»." IET Microwaves, Antennas & Propagation, vol. 9, no. 9, pp. 913–922, 2015, doi: 10.1049/iet-map.2014.0602.
- [92] A. Holub and M. Polívka. «A novel microstrip patch antenna miniaturization technique: Meanderly folded shorted-patch antenna», In 2008 14th Conference on Microwave Techniques, pp. 1-4, IEEE 2008, doi: 10.1109/COMITE.2008.4569889.
- [93] N. Ferdous, N. T. Nainee, and R. Hoque. «Design and performance of miniaturized meandered patch antenna for implantable biomedical applications». In 2015 International Conference on Electrical Engineering and Information Communication Technology (ICEEICT), pp. 1–4, IEEE 2015, doi: 10.1109/ICEEICT.2015.7307370.
- [94] H. Nakano, H. Tagami, A. Yoshizawa, & J. Yamauch. «Shortening ratios of modified dipole antennas». IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 32, no 4, p. 385–386.1984
- [95] Y. Huang, X. Fang, D. Inserra, J. Li, G. Wen, H. Zhang, and L. Zuo. «Miniaturized broadband CPW-fed folded-slot antenna for wireless-LAN and Wi-MAX bandwidths». In 2018 IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP). pp. 89–90, IEEE 2018.
- [96] Y. K. Cho, G. H. Son, G. S. Chae, L. H. Yun, and J. Hong. «Improved analysis method for broadband rectangular microstrip antenna geometry using E-plane gap coupling». Electronics Letters, vol. 29, no. 22, pp. 1907–1909, 1993, doi: 10.1049/el:19931269.
- [97] H. R. Hassani, & D. Mirshekar-Syahkal. «Study of electromagnetically coupled stacked rectangular patch antennas». IEE Proceedings-Microwaves, Antennas and Propagation, vol. 142, no 1, p. 7-13. 1995.
- [98] A. Niang. «Antennes miniatures et structures électromagnétiques à circuits non-Foster», Thèse de doctorat, Université de Paris-Saclay, 2017.
- [99] C. Y. Huang, & M. H. Lin. «Ceramic GPS antenna for remote sensing». In IGARSS. IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet: The Role of Remote Sensing in Managing the Environment. Proceedings (Cat. No. 00CH37120) ,Vol. 5, pp. 2182-2184, IEEE 2000.
- [100] P. Ikonen, & S. Tretyakov. «On the advantages of magnetic materials in microstrip antenna miniaturization ». Microwave and Optical Technology Letters, vol. 50, no. 12, pp. 3131–3134, 2008, doi: 10.1002/mop.
- [101] N. Altunyurt, M. Swaminathan, P. M. Raj, and V. Nair. «Antenna Miniaturization Using Magneto-Dielectric Substrates», In 2009 59th Electronic Components and Technology Conference Electron. pp. 801–808, IEEE, 2009, doi: 10.1109/ECTC.2009.5074103.
- [102] S. D. R. Prasath, S. Balaji, M. S. Khanna, S. Raju, and V. Abhaikumar, «Miniaturization of patch antennas using magneto-dielectric materials», In 2010 Indian Antenna Week: A Workshop on Advanced Antenna Technology. pp. 1–4, IEEE, 2010, doi: 10.1109/AAT.2010.5545951.

Bibliographie

- [103] R. C. Hansen, & M. Burke. «Antennas with magneto-dielectrics». *Microwave and optical technology letters*, vol. 26, no. 2, pp. 75–78, 2000.
- [104] Y. A. Sheikh, K. N. Paracha, S. Ahmad, A. R. Bhatti, A. D. Butt, and S. K. A. Rahim, «Analysis of compact dual-Band metamaterial-based patch antenna design for wearable application», *Arabian Journal for Science and Engineering*, pp. 1-10, 2022, doi: 10.1007/s13369-021-06365-1.
- [105] M. A. Baba, M. K. A. Rahim, F. Zubir, and M. F. M. Yusoff, «Design of miniaturized multiband patch antenna using CSRR for WLAN / WiMAX applications», *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, vol. 16, no. 4, pp. 1838-1845, 2018, doi: 10.12928/TELKOMNIKA.v16i4.9064.
- [106] A. EL Yousfi, A. Lamkaddem, K. A. Abdalmalak, and D. Segovia-Vargas, «A Miniaturized triple-band and dual-polarized monopole antenna based on a CSRR perturbed ground plane». *IEEE Access*, vol. 9. pp. 164292–164299, 2021. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3134497.
- [107] F. Z. Moussa, S. Ferouani, and Y. Belhadef, «New design of metamaterial miniature patch antenna with DGS for 5G mobile communications», *Microwave Review.*, vol. 28, no. 2, 2022.
- [108] C. Singh, and R. P. S. Gangwar, «A design and simulation of slotted patch antenna with improved radiation pattern». In *2011 International Conference on Emerging Trends in Networks and Computer Communications (ETNCC)*, IEEE, pp. 271–273, 2011, doi: 10.1109/ETNCC.2011.6255902.
- [109] C. Y. Chiu, K. M. Shum, C. H. Chan, and K. M. Luk, «Bandwidth enhancement technique for quarter-wave patch antennas». *IEEE Antennas and wireless propagation letters*, vol. 2, pp. 130–132, 2003.
- [110] A. Singh and S. Singh, «A novel CPW-fed wideband printed monopole antenna with DGS». *AEU - International journal of Electronics and Communications*, vol. 69, no. 1, pp. 299–306, 2015, doi: 10.1016/j.aeue.2014.09.016.
- [111] A. S. Bhadouria and M. Kumar, «Microstrip patch antenna for radiolocation using DGS with improved gain and bandwidth». In *2014 International Conference on Advances in Engineering & Technology Research (ICAETR-2014)*, IEEE, pp. 1–5, 2014, doi: 10.1109/ICAETR.2014.7012873.
- [112] A. Al-ahmadi and Y. S. H. Khraisat, «Bandwidth enhancement of microstrip patch antenna». *Applied Physics Research*, vol. 11, no. 1, pp. 35–40, 2019, doi: 10.5539/apr.v11n1p35.
- [113] D. Chen and C. H. Cheng, «A novel compact ultra-wideband (UWB) wide slot antenna with via holes». *Progress In Electromagnetics Research, PIER* vol. 94, pp. 343–349, 2009.
- [114] S. K. Patel and C. Argyropoulos, «Enhanced bandwidth and gain of compact microstrip antennas loaded with multiple corrugated split ring resonators». *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 30, no. 7, pp. 945-961, 2016, doi: 10.1080/09205071.2016.1167633.
- [115] C. Y. Huang, J. Y. Wu, C. F. Yang, and K. L. Wong, « Gain-enhanced compact broadband microstrip antenna», *Electronics Letters*, vol. 34, no. 2, pp. 138–139, 1998.

Bibliographie

- [116] C. Ming-hung, and T. M. Chuang, «Miniature antenna for UWB applications», In *CSQRWC 2012*, IEEE , pp. 44–47, 2012, doi: 10.1109/CSQRWC.2012.6294970.
- [117] Y. S. Chen, , and T. Y. Ku, « A low-profile wearable antenna using a miniature high impedance surface for smartwatch applications». *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letter*, vol. 15, pp. 1144–1147, 2015, doi: 10.1109/LAWP.2015.2496366.
- [118] S. Amaria, N. Keltouma, and A. Turkiya, «Miniature circular implantable antenna for wireless biomedical applications», In *2022 7th International Conference on Image and Signal Processing and their Applications (ISPA)*. IEEE, pp. 1–4, 2022, doi: 10.1109/ISPA54004.2022.9786358.
- [119] L. Huitema, C. Delaveaud, and R. D'Errico, «Miniature antenna for micro SD card», In *2013 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, IEEE, pp. 1707–1711, 2013.
- [120] M. Naser-Moghadasi, R. A. Sadeghzadeh, M. Fakheri, T. Aribi, T. Sedghi, and B. S. Virdee, « Miniature hook-shaped multiband antenna for mobile applications». *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters.*, vol. 11, pp. 1096–1099, 2012, doi: 10.1109/LAWP.2012.2214199.
- [121] F. Z. Moussa, Y. Belhadef, and S. Ferouani, «Simulation of a pentagon-shaped wideband miniature antenna for 5G mobile networks», In *2023 International Conference on Advances in Electronics, Control and Communication Systems (ICAECCS)*, IEEE., pp. 1–6, 2023, doi: 10.1109/ICAECCS56710.2023.10104952.
- [122] A. A. Elijah and M. Mokayef, «Miniature microstrip antenna for LoT application». *Materials Today: Proceedings.*, vol. 29, pp. 43–47, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.05.678.
- [123] L. Lizzi and F. Ferrero, «Use of ultra-narrow band miniature antennas for internet-of-things applications», *Electronics Letters*, vol. 51, no 24, p. 1964-1966, 2015, doi: 10.1049/el.2015.3142.
- [124] J. C. Bose, «On the rotation of plane of polarisation of electric wave by a twisted structure», *Proceedings of the Royal Society of London*, vol. 63, no 389-400, pp. 146-152, 1898.
- [125] H. Lamb, «On group-velocity», *Proceedings of the London Mathematical Society*, vol. 2, no 1, p. 473-479, 1904.
- [126] C. H. Pocklington, «Growth of a Wave-group when the Group-velocity is Negative», *Nature*, vol. 71, no 1852. 1905.
- [127] I.V. Lindell, A. H. Sihvola and J. Kurkijarvi, «Karl F. Lindman: The last hertzian, and harbinger of electromagnetic chirality», *IEEE Antennas Propagation Magasing*, vol. 34, no 3, pp.24-30, 1992.
- [128] L. I. Mandelshtam, «Lectures on Some Problems of the Theory of Oscillations», *Complete Collection of Works*, Vol. 5, Academy of Sciences, Moscow, pp. 428- 467, 1944.
- [129] G. D. Malyuzhinets, «A note on the radiation principle», *Zhurnal technicheskoi fiziki*, vol. 21, no 8, pp. 940-942. 1951.

Bibliographie

- [130] D. V. Sivukhin,. «The energy of electromagnetic waves in dispersive media», *Opt. Spektrosk*, vol. 3, no 4, pp. 308-312, 1957.
- [131] V. E. Pafomov,. «Transition radiation and Cerenkov radiation», *Soviet. Phys. JETP*, vol. 9, pp. 1321,1959.
- [132] R. A. Silin,. «Waveguiding properties of two-dimensional periodical slow-wave systems», *Voprosy Radioelektroniki, Elektronika*, vol. 4, pp.11-33, 1959.
- [133] V. G. Veselago. «Electrodynamics of substances with simultaneously negative electrical and magnetic permeabilities», *Soviet Physics Uspekhi*, vol. 10, no. 4, pp. 509–514, 1968.
- [134] C. Caloz, A. Sanada, and T. Itoh, «Microwave Circuits Based on Negative Refractive Index Material Structures», In 2003 33rd European Microwave Conference (pp. 105-108). IEEE, 2003.
- [135] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart, «Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena», *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 47, no 11, pp. 2075-2084. 1999.doi: 10.1109/22.798002.
- [136] J. B. Pendry, «Negative Refraction Makes a Perfect Lens», *Physical review letters*, vol. 85, no. 18, pp. 3966, 2000.
- [137] R. A. Shelby, D. R. Smith, and S. Schultz, «Experimental verification of a negative index of refraction», *Science*, vol. 292, no. 5514, pp. 77–79, 2001, doi: 10.1126/science.1058847.
- [138] D. R. Smith, , J. J. Mock, , A. F. Starr, , and D. Schurig, , «Gradient index metamaterials», *Physical Review E*, vol. 71, no 3, pp. 036609. 2005, doi: 10.1103/PhysRevE.71.036609.
- [139] J. B. Pendry, D. Schurig, and D. R. Smith, «Controlling Electromagnetic Fields», *science*, vol. 312, no 5781, pp. 1780-1782, 2006.
- [140] R. Liu, C. Ji, , J. J. Mock, , J. Y. Chin, , T. J. Cui, , and D. R. Smith, «Broadband Ground-Plane Cloak», *Science*, vol. 323, no 5912, p. 366-369, 2009, doi: 10.1126/science.1166949.
- [141] D. Schurig, J. J. Mock, Justice, I. B. *et al.*, «Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies», *Science*, vol. 314, no 5801,, pp. 977–980, 2006.
- [142] S. N. Burokur,. «Mise en oeuvre de métamatériaux en vue d'application aux circuits microondes et aux antennes», Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2005.
- [143] N. Engheta and R. W. Ziolkowski, «A Positive Future for Double-Negative Metamaterials», *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, vol. 53, no. 4, pp. 1535–1556, 2005.
- [144] C. Caloz and T. Itoh, «Electromagnetic Metamaterials Transmission Line Theory and Microwave Applications», John Wiley & Sons, 2005.
- [145] D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, et al., «Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity», *Physical review letters*, vol. 84, no 18, pp. 4184, 2000.
- [146] W.S., Weiglhofer, and A. Lakhtakia, «Introduction to complex mediums for optics and electromagnetics», SPIE Press, Bellingham, WA, USA, Vol. 123, 2003.

Bibliographie

- [147] A. Sihvola, «Metamaterials in electromagnetics », *Metamaterials*, vol. 1, no 1, p. 2-11, 2007.
- [148] A. DOULAT, « Conception des antennes miniatures à base de métamatériaux pour les applications de la cinquième génération », Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen,2020.
- [149] J. B. Pendry, A. J. Holden, , W. J. Stewart, , and I.Youngs, «Extremely Low Frequency Plasmons in Metallic Mesostructures», *Physical review letters*, vol. 76, no 25, pp. 4773–4776, 1996.
- [150] C. M. Krowne, and Y. Zhang, «Physics of Negative Refraction and Negative Index Materials», Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [151] T. BOUGOUTAIA, «Analyse Et Conception Des Antennes Microstrip a Base De Metamateriaux», Thèse de doctorat, Université de M'sila, 2018.
- [152] F. Bilotti and L. Sevgi, «Metamaterials : Definitions , Properties , Applications , and FDTD-Based Modeling and Simulation», *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2012, vol. 22, no 4, pp. 422-438, 2012, doi: 10.1002/mmce.20634.
- [153] B. Ouagague, «Etude théorique et expérimentale des métamatériaux et des techniques d'agilité (MEMS, BST) pour la conception des circuits RF miniatures et reconfigurables», Thèse de doctorat. Université Paul Sabatier-Toulouse III. 2014.
- [154] M. S. R. Marques, F. Martin, and M. Sorolla, «Metamaterials With Negative Parameters, Theory, Design and Microwave Applications», John Wiley & Sons, 2011.
- [155] J. D. Baena, J. Bonache, F. Martin, *et al.*, «Equivalent-Circuit Models for Split-Ring Resonators and Complementary Split-Ring Resonators Coupled to Planar Transmission Lines», *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, vol. 53, no 4, pp. 1451-1461, 2005, doi: 10.1109/TMTT.2005.845211.
- [156] M. G. Barba, «Resonant-type metamaterial transmission lines and their application to microwave device design», *Universitat Autònoma de Barcelona*, 2009.
- [157] X. J. He, L. Qiu, Y. Wang, et al. «A Compact Thin-Film Sensor Based on Nested Split-Ring-Resonator (SRR) Metamaterials for Microwave Applications A Compact Thin-Film Sensor Based on Nested Split-Ring-Resonator (SRR) Metamaterials», *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, vol. 32, pp. 902-913, 2011, doi: 10.1007/s10762-011-9807-4.
- [158] A. D. Tadesse, O. P. Acharya, , and S. Sahu, «Application of metamaterials for performance enhancement of planar antennas : A review», *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 30, no 5, p. e22154, 2020, doi: 10.1002/mmce.22154.
- [159] D. Pal, R. Singhal, and A. K. Bandyopadhyay, «Parametric Optimization of Complementary Split-Ring Resonator Dimensions for Planar Antenna Size Miniaturization», *Wireless Personal Communications*, vol. 123, no. 2, pp. 1897–1911, 2022, doi: 10.1007/s11277-021-09220-6.
- [160] B. Kamal, U. Ali, J. Chen, and S. Ullah, «Applications of Metamaterials and Metasurfaces», (2022).

Bibliographie

- [161] H. Al Issa, Y. Khraisat, and F. Alghazo, «Bandwidth Enhancement of Microstrip Patch Antenna by Using Metamaterial», vol. 14, no. 1, pp. 169–175, 2020.
- [162] K. Gangwar, R. P. S. Gangwar, et al. «Metamaterials : Characteristics, Process and Applications», *Advance in Electronic and Electric Engineering*, vol. 4, no 1, pp. 97-106, 2014.
- [163] S. A. Ramakrishna, «Physics of negative refractive index materials», *Reports on progress in physics*, vol. 68, no 2, pp. 449, 2005, doi: 10.1088/0034-4885/68/2/R06.
- [164] N. K. Prasada, T. A. Babua, S. Phanidharb, R. S. Singampallic, B. R. Naikd, M. S. S. R. K. N. Sarmaa, and S. Ramesha, «Potential Applications Of Metamaterials In Antenna Design , Cloaking Devices , Sensors And Solar Cells: A Comprehensive Review», *Journal of Optoelectronic and Biomedical Materials Vol*, vol. 13, no. 2, pp. 23–31, 2021.
- [165] S. I. Rosaline and S. Raghavan, «Survey on Metamaterials in Bio-Medicine», In 2013 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (pp. 1-4). IEEE, 2013.
- [166] N. S. Kumar, K. C. B. Naidu, P. Banerjee, et al. , «A Review on Metamaterials for Device Applications», *Crystals*, vol. 11, no 5, pp. 518., 2021.
- [167] A. Ali, A. Mitra and B. Aïssa, «Metamaterials and Metasurfaces : A Review from the Perspectives of Materials, Mechanisms and Advanced Metadevices», *Nanomaterials*, vol. 12, no 6, pp. 1027. 2022.
- [168] A. B. Numan and M. S. Sharawi, «Extraction of Material Parameters for Metamaterials Using a Full-Wave Simulator», *IEEE antennas and propagation magazine*, vol. 55, no 5, pp. 202–211, 2013.
- [169] A. M. Nicolson and G. F. Ross, «Measurement of the Intrinsic Properties of Materials by Time Domain Techniques». *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 19, pp. 377-382, 1970.
- [170] W. B. Weir, «Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies». *Proceedings of the IEEE*, vol. 62, pp. 33-36, 1974.
- [171] D. R. Smith, S. Schultz, P. Markoš, , and C. M. Soukoulis, « Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients». *Physical Review B*, vol. 65,n 19, pp. 1–5, April 2002.
- [172] D. R. Smith, D. C. Vier, T. Koschny, and C. M. Soukoulis, « Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials». *Physical review E*, vol. 71, no 3, pp. 036617, 2005.
- [173] R. Li, Q. Zhang, Y. Kuang, X. Chen, Z. Xiao, and J. Zhang, « Design of a Miniaturized Antenna Based on Split Ring Resonators for 5G Wireless Communications ». In 2019 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC) (pp. 1-4). IEEE., 2019, doi: 10.1109/CSQRWC.2019.8799332.
- [174] A. J. A. Al-gburi, Z. Zakaria, I. M. Ibrahim, and E. B. A. Halim, « Microstrip Patch Antenna Arrays Design for 5G Wireless Backhaul Application At 3 . 5 GHz». In *Recent Advances in Electrical and Electronic Engineering and Computer Science: Selected articles from ICCEE 2021 , Malaysia* (pp. 77-88). Singapore: Springer Singapore, 2022, doi: 10.1007/978-981-16-9781-4.

Bibliographie

- [175] N. Kishore and A. Senapati, « 5G smart antenna for IoT application: A review». *International Journal of Communication Systems*, vol. 35, no. 13, pp. e5241, 2022, doi: 10.1002/dac.5241.
- [176] C. S. T. S. Suite, CST Microwave Studio®, 2006.
- [177] A. B. Sahoo, N. Patnaik, A. Ravi, S. Behera, and B. B. Mangaraj, « Design of a Miniaturized Circular Microstrip Patch Antenna for 5G Applications». In *2020 International Conference on Emerging Trends in Information Technology and Engineering (ic-ETITE)*, pp. 1-4). IEEE., 2020.
- [178] Y. Belhadef, F. Z. Moussa, and S. Ferouani, « Design of a Miniature Dual-Band Patch Antenna Based on Meta-Materials for 5G and Wi-Fi Applications». *Engineering Proceedings*, vol. 14, no 1, pp. 13. 2022.
- [179] F. Z. Moussa, S. Ferouani, Y. Belhadef, and G. Abdellaoui, « New design of miniature rectangular patch antenna with DGS for 5G mobile communications». In *2021 International Conference on Information Systems and Advanced Technologies (ICISAT), IEEE 2021*, no. 4, pp. 1–5, 2021, doi: 10.1109/ICISAT54145.2021.9678464.
- [180] G. Augusitn, B. P. Chacko, and T. A. Denidni, « Printed Folded Monopole Antenna for Portable Devices operating in LTE / GSM / UMTS / WiFi bands». In *2014 16th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics (ANTEM)*pp. 1–2, IEEE, 2014.
- [181] F. Z. Moussa, Y. Belhadef, and S. Ferouani, « Design Of Miniature Circular Microstrip Patch Antenna Based On Metamaterial For Wi-Fi 5 And Wi-Fi 6 Applications ». *Telecommunications and Radio Engineering*. vol. 82, no. 7, pp. 27–42, 2023, doi: 10.1615/TelecomRadEng.2023047741.
- [182] L. C. Paul, M. T. R. Jim, T. Rani, M. Samsuzzaman, N. Sarker, and R. Azim, «A Compact Wideband Slotted Hexagonal Patch Antenna with a Modified Ground Structure for WiFi-5/6 Communication». In *2021 Emerging Technology in Computing, Communication and Electronics (ETCCE)* (pp. 1-5). IEEE, 2021.
- [183] L. C. Paul, M. M. G. Nabi, M. M. U. Rashid, R. Sen, M. Z. Mahmud, and M. M. Rahman, « Wideband Microstrip Yagi-Uda Array Antenna with High Gain and F / B Ratio for 5 GHz Wi-Fi Band Applications». In *2018 International Conference on Innovation in Engineering and Technology (ICIET)*, (pp. 1-6). IEEE, 2018, doi: 10.1109/CIET.2018.8660877.
- [184] L. C. Paul, M. H. Ali, T. Rani, H. K. Saha, and M. T. R. Jim, « A sixteen-element dual band compact array antenna for ISM/Bluetooth/Zigbee/WiMAX/WiFi-2.4/5/6 GHz applications». *Heliyon*, vol. 8, no. 11, 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e11675.
- [185] R. H. Thaher and Z. S. Jamil, «Design of Dual Band Microstrip Antenna for Wi-Fi and WiMax Applications». *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, vol. 16, no. 6, pp. 2864–2870, 2018, doi: 10.12928/TELKOMNIKA.v16i6.10016.

Publications Scientifique:

- 1) **F. Z. Moussa**, S. Ferouani, and Y. Belhadef, « New Design of Metamaterial Miniature Patch Antenna with DGS for 5G Mobile Communications». *Microwave Review*, vol. 28, no. 2, pp. 9–16, 2022.

Lien : <http://www.mtt-serbia.org.rs/files/MWR/MWR-2022dec/Vol28No2-2244-2Moussa.pdf>

Online ISSN: 2406-1050

- 2) **F. Z. Moussa**, Y. Belhadef, and S. Ferouani, « DESIGN OF MINIATURE CIRCULAR MICROSTRIP PATCH ANTENNA BASED ON METAMATERIAL FOR Wi-Fi 5 AND Wi-Fi 6 APPLICATIONS». *Telecommunications and Radio Engineering*. vol. 82, no. 7, pp. 27–42, 2023, doi: 10.1615/TelecomRadEng.2023047741.

Lien:

<https://www.dl.begellhouse.com/journals/0632a9d54950b268,4b96ebea37254651,61e2e9dc23c5c128.html>

ISSN Print: 0040-2508

ISSN Online: 1943-6009

Communications Internationales:

- **F. Z. Moussa**, S. Ferouani, Y. Belhadef, and G. Abdellaoui, « New design of miniature rectangular patch antenna with DGS for 5G mobile communications». In 2021 International Conference on Information Systems and Advanced Technologies (ICISAT), IEEE 2021, no. 4, pp. 1–5, 2021, doi: 10.1109/ICISAT54145.2021.9678464.
- **F. Z. Moussa**, Y. Belhadef, and S. Ferouani, « Simulation of a pentagon-shaped wideband miniature antenna for 5G mobile networks». In 2023 International Conference on Advances in Electronics, Control and Communication Systems (ICAECCS)., pp. 1–6, IEEE ,2023, doi: 10.1109/ICAECCS56710.2023.10104952.
- Y. Belhadef, **F. Z. Moussa**, and S. Ferouani, « Design of a Miniature Dual-Band Patch Antenna Based on Meta-Materials for 5G and Wi-Fi Applications ». *Engineering Proceedings*, vol. 14, no 1, p. 13.2022.
- **F. Z. Moussa**, Y. Belhadef, and S. Ferouani, B.Moulfi , « Dual-band Butterfly Patch Antenna Based on CSRR for 5G Mobile and C-band Applications ». 11ème Conférence Internationale des Energies Renouvelables,(CIER-2023).

- Mouffi Bouchra, Ferouani Souheyla, Ziani Kerarti Djalal, **MOUSSA FZ**, « Terahertz rectangular antenna for biomedical application ». (ITTAP-2023),The 3rd International Workshop Ternopil, UKRAINE.
- Bouchra Mouffi, Souheyla Ferouani, Ziani Kerarti Djalal, **MOUSSA FZ**, « A nano hexagonal terahertz antenna for medical application »,11ème Conférence Internationale des Energies Renouvelables,(CIER-2023).
- Bouchra Mouffi, Souheyla Ferouani, Ziani Kerarti Djalal, **MOUSSA FZ**, « A Nano rectangular gold and graphene patch antenna for WBAN applications», The 1st International Conference on Advances in Electronics, Control and Computer Technologies.

Communications nationales :

Conférence Nationale sur les Télécommunications et ses applications : CNTA'21

- **F. Z. Moussa**, S. Ferouani, Y. Belhadef, and G. Abdellaoui, “Rectangular Printed Antenna for 5G Mobile Communications With DGS,” Journal of Informatics & Mathematical Sciences, vol. 13, no 3, pp. 167–174, 2023, doi: 10.26713/jims.v13i3.2058.

ISSN (online): 0975-5748.

ISSN (print) : 0974-875X (print) Published by RGN Publications.

- Y. Belhadef, **F. Z. Moussa**, and S. Ferouani, “Design of a rectangular patch antenna based on meta materials for 5G ”.Conférence Nationale sur les Télécommunications et ses applications: CNTA'21.
- **F. Z. Moussa**, S. Ferouani, Y. Belhadef, B.Mouffi « Dual-band Hexagonal Miniature Microstrip Patch Antenna for Wifi-5/Wifi-6 Applications ». 2nd National Conference on Materials Sciences and Engineering (MSE'23),2023.
- Bouchra Mouffi, Souheyla Ferouani, Ziani Kerarti Djalal, **MOUSSA F.Z**,« Nano slotted rectangular terahertz antenna for Wireless on body area network application ». 2nd National Conference on Materials Sciences and Engineering (MSE'23),2023.
- **F. Z. Moussa**, S. Ferouani, Y. Belhadef, « Présentation de l'état de l'art des antennes patch à base méta-matériaux » Journée de Télécommunications, Université de Belhadj Bouchaib Ain Temouchent, 13 Juillet 2021 (Présentation session oral)

- **F. Z. Moussa**, S. Ferouani, Y. Belhadeb, «New design of miniature rectangular patch antenna with slot for 5G mobile communications» Présentation session poster, à l'université de Belhadj Bouchaib Ain Temouchent, 25 Mai 2022