

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Abou bakr Belkaïd- Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

MASTER En : Télécommunications

Spécialité : Systèmes des Télécommunications

Par :

Djerda Asma

Hamdani Imane

Thème

Conception d'antennes planaires à base de métamatériaux et son application pour la 5^{ème} generation-5G

Soutenu le 22 Septembre 2020 devant le jury composé de :

Mme. BENOSMAN Hayat

MCB à l'Université de Tlemcen

Présidente

Mme. BOUSALAH Fayza

MCB à l'université de Tlemcen

Encadrante

Mme. BELHADEF Yamina

MCA à l'Université de Tlemcen

Examinatrice

2019-2020

DEDICACE

Je dédie ce travail en premier lieu à mes chers parents, qui je ne remercierai jamais assez pour tous ce qu'ils ont fait pour moi et sans eux je ne serai pas arrivé là où j'en suis aujourd'hui.

Mon binôme Imane, avec qui j'ai partagé de merveilleux moments.

A tous mes amies : Soumia, Saliha, Fatima et Nihad, tous ceux qui m'ont soutenu, ma famille paternelle et maternelle et aussi à tous ceux qui ont partagé ma joie en ce jour ci.

Tous les enseignants qui m'ont dirigé vers la porte de la réussite.

Asma

DEDICACE

Je dédie ce travail en premier lieu à mes chers parents, qui je ne remercierai jamais assez pour tous ce qu'ils ont fait pour moi et sans eux je ne serai pas arrivé là où j'en suis aujourd'hui.

Mes sœurs, mes frères, et mes amies.

Mon binôme Asma, avec qui j'ai partagé de merveilleux moments.

Tous ceux qui m'ont soutenu, ma famille paternelle et maternelle et aussi à tous ceux qui ont partagé ma joie en ce jour ci.

Tous les enseignants qui m'ont dirigé vers la porte de la réussite.

Imane

Remerciements

Tout d'abord nous remercions avant tous, le grand dieu notre créateur de nous a donné la force, la volonté et le courage pour mener à bien ce modeste travail.

*Nous remercions vivement, notre encadreur Madame **BOUSALAH Fayza** de nous avoir pris en charges, et pour sa disponibilité, son aide et ses précieux conseils.*

*A notre honorable jurées Mme l'examinatrice **BENOSMAN Hayat** et Mme la présidente **BELHADEF Yamina** d'avoir accepter de lire et d'examiner ce modeste travail et d'apporter les critiques nécessaires à la mise en forme de ce projet.*

Nos vifs remerciements pour l'ensemble des enseignants du département de télécommunications qui ont contribué à notre formation d'ingénieur en télécommunications.

En fin, nous remercions tous les gens qui ont contribué de près ou de loin dans ce travail.

Merci...

Résumé

Afin de miniaturiser les antennes planaires (patch) ; nous avons utilisé, les techniques de miniaturisations basées sur les techniques des métamatériaux. Les métamatériaux prennent de l'ampleur ces dernières années. L'utilisation de ces matériaux offre des avantages tels que la réduction du poids et de l'encombrement, ce qui est bénéfique pour leur intégration dans des systèmes électroniques tel que les systèmes de télécommunications en général et les systèmes de téléphonie pour la 5^{ème} génération (5G) en particulier. Notre travail consiste à donner un aperçu sur les antennes planaires et le mécanisme de leurs fonctionnements à base de métamatériaux, nous allons proposer une démarche de conception d'une antenne patch déposée sur un substrat monocouche en plaçant au-dessus une cellule CSRR à base de métamatériaux travaillant en onde millimétrique. Par la suite, nous allons faire une étude de synthèse pour extraire les différents paramètres influant sur son comportement électromagnétique. L'antenne étudiée et conçues vise à être utilisée pour des applications de télécommunications et téléphoniques en 5G dans la bande de fréquence [3.3-3.8] GHz.

Mots clés : Antenne planaire, antenne patch, métamatériaux, SRR, CSRR, bande millimétrique, 5G, CST-MWS.

ABSTRACT

In order to miniaturize the planar antennas (patch); we used; the techniques of miniaturizations based on the techniques of metamaterials. Metamaterials have grown in recent years. The use of these materials offers advantages such as reduction in weight and size, which is beneficial for their integration into electronic systems such as telecommunications systems in general and telephony systems for the 5th generation (5G) in particular. Our work consists in giving an overview on planar antennas and their mechanisms of their functioning based on metamaterials, we will propose a design approach of a patch antenna deposited on a monolayer substrate by placing above a CSRR cell based on metamaterials

working in millimeter wave. Thereafter, we will make a synthesis study to extract the different parameters influencing its electromagnetic behavior. The antenna studied and designed aims to be used for telecommunications and telephone applications in 5G in the frequency band [3.3-3.8] GHz.

Keywords: Planar antenna, patch antenna, metamaterials, SRR, CSRR, millimeter band, 5G, CST-MWS

ملخص

من أجل تصغير الهوائيات المستوية (هوائيات التصحيح)؛ استخدمنا تقنيات التصغير بناء على تقنيات المواد الخام. نمت المواد الفوقية في السنوات الأخيرة. يوفر استخدام هذه المواد مزايا مثل تقليل الوزن والحجم، وهو أمر مفيد لدمجها في الأنظمة الإلكترونية مثل أنظمة الاتصالات بشكل عام وأنظمة الاتصالات الهاتفية للجيل الخامس (G5) على وجه الخصوص. يتكون عملنا من إعطاء نظرة عامة على الهوائيات المستوية وآليات عملها على أساس المواد الخام، سنقترح نهج تصميم هوائي التصحيح المودع على طبقة أحادية الطبقة من خلال وضعه فوق خلية SRR بناءً على المواد الخام التي تعمل في موجة المليمتر. بعد ذلك، سنقوم بدراسة تجميعية لاستخراج المعلومات المختلفة التي تؤثر على سلوكها الكهرومغناطيسي. يهدف الهوائي الذي تمت دراسته وتصميمه إلى استخدامه في تطبيقات الاتصالات والهاتف في الجيل الخامس G5 في نطاق التردد [3.8-3.3] GHz.

الكلمات الرئيسية: هوائي مستوي، هوائي التصحيح، المواد الخام، SRR، CSRR، نطاق المليمتر، G 5، CST-MWS

Sommaire

Dédicaces.....	i
Remerciements.....	iii
Résumé.....	iv
Sommaire	vi
Listedes figures.....	xi
Liste des tableaux.....	xiv
Liste des acronymes.....	xv
Introduction Générale.....	1

Chapitre I : GENERALITES SUR LES ANTENNES IMPRIMES ET LA

CINQUIEME GENERATION – 5G

I.1. Introduction.....	4
I.2. Historique des antennes imprimées	4
I.3. Présentation général d’un antenne imprimées	5
I.3.1 Structure d’une antenne imprimée	5
I.3.2 Différentes formes d’antenne imprimée.....	6
I.4. Caracteristiques de l’antenne imprimée	6
I.4.1 Coefficient de reflexion	6
I.4.2 Rappoert d’onde stationaire ROS	7
I.4.3 Bande passent	7
I.4.4 Fréquence de resonance	7

I.4.5 Efficacité.....	8
I.4.6 Directivité.....	8
I.4.7 Diagramme de rayonnement.....	8
I.4.8 Rendement.....	8
I.4.9 Angle d'ouverture.....	9
I.5. Paramètres geometriques de l'antenne imprimées.....	9
I.5.1 Largeur du patch.....	9
I.5.2Longeur du patch.....	9
I.6. Avantages et inconvénients de l'antenne imprimée ...	10
I.7. Différentes Technique d'alimentation.....	11
I.7.1 Alimentation par ligne micro-ruban.....	12
I.7.2 Alimentation par un sonde coaxial.....	12
I.7.3 Excitation par couplage électromagnétique.....	12
I.8.Méthodes d'analyses des antennes imprimées « patch ».....	13
I.8.1 Modèle de ligne de transmission.....	13
I.8.2 Méthode de la cavité.....	13
I.8.3 Méthode d'analyse numerique.....	13
I.8. 3.1 Méthode des éléments finies MEF.....	14
I.8. 3.2 Méthode des différences finies MDF.....	14
I.8. 3.3 Méthode de la matrice des lignes de transmission TLM.....	14
I.8. 3.3 Méthode intégral MI.....	14
I.9Differents types d'antennes imprimées.....	15
I.9.1 Antenne dipolaire et filaire.....	15
I.9.2 Antenne à boucle magnetique.....	15

I.9.3 Antenne cornet	16
I.9.4 Antenne à réseau de fentes	16
I.9.5 Antenne spiral	16
I.9.6 Antenne parabolique	17
I.9.7 Antenne patch	17
I.10. Applications d'une antenne imprimée « patch ».....	17
I.11. Cinquième génération (5G).....	18
I.11.1 Introduction.....	18
I.11.2 Architecture et fonctionnement de la 5G.....	19
I.11.3 Avantages et inconvénients de la 5G.....	19
I.11.3.1 Avantages	19
I.11.3.2 Inconvénients	20
I.11.4 Fonctionnement de la 5G	20
I.11.5 Application de la 5G	20
I.11.5.1 Autonomie professionnelle en déplacement	21
I.12. Conclusion	21
Bibliographie	21
 <u>Chapitre II : Etat de L'art des métamatériaux</u>	
II.1. Introduction... ..	26
II.2. Historique.....	26
II.3. Classification des métamatériaux	27
II.4 Caractéristiques des matériaux	29
II.4.1 Métamatériaux à permittivité négative (ENG).....	29
II.4. 2 Métamatériaux à perméabilité négative (MNG)....	30

II.4.3 Métamatériaux doublement négatifs (DNG)	34
II.5. Applications des métamatériaux	35
II.5.1 Les technique de camouflage	35
II.5.2 Cape d'invisibilité	36
II.5.3 Lentilles parfaites	36
II.5.4 Miniaturisation	37
II.5.5 Sélectivité...	38
II.6. Conclution	38
Bibliographie	39

Chapitre III : Applications des Métamatériauxaux antennes patch

III.1. Introduction	42
III.2 conception et simulation de l'antenne patch rectangulaire	42
III.2.1 Cahier des charges	42
III.2.2 Outils de simulation	43
III.3. calculs theorique des dimensions et de l'antenne patch rectangulaire	43
III.3.1 Calculs théorique de dimensions de l'antenne patch rectangulaire	43
III.3.2 Dimension de la ligne de transmission	44
III.4 résultats de conception et de simulation des antennes patch	44
III.4.1 Conception d'une antenne patch rectangulaire sans encoche	44
III.4.2 Conception d'une antenne patch rectangulaire avec encoches	46
III.5 Conception et simulation des cellules SRR et CSRR	48
III.5.1 Cahier de charge	48
III.5.1.1 Conception et simulation de la cellule SRR	48

III.5.1.2 Conception et simulation de la cellule SRR ou RAF à 2 anneaux.....	49
III.5.2 Conception et simulation de la cellule CSRR ou RAFC à 2 anneaux.....	51
III.6 conception et simulation des antennes associées aux cellules SRR.....	53
III.6.1 Interprétation des résultats de simulation avant adaptation	53
III.6.2 Interprétation des résultats de simulation après adaptation.....	57
III.6.3 Paramètres de l'antenne patch après l'adaptation	61
III.6.4 Résultats du gain avant et après adaptation.....	62
III.6.5 Commentaires des figures avant et après adaptation.....	63
III.7 Conception et simulation de la cellule SRR et CSRR a 3 anneaux a deux ouvertures dans le meme sens.....	64
III.7.1 Conception et simulation de la cellule CSRR ou RAFC à 3 anneaux.....	65
III.7.2 Interprétation des résultats de simulation avant adaptation.....	67
III.7.3 Interprétation des résultats de simulation des antennes après adaptation	69
III.7.4 Interprétation des résultats de gain avant et après adaptation	72
III.7.5 commentaires avant et après adaptation de l'antenne patch	73
III.8 Conception et simulation de la cellule SRR et CSRR a 3 anneaux ouvertures dans le meme sens	74
III.8.1 Conception et simulation de la cellule CSRR ou RAFC à 3 anneaux avec ouvertures dans le même sens.....	75
III.8.2 Interprétation des résultats de simulation avant adaptation.....	76
III.8.3 Interprétation des résultats de simulation des antennes après adaptation	77
III.8.4 Interprétation des résultats du gain avant et après adaptation	78
III.8.5 Commentaires avant et après adaptation.....	79
III.9. Conclusion.....	79
Conclusion générale.....	82

Liste des figures

Chapitre I : GENERALITESc SUR LES ANTENNES IMPRIMES

ET LA CINQUIEME GENERATION – 5G

Figure I.1 : Structure de base d'une antenne patch.....	5
Figure I.2 : différentes formes d'élément rayonnant.....	6
Figure I.3: Diagramme de rayonnement : a)2-Det b)3-D.....	7
Figure II.4: Paramètre S11 d'une antenne imprimée à 1GHz - La fréquence de résonance correspond à l'impédance d'entrée réel.....	8
Figure I.5 : Diagramme de rayonnement et angle d'ouverture	9
Figure I.6 : a) Alimentation par une ligne micro ruban b) photo d'une antenne réalisée.....	11
Figure I.7: Alimentation par connexion directe à une ligne coaxial	12
Figure I.8: Excitation par couplage électromagnétique.....	13
Figure I.9: Modèle de la cavité.....	13
Figure I.10: Répartition du courante le long d'un dipole et champ rayonné	15
Figure I.11: Antenne à boucle magnétique.....	15
Figure I.12: Antenne cornet	16
Figure I.13 : Antenne à réseau fe fentes	16
Figure I.14: Antenne spiral.....	17
Figure I.15: Antenne parabolique.....	17
Figure I. 16: Architecture fonctionnelle de 5G.....	19

Chapitre II : Etat De l'art des métamatériaux

Figure II.1: Classement des matériaux en fonction du signe de leur permittivité ϵ et leur permeabilité μ	27
Figure II.2 : Trièdre indirect caracterisé par la règle de la main gauche.....	28

Figure II.3 : Teges métallique.....	29
Figure II.4 : La permittivité effective du milieu en fonction de la fréquence ...	30
Figure II.5 : Structure de rouleau Suisse introduit par Pendry (a) vue de face (b) vue de profil.....	31
Figure II.6: Variation de la partie réelle et imaginaire de la perméabilité effective de la fréquence pour différentes valeurs de la conductivité σ 0.1, 2	31
Figure II.7: Présentation en anneau fendu (Split Ring Resonator SRR) ...	32
Figure II.8 : Réseau de SRR pour obtenir une perméabilité magnétique effective négative	32
Figure II.9: Variation de la perméabilité en fonction de la fréquence de travail	33
Figure II.10 (a)Premier prototype métamatériaux propose par l'équipe de D.R Smith(b)prototype Amélior.....	34
Figure II.11 : (a) Cellule DNG : SRR +Tig, (b) perméabilité et permittivité la celluleSRR+Tig.....	35
Figure II.12 : Cellule DNG sous forme de Ω	35
Figure II.13 : La cape d'invisibilité de J. Pendry.....	36
Figure II.14: (a) Lentille parfaite de Pendry se basant sur la propagation des ondes dans un slab d'indice de réfraction négatif. (b) Lentille parfaite de Smithen insistant sur les ondes évanescentes dans un slab d'indice de réfraction négatif. (c) comparaison des données mesurées (rouge) et résultats simulés (bleu) la limite de direction est représentée en vert.....	37
Figure II.15: Photo d'une antenne patch miniaturisée grâce à une couche de métamatériau à la perméabilité améliorée. Le facteur de miniaturisation pour ce type d'antenne.....	37
Figure II.16: Exemple d'une couche d'absorbant par Hao <i>et al.</i> à base de métamatériau métallique, fonctionnant dans l'infrarouge. En plus d'une géométrie assez simple, l'épaisseur de la couche d'absorbant (en bleue sur la figure centrale) est 15 fois plus petite que la longueur d'onde du pic d'absorption, ce qui est pourtant suffisant pour avoir une absorption importante, avec une efficacité de près de 88%	38
Figure II.17: Exemple d'un métamatériaux plan ayant une grande sensibilité en fréquence au THz, permettant de concevoir un capteur performant dans le visible, avec des modes de	

résonances fins (à droite).....3

8

Chapitre III : APPLICATIONS DES METAMATERIAUX AUX ANTENNES PATCH

Figure III.1 : Antenne patch microstrip sans encoches	45
Figure III.2: Coefficient S_{11} de l’antenne patch sans encoches en fonction de la fréquence	45
Figure III.3: Diagramme de la directivité de l’antenne patch sans encoches.....	46
Figure III.4 : Diagramme de rayonnement du gain de l’antenne patch sans encoche	46
Figure III.5 : Antenne patch microstrip avec encoches	47
Figure III.6: Coefficient S_{11} de l’antenne patch avec encoches en fonction de la fréquence.....	47
Figure III.7 : Diagramme de rayonnement du gain de l’antenne patch avec encoches	48
Figure III.8 : Diagramme de la directivité de l’antenne patch sans encoches	48
Figure III.9 : Représentation et dimensions d’une unité SRR à 2 anneaux	50
Figure III.10 : Représentation des coefficients S_{11} et S_{21}	51
Figure III.11 : Représentation d'un résonateur complémentaire en anneau fendu (CSRR) carré à 2anneaux	52
Figure III.12 : coefficient de réflexion (S_{11}) pour la CSRR.....	52
Figure III.13 : coefficient de de transmission (S_{21}) pour la CSRR	52
Figure III.14 : (a) 1CSRR sur le patch, (b) coefficient de réflexion (S_{11}).....	54
Figure III.15 : (a) 2CSRR horizontales en haut sur le patch, (b) coefficient de réflexion (S_{11}).....	54
Figure III.16 : (a) 2CSRR verticales sur le patch, (b) coefficient de réflexion (S_{11}).....	55
Figure III.17 : (a) 3 CSRR sur le patch, (b) coefficient de réflexion (S_{11}).....	55
Figure III.18 : (a) 4 CSRR verticales sur le patch, (b) coefficient de réflexion (S_{11}).....	55
Figure III.19 : (a) 6 CSRR sur le patch, (b) coefficient de réflexion (S_{11}).....	56
Figure III.20 : (a) 8 CSRR sur le patch, (b) coefficient de réflexion (S_{11}).....	56

Figure III.21 : (a) 2 CSR capacité horizontales sur patch, (b) coefficient de réflexion (S_{11}).	57
Figure III.22 : (a) 2 CSRR capacité sépare sur patch, (b) coefficient de réflexion (S_{11})	57
Figure III.23 : (a) 1 CSRR sur le patch, (b) coefficient (S_{11}).....	58
Figure III.24: (a) 2 CSRR horizontales en haut sur patch, (b) coefficient (S_{11})	59
Figure III.25 : (a) 2 CSRR verticales sur patch, (b) coefficient (S_{11})... ..	59
Figure III.26 : (a) 3 CSRR sur patch, (b) coefficient (S_{11})	59
Figure III.27 : (a) 4 CSRR horizontales sur patch, (b) coefficient (S_{11})	60
Figure III.28 : (a) 6 CSRR sur le patch, (b) coefficient de réflexion (S_{11}).....	60
Figure III.29: (a) 8 CSRR sur le patch, (b) coefficient de réflexion (S_{11}).....	60
Figure III.30 : (a) 2 CSRR capacité horizontales sur patch, (b) réflexion (S_{11}).....	61
Figure III.31 : (a) 2 CSRR capacité horizontales séparées sur patch, (b) coefficient (S_{11}).....	61
Figure III.32: Représentation et dimensions d'une unité SRR à 3 anneaux	65
Figure III.33 : Représentation des parametres (S) de la SRR carrée à 3 anneaux.	65
Figure III.34: Figure III.34 : Représentation et dimensions d'une unité CSRR à 3 anneaux.....	66
Figure III.35 : Coefficient de de transmission (S_{21}) de la CSRR à 3 anneaux	66
Figure III.36 : Coefficient de réflexion (S_{11}) de la CSRR à 3 anneaux	66
Figure III.37: (a) 2CSRR verticales sur patch, (b) coefficient (S_{11})... ..	67
Figure III.38 : (a) 2 CSRR horizontales sur patch, (b) coefficient S_{11}	68
Figure III.39: (a) 6 CSRR sur patch et plane de masse, (b) coefficient	68
Figure III.40 : (a) 2 CSRR verticales sur plane de masse, (b) coefficient S_{11}	68
Figure III.41 : (a) 2 CSRR verticales sur patch et plane de masse, (b) coefficient S_{11}	69
Figure III.42 : (a) 1 CSRR sur Patch, (b) coefficient S_{11}	69
Figure III.43 : (a) 1 CSRR sur PDM, (b) coefficient S_1	69
Figure III.44: (a) 2 CSRR verticales sur patch, (b) coefficient S_{11}	70
Figure III.45 : (a) 2 CSRR horizontales sur patch, (b) coefficient $S_{11.6}$	70
Figure III.46 : (a) 1 CSRR capacité sur plane de masse, (b) coefficient S_{11}	71

Figure III.47 : (a) 1 CSRR sur PDM, (b) coefficient S_{11}	71
Figure III.48 : (a) 2 CSRR verticales sur patch et plane de masse, (b) coefficient S_{11}	71
Figure III.49 : Représentation et dimensions d'une unité SRR à 3 anneaux avec ouvertures dans le même sens.....	74
Figure III :50 Représentation des parametres (S) de la SRR carrée à 3 anneaux avec ouvertures dans le même sens.....	75
Figure III.51 : Représentation et dimensions d'une unité CSRR à 3 anneaux à 3 ouvertures dans le même sens.....	75
Figure III.52 : Coefficient de de transmission (S_{21}) de la CSRR à 3 anneaux à 3 ouvertures dans le même sens.....	76
Figure III.53 : (a) 1 CSRR sur Patch, (b) coefficient S_{11}	77
Figure III.54 : (a) 1 CSRR sur Patch, (b) coefficient S_{11}	77

Liste des tableaux

Tableau I.1 : LAvantages et inconvénients de l’antenne imprimée”patch”	10
Tableau I.2 : Applications de l’antenne imprimée	18
Tableau III 1 : Dimensions des paramètres de l’antenne patch	44
Tableau III.2 : Résultats du coefficients S_{11} en fonction des fréquences pour différentescellules CSRRgravées sur le patch	54
Tableau III.3 : Résultats du coefficients S_{11} en fonction des fréquences pourdifférentes cellules CSRR gravées sur le patch	58
Tableau III.4 : Paramètres de l’antenne patch après adaptation	62
Tableau III.5 : Valeurs du gain de l’antenne patch avant et après adaptation	63
Tableau III.6 : Valeurs du taux de miniaturisation, rendement et bande passante des différentes antennes patch avec CSRR.....	63
Tableau III.7 : Commentaires des figures.....	64
Tableau III.8 : Valeurs des coefficients de réflexion pour différentes antennes patch avec différentes positions des cellules CSRR sur patch et plan de masse.....	67
Tableau III.9: Valeurs des coefficients de réflexion pour différentes antennes patch avec différentes positions des cellules CSRR sur patch et plan de masse	70
Tableau III.10 : Valeurs de taux de miniaturisation et rendement et bande passante pour les différentes antennes avec CSRR gravées sur patch et PDM.....	72
Tableau III.11 : Paramètres de l’antenne patch après adaptation	72
Tableau III.12 : Valeurs du gain de l’antenne patch avant et après adaptation	73
Tableau III.13 : Commentaires des figures.....	74
Tableau III.14: Valeur du coefficient de réflexion pour antenne patch avec position de cellule CSRR à 3 anneaux avec ouvertures dans le même sens	76

Tableau III.15 :Valeur du coefficient de réflexion pour une antenne patch avec position de cellule CSRR à 3 anneaux avec ouvertures dans le même sens	77
Tableau III.16 :Valeur du taux de miniaturisation, du rendement et de la bande passante pour une antenne patch avec CSRR à 3 anneaux avec ouvertures dans le même sens.....	78
Tableau III.17 :Paramètre de l’antenne patch après adaptation.....	78
Tableau III.18 :Valeurs du gain de l’antenne patch avant et après adaptation	78
Tableau III.19 :Commentaires des figures.....	79

Liste des Acronymes et Abréviations

(ϵ_r) : Permittivité relative de diélectrique

Γ : Le coefficient de réflexion

T : Le coefficient de transmission

Z_{ant} : Impédance d'entrée de l'antenne

Z_0 : Impédance caractéristique

ROS : Rapport d'onde stationnaire

VSWR : Voltage Standing Wave Ratio

5G : Cinquième génération

f_{max} : fréquence maximale

f_{min} : fréquence minimale

f_c : fréquence central

D : directivité

R_r : Résistance liée a son rayonnement

R_L : Résistance liée aux pertes de l'antenne

H : Le rendement

C : Vitesse de la lumière

ϵ_e : La permittivité effective

σ : La conductivité

SRR : Split Ring Resonator (SRR)

RAF : Résonateur en Anneau Fendu

CSRR : Cellule complémentair

CST : Compter simulation technologie

FR 4 : Flame Resistant 4

W_p : Largeur du patch

ϵ_{eff} : Constante diélectrique effective

L_{eff} :Longeure ffective

ΔL : Extension de longueur

L_p :Longeur de patch

LL :Longeur d'alimentation

L_g :Longeur de substrat

W_g : Largeur de substrat

W₀ : Largeur de la ligne d'alimentation

S₁₁ : coefficient de réflexion

S₂₁ : Coefficient de de transmission

INTRODUCTION GENERALE

Les systèmes des télécommunications ont connu un saut qualitatif entraînant la création et l'innovation des plusieurs technologies. Les métamatériaux constituent l'une des nouvelles découvertes cette dernière décennie et sont un domaine de recherche passionnant, émergeant et promet d'apporter d'importantes avancées technologiques et scientifiques dans de nombreux domaines importants tels que les télécommunications, les radars, la défense, l'imagerie médicale, etc.

Les métamatériaux sont des milieux artificiels aux propriétés électromagnétiques inhabituelles. Leur concept fut théorisé pour la première fois par le physicien russe Victor Veselago [1]. Il s'agit de structures périodiques, diélectriques ou métalliques, qui se comportent comme des matériaux homogènes n'existant pas à l'état naturel. Il existe plusieurs types de métamatériaux en électromagnétisme dont les plus connus étant ceux susceptibles de présenter à la fois une permittivité et une perméabilité négatives. Depuis leur avènement dans les années 2000, ils ont permis de multiples avancés en électromagnétisme et ont ouvert des perspectives intéressantes pour les hyperfréquences, que ce soit pour des applications circuits (filtres, déphaseurs, etc.) ou pour des applications de rayonnement (antennes, diffraction, furtivité). Parmi les bénéfices potentiels de ces structures, citons par exemple la miniaturisation des antennes [2], l'élargissement de leur bande passante, la réduction du couplage inter-élément au sein d'un réseau ou encore l'augmentation de l'efficacité (rendement) des antennes miniatures.

L'antenne patch est conçue pour satisfaire ces besoins, c'est un conducteur métallique de forme particulière placé sur un substrat terminé par un plan de masse ; son caractère en miniature offre la possibilité de l'intégrer facilement dans les systèmes d'émission réception.

Notre objectif est d'étudier, de concevoir, d'optimiser et de caractériser une antenne à base de métamatériaux autour d'une de résonance $f_r=3.5\text{GHz}$ avec le maximum de compacité et la plus grande largeur de bande.

Le but de ce mémoire est de comprendre les influences intéressantes de ce RAF en vue d'applications aux antennes. Ce manuscrit est divisé en trois chapitres :

Le premier chapitre est divisé en deux parties : la première partie présente une description générale sur les antennes imprimées (principe, types, paramètres), ensuite une vue générale sur les antennes PATCH et leurs caractéristiques ainsi que certaines techniques d'alimentation et le mécanisme de rayonnement. La deuxième partie parlera de l'évolution des technologies des réseaux de télécommunications de la 5-ème génération dans le domaine des communications (Architectures, structures, composants, fonctionnement, domaines d'applications, ...).

Dans le second chapitre, nous présentons une synthèse bibliographique sur les métamatériaux avec une analyse de modélisation des différents éléments qui constituent les matériaux main gauche, en s'appliquant sur la cellule SRR (RAF) et sa cellule complémentaire CSRR (RAFC).

Le troisième chapitre est consacré dans la première partie une description de l'environnement de l'outil de simulation des champs électromagnétiques CST Studio Suite (Central Standard Time) utilisé dans ce travail qui est un logiciel électromagnétique 3D.

La deuxième partie est une étude paramétrique sur différents résonateurs en anneaux fendus « RAF » et leurs anneaux complémentaires « RAFC » ainsi que la méthode utilisée pour l'extraction des paramètres effectifs (perméabilité, permittivité et indice de réfraction) à partir des coefficients de réflexion « S_{11} » et de transmission « S_{21} » suite aux simulations réalisées par le logiciel CST et Matlab. La troisième partie sera consacrée à la modélisation d'une antenne patch rectangulaire puis à l'application du métamatériau composite dans l'environnement proche de l'antenne patch.

Nous terminons par une conclusion générale qui résume l'essentiel de ce travail suivi de perspectives envisageables et possibles.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES ANTENNES

IMPRIMES ET LA CINQUIEME

GENERATION – 5G

I.1 INTRODUCTION

De nos jours, les antennes imprimées sont largement employées puisqu'elles sont les éléments de base pour une liaison radioélectrique, ainsi que leur besoin permettent de répondre à nombreuses contraintes imposée par les systèmes de transmission.

Dans ces dernières années, les technologies modernes s'orientent vers la miniaturisation de ces antennes. Leurs formes et dimensions favorisent leurs intégrations sur plusieurs mobiles (voiture, avion, téléphone portable, etc...). Grâce à la capacité des antennes imprimées appelée antennes « plaquées » ou antennes « patch », permettent de répondre aux contraintes d'encombrement, de poids et surtout de coût imposé par les émergentes.

La technique des circuits imprimée à révolutionner les domaines de l'électronique, et plus récemment celui des hyperfréquences, pour la réalisation de circuits et d'antennes miniatures.

Les caractères des antennes imprimée « patch » miniaturisée offre les possibilités d'intégrer facilement les systèmes d'émission-réception. [1][2]

Ce première chapitre présente : des généralités sur les antennes patch, dont on cite leurs structures, leurs caractéristiques, leurs avantages, leurs inconvénients et leurs applications ; dans une première partie.

La deuxième partie est consacrée à la présentation des technologies de la 5^{ème} génération (5G), les principales Historiques, définitions, fréquences de résonances, architectures et applications.

I .2 HISTORIQUE DES ANTENNES IMPRIMEES

Le concept de « structures imprimées rayonnantes » est apparu en 1953 avec Deschamps et les premières validations ont été réalisées vers 1970 par Maxwell et Nunson.[1]

Un peu plus tard le phénomène de rayonnement provenant des discontinuités dans les strip-lines fût observé et étudié par Lewin en 1960. Au début des années 70, Byron décrit une piste rayonnante conductrice gravée sur un substrat diélectrique ($\epsilon_r < 10$) qui repose sur un plan de masse [3].

Par la suite, les caractéristiques des patchs micro-ruban rectangulaires furent publiées par Howell. De

son côté, Weinschel, développa plusieurs géométries de patches micro-ruban pour l'usage en réseau cylindrique [3]. Les travaux sur les éléments du micro-ruban furent publiés en 1975.[3]

I.3PRESENTATION GENERALE D'UNE ANTENNE IMPRIMEE

I.3.1 Structure d'une antenne imprimée

En général, une antenne imprimée est constituée d'un plan de masse, d'une ou de plusieurs couches de substrat pouvant avoir des permittivités (ϵ_r) égales ou différentes. La surface contient un élément rayonnant de géométrie quelconque (rectangulaire, circulaire, à fente, ou formes plus élaborées).

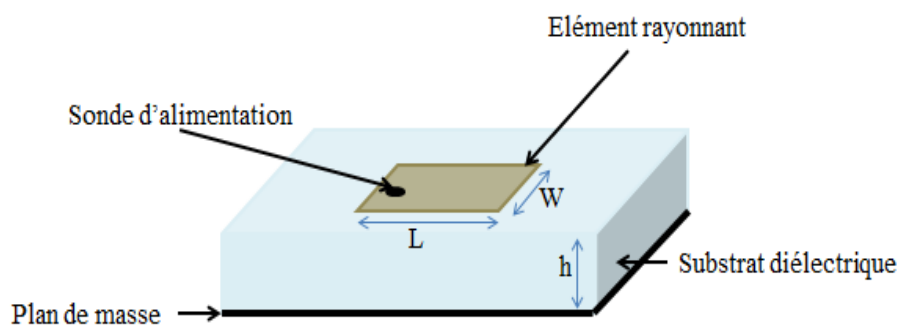


Figure I.1 : Structure de base d'une antenne patch. [4]

Les substrats diélectriques ont généralement une faible permittivité ($\epsilon_r < 3$) pour faciliter et favoriser le rayonnement, tout en évitant le confinement des champs dans la cavité comprise entre l'élément imprimé et le plan de masse.[4]

Les paramètres physiques et géométriques liés à cette structure sont [2] :

- * Permittivité relative de diélectrique (ϵ_r).
- * Tangente des pertes(tang)du même substrat, avec pertes par effet de joule.
- * Epaisseur diélectrique (elle doit rester faible par rapport à la longueur d'onde à transmettre).
- * Les dimensions de l'élément rayonnant.

I.3.2 Différentes formes d'antenne imprimée « patch »

Différentes formes de patch des antennes microrubans peuvent prendre plusieurs formes simples ou complexes : carré ou rectangulaire, circulaire ou elliptique et la forme triangulaire [5]. La figure I.2 montre quelques formes simples de l'élément rayonnant.

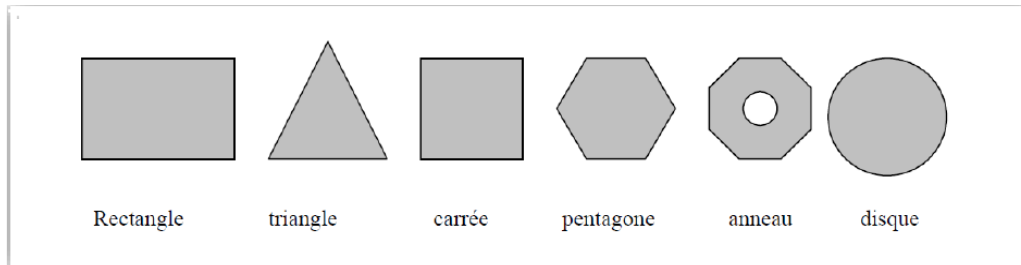


Figure I.2: différentes formes d'élément rayonnant.[6].

I.4 CARACTERISTIQUES DE L'ANTENNE IMPRIMEE

I.4.1 Coefficient de réflexion

Lorsqu'une onde incidente change de milieu de propagation ou rencontre une nouvelle interface, une partie de cette onde incidente est réfléchiée et l'autre partie est transmise dans le nouveau milieu. Le coefficient de réflexion Γ , et le coefficient de transmission, T , quantifient ces deux parties, respectivement. Ces deux coefficients sont reliés par l'expression suivante (I.1) qui traduit la conservation de l'énergie [7] :

$$|\Gamma|^2 + |T|^2 = 1 \quad (\text{I.1})$$

Pour un transfert de puissance maximal entre les différents éléments d'un circuit, il faut que le module du coefficient de réflexion soit le plus faible possible. L'impédance caractéristique Z_0 peut prendre différentes valeurs, souvent elle est fixée à 50Ω . A partir de l'impédance caractéristique et de l'impédance d'entrée de l'antenne, nous pouvons définir le coefficient de réflexion [7] :

$$\Gamma = \frac{Z_{\text{ant}} - Z_0}{Z_{\text{ant}} + Z_0} \quad (\text{I.2})$$

Z_{ant} : impédance d'entrée de l'antenne.

Il peut également s'exprimer en décibel comme suit : $S_{11}(\text{dB}) = 20\log_{10}(\Gamma)$ (I.3)

I.4.2 Rapport d'onde stationnaire ROS

Le ROS se définit comme le rapport des valeurs maximales et minimales de l'amplitude de l'onde stationnaire [7]. En anglais (VSWR : Voltage Standing Wave Ratio) :

$$ROS = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (\text{I.4})$$

I.4.3 Bande passante [8]

La bande passante d'une antenne définit le domaine de fréquences dans lequel le rayonnement de

l'antenne présente les caractéristiques requises. Elle est donnée par : $BP_{LB} = \frac{f_{\max}}{f_{\min}}$ (I.5)

$$BP_{BE}(\%) = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_c} \quad (\text{I.6})$$

f_{\max} : la fréquence maximale.

f_{\min} : la fréquence minimale.

f_c : la fréquence centrale.

I.4.4 Fréquence de résonance [9]

Le paramètre S_{11} d'une antenne rectangulaire est représenté sur la figure 3.

- Fréquence de résonance f_r : fréquence pour laquelle l'impédance d'entrée est purement réelle.
- Résistance d'entrée R_{in} : résistance d'entrée de l'antenne pour $f_r = f$.

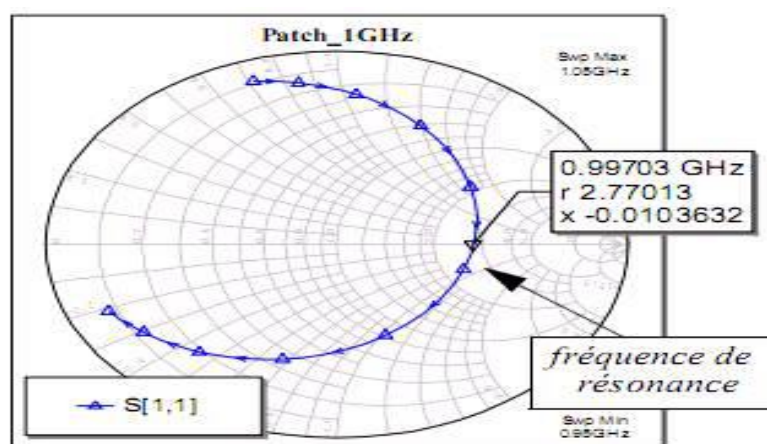


Figure I.3: Paramètre S_{11} d'une antenne imprimée à 1GHz - La fréquence de résonance correspond à l'impédance d'entrée réel. [10]

I.4.5 Efficacité

L'efficacité est le rapport de la puissance rayonnée par l'antenne sur la puissance en entrée de l'antenne.

On distingue l'efficacité rayonnée de l'efficacité totale. [10]

I.4.6 Directivité

La directivité dans une direction est le rapport entre la valeur de la fonction caractéristique de rayonnement dans cette direction à sa valeur moyenne dans tout l'espace [11] :

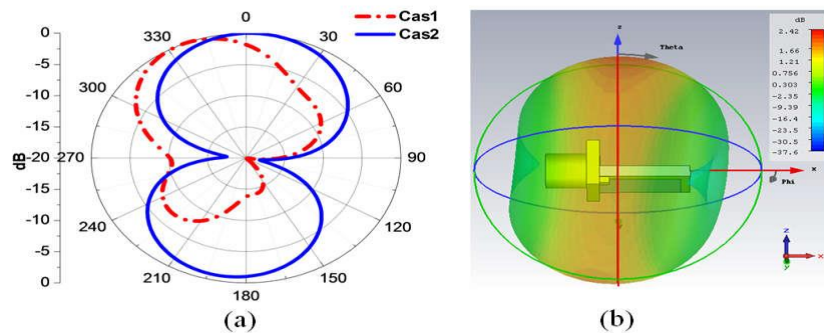
$$D(\theta, \phi) = \frac{Fn(\theta, \phi)}{\frac{1}{4\pi} \iint Fn(\theta, \phi) d\Omega} \quad (I.7)$$

La directivité s'exprime aussi en fonction de la densité surfacique de puissance [11] :

$$D(\theta, \phi) = \frac{Sr(\theta, \phi)}{\frac{1}{4\pi} \iint Sr(\theta, \phi) d\Omega} \quad (I.8)$$

I.4.7 Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement d'une antenne est la représentation de ses propriétés de rayonnement dans les coordonnées spatiales par des coordonnées directionnelles. La représentation du champ électrique (ou magnétique), sur un rayon constant, est nommée diagramme de l'amplitude du champ. La variation spatiale de la densité de puissance le long d'un rayon constant, est nommée diagramme d'amplitude de puissance. [11]



I.4.8 Rendement

Est le rapport entre l'énergie rayonnée par une antenne et celle que lui fournit l'alimentation, exprimé

par [8] : $\eta = \frac{Rr}{Rr+RL}$ (I.9)

R_r : Résistance liée à son rayonnement et R_L : Résistance liée aux pertes de l'antenne.

I.4.9 Angle d'ouverture

L'angle d'ouverture caractérise la largeur du lobe principal. On appelle l'angle d'ouverture (à 3dB) de l'antenne, l'angle autour de la direction de fort champ pour lequel la puissance est supérieure ou égale à la moitié de la puissance se propageant dans la direction du fort champ de gain G_e (figure. I.5).[12]

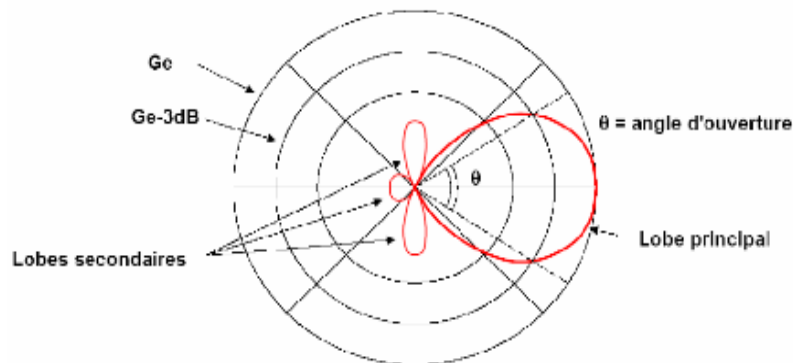


Figure I.5: Diagramme de rayonnement et angle d'ouverture. [12]

I.5 PARAMETRES GEOMETRIQUES DE L'ANTENNE IMPRIMEE

I.5.1 Largeur du patch

La largeur du patch (équation I.10) a un effet mineur sur les fréquences de résonance et sur le diagramme de rayonnement de l'antenne. Elle joue un rôle important pour l'impédance d'entrée de l'antenne et la

bande passante à ses résonances [3]:
$$W = \frac{c}{2fr} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (I.10)$$

f_r : Fréquence de rayonnement.

ϵ_r : Constante diélectrique du substrat.

C : Vitesse de la lumière.

I.5.2 Longueur du patch

La longueur du patch (équation I.11), détermine les fréquences de résonance de l'antenne. Il ne faut pas oublier de retrancher deux fois la longueur ΔL qui correspond au débordement des champs. Le calcul de la permittivité effective d'une ligne microstrip repose sur la largeur de la ligne et sur la hauteur du

substrat [10] :

$$\epsilon_e = \left(\frac{\epsilon_r+1}{2}\right) + \left(\frac{\epsilon_r-1}{2}\right) \frac{1}{\sqrt{1+10\frac{h}{w}}} \quad (\text{I.11})$$

Dans le cas d'un motif carré, la largeur de la ligne est une demi-onde :

$$W = \frac{\lambda_e}{2} = \frac{c}{2fr\sqrt{\epsilon_e}} \quad (\text{I.12})$$

La longueur de l'antenne est légèrement inférieure à $\lambda_e/2$:

$$L = w - 2\Delta l = \frac{c}{2fr\sqrt{\epsilon_e}} - 2\Delta l \quad (\text{I.13})$$

La longueur L du patch doit être inférieure que la longueur d'ondes dans le diélectrique. A cette fréquence d'opération, λ dépend de la constante diélectrique efficace (ϵ_{eff}). L'effet de débordement du champ (effet électrique), le patch semble plus grand que sa dimension physique. Il y a donc une augmentation de ΔL (équation I.14) de chaque côté de patch.[3]

$$\Delta L = 0.421h \frac{(\epsilon_e + 0.3) \left(\frac{l}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_e - 0.258) \left(\frac{l}{h} + 0.8\right)} \quad (\text{I.14})$$

Donc la dimension effective du patch sera : $L_{\text{eff}} = L + 2\Delta l$ (I.15)

I.6 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ANTENNE IMPRIMEE « Patch »

Compte tenu de la structure plane des antennes imprimées, nous bénéficions de tous les avantages de la technologie des circuits imprimés. Comparées aux antennes conventionnelles, leurs avantages sont nombreux [2],[13], cités dans le tableau (I-1) :

Avantages	Inconvénients
Faible poids	Bande passante très étroite
Faible encombrement	Gain faible dû aux pertes
Faible épaisseur	Rendement faible (concentration des champs sur les parois métallique)
Simplicité de réalisation et reproduction	Effet de couplage parasite entre les éléments

Fort rendement d'ouverture	Pureté de polarisation difficile à obtenir
Polarisation variable simplement avec la position d'alimentation	Puissance supportée limitée
Possibilité d'association à des éléments actifs ou passifs tels que : amplificateurs, modulateurs, déphaseurs, etc....	Rayonnement parasite de l'alimentation

Tableau (I-1) : Avantages et inconvénients de l'antenne

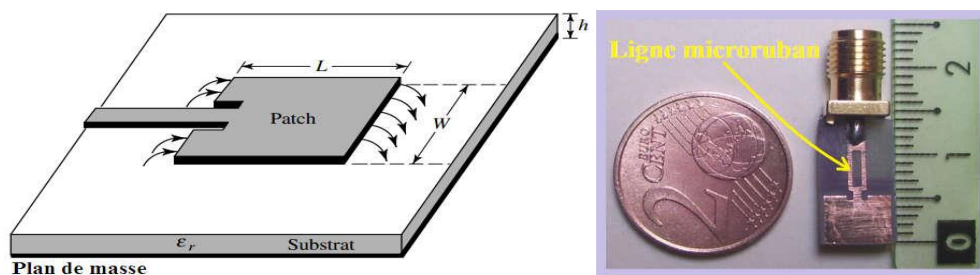
I.7 DIFFERENTES TECHNIQUES D'ALIMENTATION

Les techniques d'alimentation des antennes imprimées peuvent être classées en deux catégories :

- Alimentation par contacte (par sonde ou ligne micro-ruban).
- Alimentation par proximité (couplage électromagnétique par ligne ou parfente).

I.7.1 Alimentation par ligne micro-ruban

Parmi les techniques d'alimentation les plus utilisées nous citons la connexion directe à une ligne microruban dont le point de jonction est sur l'axe de symétrie de l'élément ou décalé par rapport à cet axe de symétrie si cela permet une meilleure adaptation d'impédance. [10]



(a) (b)
Figure I.6: (a) Alimentation par une ligne micro ruban,
(b) Photo d'une antenne réalisée.[10]

I.7.2 Alimentation par une sonde coaxiale

Elle est effectuée par connexion directe a câble coaxial (Figure. I.7), ou le conducteur central est connecte

en un point situe sur l'axe de symétrie de l'élément. Le conducteur extérieur du câble coaxial est relié au plan de masse. [8]

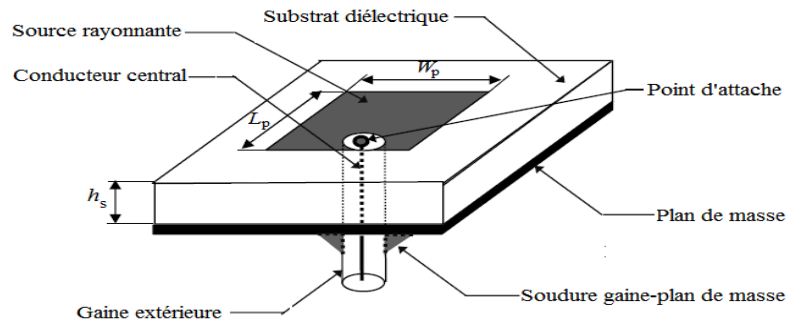


Figure I.7: Alimentation par connexion directe à une ligne

➤ Les principaux avantages de ce système d'alimentation sont [14] :

-Possibilité d'installer la sonde coaxiale à n'importe quel emplacement, à l'intérieur du patch, afin d'effectuer l'adaptation.

-Faible rayonnement parasite, la ligne d'alimentation ne cause aucune perte par rayonnement.

-Installation d'un câble en dessous du plan de masse pour réduire le couplage entre le patch et l'alimentation.

➤ Les inconvénients majeurs de cette technique sont [14] :

-Bande passante étroite et difficulté de modalisation.

-Augmentation de la longueur de la sonde, pour des substrats épais, rend l'impédance d'entrée plus inductive.

I.7.3 Excitation par couplage électromagnétique

Ce type d'alimentation se fait par couplage électromagnétique d'une ligne microbande à l'élément rayonnant (Figure. I.8).[8]

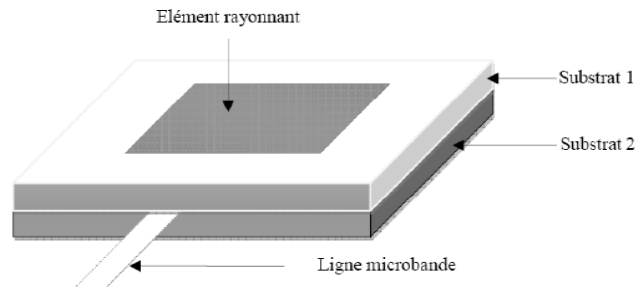


Figure I.8: Excitation par couplage électromagnétique. [8]

I.8 Méthodes d'analyse des antennes imprimées « patch »

I.8.1 Modèle de ligne de transmission

L'antenne imprimée est modélisée par deux fentes rayonnantes dans le demi espace supérieur au plan de masse, qui sont situées aux extrémités d'une ligne de transmission de longueur $(\lambda/2)$.

I.8.2 Modèle de la cavité

Ce modèle assimile l'antenne à une cavité fermée latéralement par des murs magnétiques et horizontalement par des murs électrique (élément rayonnât et plan de masse).[2]

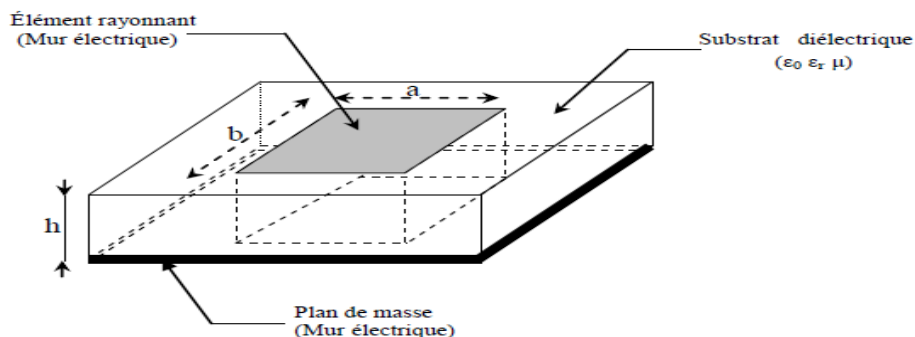


Figure I.9: Modèle de la cavité. [1]

I.8.3 Méthode d'analyse numérique

Dans n'importe quelle géométrie d'antenne, en se basant sur la modélisation électromagnétique, ces méthodes sont plus précises. Il existe plusieurs méthodes, parmi ces méthodes on cite :

- Méthode des éléments finis (MEF).
- Méthodes des différences finies (MDF).
- Méthode de matrice des lignes de transmission (TLM).

–Méthode intégrale (MI).

I.8.3.1 Méthode des éléments finis (MEF)

La région de propagation est divisée en un nombre fini grande, de sous-domaine de forme triangulaire appeler éléments. Le champ électromagnétique est représenté par un polynôme. En employant une formulation variationnelle du champ électromagnétique et par minimisation de celle-ci en différentes point appelés point nodaux, ou en calculant le flux de la fonction inconnu à travers les arrêts de l'élément, on aboutit à la résolution d'un système à valeurs propres dont les vecteurs propres sont les valeurs du champs électromagnétiques associé.

L'avantage de cette méthode est lié au fait que la forme tétraédrique et la variation des dimensions des cellules élémentaires caractérisant le volume discrétisé, donne au maillage une très grande souplesse.

Cette méthode permet de simuler des structures géométriques complexes mais avec d'importants moyens informatiques.[2],[15]

I.8.3.2 Méthodes des différences finies (MDF)

Les équations aux dérivées partielles représentant la propagation des champs sont remplacés par un ensemble d'équations aux différences finies exprimées aux nœuds d'une réseau de points réparti dans le domain modélisé.

I.8.3.3 Méthode de la matrice des lignes de transmission (TLM)

La méthode TLM est un processus itératif temporel effectué par une discrétisation spatiale en lignes de transmission et permet ainsi, de connaître l'évolution temporel du champ électromagnétique en chaque point du maillage. Cette méthode est facile pour traiter des structures complexes composées de plusieurs matériaux, et particulièrement appropriée pour l'analyse des structures planaires multicouches.

I.8.3.4 Méthode intégrale (MI)

Cette méthode est basée sur la résolution d'équations intégrales utilisant la méthode des moments. Dans le domaine cartésien, les éléments rayonnants sont découpés en cellules rectangulaires supportant chacune un courant de forme triangulaire. Cette caractérisation permet de modéliser des formes

complexes, à angle droit, d'éléments rayonnant. Elles permettent d'arriver rapidement au résultat mais nécessitent une étude numérique délicate.[2]

I.9 Différents types d'antennes imprimées

I.9.1 Antenne dipolaire et filaire

L'antenne dipolaire est constituée de deux tiges cylindriques de diamètre fin ($d \ll \lambda/100$), très courtes et reliées chacune à deux fils parallèles et très proches constituant une ligne bifilaire (figure I.10). En émission, cette ligne est reliée à un générateur alternatif, caractérisé par sa fréquence et son impédance interne. À la réception, la ligne bifilaire est branchée sur un récepteur. [16]

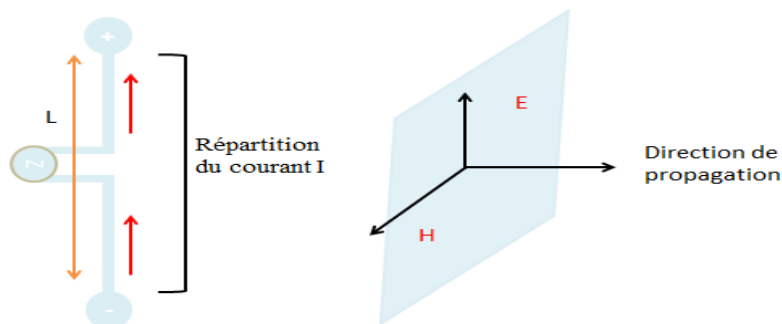


Figure I.10 répartition du courant le long d'un dipôle et champ rayonné.

I.9.2 Antenne à boucle magnétique

L'antenne à boucle magnétique sera formée d'un conducteur dont la longueur sera inférieure à $1/10$ de la longueur d'onde. Elle sera accordée sur la fréquence de travail par une capacité, l'ensemble formant un circuit résonant parallèle.[17]

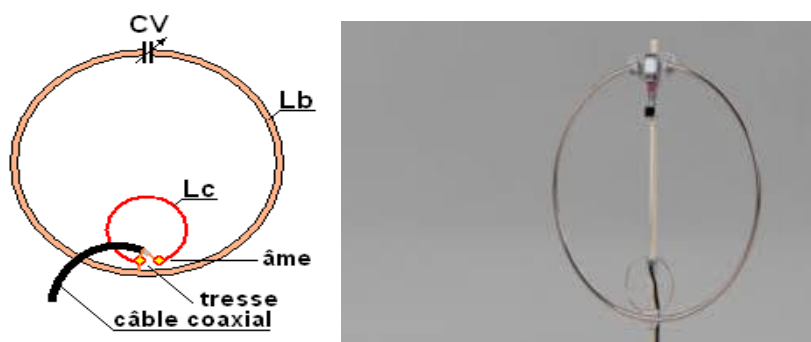


Figure I.11 Antenne à boucle magnétique.

I.9.3 Antenne Cornet

Un dispositif très utilisé pour la propagation d'ondes guidées est le guide d'onde rectangulaire. Pour cette raison, il est utilisé en haute en fréquence. Le transformateur de puissance électromagnétique guidée en puissance rayonnée est l'antenne cornet (figure 1.12).[11]



Figure I.12 Antenne Cornet.

I.9.4 Antenne a réseau de fentes

En utilisant le guide d'onde comme dispositif de transmission, il est possible d'envisager un rayonnement dans une direction différente de l'axe du guide. La figure (I.13) donne une représentation de l'antenne à fentes [4].

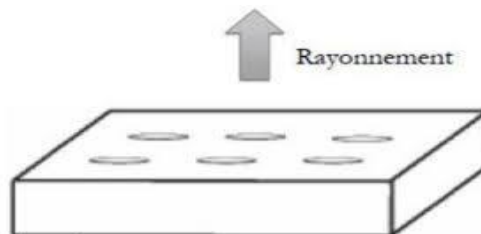


Figure I.13 Antenne à réseau de Fentes.

I.9.5 Antenne Spirale

L'antenne spirale est une antenne planaire, constituée de zones métalliques délimitées par des spirales (figure I.14) [11].

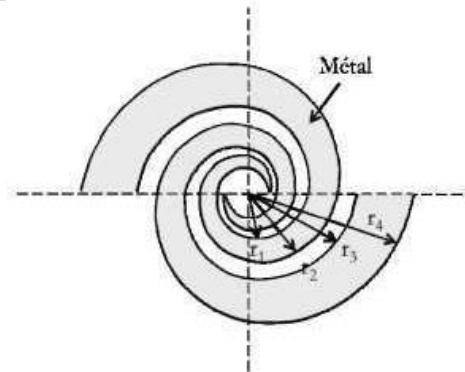


Figure I.14 Antenne Spirale.

I.9.6 Antenne parabolique

Est une antenne à réflecteur utilisée essentiellement dans la réception des ondes satellites. Elle permet de capter la télévision numérique terrestre (TNT) et ne nécessite pas d'être branchée à un décodeur.[18]



Figure I.15 Antenne parabolique.

I.9.7 Antenne Patch

L'antenne planaire ou patch est une antenne plane dont l'élément rayonnant est une surface conductrice généralement carrée, séparée d'un plan réflecteur conducteur par une lame diélectrique. Sa réalisation ressemble à un circuit imprimé double face, substrat, et est donc favorable à une production industrielle.

I.10 APPLICATIONS D'UNE ANTENNE PATCH IMPRIMEE

Les avantages de l'antenne patch a permis de trouver de nombreuses applications. Certaines des applications de l'antenne patch sont énumérées dans le tableau I.2. [19]

SYSTEME	APPLICATION
Antennes d'avion et de Navire	La communication et la navigation, les altimètres, des systèmes aveuglent d'atterrissages.

Missiles	Le radar, les fusibles de proximité et la télémétrie.
Communications par Satellites	La télédiffusion domestique directe, les antennes au bord des véhicules, la communication.
Radio mobile	Les téléphones portables, la téléphonie mobile dans les véhicules.
Téledétection	Grandes ouvertures légères.
Biomédical	Les applicateurs dans le four à micro-ondes.
Autres	Les alarmes d'intrusion, la communication personnelle.

Tableau I.2 : Applications de l'antenne imprimée.

L'antenne imprimée est plus en plus utilisée dans plusieurs domaines, surtout dans le secteur de la téléphonie mobile moderne par exemple « la 5^e génération ».

I.11 CINQUIEME GENERATION (5G)

I.11.1 Introduction

La 5G souhaite se présenter comme la génération de rupture, la génération qui ne s'intéresse plus uniquement au monde des opérateurs de téléphonie mobile et des communications grand public, mais qui ouvre de nouvelles perspectives et permet la cohabitation d'applications et usages extrêmement diversifiés, unifiés au sein d'une même technologie. La 5G envisage la numérisation de la société et de l'économie.

L'idée qui commence à se forger derrière la notion de 5G est que celle-ci ne correspondrait pas à une simple augmentation des débits, comme cela a été le cas pour les précédentes générations. Les communications mobiles grand public, le téléchargement de vidéos et l'utilisation d'applications mobiles représentent l'essentiel de l'utilisation actuelle des ressources radio dans les réseaux 4G ; avec

la 5G, l'objectif serait que le spectre des usages et la diversité des utilisateurs soient grandement élargis.

[20]

I.11.2 Architecture et fonctionnement de la 5G

La figure (I.16) résume le principe de l'architecture générale pour les réseaux mobiles 5G, ce qui est tout-IP modèle basé sur des réseaux sans fil et mobiles inter-opérabilité.

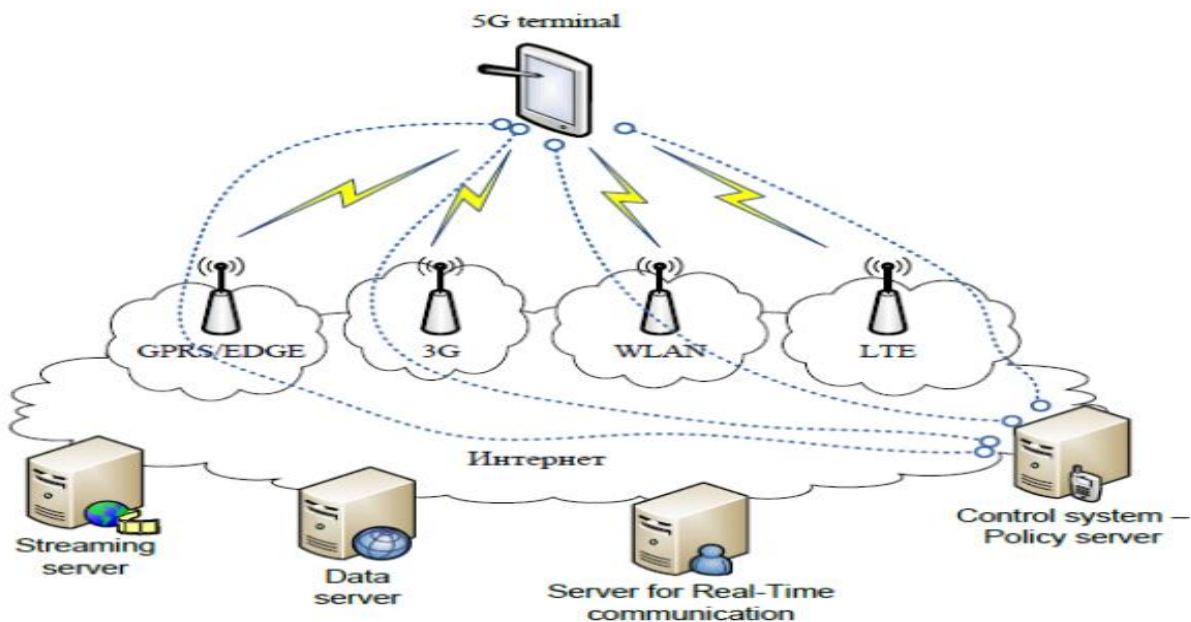


Figure.I.16 Architecture fonctionnelle de 5G. [21]

I.11.3 Avantages et inconvénients de la 5G

I.11.3.1 Avantages

Débit : La 5G va permettre d'aller vite, beaucoup plus vite : des débits de 10 Gbit/s contre 100 Mb/s aujourd'hui.

Ce débit peut se comparer avec le réseau de fibres standard disponible chez vous actuellement.

Latence réduite : désigne le délai entre une action et le déclenchement d'une réaction.

Connectivité massive : des utilisateurs pourront être connectés en simultanés sans que votre vitesse de connexion s'en ressentent.

Objets connectés : Tous vos objets du quotidien vont pouvoir être connectés simplement et à moindre coût au réseau. C'est l'explosion des volumes de données transmises.[22]

I.13.3.2 Inconvénients

Le futur réseau 5G suscite néanmoins quelques inquiétudes notamment en matière d'exposition aux ondes. En effet, l'impact des radiofréquences sur notre santé et sur l'environnement fait débat, l'arrivée de la 5G, tout comme la 4G, augmentera obligatoirement l'exposition aux ondes avec l'installation de nouvelles antennes pour assurer une bonne couverture 5G du territoire.

Pour évaluer si la 5G présente un danger pour notre santé, les expérimentations pilotes actuellement menées en France vont permettre de mesurer les niveaux d'exposition du public aux ondes. L'Anse devra également déterminer les limites sanitaires à adopter pour le réseau 5G. [23]

I.11.4 Fonctionnement de la 5G

La procédure de sélection pour l'attribution des fréquences de la bande [3,4 - 3,8] GHz a été lancée le 31 décembre 2019. La bande [3,4 - 3,8] GHz constitue la bande-cœur de la 5G, dont le déploiement doit permettre d'améliorer la compétitivité des entreprises, de développer l'innovation en France ainsi que de répondre aux attentes des utilisateurs d'accéder à des services mobiles toujours plus performants. La procédure concerne l'attribution des fréquences [3490 – 3800] MHz en métropole.[24]

Quatre sociétés ont déposé un dossier de candidature pour l'attribution des fréquences de la bande [3,4 - 3,8] GHz en France métropolitaine avant la date limite du 25 février 2020 :

- Bouygues Telecom
- Free Mobile
- Orange
- SFR

I.11.5 Applications de la 5G

En termes de technologie, la 5G est définitivement le "hot topique" de ce début d'année. Les avantages de cette technologie sont indéniables : des vitesses de téléchargement augmentées, des temps de latence réduits et une localisation plus précise des utilisateurs. On parle énormément de son application dans certains secteurs (jeux mobiles, e-commerce, véhicules autonomes, télémédecine, trafiques...) mais peu de son immense potentiel dans des domaines aussi variés que l'éducation ou encore le monde du travail.

L'application de la 5G dans le monde des services mobiles ouvre le champ à de nombreuses opportunités et cas d'usage ; en voici 5 qui se distinguent par leur fort potentiel [25]:

I.11.5.1 Autonomie professionnelle en déplacement :

Le smartphone est devenu un outil indispensable pour les professionnels itinérants, mais le réseau 4G peut affecter leur productivité sur les applications mobiles, notamment sur des fonctionnalités de type partage de fichier sur le Cloud ou visioconférence. La 5G saurait combler ce manque. La vitesse de téléchargement sera multipliée par 7, soit 490 Mbit/s.

I.12 CONCLUSION

Dans ce premier chapitre nous avons présenté d'une manière générale l'essentiel des antennes imprimées. Nous avons étudié le principe fonctionnement d'une antenne imprimée, nous avons défini leurs différentes caractéristiques de rayonnement ainsi les différentes techniques d'alimentations, les avantages et les inconvénients des antenne imprimées. Puis nous avons présenté les importantes méthodes utilisées pour la détermination des caractéristiques des antennes imprimées. La dernière section de ce chapitre a été consacré à une présentation globale du réseau 5G.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] H. CHAKER, « conception et optimisation de réseaux d'antennes imprimées a faisceaux multiples application des réseaux de neurones », Thèse de doctorat en Télécommunication, Université Abou-BekrBelkaid – Tlemcen, Mars 2012.
- [2] S. AZZAZ, H. BOUKLI « Analyse des antennes imprimées en anneaux concentriques », Livre, Schaltungsdienst Lange O.H.G, Berlin, Edition Universitaire Européennes ,2012.
- [3] S. SAMIRA, « Etude et caractérisation d'antennes imprimées pour système ultra-large bande », Thèse de Magister en Génie Electrique, Université Mohamed Khider –Biskra, Septembre 2015.
- [4] A. BENOMAR, « Etude des Antennes à Résonateurs Diélectriques. Application aux Réseaux de Télécommunications », thèse en cotutelle en Télécommunication pour docteur de l'université de Tlemcen et docteur de l'université de Limoges, 06 juin 2015.

- [5] F. CHETOUAH, « Etude et modélisation des antennes miniatures basées sur des matériaux diélectriques », thèse doctorat en Electronique Université FERHAT ABBAS SETIF-1, octobre 2018.
- [6] S. MANSAR, M. ALOUI, T. ELBAHRI, « Antenne Patch » Rapport, Ecole National des Science Appliquée Khouribga, 2014/2015.
- [7] A. NIANG, « Antennes miniatures et structures électromagnétiques avec circuits non-Foster », THESE DE DOCTORAT En Physique, Université Paris-Saclay préparée a l'Université Paris-Sud ",09 Janvier 2017.
- Université de Tlemcen, Mai 2014.
- [8] AZZAZ.RAHMANI. S « analyse et conception des antennes imprimées multi bandes en anneaux concentriques pour les réseaux de télécommunications », Thèse de doctorat en Télécommunications, Université de Tlemcen, juillet 2013.
- [9] F. Daout, S. Jacquet, X. Durocher, G. Holtzmer, « Conception, Simulation, Réalisation et mesure d'une antenne imprimée rectangulaire 2.4 GHz », Article disponible sur le site <http://www.j3ea.org> ou <http://dx.doi.org/10.1051/j3ea/2009003>.
- [10] A. BERKAT, « Conception et réalisation d'antenne Miniatures Isotropes dans les Bandes C et ISM », thèse de docteur en télécommunication option communication et réseaux sans fil, Université de Tlemcen, Mai 2014.
- [11] M. CHAABANE.A « Conception d'une antenne bip large bande a fort gain », thèse de docteur en science en Electronique, Université Ferhat Abbas - Sétif 1-, 23 Février 2017.
- [12] K.CHARLES ,GASHABUKAS S.A, « ETUDE DES POSSIBILITES D'UTILISATION D'UN REFLECTEUR PASSIF SUR UNE LIAISON NUMERIQUE DE GRANDE CAPACITE : « Cas de la liaison de MTN RwandacellKarongi-Kibuye » ,Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade d'ingénieur en Electricité et Electronique,UNIVERSITE NATIONALE DU RWANDA,Octobre 2006.
- [13] S.A. DJENNAS « analyse et synthèse de structures conformées d'antenne imprimées implantées sur des objets de formes diverses », Thèse de Magister en Electronique, Université Abou-BekrBelkaid – Tlemcen, Décembre 2000.

- [14] O. PICON et COLL « les antennes théorie, conception et application » Livre, Préface de Maurice Bellanger, paris 2009.
- [15] M. MOULAY, « Exploitation du modelé de la ligne de transmission pour la conception des antennes imprimées multi-bandes dédiées aux applications sans fil », thèse de doctorat en Télécommunication, Université de Tlemcen, 03 Mars 2016.
- [16] S. BOUSSAHA, « Contribution à l'étude et à la modélisation des antennes imprimées rectangulaires Applications aux systèmes de communication », Thèse de Magister en Télécommunication, Université 8Mai 1945 – Guelma, 2012.
- [17] Denis. Audubon « antenne a boucle magnétique formation radioamateur », <https://radioamateur.org/formation/technique-lt-bm>.
- [18] « Antenne parabolique », ooreka. <https://antenne.ooreka.fr/comprendre/antenne-arabolique>.
- [19] D. SABRA, K. KAWTHER, « Etude et conception des antennes planaires ULB à base de métamatériaux », Thèse de Master en Télécommunication, Université 8Mai 1945 Guelma, Juillet 2019.
- [20] Rapport-Enjeux de la 5G « Autorité de régulation des communications électronique et des postes », République Français, Mars 2017.
- [21] R. SHEKHAR, " Network architecture of 5G mobile technology ", Article rédigé dans <http://fr.slideshare.net/vineetkathan/5gwirelessyste>, 2013.
- [22] R. Cetkovic, « Les avantages de la 5G simplement », Article rédigé dans https://www.journaldunet.com/ebusiness/telecoms-fai/1420427-les-avantages-de-la-5g_simplement/#, 20/12/2018
- [23] Réseaux 5G « Les avantages et les inconvénients », Article rédigé dans <https://www.prixtel.com/decouvrir-prixtel/actualite/news/reseau-5g-les-avantages-et-les-inconvenients/>, 24 juin 2019.
- [24] « grands dossiers fréquence 5G :procédure d'attribution de la bande -3.4-3.8 Ghz en métropole », Article rédigé dans <https://www.arcep.fr/la-regulation/grands-dossiers-reseaux-mobiles/la-5g/frequences-5g-procedure-dattribuion-de-la-bande-34-38-ghz-en-metropole.html>.

[25] PASCAL.E, CHIEF.B, « « **Rand Officer chez Connectthings**5 applications de la 5G au service de la mobilité dont on ne parle jamais », Article rédigé dans <https://www.usine-digitale.fr/article/5-applications-de-la-5g-au-service-de-la-mobilite-dont-on-ne-parle-jamais.N826915>, publié le 04 avril 2019.

CHAPITRE I I

ETAT DE L'ART DES METAMATERIAUX

II. 1 INTRODUCTION

Les métamatériaux, sont des matériaux artificiels ayant des propriétés physiques supérieures aux matériaux naturels.

Le terme "Meta" est un préfixe grec signifiant "au-delà", comme dans les termes "métaphysique" et "métalogique". Les métamatériaux sont donc des matériaux ayant des propriétés "au-delà" de ce que l'on peut espérer observer dans des matériaux naturels.

Les métamatériaux sont utilisés pour améliorer les performances des antennes, des filtres et des coupleurs. Leur principal avantage est la miniaturisation des dispositifs grâce à un indice de réfraction assez facilement ajustable que peut même être négatif à certaines fréquences. En général, les métamatériaux sont fabriqués à partir d'inclusions métalliques noyées dans un substrat diélectrique. Parmi les structures les plus connues nous trouvons le Split Ring Resonator (SRR) ou Résonateur en Anneau Fendu (RAF) et les métasolénoïdes [1], [2].

Le deuxième chapitre de cette mémoire est réservé aux généralités sur l'étude générale des métamatériaux, en commençant par un historique sur les structures périodiques, ensuite leurs définitions, ses classifications, ses caractéristiques fondamentales telles que la perméabilité et la permittivité négatives. Enfin dans la dernière partie du chapitre, notre attention sera focalisée sur les applications des métamatériaux et leurs utilisations dans le domaine des antennes.

II.2 Historique

Les premières études ont été consacrées au contrôle des ondes électromagnétiques avec comme principale source d'inspiration, les travaux théoriques publiés dès 1968 par le chercheur physicien russe Victor Veselago en 1968. Depuis, ce sujet a connu une longue hibernation jusqu'en 2001, où une première réalisation pratique a été proposée par le chercheur américain D. Smith. Depuis, les métamatériaux n'ont cessé d'attiser l'intérêt des chercheurs, car ils permettent d'envisager de nouvelles applications et optimisations dans le domaine des micro-ondes, notamment au niveau de la

miniaturisation des circuits et l'introduction de nouvelles propriétés (filtre dual bande, ligne à avance de phase). [3]

Au fil du temps la recherche en électromagnétisme sur les composantes à réfraction négative avait une évolution depuis la découverte de la théorie de V. VESELAGO dont on cite [4] :

- 1996 : Pendry montre théoriquement qu'il est possible d'obtenir des perméabilités négatives ($\mu < 0$)
- 1999 : Pendry montre qu'il est possible d'obtenir des perméabilités négatives ($\mu < 0$)
- 2000 : Smith montre théoriquement la faisabilité d'un méta matériau qui se compose d'un RAF couplés à un réseau de fils conducteurs verticaux.
- 2001 : validation expérimentale de la réfraction négative par Smith.
- 2002 : Concept de lentille parfaite de Pendry.
- 2005 : Approche ligne de transmission par Caloz et Itoh.
- 2006 : Application méta matériaux : antenne, coupleur.

II.3 CLASSIFICATION DES MATERIAUX

Cette classification est basée sur les différentes valeurs de la permittivité ϵ et de la perméabilité μ , et par conséquent sur les valeurs de l'indice de réfraction et de la constante de phase (figure I I.1), définies par

$$n = \sqrt{\epsilon \cdot \mu} \quad (\text{I I.1})$$

$$\beta = \omega \sqrt{\epsilon \cdot \mu} \quad (\text{I I.2})$$

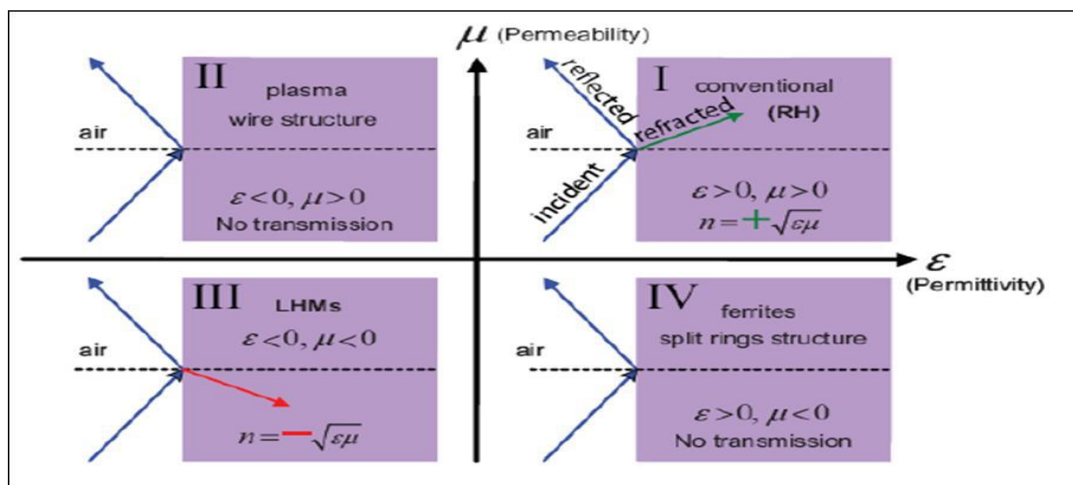


Figure II.1 Classement des matériaux en fonction du signe de leur permittivité ϵ et de leur perméabilité μ . [5]

Dans le diagramme ci-dessus, on trouve généralement quatre milieux effectifs :

1. Le premier quadrant où $\epsilon r > 0$ et $\mu r > 0$ qui donnent $n^2 > 0$ et, et forme un triplet de main droite, représente les matériels conventionnels de main droite. Il y a aussi une famille de MMs dans cette zone, afin d'obtenir une propriété électromagnétique anormale, et un très haut indice de réfraction.
2. Dans le deuxième quadrant où $\epsilon r < 0$ et $\mu r > 0$ qui donnent $n^2 < 0$, autrement dit un indice de réfraction complexe, les matériels dans cette zone permettent une propagation évanescence, comme le plasma du gaz, le plasma dans massif métaux nobles, plasmon (polariton) de surface.
3. Dans le troisième quadrant, où $\epsilon r < 0$ et $\mu r < 0$, qui donnent $n^2 > 0$ et on trouve des MMs à l'indice négatif, les valeurs négatives de ϵ et μ proviennent de la résonance plasmonique qui est lié aussi à un mode évanescent de la propagation de l'onde dans ce MM.
4. Il n'y a pas de matériels naturels avec permittivité positive et perméabilité négative autres que les ferrites ou matériels ferrimagnétiques excités par une onde électromagnétique dont la fréquence est inférieure à fréquence de résonance du plasma magnétique. Des MMs avec la structure en anneau proposée par Pendry dans peuvent exhiber une telle propriété anormale. Ont en même temps les métamatériaux « Left-Handed Material (LHM) » $\epsilon, \mu < 0$ la constante de propagation positive mais l'indice de réfraction négatif, la puissance active selon les \vec{Z} décroissante, le trièdre $(\vec{E}, \vec{H}, \vec{K})$ suit la règle de la main gauche (figure II.2).[6]

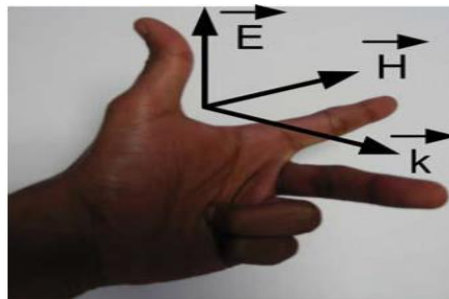


Figure I I.2: Trièdre indirect caractérisé par la règle de la main gauche. [7]

II.4 CARACTÉRISTIQUES DES MÉTAMATÉRIAUX

Il existe plusieurs types de métamatériaux en électromagnétisme, les plus connus étant ceux susceptibles de présenter à la fois une permittivité et une perméabilité négatives.

II.4.1. Métamatériaux à permittivité négative « ENG »

La structure avec un $\epsilon < 0$ décrit par Pendry se compose d'une matrice carrée des fils métalliques parallèles infiniment minces et longs incorporés dans le milieu diélectrique (Figure I I.3). [8]

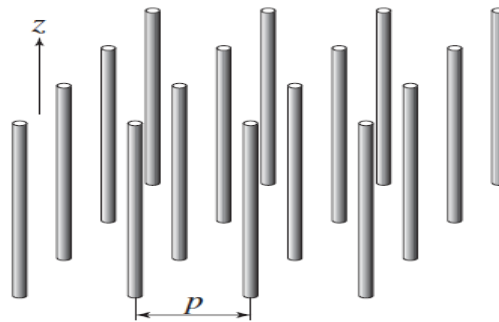


Figure I I.3 Tiges métalliques.

Cette structure a une taille moyenne de p cellule beaucoup plus petite que la longueur d'onde guidée ($p \ll \lambda_g$), c'est une structure effectivement homogène. Si l'excitation de \vec{E} champ électrique est parallèle à l'axe des fils, on aura un courant induit le long de ces fils, en plus des moments dipolaires équivalents sont générés.

La permittivité des fils métalliques soumis au \vec{E} champ électrique est donnée par la formule suivante

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2} \quad (\text{I I.3})$$

ω_{pe} : Fréquence de plasma électrique des fils métalliques.

ω : Fréquence d'excitation de la source.

On constate que la permittivité plasma électrique est négative pour les fréquences en dessous de la fréquence de plasma électrique (relation I I.1), mais cette condition est insuffisante, il faut que le champ soit parallèle à l'axe des Z pour avoir une permittivité négative dans cette structure (Figure I I.4).

Où : la fréquence de plasma est donnée par :

$$\omega_{pe} = \frac{ne^2}{\epsilon_0 m_{eff}} \quad (\text{I I.4})$$

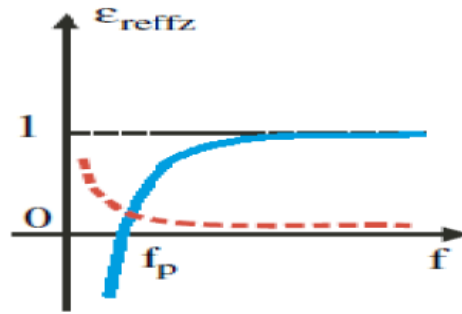


Figure I I.4. La permittivité effective du milieu en fonction de la fréquence. [8]

I I.4.2 Métamatériaux a perméabilité négative « MNG »

Dans le domaine microondes, certains matériaux ferromagnétiques et composites antiferromagnétiques tels que MgF_2 et FeF_2 peuvent présenter une perméabilité négative. Cependant, ces matériaux sont lourds et présentent de fortes pertes magnétiques. La possibilité de créer des milieux non-magnétiques avec une réponse magnétique est alors très intéressante. Cette possibilité est devenue une réalité en 1999 quand Pendry introduisit la structure rouleau suisse (Swiss-Roll) présentée sur la figure (II.5). En effet, le rouleau suisse est une structure artificielle métallique qui a une résonance magnétique sans la présence de composant magnétique. Chaque rouleau suisse individuel est composé d'un cylindre de rayon R sur lequel est enroulé une spirale conductrice isolée de N tours. L'espace entre deux tours consécutifs est noté par dc . Il n'existe donc pas de contact électrique entre les couches. Quand un champ magnétique alternatif est appliqué selon l'axe du cylindre, un courant est induit dans le conducteur. La capacité créée complète donc le circuit résonant et fait circuler le courant. Les dimensions typiques présentées pour la structure étaient de 200 mm pour la longueur et 8 mm pour le rayon. Comme la capacité créée était grande, la structure résonnait dans le domaine radiofréquences (figure II.6). La relation permettant de calculer la perméabilité effective est d'après [10].

$$\mu_{eff} = \frac{F}{1 + \frac{2\sigma i}{\omega r \mu_0 (N-1)} - \frac{dc C_0^2}{2\pi^2 r^2 (N-1) \omega^2}} \quad (II.5)$$

Où C_0 est la vitesse de la lumière dans le vide et ω la pulsation angulaire. La feuille spirale a une conductivité σ et l'isolant entre les couches conductrices a une permittivité. Le taux de remplissage de matériau qui est magnétiquement actif est donné par F . La perméabilité effective s'écrit sous la forme

suivante [10] : $\mu_{eff} = 1 - \frac{F\omega^0^2}{\omega^2 - \omega^0^2 + iT\omega}$ (II.6)

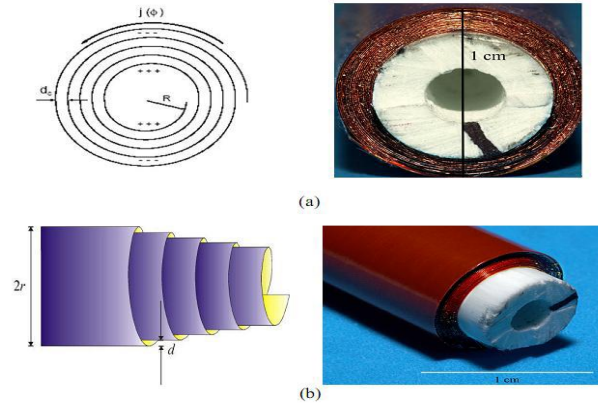


Figure II.5 Structure de rouleau suisse introduite par Pendry : (a) vue de face. (b) vue de profil.[11]

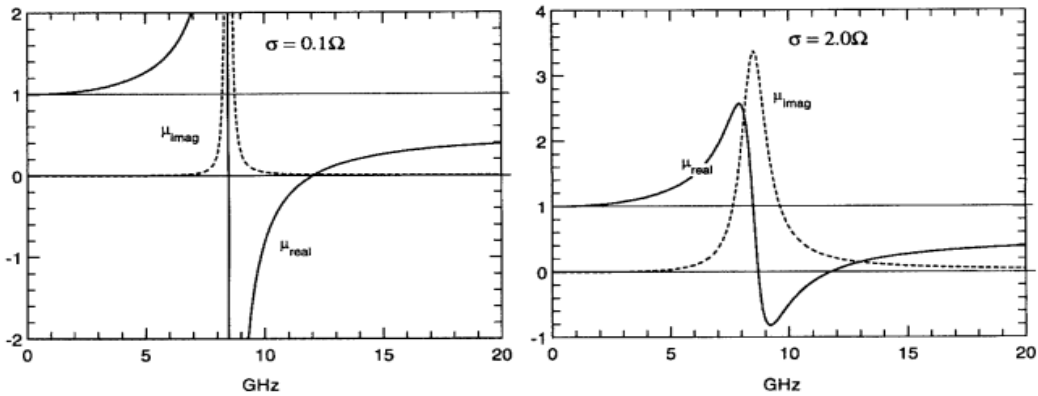


Figure II.6 : Variation de la partie réelle et imaginaire de la perméabilité effective en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de la conductivité σ 0,1, 2. [12]

Où la pulsation de résonance est donnée par : $\omega^0 = \sqrt{\frac{dcC^0^2}{2\pi^2R^3(N-1)}}$ (II.7)

L'amortissement de la résonance est donné par le facteur : $\Gamma = \frac{2\sigma}{\omega R\mu_0(N-1)}$ (II.8)

La perméabilité négative est obtenue par magnétisme artificiel sur des motifs d'anneaux fendus qui seront appelés par la suite Split Ring Resonators (SRR), excité par un champ magnétique parallèle à son axe, la caractéristique typique de ce phénomène en fonction de la fréquence suit une évolution de Lorentz (Figure 11.7) ou correspond à la pulsation de résonance pour laquelle la perméabilité effective devient négative et repasse par zéro à la pulsation désignée comme la pulsation plasma magnétique. Par analogie avec la pulsation plasma électrique. Lorsque l'on s'éloigne de cette résonance, la perméabilité

effective tend vers zéro.

Différents types de résonateurs en anneau fendu « RAF » ou « SRR » sous plusieurs formes géométriques (carré, circulaire, oméga...), ont été présente dans la littérature.[12]



Figure II.7 Résonateur en anneau fendu (Split Ring Resonator (SRR)).

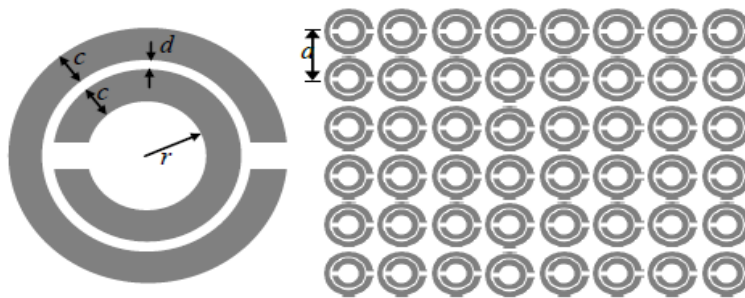


Figure II.8 Réseau de SRR avec perméabilité magnétique effective négative.

Après le calcul de la force électromotricesur les mailles formées par chacune des deux boucles de la SRR l'expression de la perméabilité effective est donnée par :

$$\mu_{\text{eff}} = 1 - \frac{F}{1 + \frac{2\sigma i}{\omega R \mu_0} - \frac{3}{\pi^2 \mu_0 \omega^2 C r^3}} \quad (\text{I I.9})$$

Le volume occupé par une cellule unitaire appartenant au réseau global r , est le rayon de l'anneau interne a , la périodicité du réseau et d est la distance entre les deux SRRs emboîtés. Le volume F et la capacité C créée par le gap intra-cellules adjacentes s'écrivent sous les formes suivantes :

$$F = \pi \frac{r^2}{a^2} \quad (\text{I I.10})$$

$$F = \pi \frac{\varepsilon_0}{d} \quad (\text{I I.11})$$

Un développement de l'équation (I I.10) conduit à une expression de la perméabilité effective simplifiée en fonction principalement de la pulsation de résonance ω_0 et la pulsation du plasma magnétique

$$\omega_{pm}: b\mu_{eff} = 1 - \frac{F}{\omega^2 - \omega_0^2 + i\gamma\omega} \quad (II.12)$$

Les SRR présentent au-dessus de leurs fréquences de résonance une bande étroite pour laquelle la perméabilité passe en dessous de zéro (figure II.9). Le phénomène métamatériau magnétique est observé entre la fréquence de résonance ω_0 et la fréquence du plasma magnétique ω_{pm} . [3]

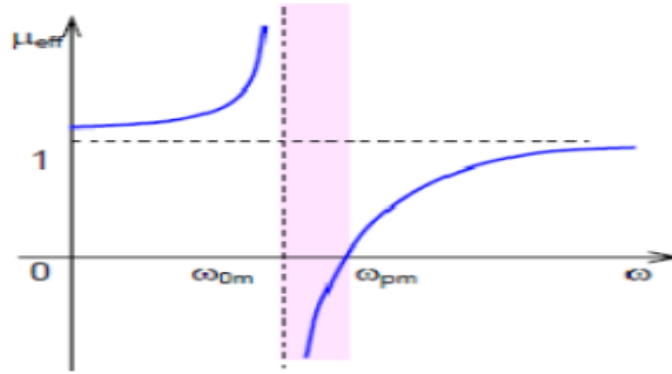


Figure II.9 Variations de la perméabilité en fonction de la fréquence de travail. [12]

En se basant sur les structures originales de J. Pendry, les chercheurs ont espéré alors réaliser et caractériser expérimentalement ces matériaux mystérieux. Et ce n'est qu'en 2001 qu'une structure Métamatériau a vu le jour (Figure I I.10). L'équipe de D.R. Smith a réalisé une structure à base d'un réseau de SRR avec des tiges métalliques, elle a ensuite proposé une structure planaire améliorée fonctionnant dans le domaine des micro-ondes (Figure I I.9.b), pour proposer après une méthodologie de caractérisation expérimentale des propriétés de Métamatériau sur la base de la mesure des paramètres S [13].

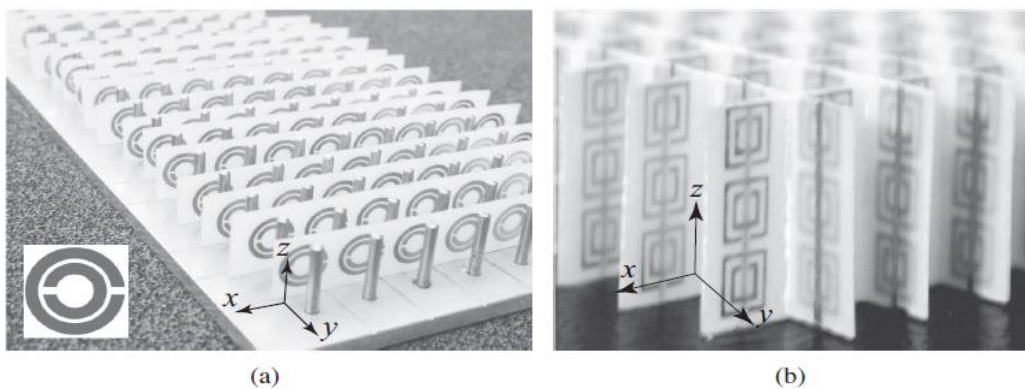


Figure II.10 (a) Premier Prototypé Métamatériau proposé par l'équipe du D.R. Smith :(b) prototypé amélioré. [9]

II.4.3 Métamatériaux doublement négatifs « DNG »

Les matériaux DNG sont les matériaux ayant simultanément une permittivité et une perméabilité négative, ces Métamatériaux peuvent être réalisés par des cellules « imbriquées » ou des cellules « combinées ».

Le premier type imbrique deux cellules unitaires basiques : une cellule de type MNG, et une cellule de type ENG. A la résonance cette cellule composite montre un phénomène doublement négatif, la cellule (SRR+Tige) réalisée par l'équipe de D.R. Smith (Figure II.11.a). Cette cellule imbrique deux cellules unitaires basiques : la SRR ayant une activité magnétique et le réseau de tiges responsable de l'activité électrique. A la résonance cette cellule composite montre un phénomène doublement négatif (Figure II.11.b).

Le deuxième type est basé sur un seul motif responsable d'une double activité simultanément sous forme de Ω (Figure II.12) et repoussée par H. Griguer. [14]

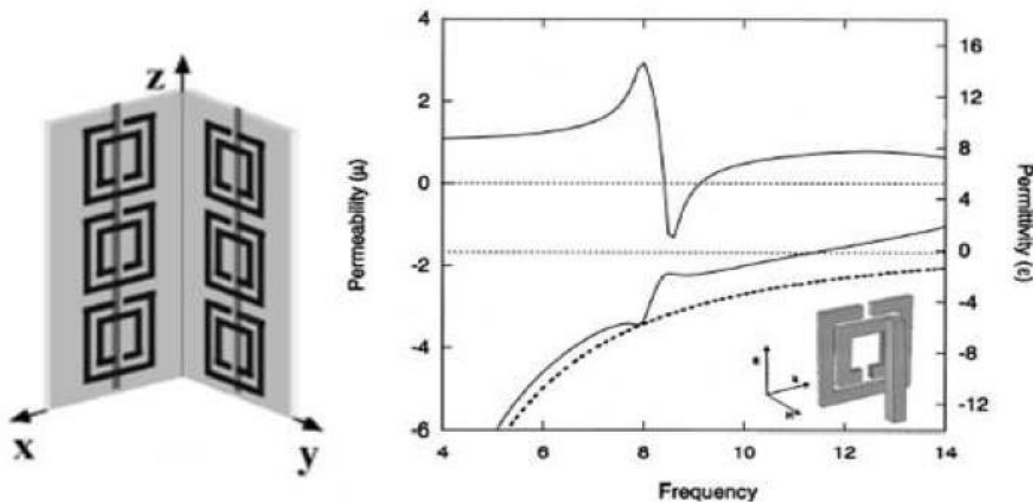


Figure II.11 (a) cellule DNG-"SRR+Tige", (b) perméabilité et permittivité de la cellule "SRR+Tige". [14]

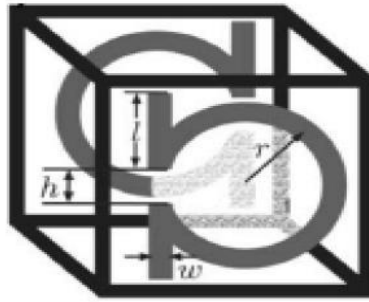


Figure II.12 Cellule DNG sous forme de « Ω ».

II.5 Applications des métamatériaux

Ces quinze dernières années, les métamatériaux jouissent d'un intérêt croissant via notamment :

- Les techniques de camouflage.
- La miniaturisation.
- La super-résolution.
- La sélectivité

II.5.1 Techniques de camouflage

Cette application, bien que relevant quasiment de la science-fiction, a particulièrement capté l'attention du grand public sur les métamatériaux. L'idée est née d'une publication de J. Pendry en 2006. Elle est basée sur les transformations géométriques de la relativité permettant de contrôler en chaque point de l'espace le parcours des ondes électromagnétiques, faisant apparaître des potentialités lointaines telles que la cape d'invisibilité d'Harry Potter.

Ce type d'application ne nécessite pas une permittivité et perméabilité négative, mais de pouvoir contrôler et varier leur valeur dans l'espace. [15]

II.5.2 Cape d'invisibilité

La fabrication de la première cape d'invisibilité en micro-onde a été développée par John Pendry en 2006. Il a proposé un métamatériau dont les champs électromagnétiques peuvent être contrôlés et manipulés. Cette cape d'invisibilité détourne les ondes centimétriques ou micro-ondes, figure 1.17, cette propriété résulte de la présence de mini circuits de taille inférieure à la longueur d'onde et de l'architecture en anneaux concentriques. [12]

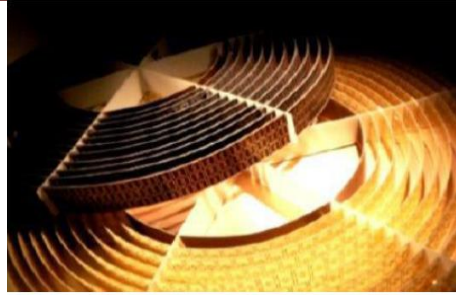


Figure II.13 : Cape d'invisibilité de J. Pendry.

II.5.3 Lentilles parfaites

Elles sont l'une des applications des matériaux main-gauche proposés par Pendry, qui a montré qu'un substrat ayant un indice de réfraction négatif entouré par l'air permet d'obtenir des images avec une précision infinie en longueur d'onde.

La résolution des lentilles d'indice négatif ne serait donc plus limitée par la longueur d'onde et elles permettraient d'observer des détails inaccessibles. Pour cette raison, Pendry donne à ces matériaux le nom de « lentilles Parfaites ». Le principe est représenté sur la figure (II.14). [16]

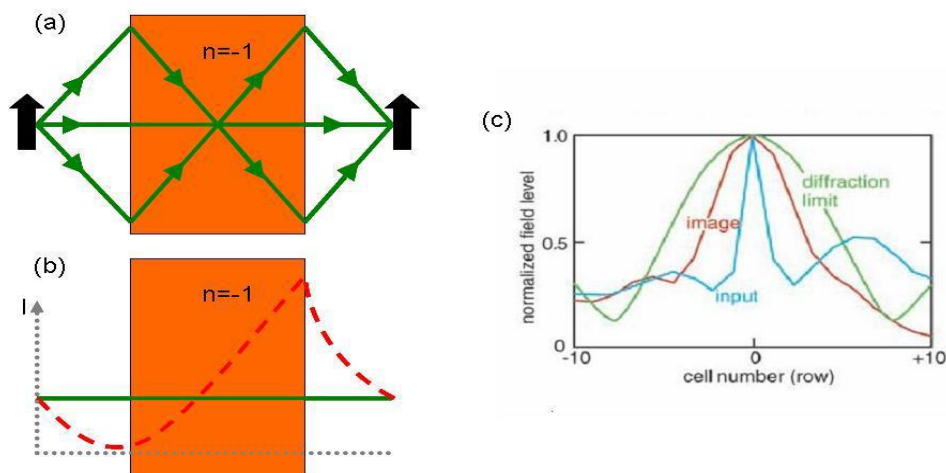


Figure II.14 : (a) Lentille parfaite de Pendry d'indice de réfraction négatif. (b) Lentille parfaite de Smith d'indice de réfraction négatif. (c) comparaison des données mesurées (rouge) et résultats simulés (bleu) la limite de direction (vert).

II.5.4 Miniaturisation

Quatrième application importante, les métamatériaux permettent une miniaturisation de la plupart des dispositifs classiques tels que les antennes, les guides d'ondes, les absorbants, les capteurs. Nous présenterons deux exemples d'applications : la figure (II.15) montre une antenne patch améliorée car

posée sur une couche de métamatériau, à la perméabilité très supérieure à 1 car elle est résonante.

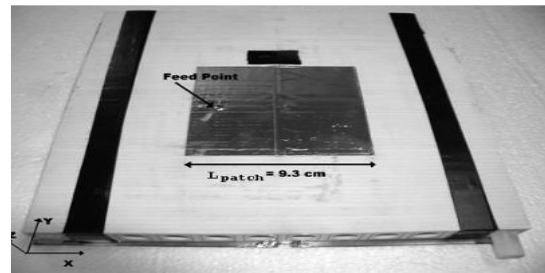


Figure II.15 : Photo d'une antenne patch miniaturisée grâce à une couche de métamatériau à la perméabilité améliorée.

Second exemple de miniaturisation : les d'absorbant en métamatériaux, figure (II.16) fonctionnant aux infrarouges. L'épaisseur de l'absorbant est de l'ordre de 100 nm, soit 15 fois plus petit que la longueur d'onde dupic d'absorption [17]. L'utilisation demétamatériaux permet dans ce cas de réduire les dimensions del'absorbant tout en conservant une efficacité de fonctionnement élevée. Il a été montréque le fait d'avoir un métamatériau à la perméabilité résonante permet d'amplifier cettedernière ($\mu r < 1$) et ainsi de diminuer considérablement l'épaisseur d'un absorbant.

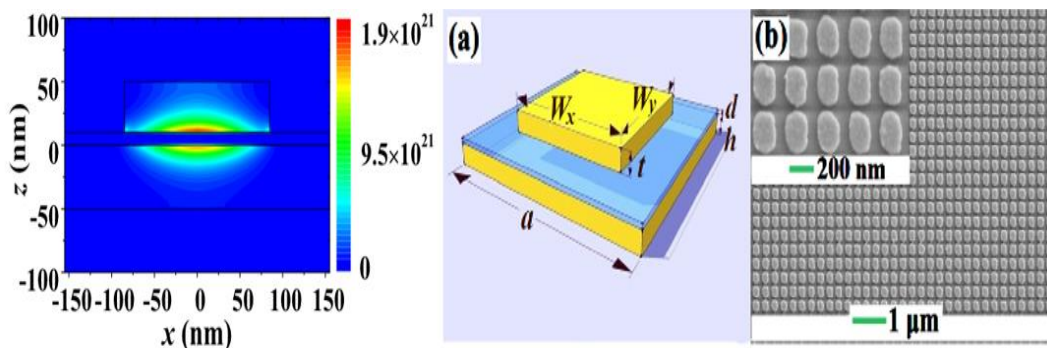


Figure II.16 : Ccouche d'absorbant par Haoet al. à base de métamatériau métallique, fonctionnant dans l'infrarouge. [17]

II.5.5 Sélectivité

De par leurs dimensions sub-longueur d'onde, les métamatériaux ont un intérêt dans la fabrication de capteurs performants. Cette potentialité fut soulignée dès 1999 par Pendry. La rupture de symétrie dans les « atomes » de ce métamatériau permet l'apparition de modes de résonances plus précis. C'est grâce à la diminution de cette largeur en fréquence Δf , visible à droite sur la figure (I I.17), que l'on parle de meilleure sensibilité des métamatériaux. [17]

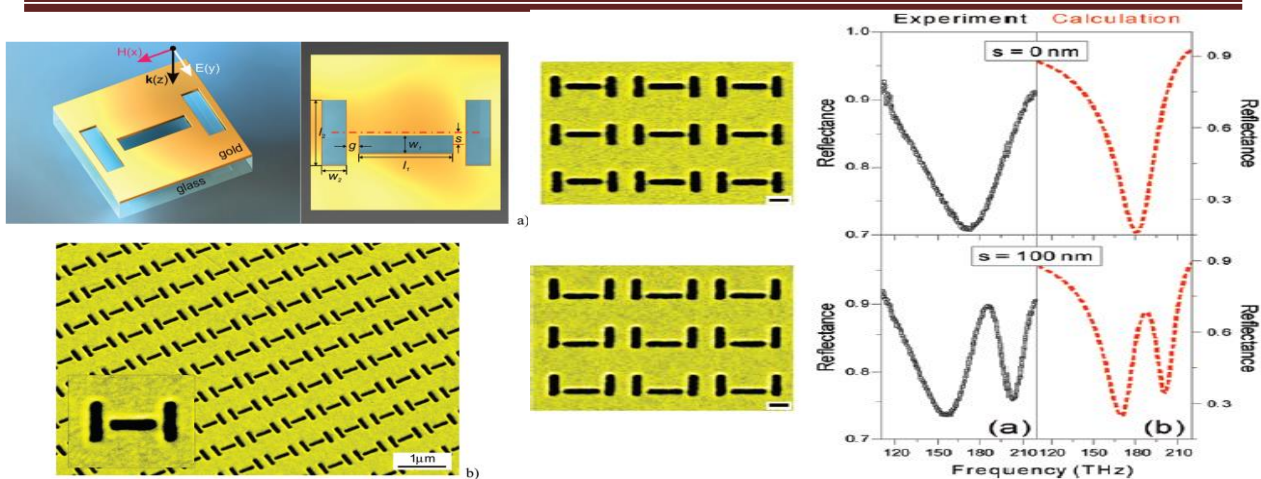


Figure II.17 : Métamatériaux plan ayant une grande sensibilité en fréquence au THz, permettant de concevoir un capteur performant dans le visible. En jouant sur la position de la fente centrale, on brise la symétrie de résonance qui devient plus fins (à droite)

II.6 CONCLUSION

Dans ce deuxième chapitre, nous avons présenté les notions de base sur les métamatériaux à savoir la permittivité et la perméabilité. Par suite, nous avons décrit et commenté les étapes de réalisation de métamatériaux doublement négatifs à partir d'une superposition de deux milieux négatifs (ϵ et $\mu < 0$). Enfin, nous avons cité quelques applications potentielles des métamatériaux qui ont un rôle important dans les nouvelles technologies surtout les domaines des télécommunications.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] S. Gomez, P. Quéffélé, A. Chevalier, « Méthode De Caractérisations Electromagnétique Large Bande Des Métamateriaux », article de l'université de Bretagne Occidentale, Mars 2001.
- [2] R. MOHAMED LAMINE, « Modélisation et simulation des antennes en ondemillimétrique à base de métamatériaux », Thèse de Magister en Micro-Ondes, Université Ziani Achour de Djelfa, Mai 2014.
- [3] T. BOUGOUTIA, « Analyse et conception des antennes microstrip à base de métamatériaux », Thèse de Doctorat Option Micro – Ondes, Université Mohamed Boudiaf-Msila, Mai 2018.
- [4] V. Veselago, L. Braginsky, V. Shklover, and C. Hafner. "Negative Refractive Index Materials". ASP Computer Theory Nanoscience, Vol. 3, No. 2, pp. 1-30, 2006.
- [5] M. LABIDI, « Conception et application des métamatériaux pour des circuits RF », Thèse de Doctorat En Technologies de l'information et de Communications, Université de Carthage Ecole

Supérieure des Communications de Tunis, 2011/2012.

[6] F. YOUNG « Applications des métamatériaux en optique guidée », Thèse de Doctorat Physique, DE L'UNIVERSITE PARIS-SACLAY préparée à l'Université Paris Sud, 05 Mai 2017.

[7] B. BELKADI, « étude et conception de filtres hyperfréquences à base de nouveaux matériaux », Thèse de Doctorat En Electronique, Université Djilali Liabès Sidi Bel Abbes, 07 Avril 2019.

[8] M. GAMOUH.SAMIA, « ETUDE DES METAMATERIAUX ET LEURS APPLICATIONS DANS LES SYSTEMES MICRO-ONDES », Thèse de Doctorat En Electronique Option Biocapteurs, Université Freres Mentouri Constantine, 10 Juillet 2017.

[9] A. JOHN WILEY. SONS « Electromagnetic metamaterials: transmission line theory and microwave applications the engineering », Livre publié in Canada, 2006.

[10] S. NAWAZ.BUOKUR, « Mise en œuvre de métamatériaux en vue d'application aux circuits microondes et aux antennes », thèse de Doctorat en Electronique, Université De Nantes Ecole Doctorale, Novembre 2005.

[11] N. ABELGHANI « Etude et conception de structures à base de métamatériaux pour application aux circuits microondes et antennes », thèse pour l'obtention du grade Docteur En science en Télécommunication, Université Abou Bakr Belkaïd-Tlemcen, 22 Décembre 2018.

[12] S. GAMOUH, « Etude des métamatériaux et leurs applications dans les systèmes micro-ondes », Thèse de doctorat En Electronique, Université Frères Mentouri Constantine, 10 Octobre 2017.

[13] <http://www.memoireonline.com/11/12/6502/Conception-dune-antenne-Patch-Microstrip.html>.

[14] Hicham LALJ, « Conception et caractérisation de filtres et systèmes antennaires reconfigurables chargés par des résonateurs Métamatériaux sub-longueurs d'onde » thèse doctorat, INSA de Rennes 2014.

[15] S. LANNEBRE, « Étude théorique de métamatériaux formés de particules diélectriques résonantes dans la gamme submillimétrique : magnétisme artificiel et indice de réfraction négatif », Thèse pour Obtenir le grade Docteur En Electronique, Université bordeaux 1, 03 Novembre 2011.

[16] R. GHASEMI, « Métamatériaux en infrarouge et applications », Thèse de Doctorat, discipline

physique, Université Paris-Sud, 11 Novembre 2012

[17] S. MARCELLIN, « Métamatériaux « tout-diélectrique » pour le térahertz », Thèse de doctorat En Physique, THESE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITE PARIS-SACLAY, préparée à l'Université Paris-Sud, 24 Mai 2016.

CHAPITRE III

APPLICATIONS DES METAMATERIAUX AUX ANTENNES PATCHS

III.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de concevoir une antenne patch qui doit fonctionner à la fréquence de résonance 3.5GHz, avec un coefficient de réflexion à -10dB. Pour cela nous allons calculer les paramètres de l'antenne avant la simulation pour trouver les paramètres caractéristiques internes (les paramètres S, la fréquence de résonance, la bande passante), et les caractéristiques externe (le gain, la directivité, la polarisation et le diagramme de rayonnement dans le plan E et H).

Une méthodologie a été mise en place pour la conception de l'antenne patch rectangulaire celle-ci consiste à :

- Calculer les dimensions théoriques du patch à réaliser à la fréquence désirée.
- Optimiser l'adaptation de l'antenne par des encoches.
- Faire une simulation sous logiciel CST Microwave Studio.
- Vérifier les performances de l'antenne tel que l'adaptation, le gain, la directivité.
- Amélioration du gain par un réseau d'antenne.

III.2 CONCEPTION ET SIMULATION DE L'ANTENNE PATCH RECTANGULAIRE

III.2.1 Cahier des charges

Ce projet consiste à réaliser une antenne patch microstrip à la fréquence de 3.5GHz. Le cahier des charges nous impose les valeurs caractérisant des différents éléments de l'antenne :

- Permittivité diélectrique du substrat (FR-4 « Fire Retardant ») : $\epsilon_r = 4.3$,
- Hauteur du substrat diélectrique : $h_s = 1.56\text{mm}$
- Fréquence de résonance que l'on désire : $f_r = 3.5\text{ GHz}$
- Adaptation à 50 Ohm
- Alimentation par ligne microstrip

- Epaisseur de la métallisation : $h = 0.035\text{mm}$

III.2.2 OUTILS DE SIMULATION

Plusieurs logiciels commerciaux sont utilisés pour simuler le comportement des structures planaires et étudier leurs performances. Parmi ces logiciels on peut citer le logiciel HFSS (High Frequency Structure Simulator) et le logiciel CST (Computer Simulation Technology).

III.3 CALCULS THEORIQUE DES DIMENSIONS ET CARACTERISTIQUES DES ANTENNES

III.3.1 Calculs théorique de dimensions de l'antenne patch rectangulaire

Dans les calculs qui suivent nous allons utiliser la permittivité du substrat $\epsilon_r = 4.3$ son épaisseur est de $h = 1.56\text{mm}$, le choix de ces valeurs sera justifié dans la sous-section 3.3 traitant l'influence des caractéristiques du substrat sur les performances de l'antenne.

- **Calcul de la largeur W_p du patch :** La formule suivante permet de calculer la largeur du patch travaillant à la fréquence de résonance 3,5 GHz. Cette formule permet d'optimiser le rayonnement et de limiter les modes d'ordres supérieures :

$$W_p = \frac{c}{2 * f * r * \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} = 26.32\text{mm}$$

- **Calcul de constante diélectrique effective $\epsilon_{r_{eff}}$:**

$$\epsilon_{r_{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} * \left[1 + 12 * \frac{h}{w} \right]^{-\frac{1}{2}} = 3.9214$$

- **Calcul de la longueur effective :**

$$L_{eff} = \frac{c}{2 * f * r * \sqrt{\epsilon_{r_{eff}}}} = 21.75\text{mm}$$

- **Extension de longueur (ΔL) :**

$$\Delta L = 0.412 * h * \frac{(\epsilon_{r_{eff}} + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{r_{eff}} - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.8 \right)} = 0.6915\text{mm}$$

- **Calcul de la longueur de patch (L_p) :**

$$L_p = L_{eff} - 2 * \Delta L = 20.40\text{mm}$$

- **Calcul de longueur d'alimentation (LL) :**

$$LL = \frac{c}{2 * fr} = 42 \text{ mm}$$

- **Calcul de longueur de substrat (Lg) :**

$$Lg = Lp + 6 * h + LL = 71.76 \text{ mm}$$

- **Calcul la largeur du substrat (wg) :**

$$Wg = Wp + 6 * h = 35.058 \text{ mm}$$

- **Calcul la largeur de la ligne d'alimentation (W0) avec $Zc = 50 \Omega$:**

On utilise le calculateur CST.

III.3.2 Dimension de la ligne de transmission

Pour calculer les dimensions de la ligne de transmission, l'outil « MicrostripAnalysis/SynthesisCalculator » sera utilisé afin d'accélérer le processus.

Pour avoir une impédance de 50Ω , la largeur de ligne nécessaire pour la ligne d'alimentation est $W_0 = 3.058 \text{ mm}$. Le tableau III.1 représente les paramètres de l'antenne patch.

W (mm)	ϵ_e	L_e (mm)	ΔL (mm)	L (mm)	L_L (mm)	L_g (mm)	W_g (mm)
26.32	3.9214	12.75	0.6915	20.40	42	71.76	35.058

Tableau III.1 : Dimensions des paramètres de l'antenne patch.

III.4 RESULTATS DE CONCEPTION ET DE SIMULATION DES ANTENNES PATCH

III.4.1 Conception d'une antenne patch rectangulaire sans encoche

Maintenant que toutes les dimensions sont calculées, on peut représenter l'antenne patch sous CST et l'adaptation à la fréquence 3,5 GHz qui représente l'une des fréquences utilisées pour la 5G. La figure (III.1) représente une antenne patch rectangulaire sans encoches.

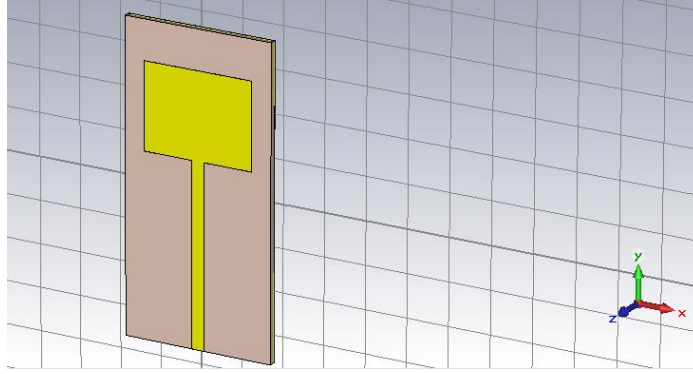


Figure III.1: Antenne patch microstrip sans encoches.

La figure III.2 représente le résultat de simulation du coefficient S_{11} qui est de l'ordre de -30dB pour une fréquence de résonance de 3.51GHz.

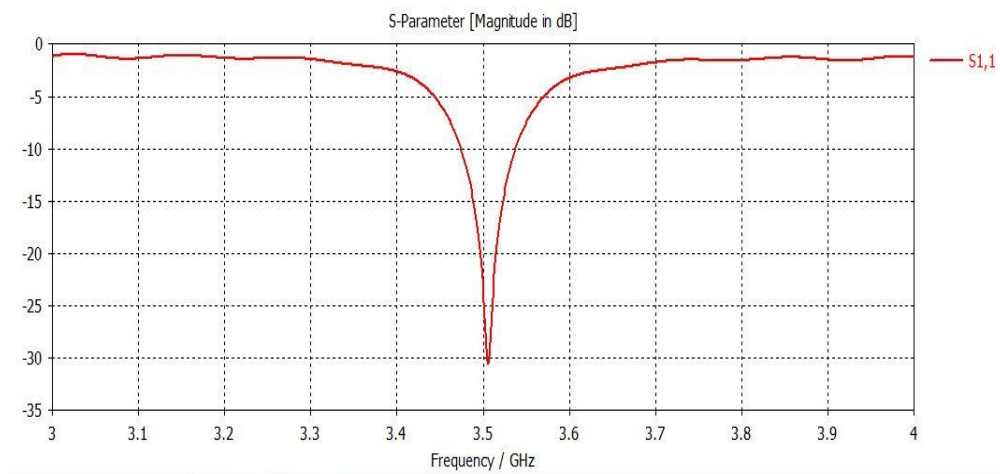


Figure III.2 : Coefficient S_{11} de l'antenne patch sans encoches en fonction de la fréquence.

La figure III.3 représente la directivité de l'antenne, l'angles $\phi = 90^\circ$ et $\theta = 270^\circ$ avec un gain de 6.2dB, donc l'antenne est directive.

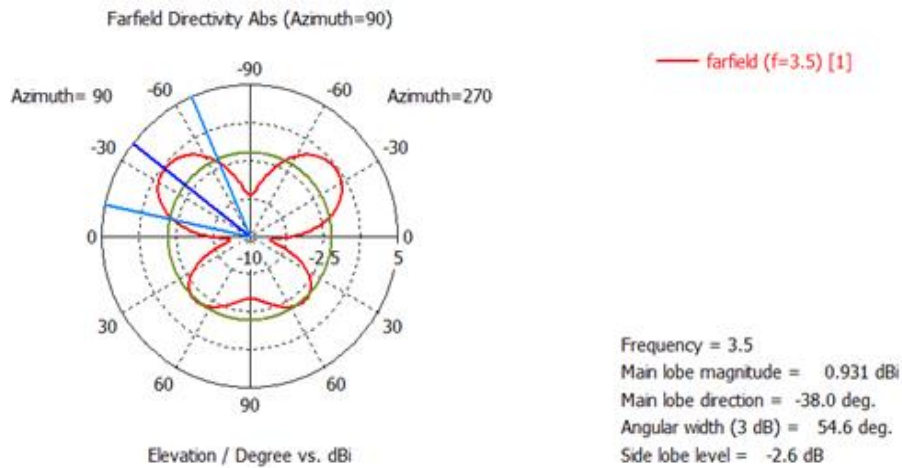


Figure III.3: Diagramme de la directivité de l'antenne patch sans encoches.

La figure III.4 représente le diagramme de rayonnement de l'antenne patch sans encoches.

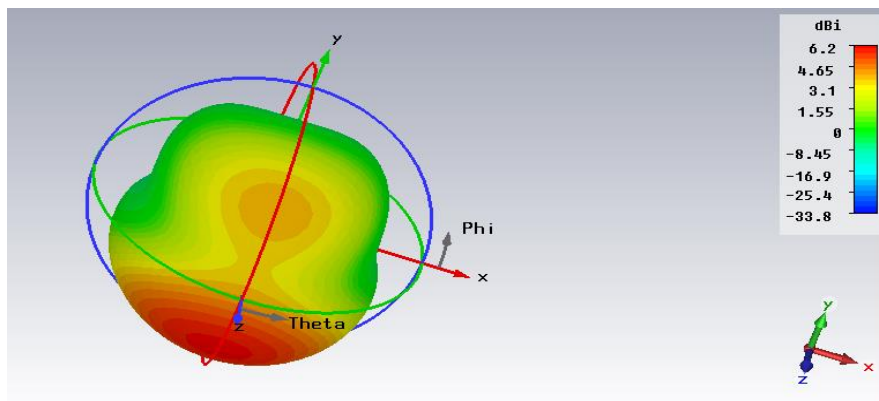


Figure III.4 : Diagramme de rayonnement du gain de l'antenne patch sans encoche.

III.4.2 Conception d'une antenne patch rectangulaire avec encoches

La figure (III.5) représente une antenne patch rectangulaire avec encoches, ces dernières sont utilisées pour une meilleure adaptation de l'antenne patch sur la fréquence de résonance 3.5GHz.

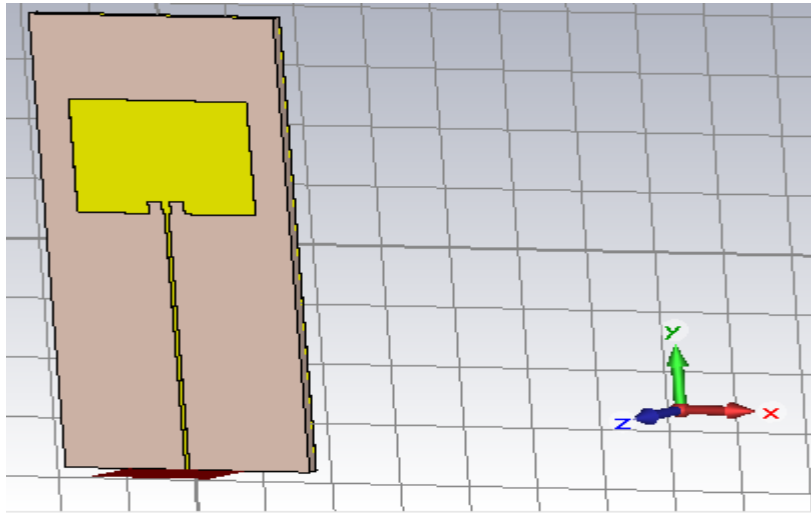


Figure III.5: Antenne patch microstrip avec encoches.

La figure III.6 représente le résultat de simulation du coefficient S_{11} qui est de l'ordre de - dB pour une fréquence de résonance de 3.51 GHz.

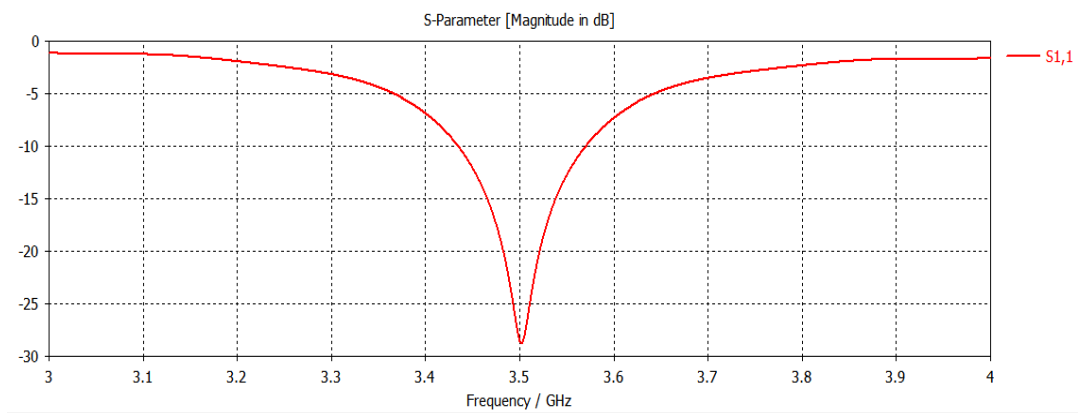


Figure III.6: Coefficient S_{11} de l'antenne patch avec encoches en fonction de la fréquence.

La figure III.7 représente le diagramme de rayonnement de l'antenne patch avec encoches.

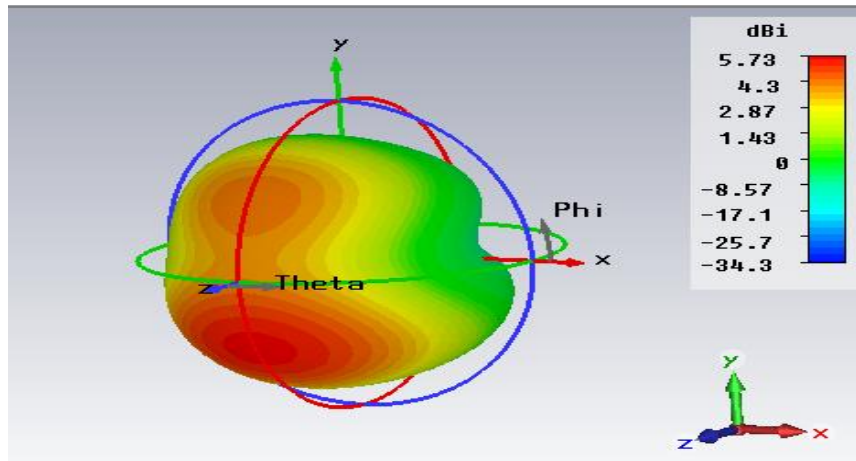


Figure III.7: Diagramme de rayonnement du gain de l'antenne patch avec encoches.

La figure III.8 représente la directivité de l'antenne, l'angles $\phi = 90^\circ$ et $\theta = 270^\circ$ avec un gain de 6.2dB, donc l'antenne est directive.

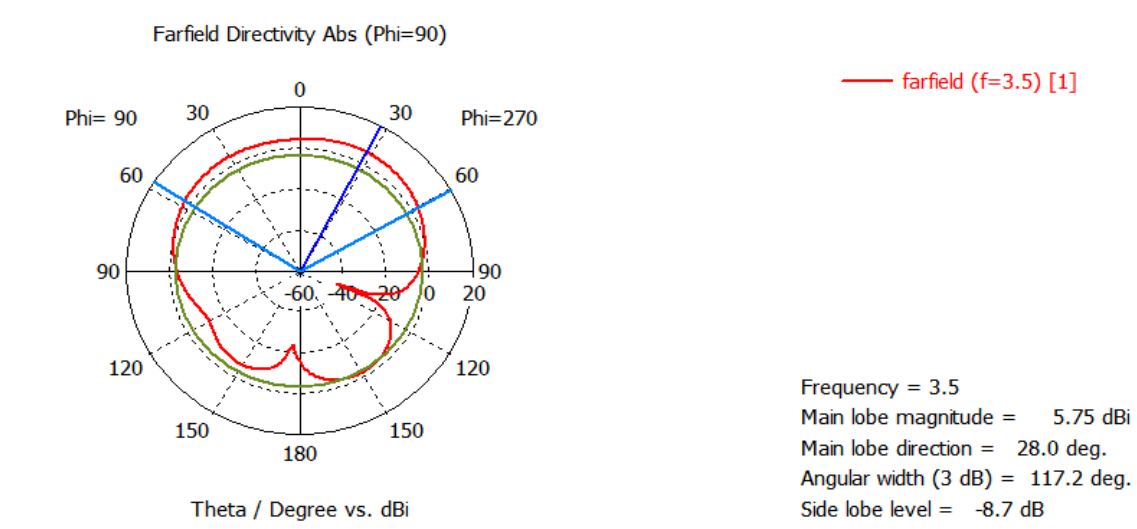


Figure III.8 : Diagramme de la directivité de l'antenne patch sans encoches.

III.5 CONCEPTION ET SIMULATION DES CELLULES SRR ET CSRR

III.5.1 Cahier de charge

III.5.1.1 Conception et simulation de la cellule SRR

Pour concevoir un SRR on prend les dimensions suivantes :

La dimension de l'are du substrat est $L_s = 5.55\text{mm}$.

La longueur L_1 ex= 5.3mm .

La largeur de substrat est $S_{ext} = 0.3\text{mm}$.

La distance entre les deux anneaux $S = 0.15\text{mm}$.

La largeur de l'anneau est $W = 0.2\text{mm}$.

La largeur du gap est $g = 0.3\text{mm}$.

Les matériaux utilisés :

Pour le SSR : cuivre (cooper)

Pour le substrat : FR-4

Pour le Box : vacuum

- **Simulations sous CST**

L'étude présentée dans cette thèse est basée sur un mini projet de conception des antennes patch microstirp.

L'utilisation d'un simulateur électromagnétique CST permet d'appréhender des lois de comportements sans avoir préalablement recours à un formalisme mathématique.

On veut concevoir une antenne rectangulaire dont les caractéristiques sont citées dans le cahier de charge de la simulation de l'antenne patch rectangulaire. Ces caractéristiques sont citées de telle sorte à ce que la fréquence de résonance soit bien à $f = 3.5\text{GHz}$.

On prend deux anneaux de cuivre de longueur L , espacés par un gap 'g'. Aux points de contact entre le gap (cuivre) et les anneaux (cuivre).

III.5.1.2 Conception et simulation de la cellule SRR ou RAF à 2 anneaux

On début on prend un box dont la largeur est égale la longueur est égale $L_s = 5.55\text{mm}$ avec le matériel vacuum avec un substrat dont la hauteur est 1.56mm et puis on réalise les deux anneaux de dimensions L_1 extérieur et L_2 intérieur puis on prend un deuxième carré intérieur de dimensions L_1 extérieur et L_2 intérieur de largeur respectivement $S = 0.15\text{mm}$ et de largeur

de $W = 0.2 \text{ mm}$ La figure (III.9) représente la cellule SRR.

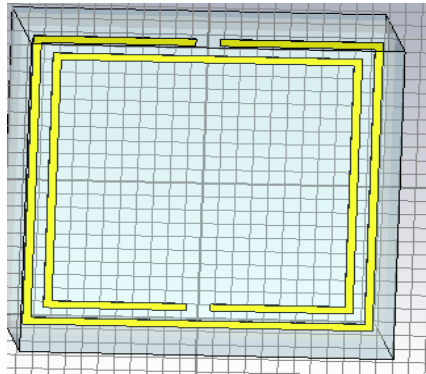
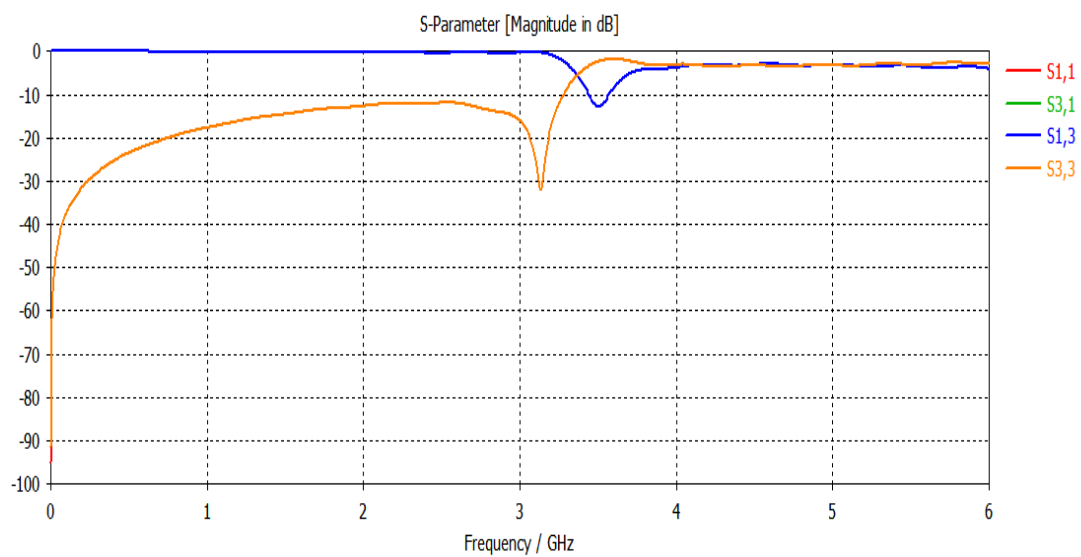
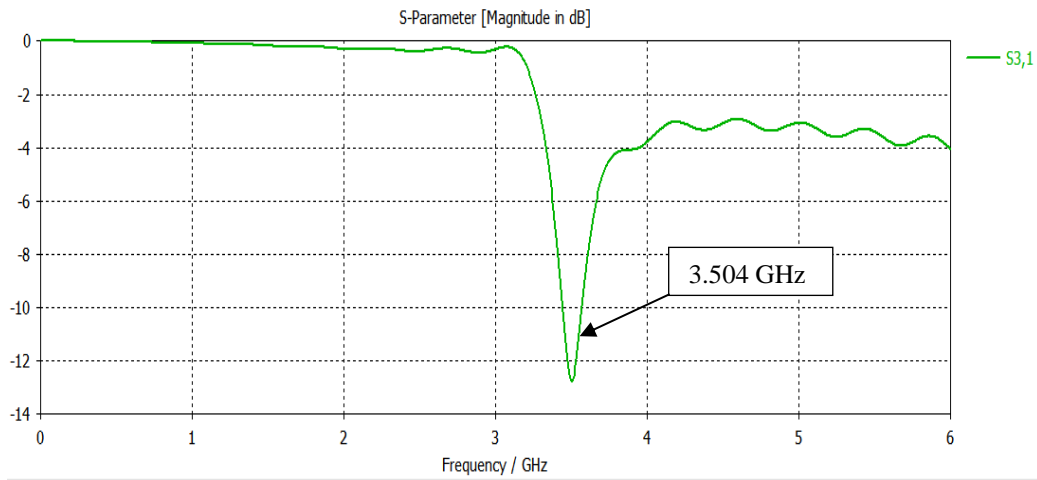


Figure III.9: Représentation et dimensions d'une unité SRR à 2 anneaux.

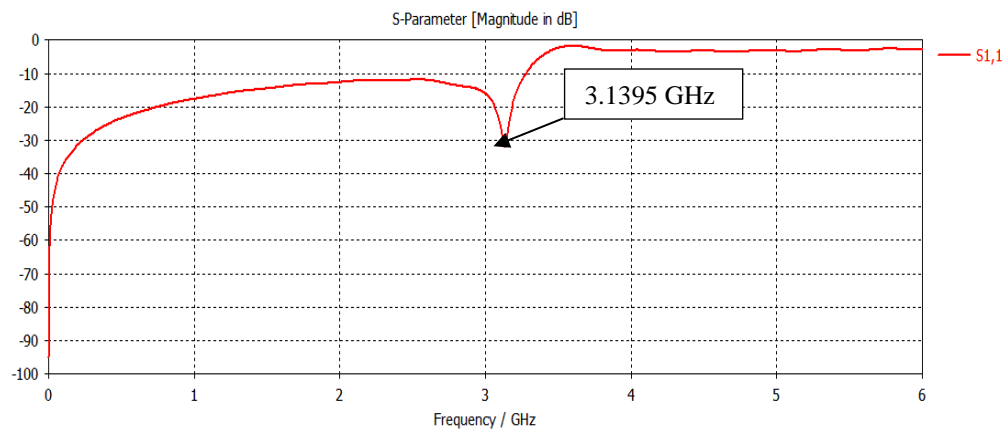
Les résultats de simulation de la cellule SRR sont présentés sur la figure III.10 après simulation et adaptation des valeurs de de la cellule SRR.



A : représentation des paramètres (S) ou S_{11} et S_{21} qui se croisent.



B : Coefficient de transmission (S_{21}) en dB.



C : Coefficient de reflexion S_{11} en dB.

Figure III.10: Représentation des coefficients S_{11} et S_{21} .

La figure (III.10) représente les coefficients de réflexion (S_{11}) et de transmission (S_{21}) en dB suite à la simulation de la RAF carré présenté dans la figure. Nous pouvons observer que le Coefficient de réflexion (S_{21}) est inférieur à -10 dB dans une de fréquence de 3.504GHz. Nous observons aussi que la RAF présente un coefficient de réflexion (S_{11}) de -31.2 dB pour une fréquence de 3.1395 GHz. Cette résonance est une résonance magnétique et électrique obtenue suite à une pénétration du champ à travers les anneaux et produit un courant induit circulant sur les anneaux et aussi excite les coupures des anneaux.

III.5.2 Conception et simulation de la cellule CSRR ou RAFC à 2 anneaux

La cellule SRR complémentaire dite CSRR, est une double contrepartie du SRR ou parfois appelé « fente split-résonateur en anneau », est constitué de fentes qui ont la même dimension que la SRR correspondant. Par le principe de la dualité, les propriétés du CSRR sont en relation duelle avec les propriétés des SRR. La SRR se comportent comme un dipôle magnétique ponctuel, alors que la CSRR présentent un dipôle électrique ponctuel avec polarisation négative. Les deux cellules SRR et CSRR présentent approximativement la même fréquence de résonance en raison de leurs dimensions partagées. La figure III.11 représente la CSRR à 2 anneaux.

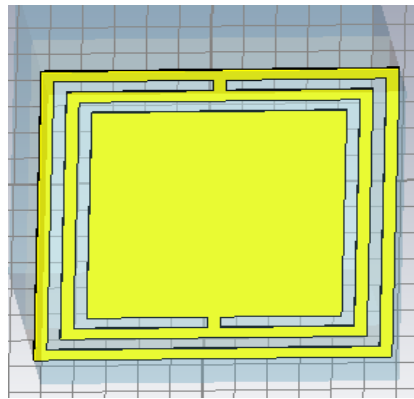


Figure III.11: Représentation d'un résonateur complémentaire en anneau fendu (CSRR) carré à 2 anneaux.

La figure III.12 représente le coefficient de réflexion (S_{11}) de transmission (S_{21}) de la cellule complémentaire CSRR.

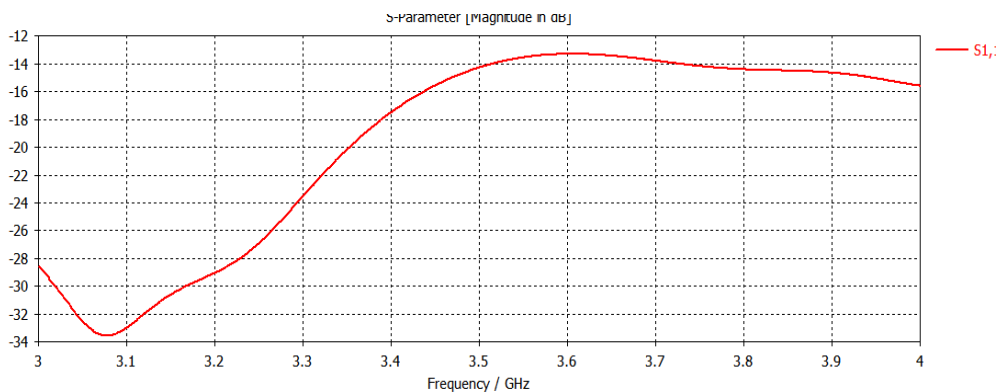


Figure III.12: coefficient de réflexion (S_{11}) pour la CSRR.

La figure III.13 représente le coefficient de transmission (S_{21}) de la cellule complémentaire CSRR.

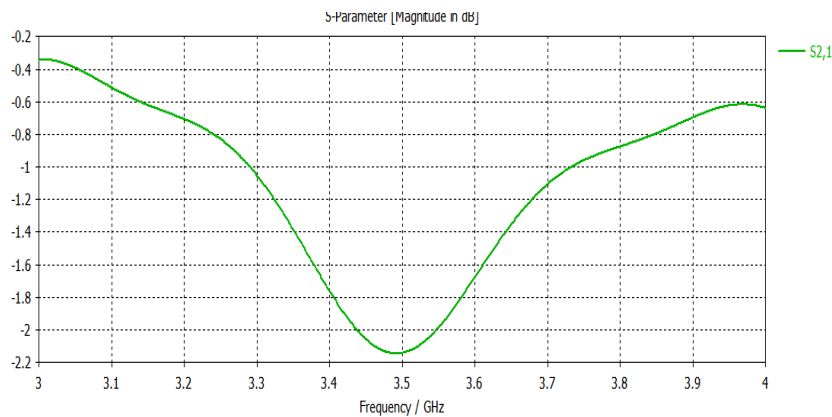


Figure III.13: coefficient de de transmission (S_{21}) pour la CSRR.

Nous remarquons que la CSRR présente un coefficient de réflexion S_{11} de -34 dB pour une fréquence de 3.09 GHz et une transmission S_{21} de -2.2 dB pour une fréquence de 3.5 GHz. Les deux SRR et CSRR présentent approximativement la même fréquence de résonance en raison de leurs dimensions partagées.

III.6 CONCEPTION ET SIMULATION DES ANTENNES ASSOCIEES AUX CELLULES CSRR

Dans cette partie, nous avons chargé l'antenne patch par la cellule CSRR. Cette partie consiste à déterminer la position optimale de la CSRR sur le patch, afin d'étudier l'impact de la variation de la cellule métamatériaux CSRR sur l'antenne, dont on fait varier leur nombre et leur position sur le patch et sur le plan de masse.

Pour illustrer les différentes étapes de notre étude, nous utilisons la cellule CSRR résonante à la fréquence 3.5 GHz et le patch adapté à la fréquence conçue 3.5 GHz dans les parties précédentes.

Les différentes configurations de l'antenne patch et CSRR sont simulées sous CST. Les résultats de simulation des paramètres S_{11} en fonction de nombre de cellules CSRR et sa position montrent que la fréquence de résonance et la bande passante varie en augmentant le nombre de

cellules CSRR utilisées.

III.6.1 Interprétation des résultats de simulation avant adaptation

Les paramètres des différentes configurations de l'antenne en fonction du nombre et de position de cellules CSRR utilisées sont présentés dans les tableaux ci-dessous. Le tableau III.2 présente la position des cellules CSRR sur le patch avec la fréquence de résonance et le coefficient de réflexion (S_{11}).

Position de la CSRR sur le patch	Fréquence (GHz)	S-Paramètre (dB)
1 CSRR sur patch	3.44	-15.183727
2 CSRR horizontales sur patch	3.435	-27.204165
2 CSRR verticales sur patch	3.223	-28.052414
3 CSRR sur patch	3.1997	-22.79569
4 CSRR sur patch	3.419	-26.415833
8 CSRR sur patch	3.813	-6.2091014
2 CSRR capacités horizontales	3.321	-27.820103
2 CSRR capacité horizontales séparées	3.268	-27.028834
6 CSRR sur patch	3.068	-11.60

Tableau III.2 : Résultats du coefficients S_{11} en fonction des fréquences pour différentes cellules CSRR gravées sur le patch.

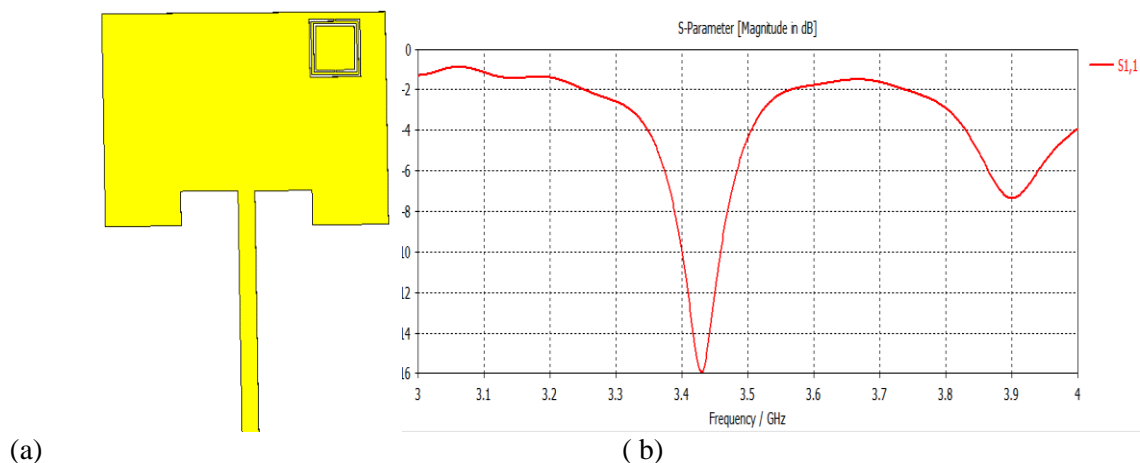


Figure III.14 : (a) 1CSRR sur le patch, (b) coefficient de réflexion (S_{11}).

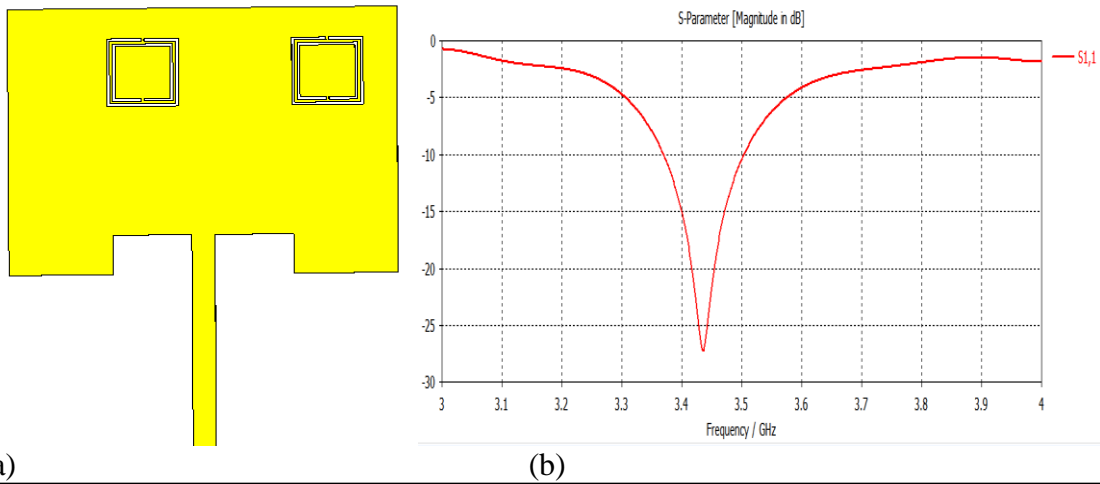


Figure III.15 : (a) 2 CSRR horizontales en haut sur le patch, (b) coefficient de réflexion (S_{11}).

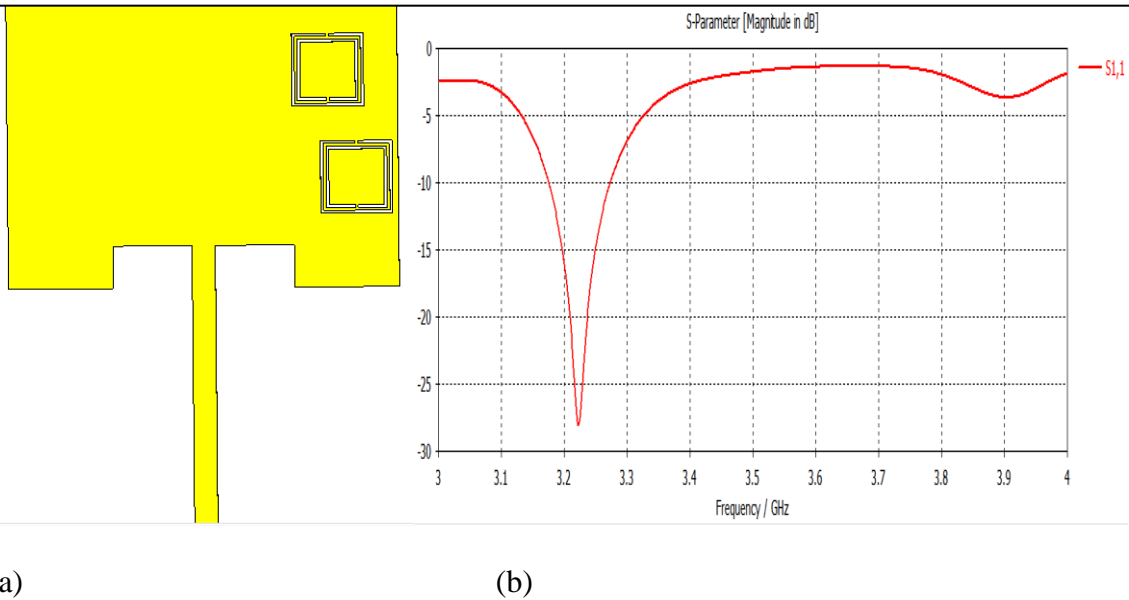


Figure III.16 : (a) 2 CSRR verticales sur le patch, (b) coefficient de réflexion (S_{11}).

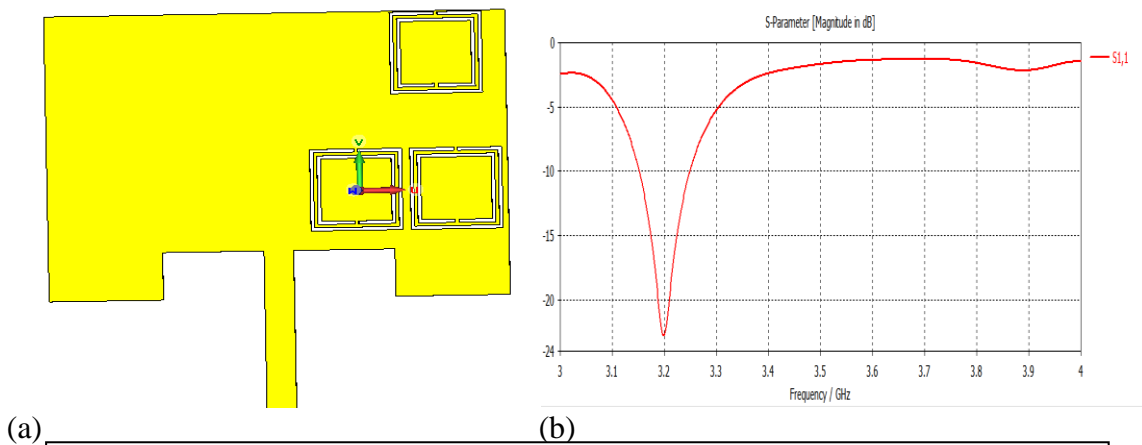


Figure III.17 : (a) 3 CSRR sur le patch, (b) coefficient de réflexion (S_{11}).

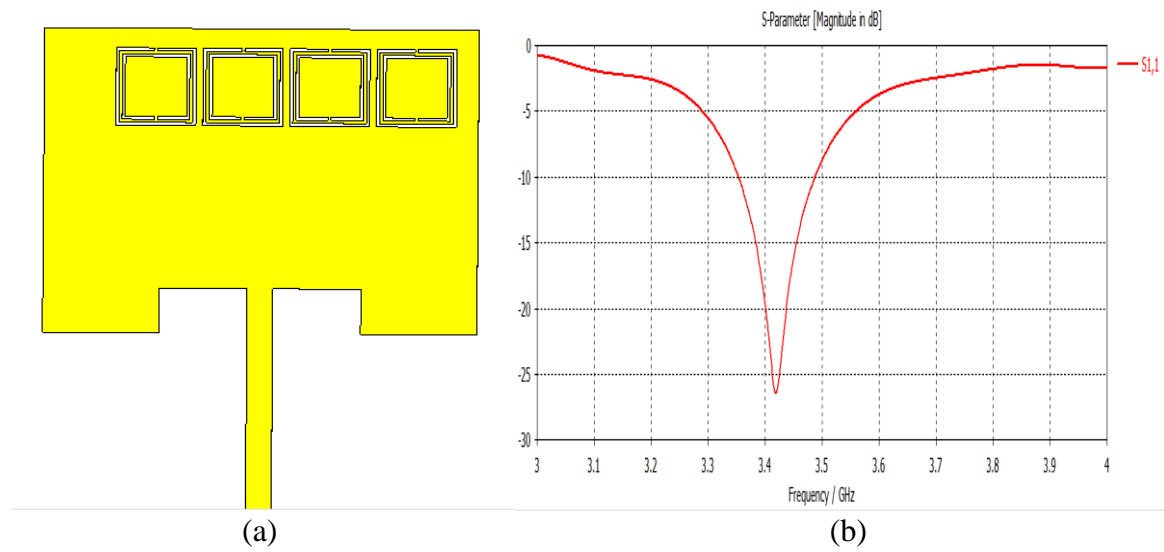


Figure III.18: (a) 4 CSRR verticales sur le patch, (b) coefficient de réflexion (S_{11}).

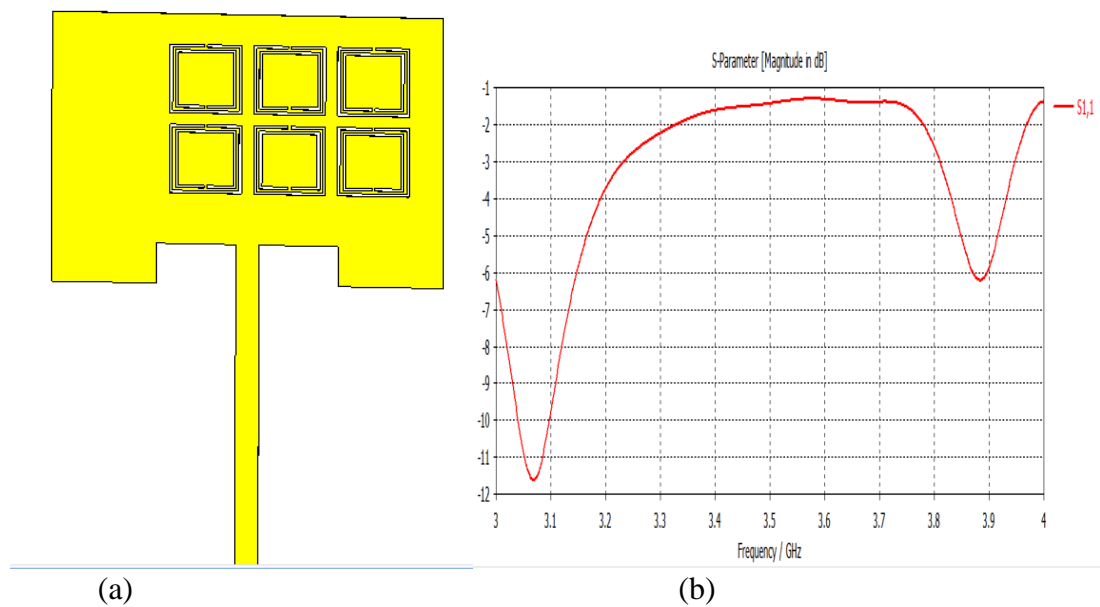


Figure III.19: (a) 6 CSRR sur le patch, (b) coefficient de réflexion (S_{11}).

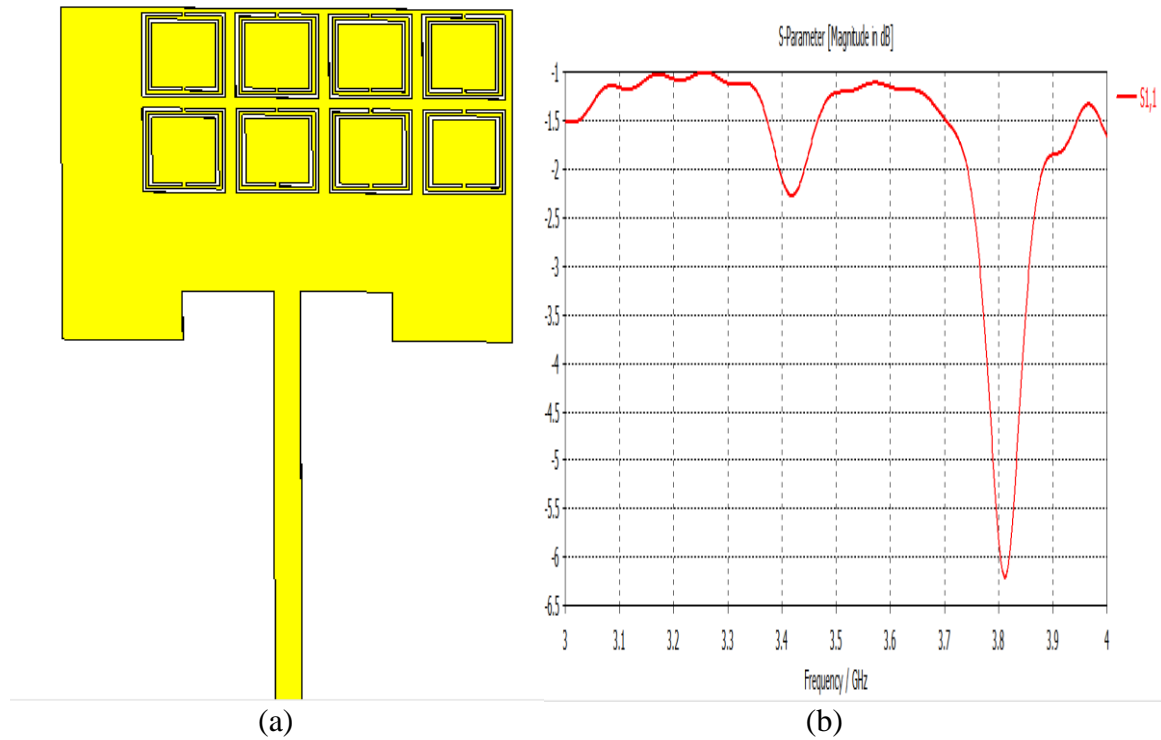


Figure III.20: (a) 8 CSRR sur le patch, (b) coefficient de réflexion (S_{11}).

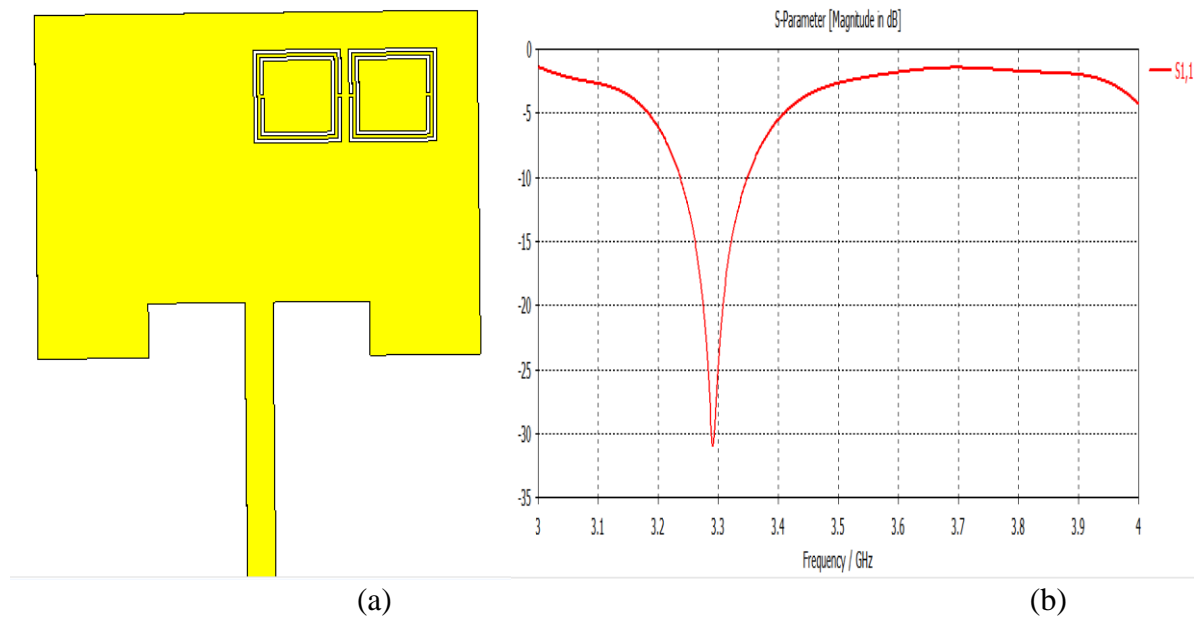


Figure III.21: (a) 2 CSR capacité horizontales sur patch, (b) coefficient de réflexion (S_{11}).

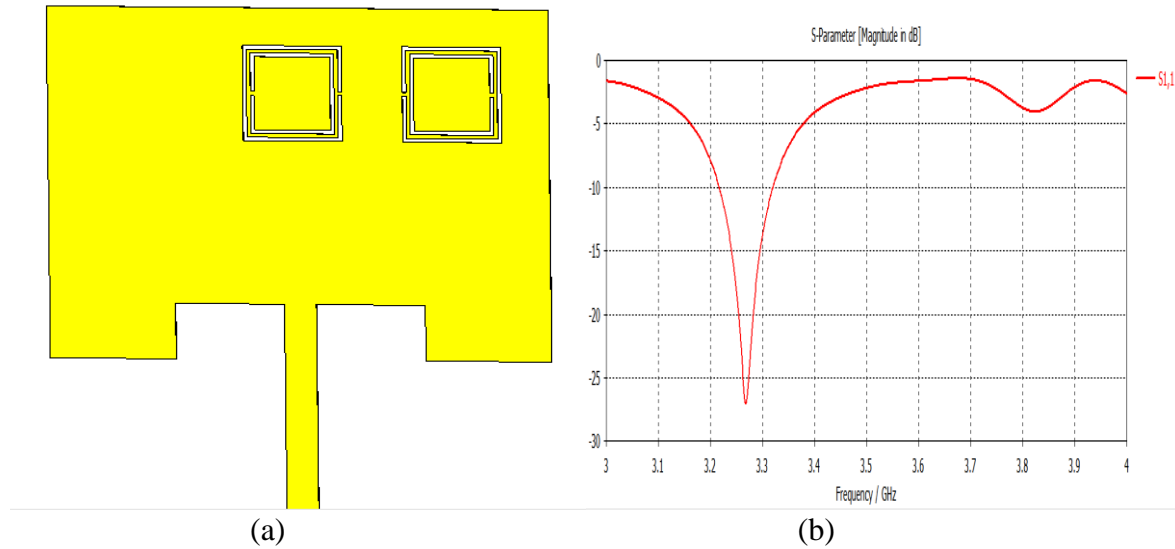


Figure III.22: (a) 2 CSRR capacité séparée sur patch, (b) coefficient de réflexion (S_{11}).

III.6.2 Interprétation des résultats de simulation après adaptation

Les paramètres des différentes configurations de l'antenne en fonction du nombre et de position de cellules CSRR après l'adaptations utilisées sont présentés dans les tableaux ci-dessous.

Le tableau III.3 présente la position des cellules CSRR sur le patch avec la fréquence de résonance et le coefficient de réflexion (S_{11}).

Position de la CSRR sur le patch	Fréquence (GHz)	S-Paramètre (dB)
1 CSRR sur patch	3.5	-16.41
2 CSRR horizontales sur patch	3.505	-27.906
2 CSRR verticales sur patch	3.501	-29.401
3 CSRR sur patch	3.22	-9.6
4 CSRR sur patch	3.503	-30.1460
8 CSRR sur patch	3.81	-6.20
2 CSRR capacité horizontales sur patch	3.504	-28.43
2 CSRR capacité horizontales séparées sur patch	3.415	-38.64

6 CSRR sur patch	3.068	-11.60
------------------	-------	--------

Tableau III.3 : Résultats du coefficients S_{11} en fonction des fréquences pour différentes cellules CSRR gravées sur le patch.

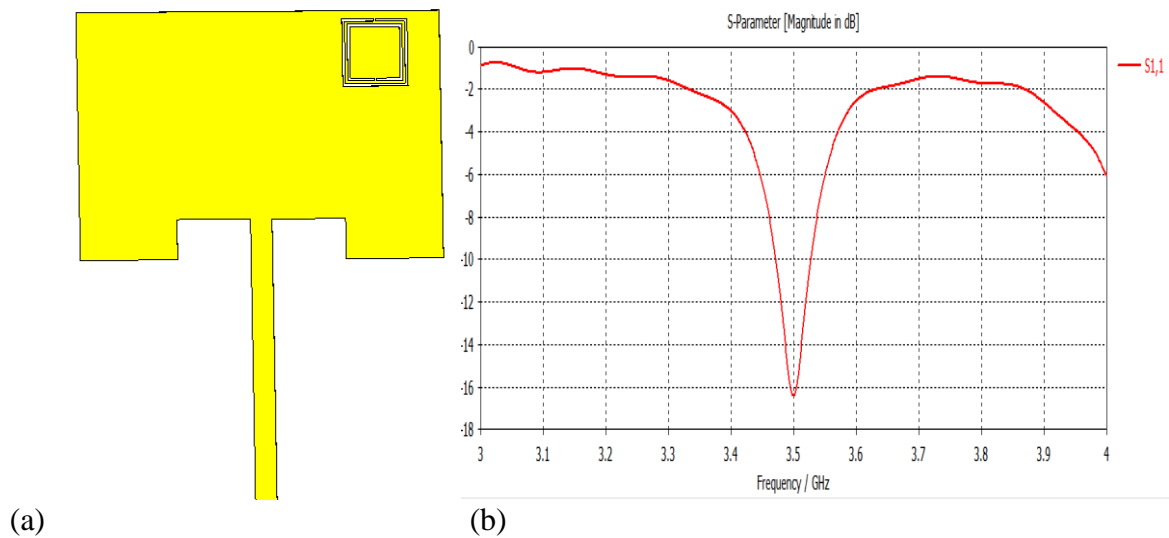


Figure III.23 : (a) 1 CSRR sur le patch, (b) coefficient (S_{11}) .

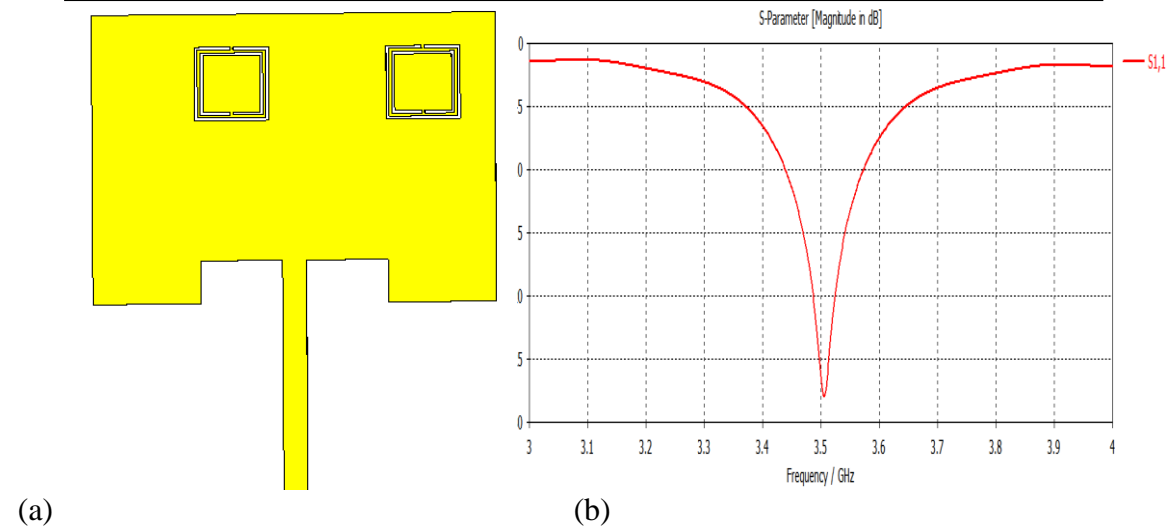


Figure III.24: (a) 2 CSRR horizontales en haut sur patch, (b) coefficient (S_{11})

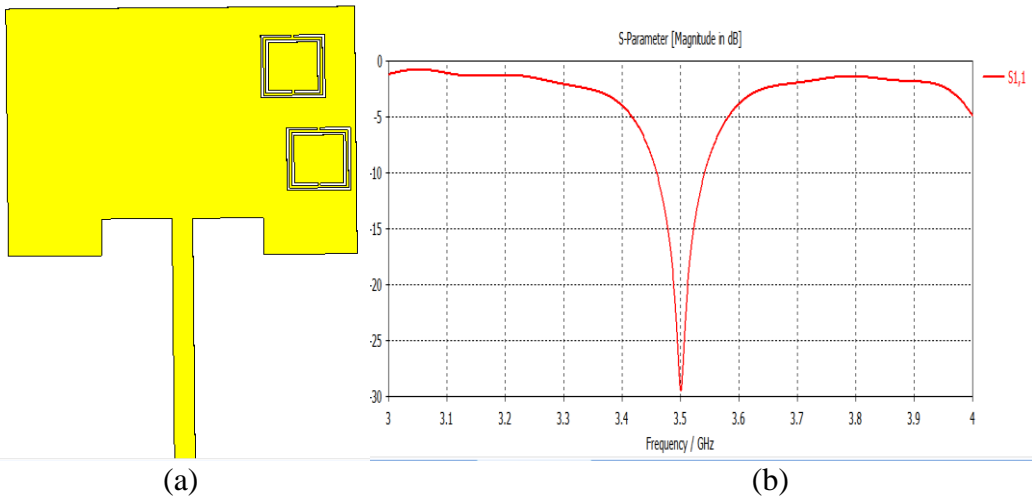


Figure III.25: (a) 2 CSRR vertical on patch, (b) coefficient (S_{11}).

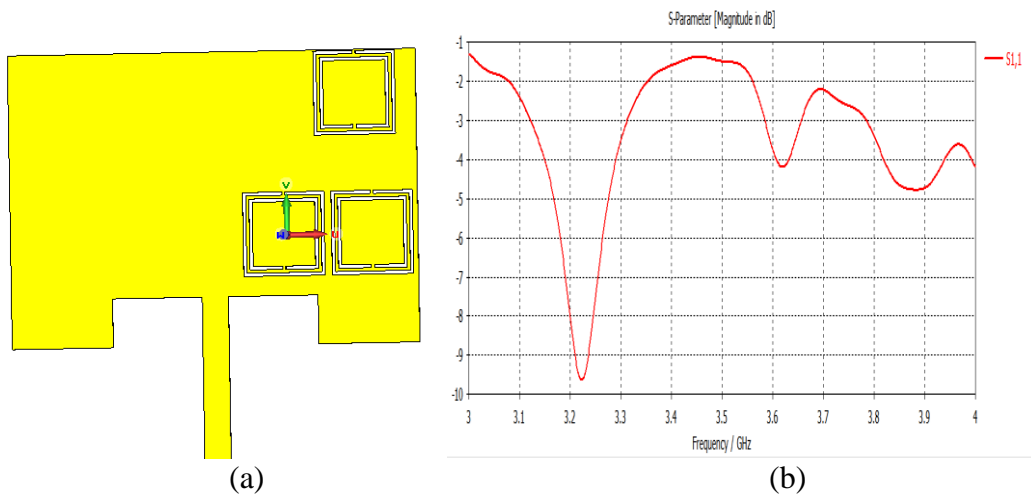


Figure III.26: (a) 3 CSRR on patch, (b) coefficient (S_{11}).

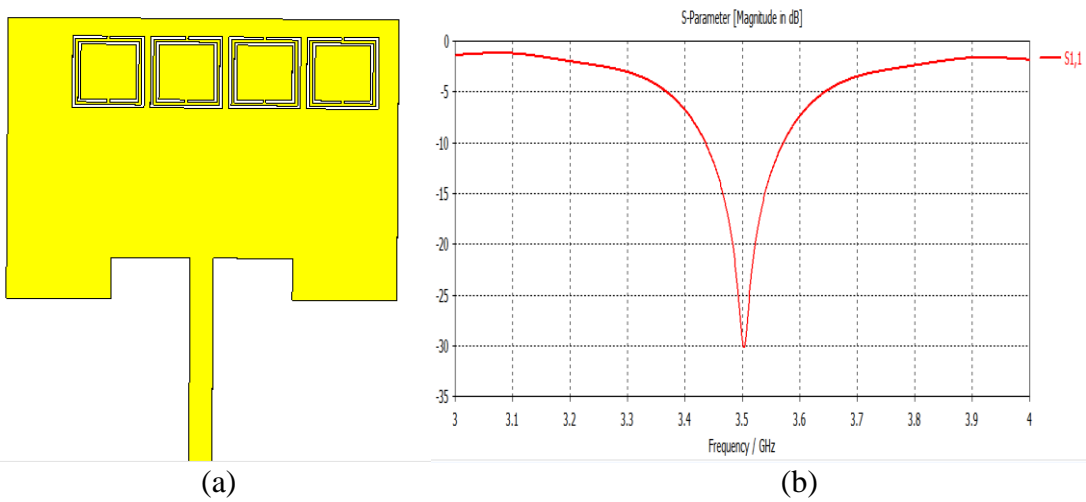


Figure III.27: (a) 4 CSRR horizontal on patch, (b) coefficient (S_{11}).

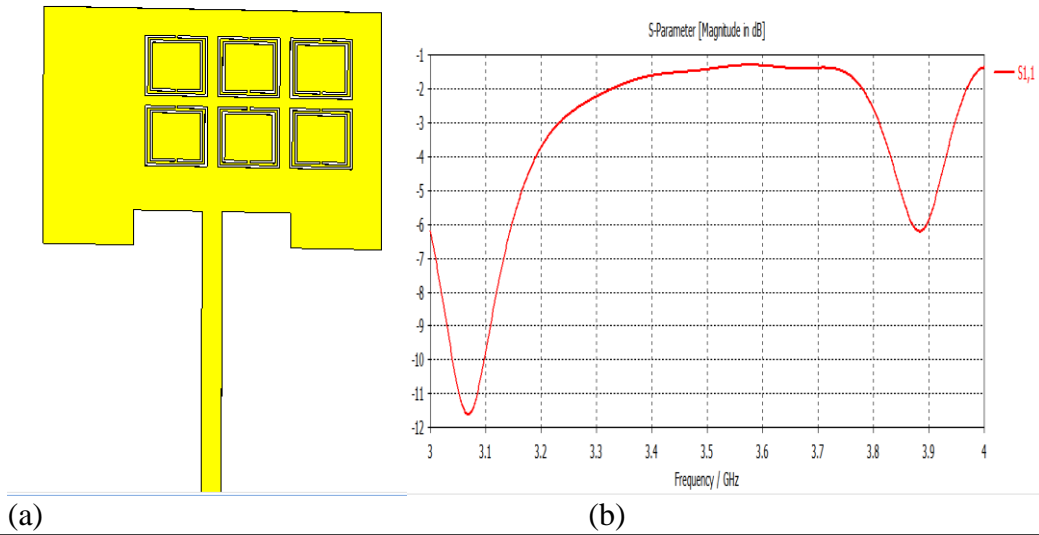


Figure III.28: (a) 6 CSRR sur le patch, (b) coefficient de réflexion (S_{11}) .

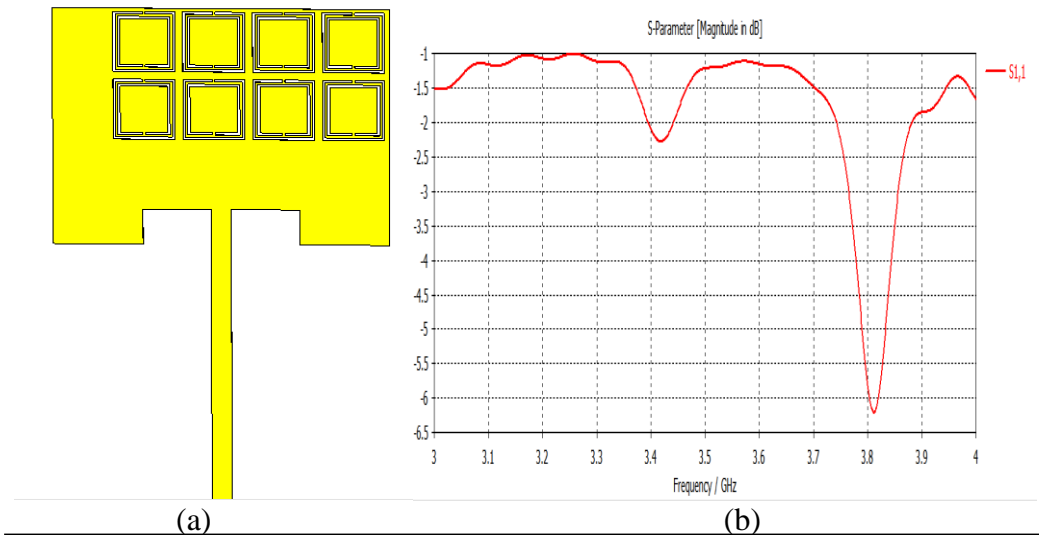


Figure III.29: (a) 8 CSRR sur le patch, (b) coefficient de réflexion (S_{11}) .

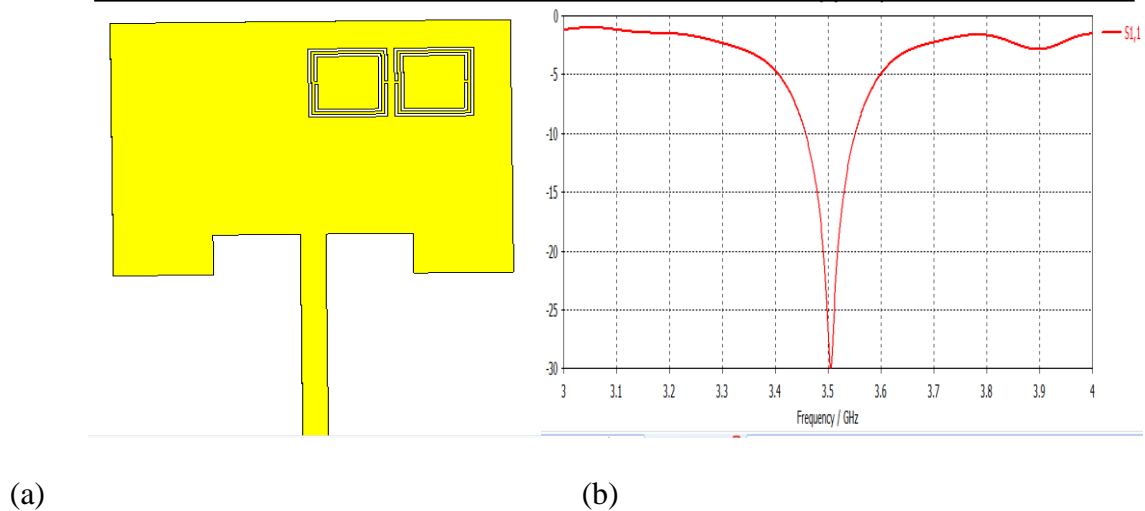


Figure III.30: (a) 2 CSRR capacité horizontales sur patch, (b) réflexion (S_{11}) .

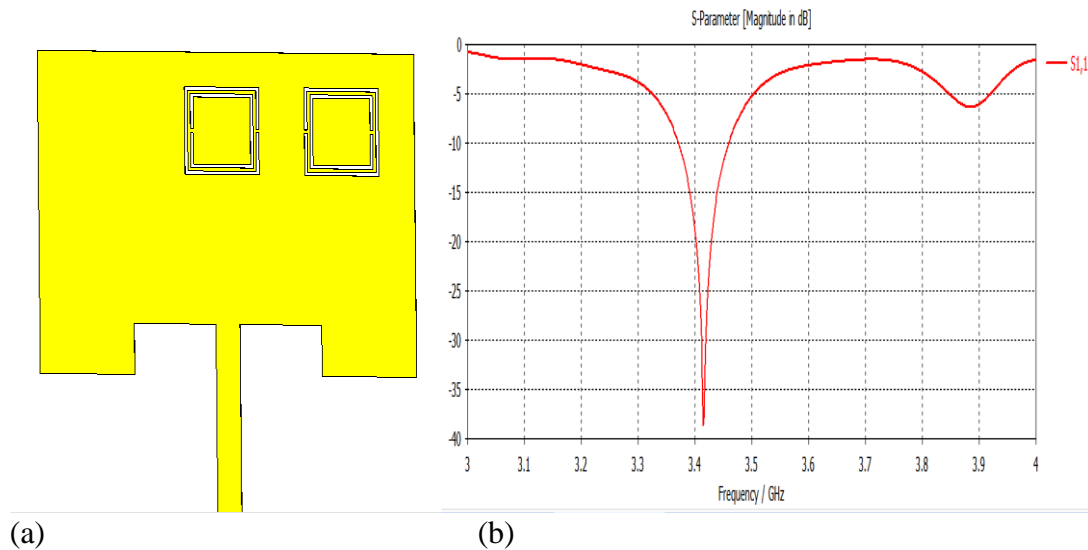


Figure III.31: (a) 2 CSRR capacité horizontales séparées sur patch, (b) coefficient (S_{11}).

III.6.3 Paramètres de l'antenne patch après l'adaptation

Pour avoir une fréquence inférieure à 3.5GHz de, la largeur de ligne nécessaire pour la ligne d'alimentation est $W_0 = 1.66mm$. Le tableau (III.4) représente les paramètres de l'antenne patch après adaptation.

Position de la CSRR sur le patch	$W_p(mm)$	$L_p(mm)$	$W_g(mm)$	$L_g(mm)$
1 CSRR sur patch	326.3	18.08	35.62	26.3
2 CSRR horizontales sur patch	25.8	20.07	35.65	76
2 CSRR verticales sur patch	26.5	18.01	35.68	76
3 CSRR sur patch	34	19	35.65	76
4 CSRR sur patch	27	19.9	35.68	27
8 CSRR sur patch	28	20.26	35.65	72.74
2 CSRR capacité horizontales sur patch	25.888	18.888	35.68	76
2 CSRR capacité horizontales séparées sur patch	26.1	19	35.65	78
6 CSRR sur patch	28	20.26	35.65	72.74

Tableau III.4 : Paramètres de l'antenne patch après adaptation.

III.6.4 Résultats du gain avant et après adaptation

Les résultats du gain avant et après adaptation pour les antennes patch avec différentes positions et nombres des cellules CSRR sont représentés sur le tableau III.5.

Position de la CSRR sur le patch	Gain avant adaptation	Gain après adaptation
1 CSRR sur patch	6.02	5.81
2 CSRR horizontales sur patch	6.22	5.97
2 CSRR verticales sur patch	6.15	5.98
3 CSRR sur patch	5.95	4.57
4 CSRR sur patch	6.19	6.19
8 CSRR sur patch	4.89	4.98
2 CSRR capacité horizontales sur patch	6.12	6.12
2 CSRR capacité horizontales séparées sur patch	6.09	5.7
6 CSRR sur patch	5.88	5.88

Tableau III.5 : Valeurs du gain de l'antenne patch avant et après adaptation.

Les résultats des paramètres S des figures précédentes, montrent un comportement coupe bande autour de la fréquence 3.5GHz, correspondant à la fréquence de résonance de la cellule CSRR après optimisation et modification des paramètres de l'antenne.

En fait, les différents cas étudiés de l'antenne résonnent pour la majorité des cas à environ 3.5GHz. Les meilleures optimisations pour les différentes positions sont obtenues pour les positions suivantes :

Position de la CSRR sur le patch	Fréquence (GHz)	Taux de miniaturisation (%)	Rendement (%)	Bande passante (dB)
2 CSRR horizontales sur patch	3.0505	8.72	3.82	0.09
2 CSRR verticales sur patch	3.501	15.86	2.57	0.14
2 CSRR capacité horizontales sur patch	3.504	13.86	2.3	0.08
2 CSRR capacité horizontales séparées sur patch	3.415	12.5	2.85	0.1

Tableau III.6 : Valeurs du taux de miniaturisation, rendement et bande passante des différentes antennes patch avec CSRR.

III.6.5 Commentaires des figures avant et après adaptation

Le tableaux III.7 donne les commentaires des différentes antennes patch.

Position de la CSRR sur patch	Commentaires Avant adaptation	Commentaires Après adaptation
1 CSRR sur patch	Diminution de la fréquence à 3.44GHz avec un coefficient de réflexion très bas -17.41dB.	Très bonne fréquence d'adaptation à 3.5GHz mais un coefficient de réflexion très bas -15.18dB.
2 CSRR horizontales sur patch	Fréquence diminuée à 3.43 avec un coefficient de réflexion de -27.204	Fréquence de résonance à 3.5GHz et coefficient de réflexion souhaitée.
2 CSRR verticales sur patch	Très bonne diminution de fréquence à 3.223GHz avec un coefficient de -28.052dB	Meilleures optimisations.
2 CSRR capacité sur patch	Malgré la diminution de fréquence à 3.32 GHz mais le coefficient est très loin.	Fréquence et coefficient de réflexion souhaité.

2 CSRR capacité séparées sur patch	Fréquence diminuée à 3.268 avec un bon coefficient de -27.02dB.	Proche de la fréquence de résonance souhaitée avec un coefficient de réflexion très haut.
---	---	---

Tableau III.7 : Commentaires des figures.

III.7 CONCEPTION ET SIMULATION DE LA CELLULE SRR ET CSRR A 3 ANNEAUX A DEUX OUVERTURES DANS LE MEME SENS

On début on prend un box dont la largeur est égale la longueur est égale $L_s = 5.55\text{mm}$ avec le matériel vacuum avec un substrat dont la hauteur est 1.56 mm et puis on réalise les deux anneaux de dimensions L_1 extérieur et L_2 intérieur puis on prend un deuxième carré intérieur de dimensions L_1 extérieur et L_2 intérieur de largeur respectivement $S = 0.15\text{ mm}$ et de largeur de $W = 0.2\text{mm}$. La figure III.32 représente la cellule SRR à 3 anneaux.

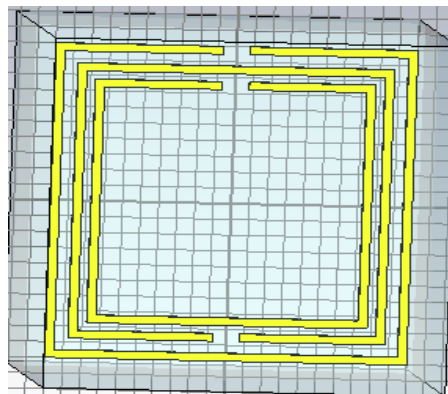


Figure III.32: Représentation et dimensions d'une unité SRR à 3 anneaux.

Les résultats de simulation de SRR à 3 anneaux est présenté sur la figure 3.33 pour les coefficients S_{11} et S_{21} .

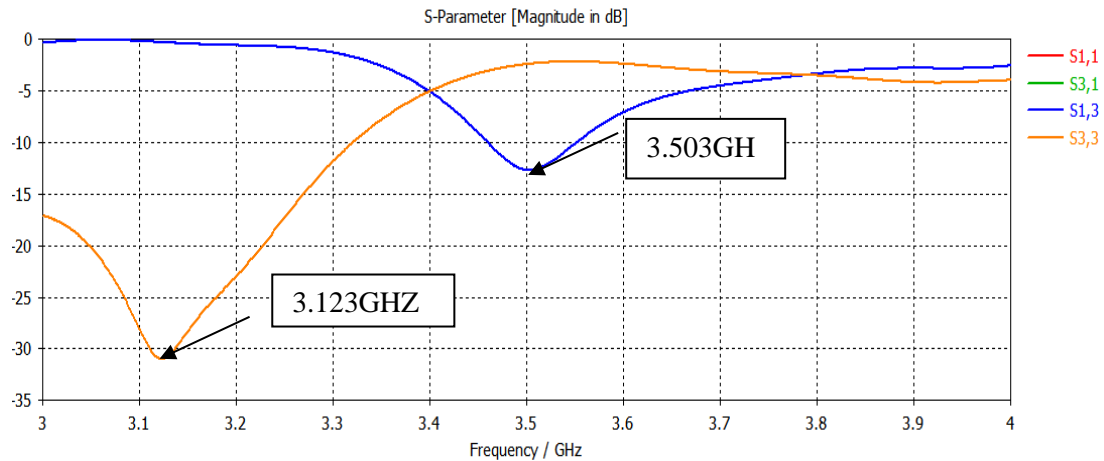


Figure III.33 : Représentation des paramètres (S) de la SRR carrée à 3 anneaux.

La figure (3.33) représente l'évolution des coefficients de réflexion S_{11} et de transmission S_{21} en fonction de la fréquence correspondante à la fréquence de résonance de la RAF. Dans ce cas, nous remarquons que le RAF que nous avons conçu présente une transmission inférieure à -14dB, pour une fréquence de 3.5GHz et un coefficient de réflexion de -30.96dB pour une fréquence de 3.123GHz.

III.7.1 Conception et simulation de la cellule CSRR ou RAFC à 3 anneaux

Au lieu d'avoir deux anneaux interrompus concentrique en métal gravés Sur un support diélectrique dans ce cas, nous avons ici 3 anneaux interrompus concentrique faites dans le plan conducteur d'un substrat. La figure III.34 montre la RAFC (CSRR) 3 anneaux.

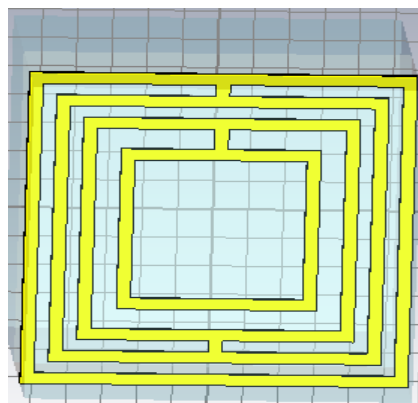


Figure III.34 : Représentation et dimensions d'une unité CSRR à 3 anneaux.

Le résultat de simulation de SRR est présenté sur les figures suivantes :

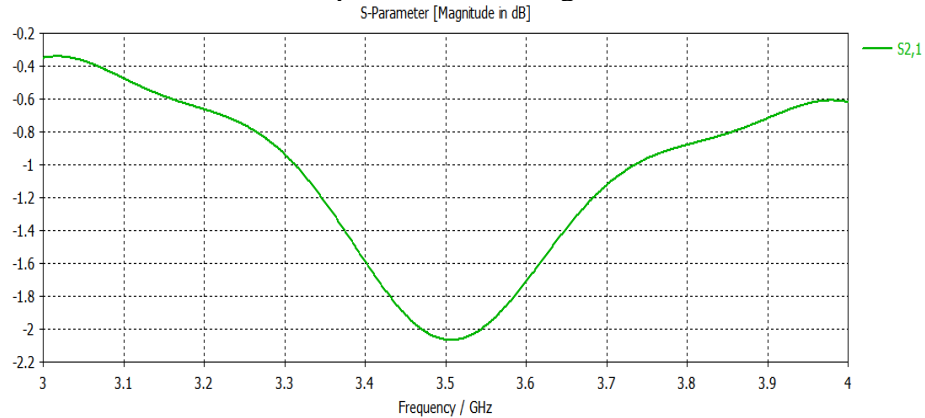


Figure III.35 : Coefficient de de transmission (S_{21}) de la CSRR à 3 anneaux.

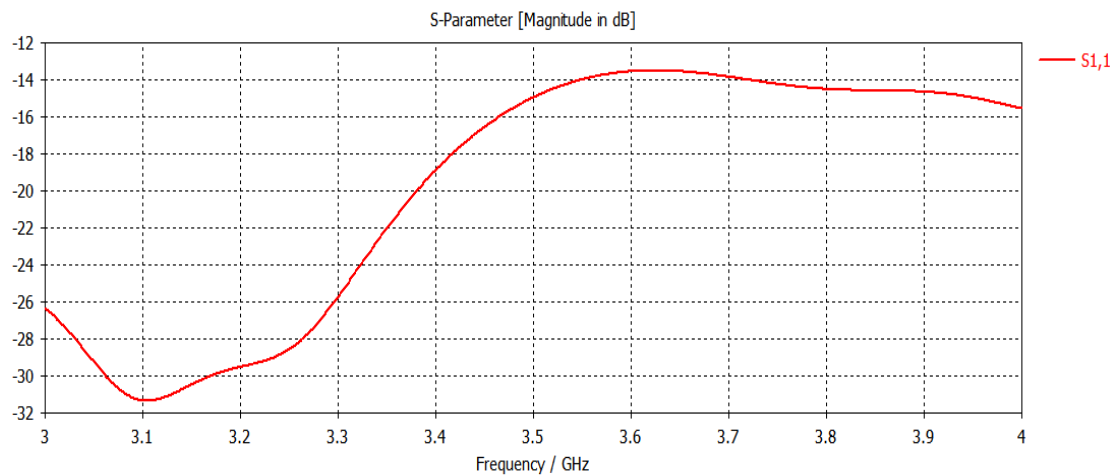


Figure III. 36 : Coefficient de réflexion (S_{11}) de la CSRR à 3 anneaux.

Nous remarquons que la CSRR présente un coefficient de réflexion S_{11} de -31dB pour une fréquence de 3.104 GHz et une transmission S_{21} de -2.06 dB pour une fréquence de 3.5GHz, suivant la figure 3.34.

III.7.2 Interprétation des résultats de simulation avant adaptation

Les paramètres des différentes configurations de l'antenne en fonction du nombre et de position de cellules CSRR utilisées sont présentés dans les tableaux ci-dessous. Le tableau III. 8 présente la position des cellules CSRR sur le patch avec la fréquence de résonance et le coefficient de réflexion (S_{11}).

Position de la CSRR sur patch et PDM	Fréquence (GHz)	S-Paramètre (dB)
2 CSRR vertical	3.269	-28.467
2 CSRR horizontales	3.417	-27.23
6 CSRR sur patch et PDM	3.85	-13.43
2 CSRR verticales sur PDM	3.212	-37.13
1 CSRR capacité sur patch	3.288	-29.66
1CSRR sur PDM	3.45	-25.69
2CSRR sur PDM et patch	3.47	-17

Tableau III.8 : Valeurs des coefficients de réflexion pour différentes antennes patch avec différentes positions des cellules CSRR sur patch et plan de masse.

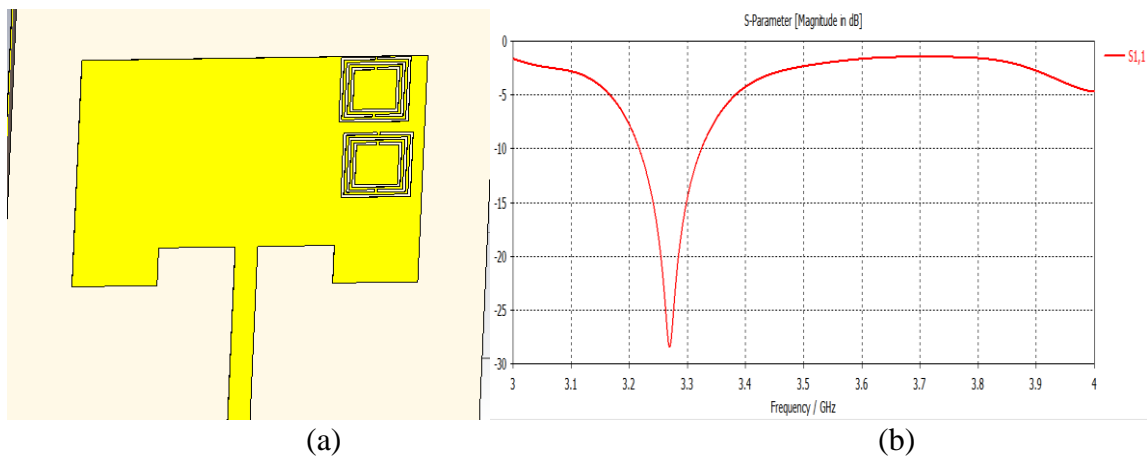


Figure III.37: (a) 2CSRR verticalessur patch, (b) coefficient S₁₁.

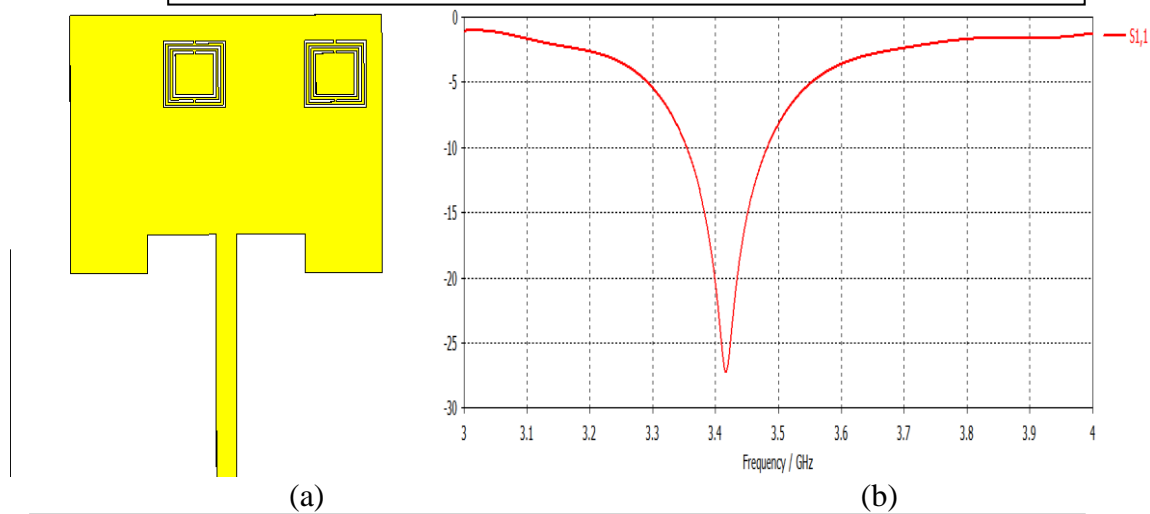


Figure III.38 (a) 2 CSRR horizontalessur patch, (b) coefficient S₁₁.

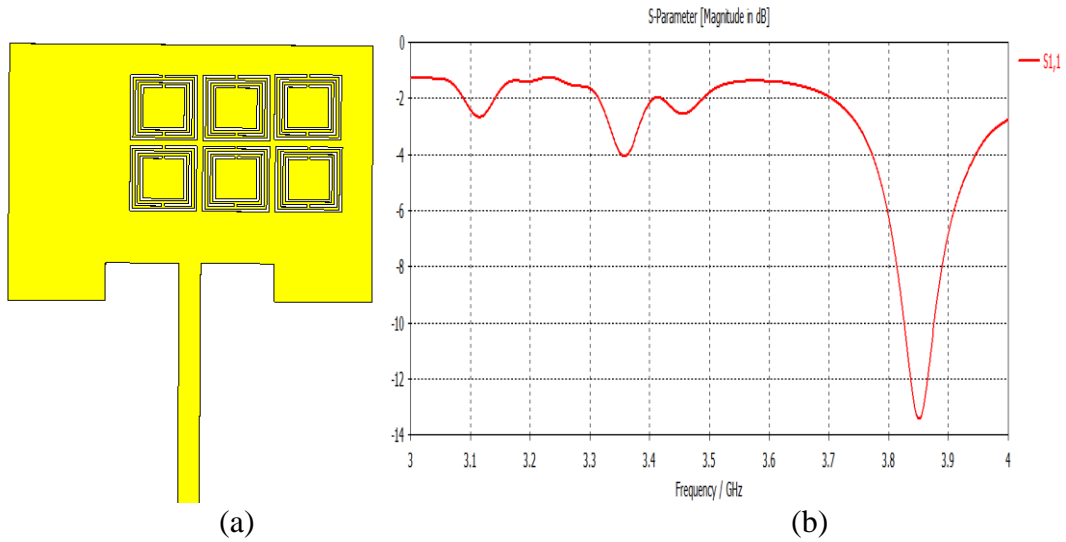


Figure III.39 : (a) 6 CSRR sur patch et plane de masse, (b) coefficient

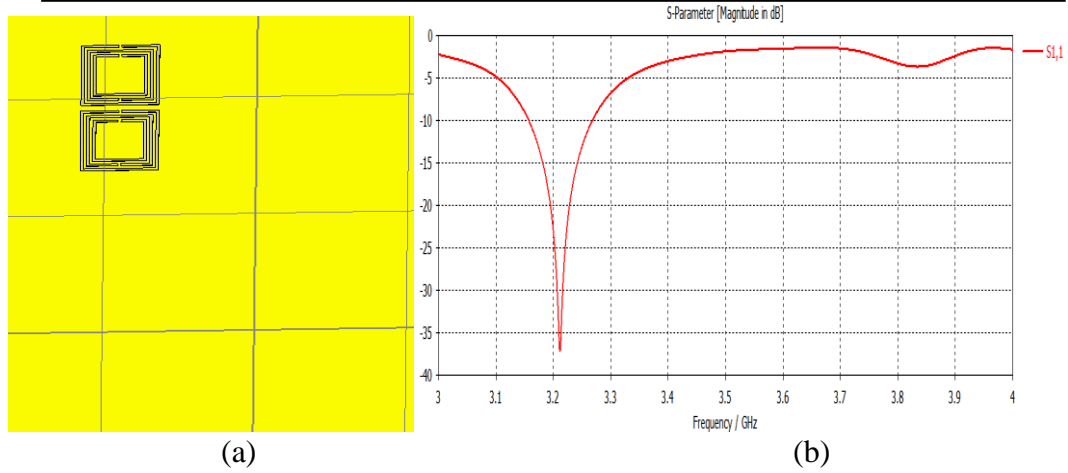


Figure III.40 : (a) 2 CSRR verticales sur plane de masse, (b) coefficient S_{11} .

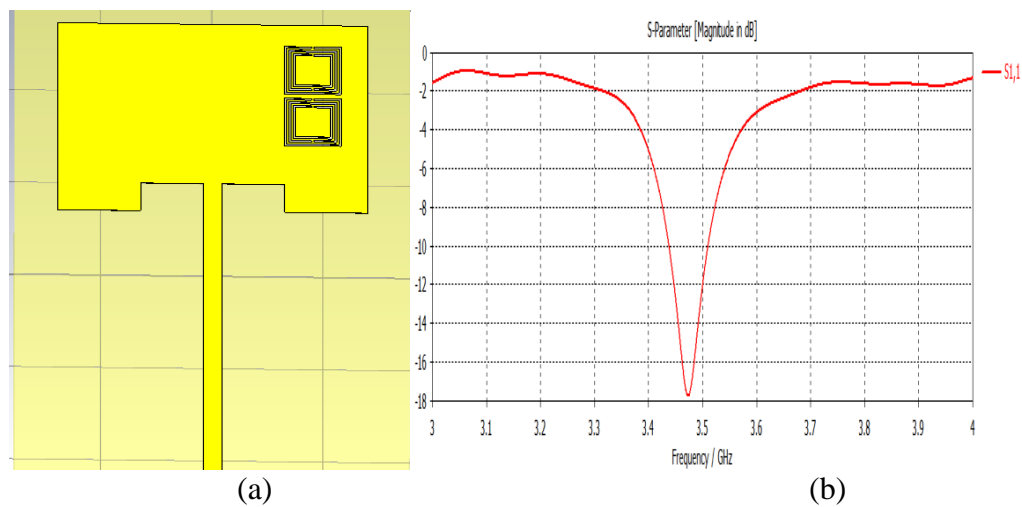


Figure III.41 : (a) 2 CSRR verticales sur patch et plane de masse, (b) coefficient S_{11} .

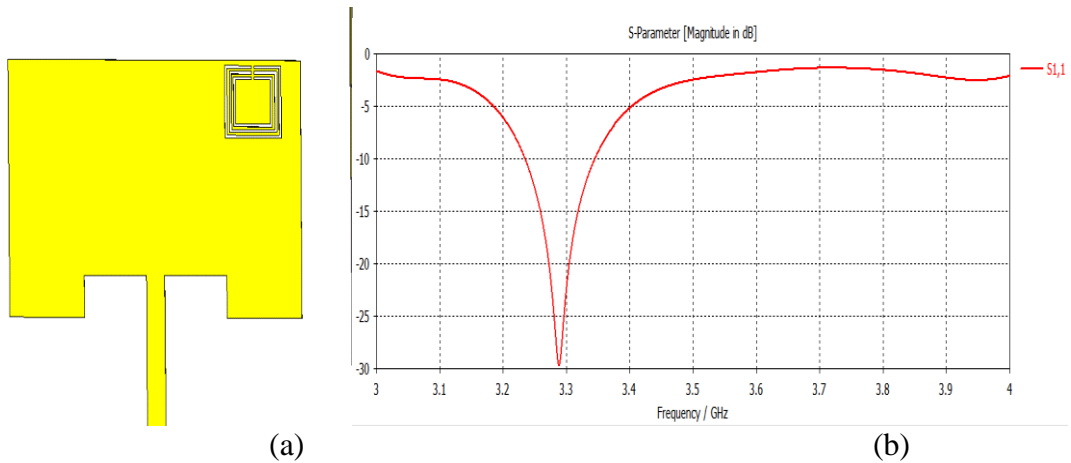


Figure III.42 : (a) 1 CSRR sur Patch, (b) coefficient S_{11} .

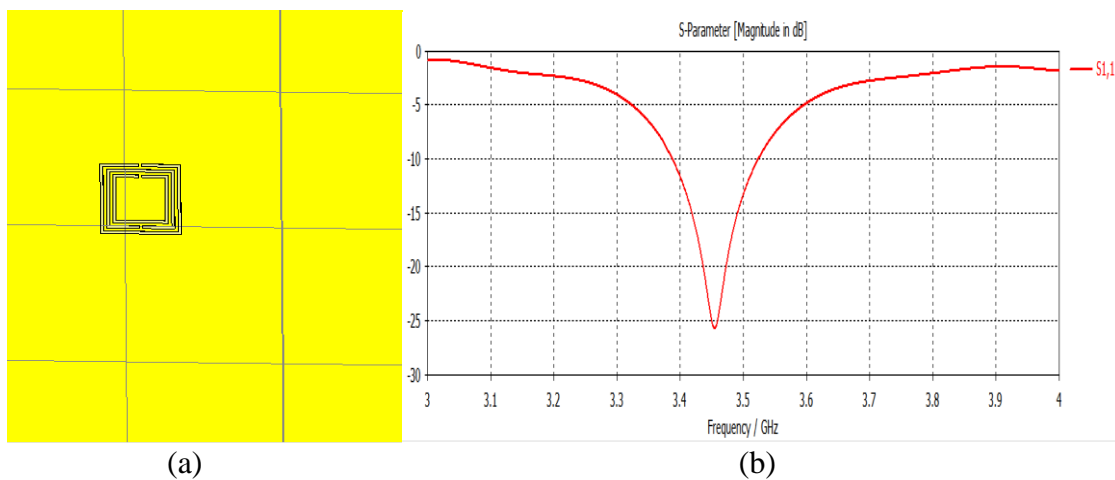


Figure III.43: (a) 1 CSRR sur PDM, (b) coefficient S_{11} .

III.7.3 Interprétation des résultats de simulation des antennes après adaptation

Les paramètres des différentes configurations de l'antenne en fonction du nombre et de position de cellules CSRR utilisées sont présentés dans les tableaux ci-dessous. Le tableau III. 9 présente la position des cellules CSRR sur le patch avec la fréquence de résonance et le coefficient de réflexion (S_{11}).

Position de la CSRR sur patch et PDM	Fréquence (GHz)	S-Paramètre (dB)
2 CSRR verticales sur patch	3.509	-28.20
2 CSRR horizontales sur patch	3.506	-29.79
1 CSRR sur PDM	3.45	-25.69
1 CSRR capacité sur patch	3.501	-30.088
2 CSRR sur PDM et patch	3.47	-17.73

Tableau III.9 : Valeurs des coefficients de réflexion pour différentes antennes patch avec différentes positions des cellules CSRR sur patch et plan de masse.

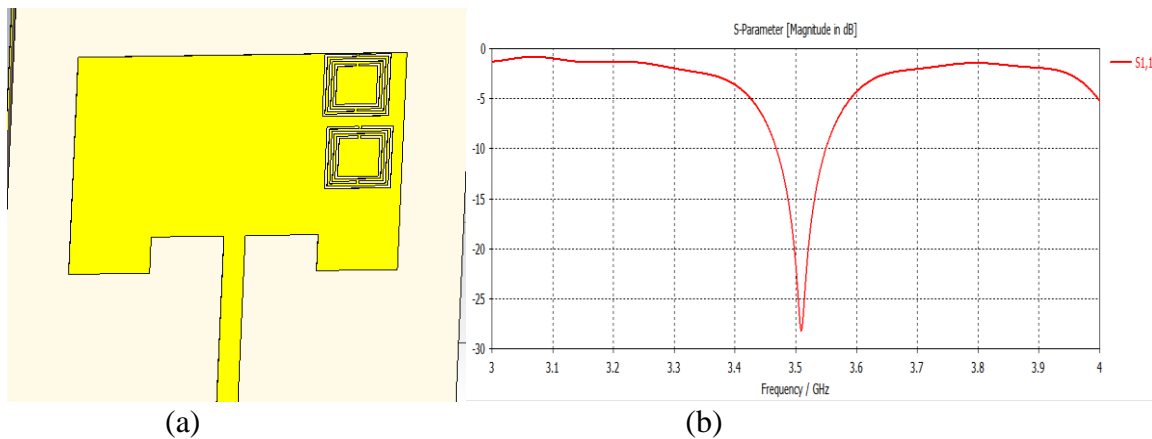


Figure III.44: (a) 2 CSRR verticales sur patch, (b) coefficient S₁₁.

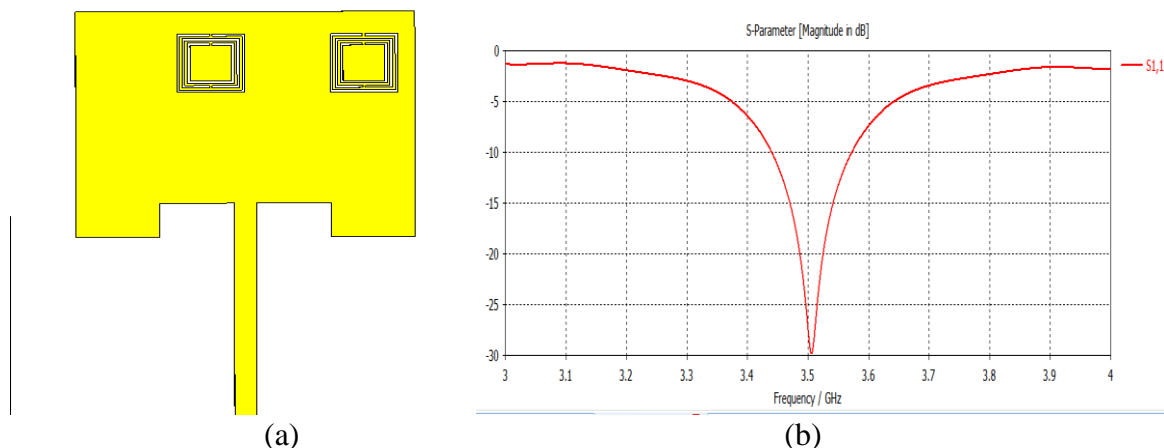


Figure III.45: (a) 2 CSRR horizontales sur patch, (b) coefficient S₁₁.

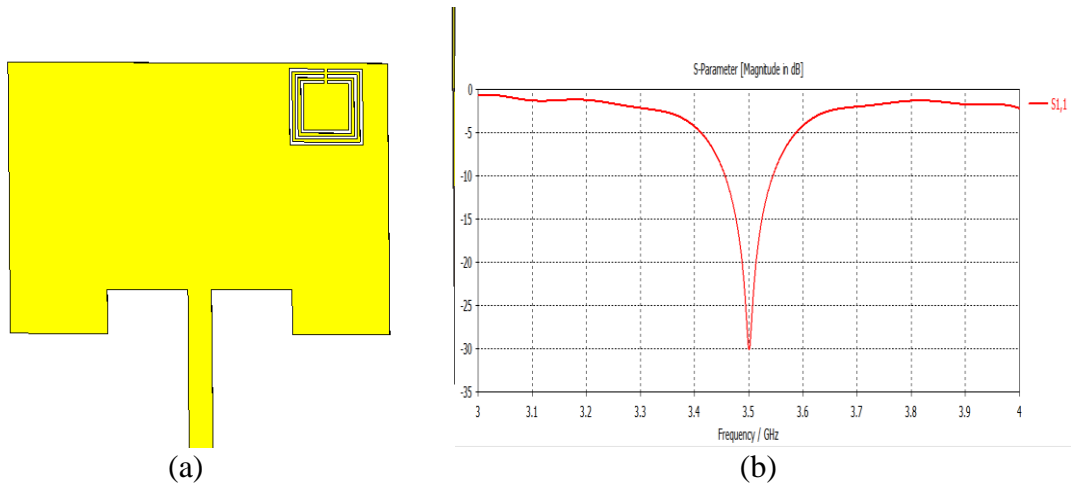


Figure III.46: (a) 1 CSRR capacité sur plane de masse, (b) coefficient S_{11} .

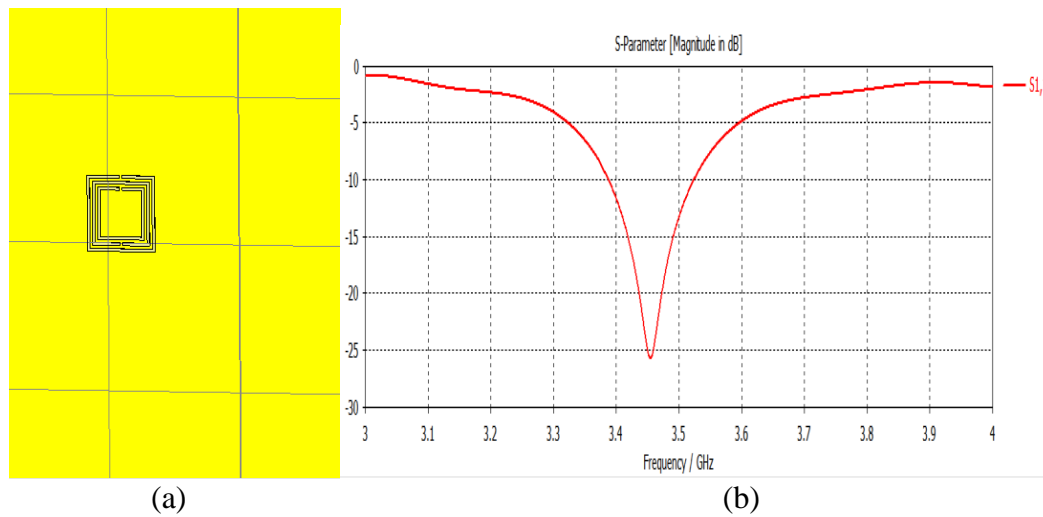


Figure III.47: (a) 1 CSRR sur PDM, (b) coefficient S_{11} .

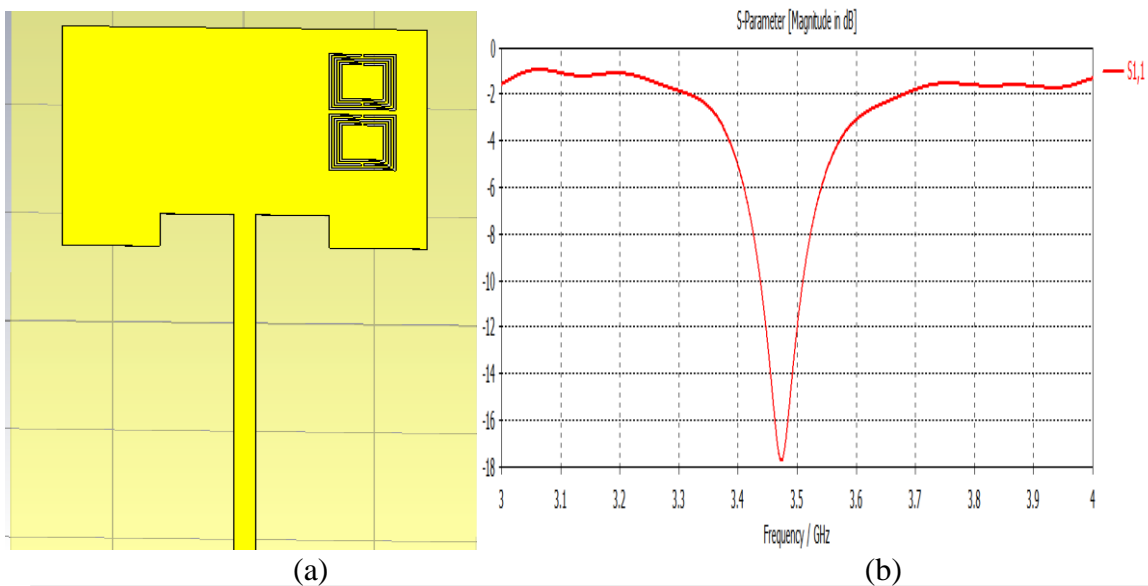


Figure III.48: (a) 2 CSRR verticales sur patch et plane de masse, (b) coefficient S_{11} .

Les résultats des paramètres S des figures précédentes, montrent un comportement coupe bande autour de la fréquence 3.5GHz, correspondant à la fréquence de résonance de la cellule CSRR après optimisation et modification des paramètres de l'antenne.

Différents cas étudiés de l'antenne résonnante pour la majorité des cas à environ 3.5GHz, les meilleures optimisations pour les différentes positions des cellules CSRR avec les taux de miniaturisation, le rendement et la largeur de la bande passante données sur le tableau 10 :

Position de la CSRR sur patch et PDM	Taux de Miniaturisation (%)	Rendement (%)	Largeur de bande (%)
2 CSRR verticales sur patch	18.5	2.28	8
2 CSRR horizontales sur patch	18.58	3.7	13
1 CSRR sur PDM	Pas d'adaptation	1.99	7.2
1 CSRR capacité sur patch	13.79	2.57	9
2 CSRR verticales sur PDM et patch	Pas d'adaptation	2.3	7.15

Tableau III .10 : Valeurs de taux de miniaturisation et rendement et bande passante pour les différentes antennes avec CSRR gravées sur patch et PDM.

Le tableau III. 11 représente les paramètres de l'antenne patch après l'adaptation.

Position de la CSRR sur le patch	Wp(mm)	Lp(mm)	Wg(mm)	Lg (mm)
2 CSRR verticales sur patch	25.6	18.04	35.65	76
2 CSRR horizontales sur patch	25.7	19.945	35.65	76
1 CSRR sur PDM	28	20.26	35.65	72.74
1 CSRR capacité sur patch	26.68	18.333	35.8	79.88
2 CSRR vertical sur PDM et patch	28	20.26	35.65	72.74

Tableau III .11 : Paramètres de l'antenne patch après adaptation.

III.7.4 Interprétation des résultats de gain avant et après adaptation

Les valeurs du gain pour les différentes configurations de l'antenne en fonction du nombre et

de position de cellules CSRR utilisées sont présentés dans les tableaux ci-dessous. Le tableau III.12 présente la position des cellules CSRR sur le patch et le plan de masse avec les valeurs du gain avant et après adaptation.

Position de la CSRR sur patch et PDM	Gain avant adaptation	Gain après adaptation
2 CSRR verticales sur patch	6.1	5.9
2 CSRR horizontales sur patch	6.21	5.97
6 CSRR sur patch et PDM	6.09	5.7
2 CSRR verticales sur PDM	5.61	5.61
1 CSRR capacité sur patch	5.33	5.33
2 CSRR vertical sur PDM et patch	6.21	6.21
1 CSRR sur PDM	6.14	6.14

Tableau III.12 : Valeurs du gain de l'antenne patch avant et après adaptation.

Après simulation des différentes antennes patch avec différentes positions des cellules CSRR sur patch ou plan de masse ou bien sur les deux surfaces de l'antennes en même temps, nous remarquons que les valeurs du gain obtenues avant adaptation sont plus élevées que celles obtenues après adaptation des différentes antennes.

III.7.5 Commentaires avant et après adaptation de l'antenne patch

Position de la CSRR sur patch et PDM	Avant adaptation	Après adaptation
2 CSRR verticales sur patch	Très bonne diminution de la fréquence à 3.269GHZ avec un coefficient de réflexion de -28.46dB	Fréquence de résonance et coefficient de réflexion souhaité meilleurs optimisation.
2 CSRR horizontales sur patch	Diminution de fréquence à 3.41GHZ et de coefficient de -27.23dB	Bonne optimisation de la fréquence de résonance et coefficient de réflexion souhaité

2CSRR sur patch et PDM	Malgré la diminution de fréquence à 3.47 le coefficient de réflexion est très loin.	Fréquence souhaitée de 3.5GHZ avec un bon coefficient de réflexion de -30dB.
1CSRR sur PDM	Une fréquence de résonance diminuée à 3.45Ghz avec un coefficient de réflexion bas à -25.69dB	Proche de la fréquence de résonance mais le coefficient de réflexion très bas.

Tableau III.13 : Commentaires des figures.

III.8 CONCEPTION ET SIMULATION DE LA CELLULE SRR ET CSRR A 3 ANNEAUX AVEC OUVERTURES DANS LE MEME SENS

Les dimensions de la cellule SRR sont comme suite : la longueur du box $L_s = 5.55\text{mm}$, la hauteur $L_h = 1.56\text{mm}$. On réalise ensuite deux anneaux de dimensions L_1 extérieur et L_2 intérieur puis on prend un deuxième carré intérieur de dimensions L_1 extérieur et L_2 intérieur de largeur respectivement $S = 0.15\text{mm}$ et de largeur de $W = 0.2\text{mm}$. La figure III.49 représente la cellule SRR. à 3 anneaux avec ouvertures dans le même sens.

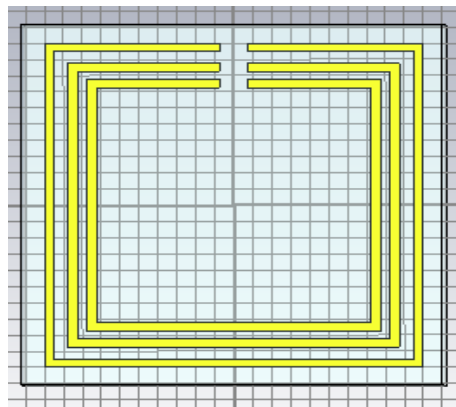


Figure III.49: Représentation et dimensions d'une unité SRR à 3 anneaux avec ouvertures dans le même sens.

Les résultats de simulation de la SRR à 3 anneaux avec ouvertures dans le même sens est présenté sur la figure III .50 pour les coefficients S_{11} et S_{21} .

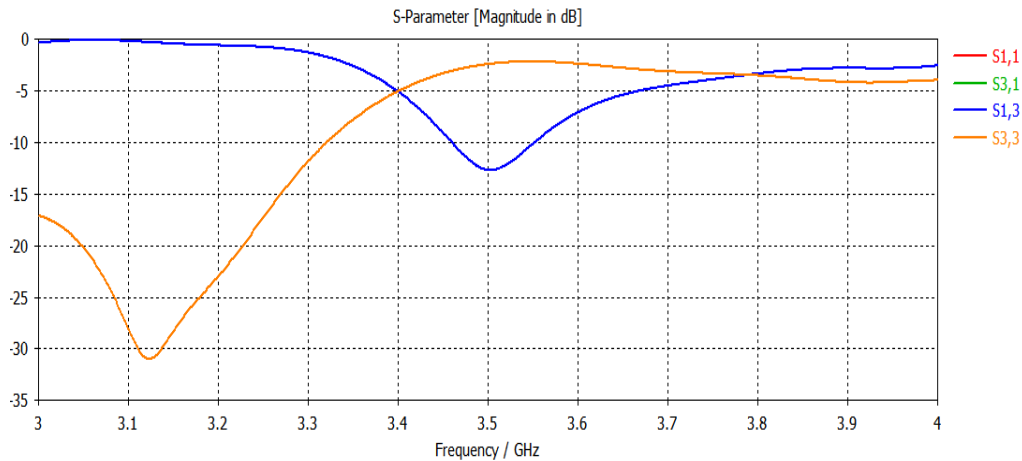


Figure III.50 : Représentation des paramètres (S) de la SRR carrée à 3 anneaux avec ouvertures dans le même sens.

La figure (III.50) représente l'évolution des coefficients de réflexion S_{11} et de transmission S_{21} en fonction de la fréquence correspondante à la fréquence de résonance de la RAF. Dans ce cas, nous remarquons que le RAF que nous avons conçu présente une transmission inférieure à -15 dB à la fréquence 3.5 GHz et un coefficient de réflexion de -30.91 dB à la fréquence 3.113 GHz.

III.8.1 Conception et simulation de la cellule CSRR ou RAFC à 3 anneaux avec ouvertures dans le même sens

Au lieu d'avoir deux anneaux interrompus concentrique en métal gravés sur un support diélectrique (substrat), dans ce cas, nous avons 3 anneaux interrompus concentrique. La figure III.51 montre la RAFC (CSRR) 3 anneaux avec ouvertures dans le même sens.

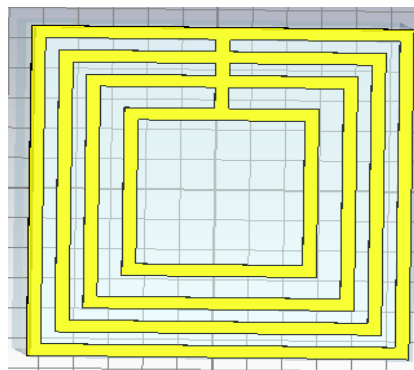


Figure III.51 : Représentation et dimensions d'une unité CSRR à 3 anneaux à 3 ouvertures dans le même sens.

Le résultat de simulation de SRR est présenté sur les figures suivantes :

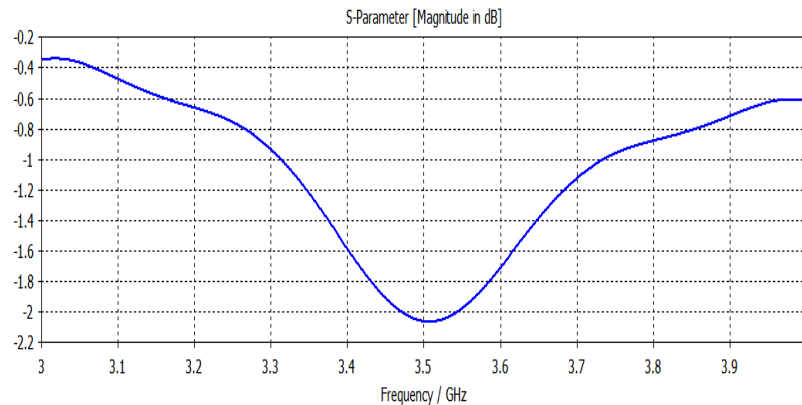


Figure III.52 : Coefficient de de transmission (S_{21}) de la CSRR à 3 anneaux à 3 ouvertures dans le même sens.

Nous remarquons que la CSRR présente un coefficient de transmission S_{21} de -2.07dB pour une fréquence de 3.5GHz suivant la figure.

III.8.2 Interprétation des résultats de simulation avant adaptation

Les paramètres des différentes configurations de l'antenne en fonction du nombre et de position de cellules CSRR utilisées sont présentés dans les tableaux ci-dessous. Le tableau (III.14) présente la position des cellules CSRR sur le patch avec la fréquence de résonance et le coefficient de réflexion (S_{11}).

Position de la CSRR sur patch	Fréquence (GHz)	S-Paramètre (dB)
1 CSRR à 3 anneaux avec ouvertures dans le même sens	3.288	-29.66

Tableau III. 14 : Valeur du coefficient de réflexion pour antenne patch avec position de cellule CSRR à 3 anneaux avec ouvertures dans le même sens.

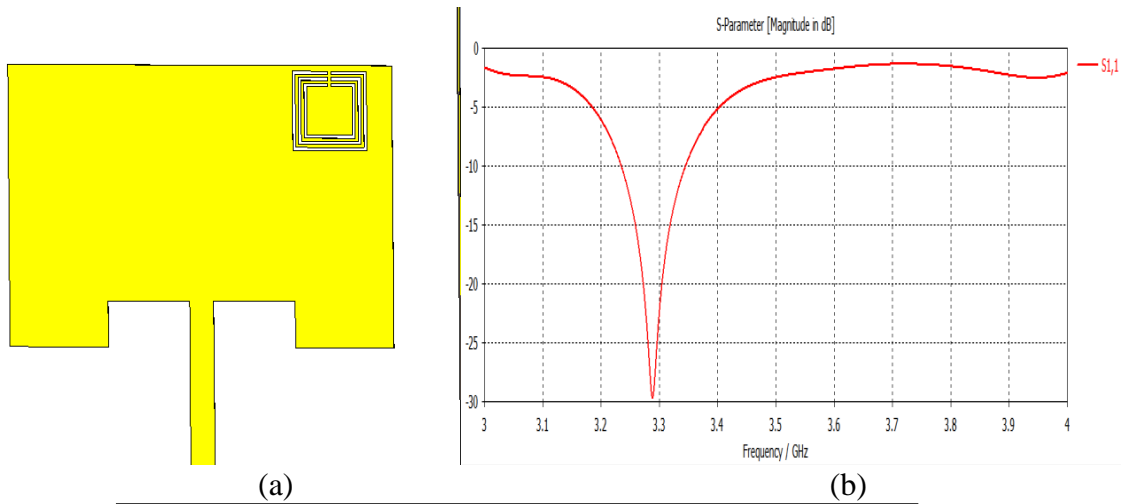


Figure III.53: (a) 1 CSRR sur Patch, (b) coefficient S_{11} .

III.8.3 Interprétation des résultats de simulation des antennes après adaptation

Les paramètres des différentes configurations de l’antenne en fonction du nombre et de position de cellules CSRR utilisées sont présentés dans les tableaux ci-dessous. Le tableau III.15 présente la position des cellules CSRR sur le patch avec la fréquence de résonance et le coefficient de réflexion (S_{11}).

Position de la CSRR sur patch	Fréquence (GHz)	S-Paramètre (dB)
1 CSRR à 3 anneaux avec ouvertures dans le même sens.	3.501	-30.088

Tableau III.15 : Valeur du coefficient de réflexion pour une antenne patch avec position de cellule CSRR à 3 anneaux avec ouvertures dans le même sens.

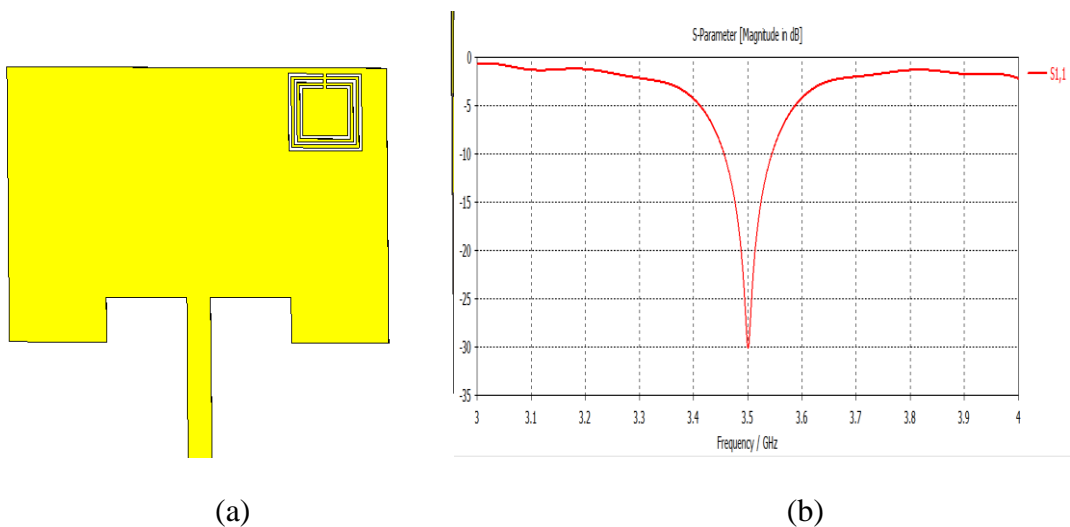


Figure III.54: (a) 1 CSRR sur Patch, (b) coefficient S_{11} .

Les résultats des paramètres S des figures précédentes montrent un comportement coupe bande autour de la fréquence 3.5GHz, correspondant à la fréquence de résonance de la cellule CSRR après optimisation et modification des paramètres de l'antenne.

Différents cas étudiés des antennes résonnent la majorité des cas à 3.5GHz, les meilleures optimisations pour les différentes positions des cellules CSRR avec leurs taux de miniaturisation, leurs rendements et leurs largeurs de bande passante sont données sur le tableau III.16 :

Position de la CSRR sur patch	Taux de Miniaturisation (%)	Rendement (%)	Largeur de bande (%)
1 CSRR à 3 anneaux avec ouvertures dans le même sens	13.79	2.57	9

Tableau III.16 : Valeur du taux de miniaturisation, du rendement et de la bande passante pour une antenne patch avec CSRR à 3 anneaux avec ouvertures dans le même sens.

Le tableau III.17 présente les paramètres de l'antenne patch après adaptation.

Position de la CSRR sur le patch	Wp(mm)	Lp(mm)	Wg(mm)	Lg (mm)
1 CSRR à 3 anneaux avec ouvertures dans le même sens	26.68	18.333	35.8	79.88

Tableau III.17 : Paramètre de l'antenne patch après adaptation.

III.8.4 Interprétation des résultats du gain avant et après adaptation

Les valeurs du gain pour cette configuration de l'antenne en fonction des positions des cellules CSRR sont présentées dans les tableaux ci-dessous. Le tableau III.18 présente la position des cellules CSRR à 3 anneaux avec ouvertures dans le même sens sur le patch et les valeurs du gain avant et après adaptation.

Position de la CSRR sur patch	Gain avant adaptation	Gain après adaptation
1 CSRR à 3 anneaux avec ouvertures dans le même sens	6.09	5.7

Tableau III.18 : Valeurs du gain de l'antenne patch avant et après adaptation.

Après simulation des différentes antennes patch avec différentes positions des cellules CSRR sur patch nous remarquons que les valeurs du gain avant adaptation sont plus élevées que celles obtenues après adaptation des différentes antennes.

III.8.5 Commentaires avant et après adaptation

Position de la CSRR sur patch	Avant adaptation	Après adaptation
1 CSRR à 3 anneaux avec ouvertures dans le même sens	Très bonne diminution de fréquence à 3.288GHZ avec un coefficient de - 29.66dB.	Fréquence de résonance souhaité de 3.501GHZ avec un bon coefficient S_{11} de réflexion - 30.88dB.

Tableau III.19 : Commentaires des figures.

III.9. CONCLUSION

Ce travail nous a permis d'apprendre à utiliser un outil de modélisation numérique en micro-ondes. Il a été possible d'effectuer la modélisation d'une antenne patch en utilisant un outil informatique spécialisé, dans ce cas l'outil est Microwave Studio (CST). Cette modélisation a aussi permis d'étudier l'influence de divers paramètres sur le diagramme de rayonnement d'une antenne patch rectangulaire.

Dans la première partie, nous avons présenté une antenne patch rectangulaire multicouches pour les applications 5G. L'antenne présente un comportement large bande en termes de bande passante et de coefficient de réflexion.

Dans la deuxième partie, les différentes structures présentées sont paramétrées pour avoir une réponse à la fréquence de résonance de 3.5 GHz. Tout d'abord nous avons présenté les résonateurs à activité magnétique RAF (SRR) et la RAF-C (CSRR) carré pour vérifier son fonctionnement à cette fréquence.

Les résultats de simulation de la cellule SRR et de la cellule complémentaire CSRR obtenus confirment l'obtention d'un comportement coupe bande autour de la fréquence de résonance de

la cellule.

Dans la troisième partie, nous avons présenté de nouveaux modèles d'antenne basées sur l'association d'une antenne patch avec des résonateurs métamatériaux de type CSRR à 2 et à 3 anneaux. Ces nouveaux modèles d'antenne ont été ensuite développés et validés expérimentalement suivant une démarche méthodologique proposée par CST. Ces modèles varient selon le nombre et la position des résonateurs CSRR que ce soit sur patch ou sur le plan de masse.

Nous avons ensuite confirmé que le choix de la position de la cellule par rapport à l'antenne, au plan de masse et en même temps sur le patch et le plan de masse est une condition primordiale afin d'optimiser le niveau du couplage et d'assurer l'effet métamatériaux souhaité. Les résultats de mesures et de simulations obtenus confirment l'obtention d'un comportement passe bande autour de la fréquence de résonance de 3.5 GHz de l'antenne et la cellule CSRR. La largeur de la bande passante varie de 83 MHz à 94 MHz avec un coefficient de réflexion qui varie entre de -25.7 dB et -37.8 dB, selon la position et le nombre de CSRR sur l'antenne.

En se basant sur le même concept, nous avons proposé une antenne avec CSRR capacité utilisant un nombre variable de cellules CSRR. Selon le même modèle d'antenne, nous avons développé une antenne passe bande basée sur l'association d'un patch à des cellules CSRR capacité. Les résultats de simulation obtenus présentent un comportement passe bande avec une fréquence centrale inférieure à la fréquence de résonance de l'antenne et de la cellule CSRR qui est de 3.5 GHz.

Les résultats de simulation après modification de certains paramètres sont en concordance. L'antenne conçue et proposée présente un coefficient de réflexion S_{11} qui résonne dans la fréquence de résonance 3.5 GHz. Par conséquent, elle peut être utilisée pour les applications de 5^{ème} Génération (5G).

Cependant, cette étude a été réalisée avec une charge CSRR dans différentes positions. Nous

avons montré que l'introduction d'une charge CSRR présente des pertes sur la structure antennaire. La position et le nombre de la cellule CSRR joue donc un rôle important dans la miniaturisation et le comportement de l'antenne résonante.

Dans ce chapitre nous avons simulé une antenne patch puis nous avons attribué des cellules métamatériaux pour voir l'impact de ces derniers sur le comportement de l'antenne. Donc les métamatériaux permettent d'avoir des caractéristiques au-delà de la nature du comportement des antennes. Le but de ce travail est de faire la miniaturisation des antennes patch à l'aide des cellules CSRR incrustées sur le patch ou sur le plan de masse ou bien sur les deux faces en même temps. La technologie de miniaturisations des antennes permet de minimiser le coût et aussi le gain de l'espace de travail d'où gain des matériaux et des surfaces à utiliser.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce mémoire était d'étudier les effets des matériaux composites (métamatériaux) sur les caractéristiques d'une antenne patch. Pour commencer nous avons étudié dans le premier chapitre un état de l'art des différentes antennes planaires et en particulier les antennes patch. Ces dernières présentent les avantages d'une ligne micro ruban (faible masse, faible encombrement, structure plane, faible coût) et la facilité de créer un réseau de quelques dizaines d'éléments. Cependant, leur bande passante reste faible (quelques pourcents), leur gain reste moyen (-30 dB pour les réseaux) et elles ne sont pas capables de transmettre une puissance de plus de quelque dizaine de watts.

Dans le second chapitre nous avons étudié plusieurs types de métamatériaux électriques (SRR carrée, CSRR carrée) et magnétique (les tiges, les résonateurs en « S »). Les métamatériaux exhibent des permittivités et des perméabilités négatives simultanément qui correspondent à un indice de réfraction négatif. Cela peut être réalisé à partir d'un motif SRR qui présente une polarisabilité électrique et magnétique, possédant des valeurs négatives dans la bande de résonance. Cette bande est très étroite correspond à un phénomène de dispersion négatif.

Dans le troisième chapitre nous avons appliqué les métamatériaux aux structures rayonnantes. La technique pour améliorer les performances d'une antenne patch est aussi suggérée. Cette technique consiste à placer le métamatériau main gauche au-dessus de l'antenne afin de miniaturiser l'antenne patch initiale. Le comportement de l'antenne métamatériau en fréquence est analysé et ses diagrammes de rayonnement sont obtenus par simulation sur le logiciel CST. Les résultats obtenus en simulation sont satisfaisants et ont montré une nette amélioration dans les performances de l'antenne. Enfin, Il nous reste encore un effort considérable d'analyse et de simulation à effectuer afin de maîtriser les divers modes possibles et les fréquences de coupure en vue d'exploiter au mieux ces structures. Comme perspectives nous souhaitons appliquer différentes cellules métamatériaux de formes différentes circulaires, triangulaires, trapézoïdes sur différentes formes d'antennes planaires, afin de miniaturiser de plus en plus les antennes de communications, ou d'élargir la bande passante de ces derniers.