

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
بلحاج بوشعيب جامعة عين تموشنت  
Université–Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib  
Faculté des Sciences et de Technologie  
Département d'électronique et télécommunications



Projet de Fin d'Etudes  
Pour l'obtention du diplôme de Master en : Réseaux et télécommunications  
Domaine : Sciences et Technologie  
Filière : Télécommunications  
Spécialité : Réseaux et télécommunications

Thème

**Conception et réalisation d'une antenne à base de métamatériaux pour les applications sans fil 5G**

Présenté Par :  
MAOUI Abdelaziz

Devant le jury composé de :

Dr. HACHEMI Belkacem	MCB	UAT.B.B (Ain Temouchent) Président
Dr. MOULESSEHOUL Wassila	MCA	UAT.B.B (Ain Temouchent) Examinatrice
Dr. FEROUANI Souheyla	MCA	UAT.B.B (Ain Temouchent ) Encadrante
Mlle. MOUSSA Fatima Zahra	Doctorante	UAT.B.B (Ain Temouchent ) Co-encadrante

*Année Universitaire 2023/2024*

# REMERCIEMENTS

**A**vant tout, nous remercions infiniment Dieu le tout puissant pour la santé, la force et le courage qu'il nous a donnés tout au long de notre parcours.

**N**otre gratitude va à l'égard de notre chère enseignante et encadrante **Dr. FEROUANI Souheyla** « Maitre de conférences classe A à l'université de Ain Témouchent » et à **Mlle. MOUSSA Fatima Zahra** doctorante à l'université de Ain Témouchent pour son bon encadrement, ses conseils, sa patience, son énorme soutien et pour toutes les connaissances acquises durant notre formation, qui nous ont énormément aidés dans ce travail.

**N**os vifs remerciements vont également aux membres du jury **Dr. MOULESSHOUL Wassila** Maitre de conférences classe A et **Dr. HACHEMI Belkacem** Maitres de conférences classe B, à l'université de Ain Temouchent pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner, de juger notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

**N**ous tenons à remercier aussi tout le corps professoral du département d'électronique et télécommunications pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploie de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.

**E**nfin, nous présentons nos plus sincères remerciements à nos parents pour leur soutien et à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

# DÉDICACE

Je dédie humblement ce travail à mes chers parents pour leurs sacrifices et leur amour inconditionnel.

"**A** la Palestine, où l'espoir reste vivant malgré les blessures, et où le rêve ne s'éteint jamais, quelles que soient les difficultés. À tous ceux qui sèment l'espoir dans les cœurs malgré la douleur, ce travail est pour vous."

**A** mes chers frères, mes chères sœurs.

**A** toute la famille **Maoui & Ghaoui**.

**A** mon club imprint.

**A** mes chers amis : Anes, Omar, Mohamed, Abdessamed, Ayoub, Alaa, Aymen,  
Mouaad, Yacine, Syphax.

**A** mes camarades des classes 2023 et 2024.

**A** tous mes enseignants qui nous ont soutenus et encouragés.

**A** tous ceux qui me sont chers et que j'ai omis de citer.

## Résumé

Les antennes patch miniatures utilisant des métamatériaux sont un domaine de recherche avancé en ingénierie des télécommunications. Les métamatériaux sont des matériaux artificiels conçus pour avoir des propriétés électromagnétiques qui ne se trouvent pas dans la nature. Ils peuvent manipuler les ondes électromagnétiques de manière inhabituelle, permettant de contrôler la permittivité et la perméabilité du matériau. Ces propriétés exceptionnelles permettent de concevoir des dispositifs compacts et efficaces.

Notre projet de fin d'étude se repose sur la conception, la miniaturisation et la réalisation d'une antenne patch de forme circulaire avec CSRR destinée pour des applications 5G dans la bande [3.4-3.8] GHz. Les dimensions finales de l'antenne sont  $27 \times 44.8 \times 1.5 \text{ mm}^3$ , Le taux de miniaturisation atteint est de 30.30%, les résultats de simulation en termes de S11, gain, directivité et bande passante sont très satisfaisants, rendant cette antenne facilement intégrable dans des dispositifs électroniques.

**Mots clés :** Antennes imprimées, patch circulaire, diagramme de rayonnement, coefficient de réflexion S11, la miniaturisation, CSRR, métamatériaux.

## Abstract

Miniature patch antennas using metamaterials represent an advanced research area in telecommunications engineering. Metamaterials are artificial materials designed to have electromagnetic properties not found in nature. They can manipulate electromagnetic waves in unusual ways, allowing control over the material's permittivity and permeability. These exceptional properties enable the design of compact and efficient devices.

Our final year project focuses on the design, miniaturization, and realization of a circular patch antenna with CSRR, intended for 5G applications in the [3.4-3.8] GHz band. The final dimensions of the antenna are  $27 \times 44.8 \times 1.5 \text{ mm}^3$ . The achieved miniaturization rate is 30.30%. Simulation results in terms of S11, gain, directivity, and bandwidth are very satisfactory, making this antenna easily integrable into electronic devices.

**Keywords:** Printed antennas, circular patch, radiation pattern, reflection coefficient S11, miniaturization, CSRR, metamaterials.

## ملخص

تعتبر هوائيات التصحيح المصغرة التي تستخدم المواد الاصطناعية مجالًا بحثيًا متقدمًا في هندسة الاتصالات. المواد الخارقة هي مواد اصطناعية مصممة لتكون لها خصائص كهرومغناطيسية غير موجودة في الطبيعة. يمكنهم التعامل مع الموجات الكهرومغناطيسية بطرق غير عادية، مما يسمح بالتحكم في سماحية المادة ونفاذيتها. هذه الخصائص الاستثنائية تجعل من الممكن تصميم أجهزة مدمجة وفعالة. يعتمد مشروع نهاية دراستنا على تصميم وتصغير وإنتاج هوائي رقعة دائري مع CSRR مخصص لتطبيقات 5 G في النطاق [3.4-3.8] GHz. الأبعاد النهائية للهوائي هي  $1.5 \times 44.8 \times 27 \text{ mm}^3$ ، معدل التصغير الذي تم تحقيقه هو 30.30%، نتائج المحاكاة من حيث S11 والكسب والاتجاهية وعرض النطاق الترددي ممتاز للغاية، مما يجعل هذا الهوائي مدمجًا بسهولة في الأجهزة الإلكترونية. **الكلمات المفتاحية:** الهوائيات المطبوعة، الرقعة الدائرية، نمط الإشعاع، معامل الانعكاس S11، التصغير، CSRR، المواد الخارقة.

# TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	i
DÉDICACE.....	ii
TABLE DES FIGURES.....	iii
LISTE DES TABLEAUX.....	iv
SYMBOLES ET NOTATIONS.....	v
ACRONYMES.....	vi
Introduction générale.....	1
I.1 Introduction.....	4
I.2 Les antennes imprimées.....	4
I.2.1 Historique.....	4
I.2.2 Description d'une antenne imprimée.....	5
I.2.3 Principe de fonctionnement d'une antenne imprimée.....	6
I.2.4 Paramètres et Caractéristiques de l'antenne patch.....	6
I.2.4.1 Coefficient de réflexion S11.....	7
I.2.4.2 VSWR.....	7
I.2.4.3 Diagramme de Rayonnement.....	7
I.2.4.3.1 La Directivité.....	7
I.2.4.3.2 Le Gain.....	8
I.2.4.3.3 L'impédance d'Entrée.....	8
I.2.4.3.4 L'ouverture d'une Antenne.....	9
I.2.4.3.5 Le rendement de l'antenne.....	10
I.2.4.3.6 Efficacité.....	11
I.2.4.4 La Bande Passante.....	11
I.2.5 Techniques d'alimentation.....	12
I.2.5.1 Alimentation par contact:.....	12
I.2.5.2 Alimentation par proximité:.....	12
I.3 La miniaturisation des antennes imprimées.....	13
I.3.1 Définition d'une antenne miniature.....	13
I.3.2 Techniques de miniaturisation des antennes.....	14
I.3.2.1 Insertion de court-circuit.....	14
I.3.2.2 Utilisation des matériaux.....	14
I.3.2.3 Modification de la géométrie.....	15
I.3.2.4 Miniaturisation à l'aide de métamatériaux.....	16
I.4 Les métamatériaux.....	17

I.4.1 Définition des métamatériaux .....	17
I.4.2 Classification des métamatériaux.....	17
I.4.3 Structure des métamatériaux SRR et CSRR.....	20
I.5 La technologie 5 G.....	22
I.5.1 Spectre de fréquence de la 5 G .....	22
I.5.2 Caractéristiques des Antennes pour la Bande 3.4 GHz - 3.8 GHz.....	23
I.5.2.1 Taille des Antennes .....	23
I.5.2.2 Types d'Antennes .....	23
I.5.3 Application des antennes imprimées miniature pour la 5G.....	23
I.6 Conclusion.....	24
II . Introduction.....	26
II.1 Présentation de l'outil de simulation .....	26
II.1.1 Description générale du logiciel : .....	27
II.1.2 L'Interface de CST .....	29
II. 2 Conception et simulation d'une antenne patch circulaire .....	30
II.2.1 Résultat de simulation :.....	32
II.3 Adaptation de l'antenne patch circulaire :.....	33
II.3.1 Résultats de simulations .....	33
II.3.1.1 paramètre S11 .....	33
II.3.1.2 VSWR .....	34
II.3.1.3 Diagramme de rayonnement.....	34
II.4 Miniaturisation de l'antenne patch circulaire proposée .....	36
II.4.1 Etude de la cellule CSRR.....	36
II.4.2 Insertion des cellules CSRR sur le plan de masse de l'antenne circulaire.....	38
II.4.3 Résultats de simulations .....	39
II.5 Amélioration du gain de l'antenne patch circulaire miniature proposée .....	42
II.5.1 Résultats de simulations .....	43
II.6 Conclusion .....	46
BIBLIOGRAPHIE.....	49

## TABLE DES FIGURES

Figure I. 1– Schéma explicatif d’une antenne a imprimée. ....	5
Figure I. 2– Différentes formes de l’élément rayonnant (patch) des antennes imprimées. ....	5
Figure I. 3– Principe de rayonnement de l’antenne imprimée [8] .....	6
Figure I. 4– L’Ouverture d’une Antenne patch [14] .....	10
Figure I. 5– Mesure de la bande passante à partir du tracé de coefficient de réflexion [3], [15] .....	12
Figure I. 6– Techniques d’alimentation d’une antenne micro ruban [16]. ....	13
Figure I. 7– Géométrie d’une antenne imprimée à encoches (a) Et son effet sur les courants surfaiques (b) [12], [25] .....	16
Figure I. 8– Antenne repliée (a) Bow-tie, (b) repliement vertical [26]. ....	16
Figure I. 9– Miniaturisation à l’aide de métamatériaux .....	17
Figure I. 10– Classification des métamatériaux électromagnétiques selon les signes $\epsilon$ et $\mu$ [29]. .....	18
Figure I. 11– Un réseau de fils conducteurs minces (a), des tracés d’un réseau de fils (b) [30]. .....	19
Figure I. 12– Un tableau de SRR (a), la perméabilité effective du tableau SRR (b) [30]. ....	20
Figure I. 13– Combinaison de fils minces et SRR pour former des métamatériaux DNG [30]. .....	20
Figure I. 14– Représentation schématique des différents types de cellules élémentaires de la structures SRR : En 2D a) Double SRR-rond, b) Double SRR-carré et c) Multi SRR-carré ; en 3D d) SRR-rond simple et d) SRR-rond double [32] .....	21
Figure I. 15– Configuration de la cellule unitaire CSRR dans sa boîte de calcul [33]. ....	21
Figure I. 16– Spectre électromagnétique en 5G [34]. ....	22
Figure II. 1– Création d’un nouveau projet. ....	27
Figure II. 2– Choix du type et de la zone de simulation.....	28
Figure II. 3– Choix du type d’antenne.....	28
Figure II. 4– Choix de la technique de simulation .....	29
Figure II. 5– choix des unités de différents paramètres.....	29

Figure II. 6– Interface principal de logiciel CST .....	30
Figure II. 7– Géométrie de l’antenne circulaire .....	31
Figure II. 8– Coefficient de réflexion de l’antenne initiale. ....	32
Figure II. 9– Antenne circulaire avec encoches. ....	33
Figure II. 10– Coefficient de réflexion de l’antenne patch circulaire proposée .....	34
Figure II. 11– VSWR de l’antenne circulaire. ....	34
Figure II. 12– Diagramme de rayonnement en gain de l’antenne circulaire proposée.....	35
Figure II. 13– Directivité de l’antenne circulaire proposée .....	35
Figure II. 14– La cellule CSRR [35] .....	36
Figure II. 15– Coefficients de réflexion et de transmission de la cellule CSRR. ....	37
Figure II. 16– Permittivité de la cellule CSRR proposée. ....	37
Figure II. 17– la perméabilité de la cellule CSRR proposée.....	37
Figure II. 18– insertions de la cellule CSRR sur le plan de masse. ....	38
Figure II. 19– Résultats du coefficient de réflexions avec cellule CSRR .....	39
Figure II. 20– Résultats du Coefficient de réflexion S11 avec l’étude paramétrique .....	40
Figure II. 21– Coefficient de réflexion S11 de l’antenne patch circulaire miniature à la fréquence 3.5GHz.....	40
Figure II. 22– VSWR de l’antenne miniature proposée. ....	41
Figure II. 23– Diagramme de rayonnement en gain de l'antenne circulaire miniature proposée, (a) Gain en 3D et (b) en polaire.....	41
Figure II. 24– Diagramme de rayonnement en directivité de l'antenne circulaire miniature proposée, (c) 3D et (d) en polaire.....	42
Figure II. 25– La géométrie finale de l’antenne patch circulaire miniature proposée. ....	42
Figure II. 26– Coefficients de réflexion S11 de l’antenne miniature proposée avec la technique de plan de masse partiel. ....	43
Figure II. 27– VSWR de l’antenne miniature proposée. ....	44
Figure II. 28– Diagrammes de rayonnement de l’antenne patch circulaire miniature adapté à 3.5GHz.....	44
Figure II. 29– La distribution de courant de l’antenne patch circulaire miniature. ....	45
Figure II. 30– mesure de l'antenne patch circulaire simple avec l'analyseur réseau. ....	45
Figure II. 31– mesure de l'antenne patch circulaire miniature avec l'analyseur réseau.....	46

# LISTE DES TABLEAUX

Tableau II 1– cahier de charge de l’antenne proposée .....	30
Tableau II 2– Paramètres de l’antenne patch circulaire [39] .....	31
Tableau II 3– Paramètres géométriques de l’antenne de base. ....	32
Tableau II 4– Etudes paramétriques .....	33
Tableau II 5–Dimensions de la cellule métamatériaux CSRR proposée [40] .....	36
Tableau II 6– Etudes paramétriques des dimensions de l’antenne circulaire miniature. ....	39
Tableau II 7– Dimensions finale de l’antenne circulaire miniature. ....	40
Tableau II 8– Dimensions finale de l’antenne patch circulaire miniature.....	43

# SYMBOLES ET NOTATIONS

$\mu$  : Perméabilité

$\varepsilon$  : Permittivité

$\omega$  : pulsation angulaire

$\rho$  : densité des électrons

$\lambda$  : Longueur d'onde

$S_{11}$  : coefficient de réflexion

$S_{21}$  : coefficient de transmission

$\vec{K}$  : Vecteur d'onde

$\vec{E}$  : Vecteur champ électrique

$\vec{H}$  : Vecteur champ magnétique

$\vec{S}$  : Vecteur de Poynting

$\eta$  : Indice de réfraction

$V_g$ : vitesse de groupe

$V_\phi$  : vitesse de phase

# ACRONYMES

**APM** : Antenne Patch Microruban

**MTM**: Méta-matériaux

**VSWR**: Voltage Standing Wave Ratio

**FIT**: Finite Integration Technique

**MNG**: Magnetic Negative

**ENG**: Electrical Negative

**LHM**: Left-Handed material

**DPS**: Double Positive

**DNG**: Double Negative

**MMG**: Matériaux Main Gauche

**CMA**: Conducteur Magnétique Artificiel

**BCC**: Bande chargée par capacité

**RAF**: Résonateur en Anneau Fendu

**IOT** : Internet Of Things (internet des objects)

**HFSS**: High Frequency Structure Simulator

**CST**: Computer Simulation Technology.

**FR-4**: Flame Resistant -4

**SRR**: Split Ring Resonator

**CSRR** : complémentaire Split Ring Resonator

**VNA**: vector network analyzer

---

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

---

# Introduction générale

Ces dernières années, le plus grand défi auquel sont confrontés les concepteurs de systèmes est de concevoir et d'améliorer les performances de chaque composant sans fil (comme l'antenne) pour obtenir un faible coût, un poids minimum et un petit facteur de forme. La nature curieuse des humains a montré la voie à la recherche et à l'innovation des matériaux avec des nouvelles propriétés. Avec toutes ces recherches, les métamatériaux naissent.

Les antennes patch sont largement utilisées de nos jours, depuis les systèmes de communication modernes jusqu'au stimulateur cardiaque. Selon le type d'application, les antennes patch sont conçues pour obtenir des performances particulières.

Cependant, la conception d'une antenne patch n'est pas toujours facile et le concepteur fait face à certains de ses inconvénients tels que la bande passante étroite, le faible gain et l'excitation des ondes de surface qui réduit le rendement du rayonnement. Pour surmonter le gain et le rendement, une nouvelle méthodologie de conception est utilisée qui est une structure artificiellement créée appelée méta matériau.

Le méta matériau est une structure résonante artificielle conçue pour obtenir des caractéristiques spécifiques qui ne sont pas d'origine naturelle dans la nature [1]. Ces caractéristiques uniques des métamatériaux ont été largement utilisées dans les antennes et les applications à micro-ondes pour améliorer les performances désirées [2].

L'objectif de ce projet est de réaliser une antenne patch miniature à base de métamatériaux à la fréquence de 3.5 GHz pour les applications 5G.

## **Organisation du projet**

**Le mémoire est divisé en deux chapitres:**

- Dans le premier chapitre, nous allons donner un aperçu général des antennes imprimées, notamment leur constitution, leurs diverses formes, leur alimentation, ainsi que leurs paramètres et caractéristiques. Nous discuterons ensuite brièvement des propriétés, des différentes classes et des types de métamatériaux, puis de leur utilisation avec les antennes imprimées pour leur miniaturisation. Enfin, nous introduirons la technologie 5G, ses caractéristiques et les domaines d'application de ces antennes patch miniatures.

- Dans le deuxième chapitre, nous allons concevoir une antenne circulaire miniature à base de métamatériaux pour une fréquence de 3,5 GHz destinée aux applications 5G. Nous réaliserons ensuite notre antenne et mesurerons son paramètre  $S_{11}$  à l'aide de l'analyseur de réseau VNA (23 MHz - 6200 MHz) pour valider nos résultats.

# Chapitre *I*

---

---

Antennes imprimées miniatures destinées aux applications de la 5G

---

## Antennes imprimées miniatures destinées aux applications de la 5G

### I.1 Introduction

Une antenne patch (ou antenne micro ruban) est un type d'antenne radio avec des caractéristiques exclusives comme faible hauteur, faible poids, très faible consommation d'énergie et facilité de fabrication, elles sont devenues l'une des antennes les plus courantes dans l'industrie des télécommunications aujourd'hui. Actuellement, ces antennes sont l'objet de nombreuses recherches en vue d'applications dans la gamme des micro-ondes. Par ailleurs, les métamatériaux sont des matériaux conçus spécifiquement pour posséder des propriétés uniques absentes des matériaux naturels. Le concept de métamatériaux est souvent utilisé en association avec les antennes imprimées pour améliorer leurs performances.

Dans ce chapitre, nous commencerons par décrire quelques concepts utiles sur les antennes micro-ruban, leurs comportements et leurs caractéristiques. Ensuite, nous aborderons la théorie des métamatériaux et leur intégration avec les antennes patch pour la miniaturisation. Enfin, nous terminerons ce chapitre par les applications des antennes patch dans la 5G.

### I.2 Les antennes imprimées

#### I.2.1 Historique

Le concept d'antenne imprimée a été initialement proposé par Deschamps aux États-Unis en 1953[3], puis en France par Baissinot et Gutton en 1955. Le phénomène de rayonnement discontinu de la ligne de bande a été observé et étudié par Lewin en 1960[4]. En 1970, Byron a avancé une structure plane composée d'une plaque conductrice gravée sur un substrat diélectrique  $\epsilon_r \leq 10$ , la plaque conductrice étant placée sur le plan de masse. Les premiers résultats obtenus étaient principalement destinés à des applications militaires. Ensuite, dans les années 1978 et 1979, Demeryd a approfondi l'étude des antennes micro-ruban

Conventionnelles. on marquant ainsi une transition vers une utilisation industrielle généralisé.

### I.2.2 Description d'une antenne imprimée

La structure de base d'une antenne imprimée, comme illustré dans la figure I.1, se compose d'une partie métallique rayonnante, appelée patch, située d'un côté d'un substrat diélectrique, avec une couche de masse de l'autre côté. Les patches sont typiquement fabriqués à partir de matériaux conducteurs tels que le cuivre ou l'or en raison de leur haute conductivité, et peuvent adopter diverses formes. Ils sont généralement réalisés par gravure lithographique sur le substrat diélectrique, tout comme les lignes d'alimentation [5].

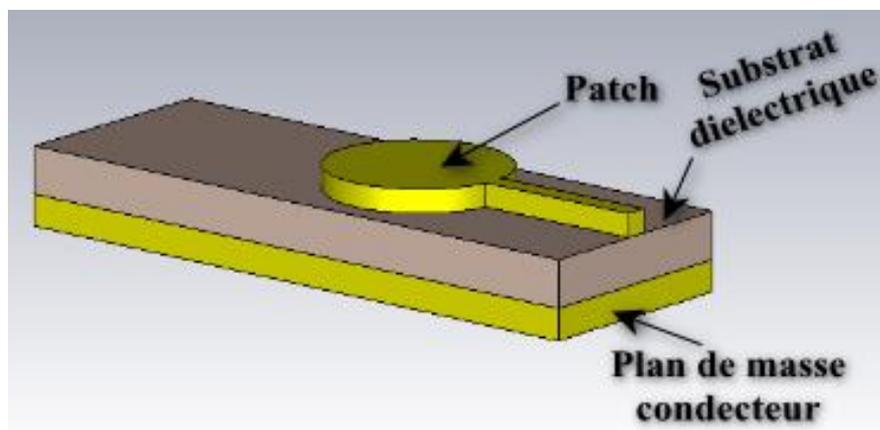


Figure I. 1– Schéma explicatif d'une antenne a imprimée.

L'antenne patch peut adopter diverses formes, mais celles illustrées dans la figure I.2 sont les plus courantes en raison de leur facilité d'analyse et de fabrication [6]. De plus, ces formes permettent d'obtenir un diagramme de rayonnement significatif.



Figure I. 2– Différentes formes de l'élément rayonnant (patch) des antennes imprimées.

### I.2.3 Principe de fonctionnement d'une antenne imprimée

Pour comprendre le principe de fonctionnement du résonateur micro ruban, il est essentiel de saisir le concept du champ électromagnétique. Lorsque la ligne électrique est excitée par une source de radiofréquence, une onde électromagnétique guidée se propage entre la ligne électrique et le plan de masse en direction de l'élément rayonnant. La répartition de la charge se forme à la fois sous l'élément rayonnant et sur le plan de masse [7]. Les performances d'un capteur de patch micro ruban sont influencées par la permittivité du substrat et les dimensions du patch.

L'effet de frange se produit en raison des lignes de champ électrique qui élargissent l'antenne après son excitation. La largeur et la position de l'alimentation dans l'antenne sont les principales causes de cet effet. Bien qu'elles favorisent un diagramme de rayonnement plus directif, elles peuvent également décaler la fréquence de résonance par rapport à la fréquence requise [8]. Une antenne patch est une antenne directionnelle plane où une pièce métallique est placée sur un substrat diélectrique. Le transfert de puissance entre une source et une antenne se fait via une ligne d'alimentation, avec une impédance caractéristique généralement de  $50 \Omega$  pour la ligne de transmission.

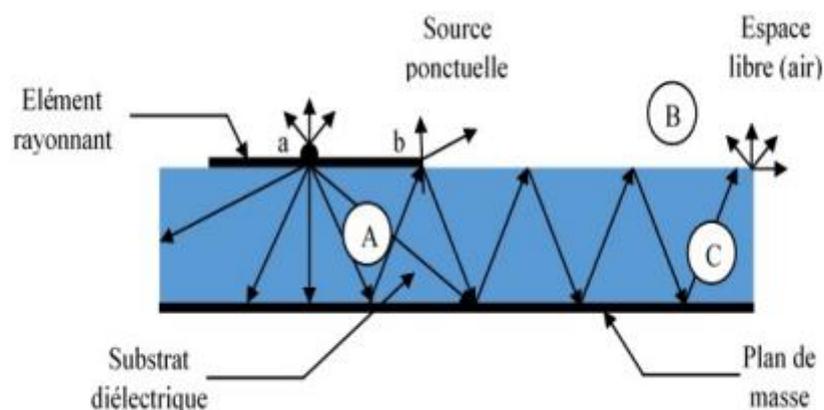


Figure I. 3– Principe de rayonnement de l'antenne imprimée [8]

### I.2.4 Paramètres et Caractéristiques de l'antenne patch

Pour évaluer les performances d'une antenne, il est essentiel de définir ses différentes caractéristiques:

### I.2.4.1 Coefficient de réflexion S11

En règle générale, lorsque l'onde incidente passe par un changement de milieu de propagation, une partie de cette onde est réfléchiée tandis que l'autre partie est transmise dans le nouveau milieu. Le coefficient de réflexion d'une antenne, S11, est défini comme le rapport entre les amplitudes des ondes réfléchiées et des ondes incidentes [9],[10]. Le coefficient de réflexion S11 met en évidence l'absorption de l'énergie par l'antenne. Ce paramètre est crucial lors de l'optimisation de l'antenne [8]. Il s'exprime par la relation suivante :

$$S_{11} = \frac{(Z_e - Z_0)}{(Z_e + Z_0)} \quad (\text{I.1})$$

où :

$Z_e$  est l'impédance d'entrée de l'antenne.

$Z_0$  est l'impédance caractéristique, généralement égale à 50  $\Omega$ .

Le coefficient de réflexion permet de déterminer la qualité de l'adaptation d'une antenne. Plus la valeur de S11 en dB est basse, plus l'antenne est bien adaptée. En général, la fréquence de résonance d'une antenne est celle où le coefficient de réflexion est minimal [3].

### I.2.4.2 VSWR

VSWR est l'acronyme de Voltage Standing Wave Ratio, et est également appelé le rapport d'onde constante (SWR). VSWR est une fonction du coefficient de réflexion, qui décrit la puissance réfléchiée par l'antenne. Si le coefficient de réflexion est donné par s11 ou par coefficient de réflexion ou perte de retour [11], alors  $|\Gamma|$  le VSWR est défini par la formule suivante :

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (\text{I.2})$$

### I.2.4.3 Diagramme de Rayonnement

#### I.2.4.3.1 La Directivité

La directivité  $D(\theta, \varphi)$  d'une antenne dans une direction  $(\theta, \varphi)$  correspond au rapport entre la puissance envoyée dans cette direction et la puissance que transmettrait une antenne isotrope. C'est-à-dire une antenne qui rayonne uniformément dans toutes les directions [12].

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{Prad} \quad (\text{I.3})$$

où :

$P(\theta, \varphi)$  est la densité de puissance rayonnée dans la direction  $(\theta, \varphi)$ .

$P_r$  est la puissance totale rayonnée par l'antenne.

La directivité est une mesure de la concentration du rayonnement dans une direction particulière par rapport à un rayonnement isotrope. Une directivité élevée indique que l'antenne est très directive, concentrant une grande partie de sa puissance rayonnée dans une direction spécifique.

#### **I.2.4.3.2 Le Gain**

Le gain d'une antenne  $G(\theta, \phi)$  est une mesure de la puissance rayonnée  $P(\theta, \varphi)$  dans une direction donnée par rapport à la puissance fournie à l'antenne  $P_a$ . Il dépend de la directivité de l'antenne et est défini comme le rapport entre la puissance rayonnée dans le lobe principal et la puissance rayonnée par une antenne de référence [12]. Le gain est exprimé par l'équation suivante :

$$G = \frac{4\pi U}{P_a} \quad (\text{I.4})$$

où :

$P(\theta, \varphi)$  est la puissance rayonnée dans une direction spécifique  $(\theta, \varphi)$ .

$P_a$  est la puissance d'alimentation de l'antenne.

Le gain peut également être exprimé en fonction du rendement  $\eta$  et de la directivité  $D(\theta, \phi)$ :

$$G(\theta, \phi) = \eta \times D(\theta, \phi) \quad (\text{I.5})$$

Cette relation montre que le gain d'une antenne est le produit de son rendement et de sa directivité. Le gain indique l'efficacité avec laquelle l'antenne convertit la puissance d'entrée en rayonnement dirigé dans une direction particulière.

#### **I.2.4.3.3 L'impédance d'Entrée**

L'impédance d'entrée d'une antenne est l'impédance vue depuis la ligne d'alimentation au niveau de l'antenne. Elle joue un rôle crucial dans l'efficacité de la transmission et de la réception des signaux, car une bonne adaptation d'impédance minimise les pertes par réflexion et assure un transfert optimal de puissance entre l'antenne et le reste du système [3], [13].

La formule suivante fournit l'impédance d'entrée  $Z_e$  :

$$Z_e = Z_0 \times \frac{1+S_{11}}{1-S_{11}} \quad (\text{I.6})$$

Où :

$Z_0$  est l'impédance caractéristique de la ligne de transmission (généralement égale à  $50 \Omega$ ).

$S_{11}$  est le coefficient de réflexion, qui représente la fraction de l'onde réfléchi par rapport à l'onde incidente.

#### **I.2.4.3.4 L'ouverture d'une Antenne**

L'ouverture d'une antenne, souvent désignée comme l'angle d'ouverture, est une mesure de la dispersion du faisceau principal d'une antenne. Si  $G_m$  est le gain maximal d'une antenne donnée dans un plan bien déterminé, alors son ouverture dans ce plan est définie comme l'angle entre deux directions de ce plan où le gain est réduit à la moitié du gain maximal, c'est-à-dire  $\frac{G_m}{2}$  (ou -3 dB par rapport au gain maximal) [14].

Cet angle d'ouverture donne une indication sur la largeur du faisceau de l'antenne.

Une antenne avec une ouverture étroite a un faisceau concentré et dirigé, ce qui est souvent souhaitable pour des applications nécessitant une direction précise du signal, comme les communications point à point. À l'inverse, une ouverture plus large implique un faisceau plus diffus, couvrant une plus grande zone, ce qui peut être bénéfique pour les applications nécessitant une couverture large.

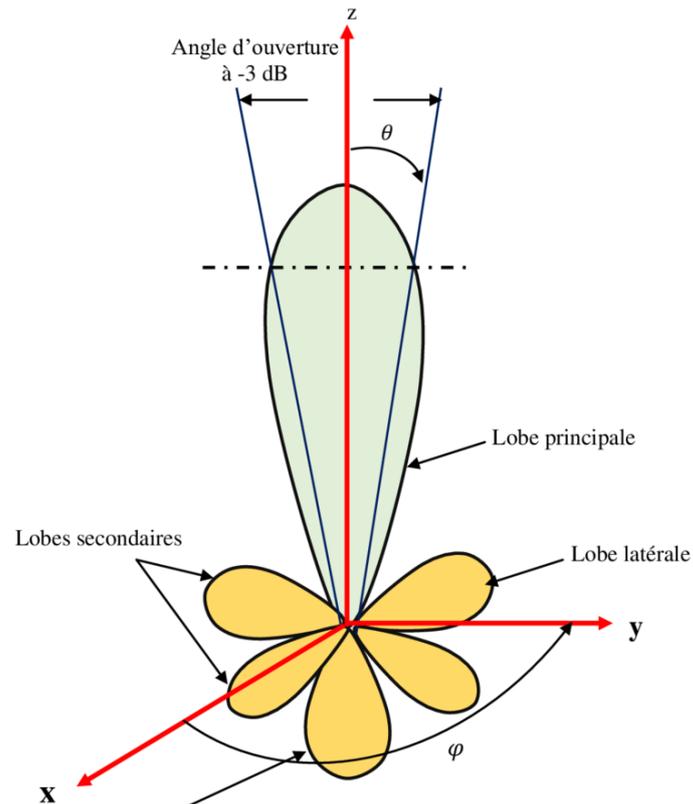


Figure I. 4– L'Ouverture d'une Antenne patch [14]

#### I.2.4.3.5 Le rendement de l'antenne

Le rendement de l'antenne  $\eta$  est le rapport entre la puissance rayonnée  $P$  et la puissance fournie à l'antenne  $P_a$ , exprimé par la formule suivante :

$$\eta = \frac{P}{P_a} \quad (\text{I.7})$$

Il peut également être exprimé en fonction du gain et de la directivité de l'antenne :

$$\eta = \frac{\text{Gain}}{\text{Directivité}} \quad (\text{I.8})$$

où :

$P$  est la puissance totale rayonnée.

$P_a$  est la puissance d'alimentation de l'antenne.

Ce rapport caractérise la perte à l'intérieur de l'antenne [15].

### I.2.4.3.6 Efficacité

L'efficacité de l'antenne est une mesure importante de son rendement. L'efficacité totale de l'antenne est utilisée pour prendre en compte les pertes au niveau de la borne d'entrée et à l'intérieur de la structure de l'antenne. Ces pertes peuvent être dues à des réflexions en raison de l'asymétrie entre la ligne de transmission et l'antenne, ainsi qu'aux pertes (conduction et diélectriques). En général, l'efficacité globale peut être exprimée comme [15]:

$$\eta_0 = \eta_{rec} \quad (I.9)$$

où  $\eta_0$  représente l'efficacité globale de l'antenne.

Lorsque  $\eta_0$  représente l'efficacité totale,  $\eta_{rec}$  est l'efficacité de conduction et diélectrique, également connue sous le nom d'efficacité de rayonnement, et  $\eta_r$  est l'efficacité de réflexion. Cette dernière est donnée par :

$$\eta_r = (1 - |\Gamma|^2) \quad (I.10)$$

où  $\Gamma$  est le coefficient de réflexion de l'antenne.

### I.2.4.4 La Bande Passante

La bande passante d'une antenne désigne l'intervalle de fréquences dans lequel le coefficient de réflexion est inférieur à un seuil fixé arbitrairement. Ce seuil est souvent fixé à -10 dB, indiquant que la puissance réfléchie est 10% ou moins de la puissance incidente. En d'autres termes, la bande passante est la plage de fréquences où l'antenne fonctionne efficacement, avec des pertes de retour acceptables.

La bande passante est généralement déterminée à partir de la courbe du coefficient de réflexion  $S_{11}$ . Cette courbe montre comment le coefficient de réflexion varie avec la fréquence. Un coefficient de réflexion inférieur à -10 dB est couramment utilisé comme critère pour définir la bande passante utile de l'antenne. Ce seuil indique que les réflexions sont suffisamment faibles [3], [15], pour garantir une bonne transmission de l'énergie.

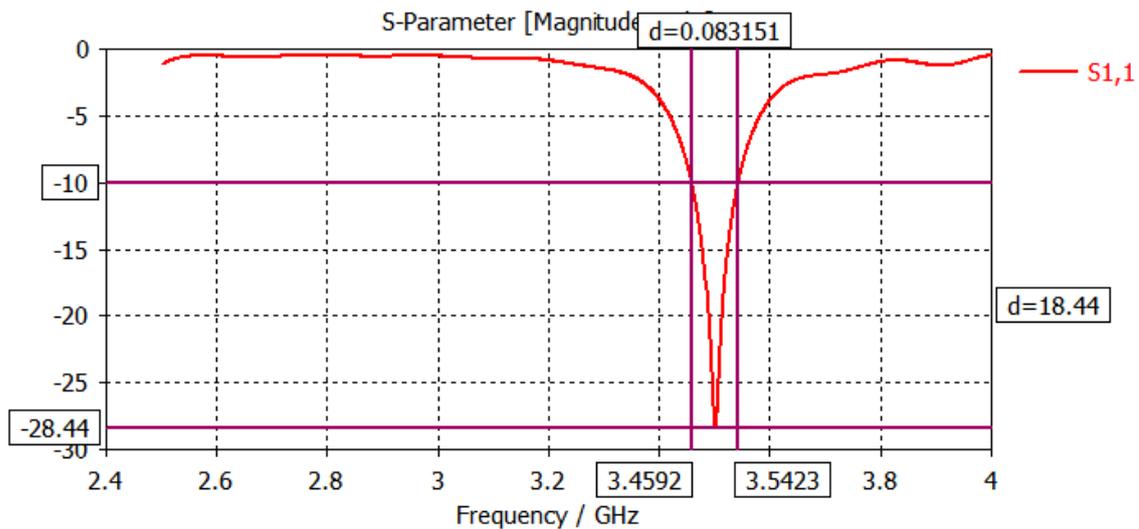


Figure I. 5– Mesure de la bande passante à partir du tracé de coefficient de réflexion [3], [15]

### I.2.5 Techniques d'alimentation

Il est important de noter que la technique d'alimentation utilisée peut avoir un impact significatif sur le fonctionnement de l'antenne [16].

L'alimentation des antennes patch est un élément crucial de leur conception. Plusieurs techniques d'alimentation existent, et la technique choisie peut modifier considérablement le fonctionnement de l'antenne. On distingue généralement deux grandes catégories Figure I.4

**I.2.5.1 Alimentation par contact :** Dans cette approche, l'alimentation est directement connectée à l'élément rayonnant en utilisant un élément de connexion tel qu'une ligne micro-ruban ou une sonde [17].

**I.2.5.2 Alimentation par proximité :** Cette méthode repose sur le couplage du champ électro-magnétique pour assurer le transfert de puissance entre la ligne micro-ruban et l'élément rayonnant [18].

Les cinq techniques d'alimentation les plus couramment utilisées sont les suivantes : la sonde coaxiale, la ligne micro-ruban, le couplage par proximité, le couplage par ouverture et les guides d'onde coplanaires. Chacune de ces techniques présente des avantages et des inconvénients spécifiques, et le choix dépendra des exigences spécifiques de l'application ainsi que des performances souhaitées de l'antenne.

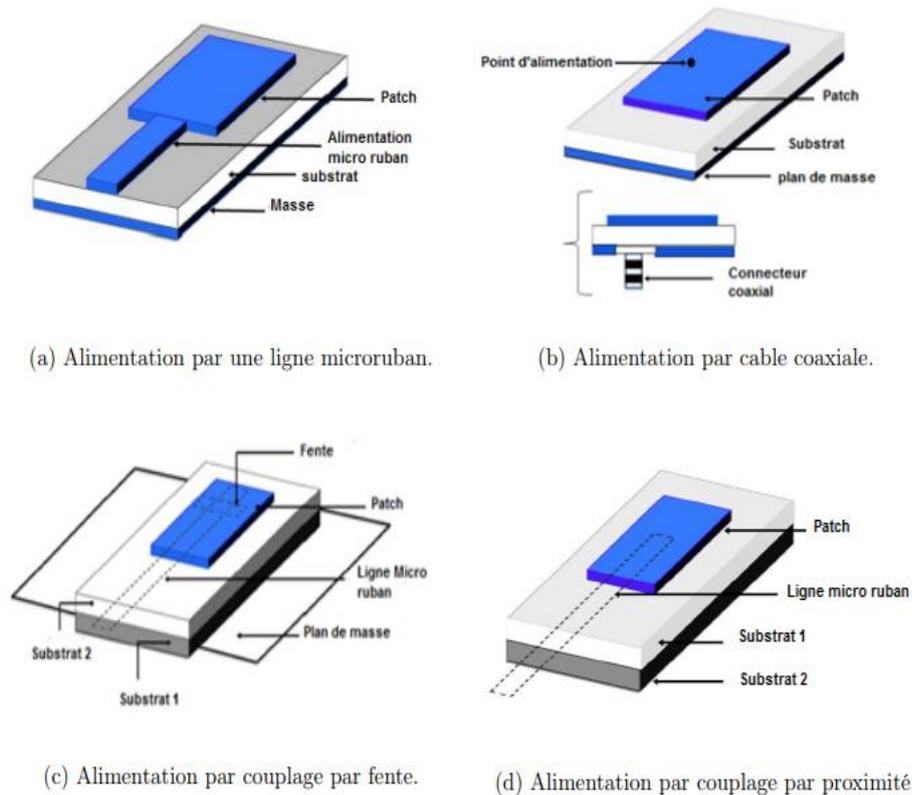


Figure I. 6– Techniques d'alimentation d'une antenne micro ruban [16].

### I.3 La miniaturisation des antennes imprimées

Au cours des dernières décennies, de nouvelles méthodes ont permis de réduire la taille des appareils électroniques. En plus de leur petite taille, ces appareils offrent l'avantage de pouvoir communiquer sans fil [19], ce qui nécessite l'utilisation d'antennes. Aujourd'hui, l'antenne joue un rôle crucial, rendant la réduction de sa taille un défi majeur.

La miniaturisation d'une antenne consiste à réduire sa taille, sa surface et son volume tout en maintenant une fréquence de résonance. Il est essentiel d'intégrer les circuits d'adaptation nécessaires à son bon fonctionnement au plus près de l'antenne.

#### I.3.1 Définition d'une antenne miniature

Une antenne miniature, ou antenne électriquement petite (AEP), est une antenne dont la taille est significativement inférieure à la longueur d'onde de sa fréquence de fonctionnement.

WHEELER [20] indique qu'une antenne pouvait être considérée comme électriquement petite si ses dimensions maximales étaient inférieures à « K » qui représente le nombre d'onde [21].

$$K = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (\text{I.11})$$

Avec « $\lambda$ » : la longueur d'onde de l'antenne à sa fréquence d'utilisation.

On a  $Ka < 1$  avec « a » : c'est le rayon de la sphère minimale qui entoure complètement l'antenne.

### **I.3.2 Techniques de miniaturisation des antennes**

Les techniques de miniaturisation des antennes sont des méthodes et des procédés utilisés pour réduire les dimensions physiques des antennes tout en maintenant leurs performances en termes de rayonnement et de réception des signaux électromagnétiques [21]. Ces techniques comprennent l'utilisation de matériaux spécifiques, la conception de structures innovantes, la manipulation des propriétés électriques et magnétiques des matériaux, ainsi que l'intégration de composants électroniques à proximité de l'antenne. L'objectif principal est de réduire la taille des antennes tout en conservant leur efficacité et leur fonctionnalité pour répondre aux exigences de miniaturisation des dispositifs électroniques modernes. Les techniques de miniaturisation pour les antennes incluent :

#### **I.3.2.1 Insertion de court-circuit**

Le quart d'onde imprimée de l'antenne : En utilisant l'analogie dipôle/monopôle, il est envisageable d'intégrer une plaque de court-circuit entre l'élément rayonnant et le plan de masse dans le plan où le champ électrique est nul sur le mode primaire de l'antenne patch [12],[22]

#### **I.3.2.2 Utilisation des matériaux**

Les antennes imprimées sont fréquemment utilisées en raison de leur simplicité d'utilisation, de leur facilité de conception et d'intégration, ainsi que de leur faible coût. Elles sont souvent miniaturisées sur le plan électrique grâce à l'utilisation de divers matériaux, parmi lesquels on trouve :

- **Utilisation d'un diélectrique**

Afin de réduire la charge, il est également possible de tirer parti des propriétés diélectriques des matériaux. En effet, plusieurs études ont montré que l'utilisation de substrats à haute permittivité, généralement comprise entre 10 et 20, permet de réduire les dimensions d'une antenne sans en modifier la configuration.

L'emploi de tels matériaux concentre les lignes de champ sous l'antenne. Ce phénomène s'explique par l'impact d'un environnement à haute permittivité sur l'organisation des électrons. Ainsi, lorsqu'un substrat présente une permittivité diélectrique élevée ( $\epsilon_r$ ), la longueur d'onde guidée ( $\lambda_g$ ) diminue [11], [23]

- **Utilisation d'un matériau magnéto-électrique**

L'utilisation de matériaux magnéto-diélectriques, présentant une permittivité et une perméabilité supérieures à 1, permet de réduire la taille d'une antenne sans compromettre ses performances en termes de bande passante. Ces matériaux contribuent à la miniaturisation des antennes imprimées car l'indice de réfraction du substrat est inversement proportionnel aux dimensions de l'antenne [11], [24].

### **I.3.2.3 Modification de la géométrie**

La dernière catégorie de méthodes concerne la transformation structurelle de l'antenne en utilisant des fentes, le repliement, des formes fractales ou arbitraires [12] :

- **Insertion d'encoches ou de fentes**

Il est fréquent d'utiliser l'insertion d'encoches (Figure I-13 (a)) ou de fentes dans une antenne patch traditionnelle. Effectivement, cette approche permet d'accroître de manière artificielle la longueur électrique de l'élément rayonnant en prolongeant le "chemin" des courants surfaciques sur le corps. Cette substance lumineuse (Figure I-13(b)) [12], [25].

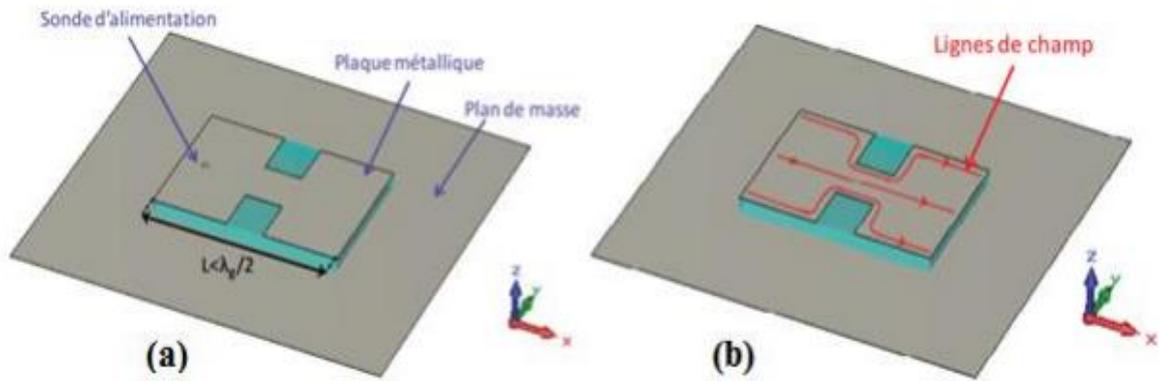


Figure I. 7– Géométrie d'une antenne imprimée à encoches (a) Et son effet sur les courants surfaciques (b) [12], [25]

- **Repliement et courbure**

Cette méthode convient aussi à la miniaturisation des antennes. Elle consiste à modifier la forme de l'élément rayonnant ou à le plier sur lui-même. Cela permet de réduire naturellement l'espace occupé par l'objet par rapport à une structure non pliée. Cette technique est principalement utilisée dans le domaine des dipôles [26], [27].

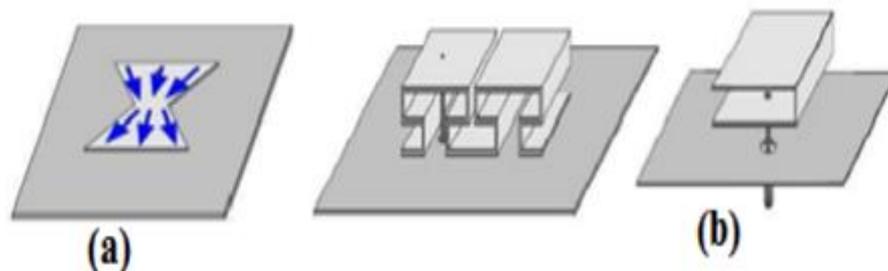


Figure I. 8– Antenne repliée (a) Bow-tie, (b) repliement vertical [26].

#### I.3.2.4 Miniaturisation à l'aide de métamatériaux

Les métamatériaux sont des matériaux artificiellement conçus pour avoir des propriétés qui ne sont pas facilement disponibles. Ce type de structure permet d'obtenir des performances d'antenne élevées et d'améliorer l'efficacité du rayonnement. Elles peuvent également être utilisées pour la miniaturisation des antennes patch en intégrant les cellules unitaires de métamatériaux, tels que les cellules SRR et CSRR sur l'élément rayonnant de l'antenne ou sur son plan de masse [28].

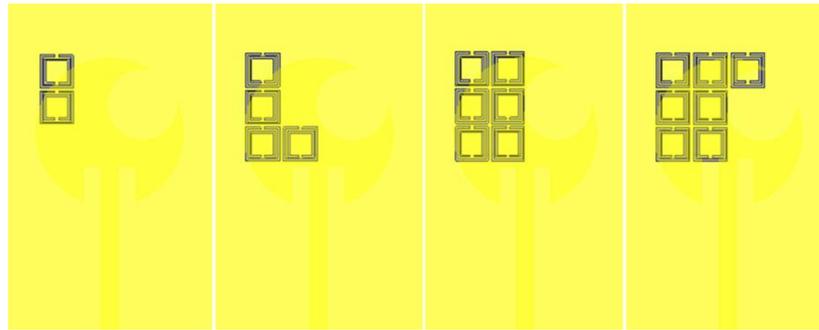


Figure I. 9–Miniaturisation à l’aide de métamatériaux

## I.4 Les métamatériaux

### I.4.1 Définition des métamatériaux

Le terme métamatériaux inventé par Walser [27] a été initialement déni pour des composites artificiels périodiques résultant d'une combinaison d'une ou de plusieurs réponses électromagnétiques. Il s'agit en général de structures périodiques, diélectriques et/ou métalliques, de dimensions très inférieures à la longueur d'onde et qui se comportent comme s'il s'agissait de matériaux homogènes. Ainsi, les métamatériaux peuvent être composés de plusieurs couches d'une matrice en fibre de verre, empilées les unes sur les autres et entre lesquelles sont insérés des anneaux métalliques. Il existe différents types de métamatériaux, mais ils sont généralement composés de deux parties : le substrat et les résonateurs.

### I.4.2 Classification des métamatériaux

Dans le domaine des micro-ondes, nous distinguons quatre catégories de matériaux en fonction du signe de leur permittivité et perméabilité. Ces propriétés déterminent comment les ondes électromagnétiques se propagent à travers un matériau. Les métamatériaux peuvent être classés en quatre groupes [29], comme illustré dans la figure I.10 :

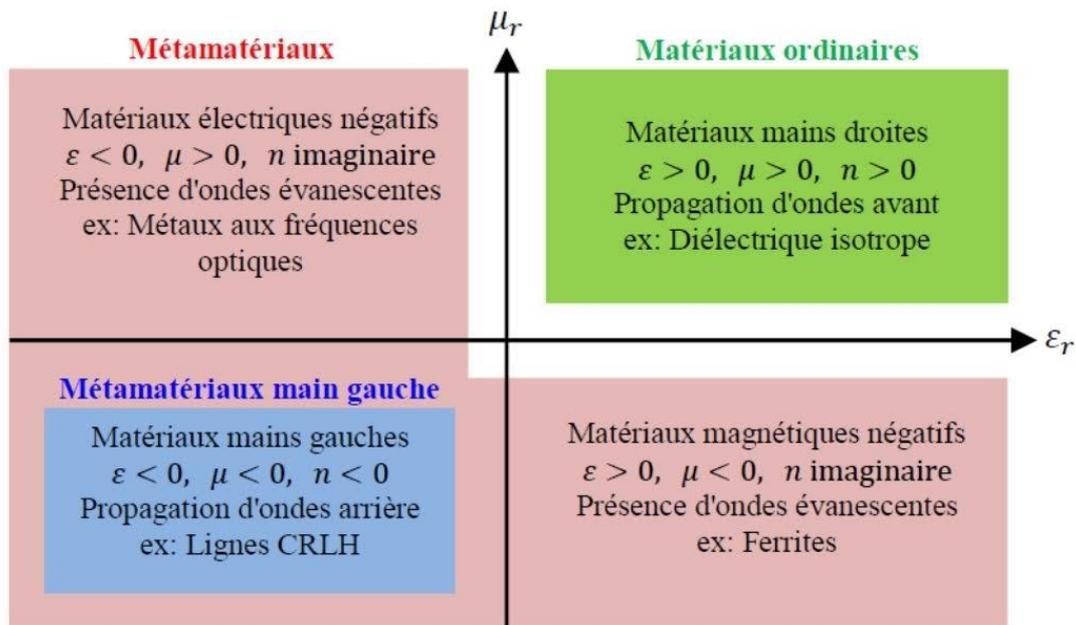


Figure I. 10– Classification des métamatériaux électromagnétiques selon les signes  $\epsilon$  et  $\mu$ [29].

#### I.4.2.1 Les matériaux doublement positif (DPS)

Les matériaux qui ont à la fois une permittivité et une perméabilité supérieures à zéro  $\epsilon > 0, \mu > 0$  sont appelés DPS (Matériaux Doublement Positive) [30]. La plupart des milieux courants (par exemple, les diélectriques) tombent sous cette désignation.

#### I.4.2.2 Les matériaux à permittivité Négative (ENG)

Si un matériau a une permittivité inférieure à zéro et une perméabilité supérieure à zéro ( $\epsilon < 0, \mu > 0$ ), on l'appelle matériau à permittivité négative (ENG, Epsilon Negative). Dans certains régimes de fréquence, de nombreux plasmas présentent ces caractéristiques. Les métamatériaux ENG utilisent un maillage métallique de fils minces en cuivre, en aluminium, en argent ou en or, disposés périodiquement (avec une période et un rayon de fil  $r$ , comme illustré dans la figure I.11 (a)). Ces fils métalliques parallèles présentent un comportement passe-haut pour une onde plane incidente, dont le champ électrique est parallèle aux fils [31]. Le réseau cylindrique affiche une permittivité négative en dessous de la fréquence de coupure, comme illustré dans la figure I.11 (b), et la réflexion totale est observée. Ce comportement est similaire à la propagation des ondes électromagnétiques dans un milieu plasmatique.

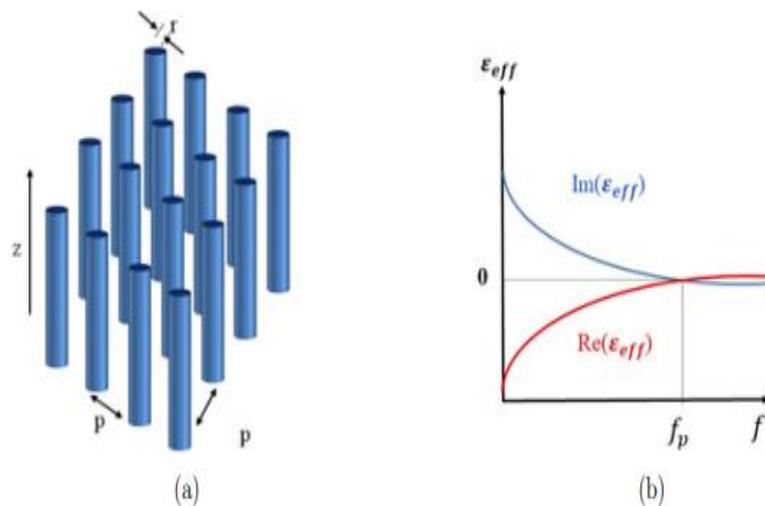


Figure I. 11– Un réseau de fils conducteurs minces (a), des tracés d'un réseau de fils (b) [30].

#### I.4.2.3 Les matériaux à perméabilité négative (MNG)

Si un matériau a une permittivité supérieure à zéro et une perméabilité inférieure à zéro ( $\epsilon > 0, \mu < 0$ ), on l'appelle matériau à perméabilité négative (MNG, Mu Negative). En tant que matériau à perméabilité négative MNG, la structure la plus utilisée est celle des résonateurs à anneaux fendus (SRR) [30]. Cette cellule unitaire est composée de deux anneaux métalliques concentriques (peut être un cercle ou un carré) et séparés par un espace 'd'. Chaque anneau possède une fente étroite, et ils sont espacés de 180 degrés de chaque côté (voir figure I.12 (a)). L'écart entre l'anneau intérieur et l'anneau extérieur agit comme un condensateur, tandis que les anneaux eux-mêmes agissent comme des inducteurs. Par conséquent, la combinaison des deux anneaux agit comme un circuit de résonance [30]. Le métamatériau formé par le réseau SRR présente une perméabilité négative dans une certaine région de fréquence au-dessus de la fréquence de résonance magnétique  $f_{mp}$ , comme le montre la figure I.12 (b) [30].

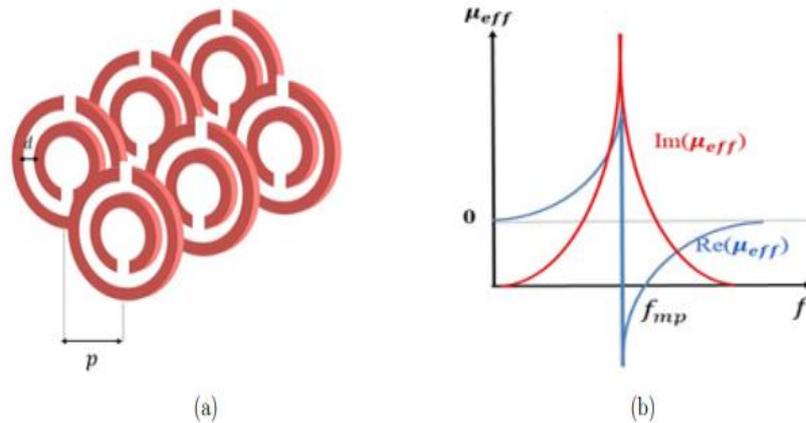


Figure I. 12– Un tableau de SRR (a), la perméabilité effective du tableau SRR (b) [30].

#### I.4.2.4 Les matériaux doublement négatifs (DNG)

Les matériaux DNG (Double Negative) sont des matériaux ayant simultanément une permittivité et une perméabilité négatives. Ces métamatériaux peuvent être réalisés par des cellules "imbriquées" ou des cellules "combinées". Les propriétés des métamatériaux DNG ont d'abord été obtenues en combinant la structure ENG à base de fil mince avec la structure MNG à base de SRR, comme illustré dans la figure I.1. Cette combinaison répond à l'exigence de  $\epsilon < 0$  à partir d'un fil/milieu rodé (comme diélectrique artificiel) et de  $\mu < 0$  à partir d'un résonateur à anneaux fendus (SRR) [30].

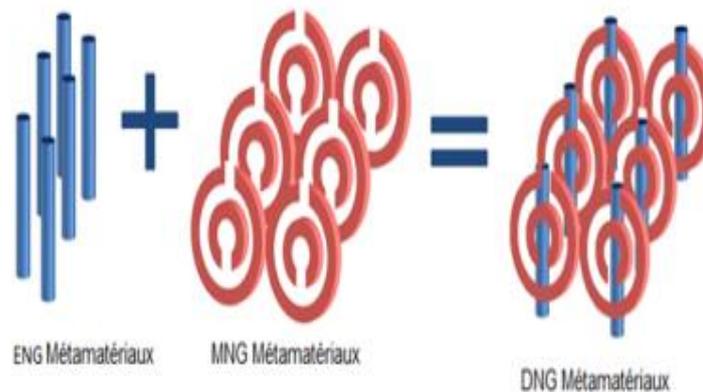


Figure I. 13– Combinaison de fils minces et SRR pour former des métamatériaux DNG [30].

### I.4.3 Structure des métamatériaux SRR et CSRR

#### I.4.3.1 Structure métamatériaux SRR

Le SRR, ou Split Ring Resonator, est une structure conçue par Pendry [32]. Elle est constituée d'un ou de plusieurs anneaux concentriques, fabriqués à partir de métaux non

magnétiques et souvent disposés sur un substrat diélectrique pour des raisons pratiques. Ces anneaux ont un rayon intérieur  $r$  et une largeur  $c$ , et ils sont interrompus par une fente de largeur  $p$ . Ils sont également séparés les uns des autres par une petite distance  $d$ . La configuration annulaire confère à la structure un comportement inductif, tandis que les différentes lacunes présentent un comportement capacitif [32].

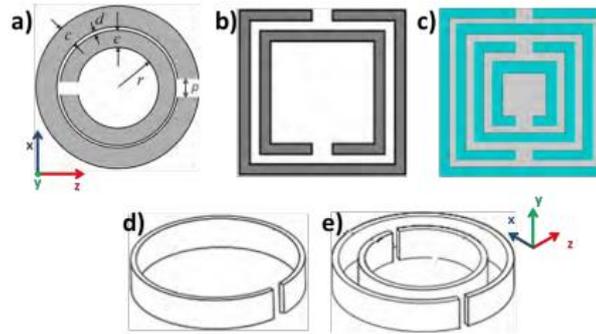


Figure I. 14– Représentation schématique des différents types de cellules élémentaires de la structures SRR : En 2D a) Double SRR-rond, b) Double SRR-carré et c) Multi SRR-carré ; en 3D d) SRR-rond simple et d) SRR-rond double [32]

#### I.4.3.2 Structure métamatériaux CSRR

La cellule complémentaire (CSRR), contrairement à la SRR, doit présenter une polarisation inversée. Dans ce cas, le champ  $E$  sera perpendiculaire au plan de la métallisation tandis que le champ  $H$  sera parallèle à celui-ci. Cette inversion des conditions de polarisation électromagnétique rend la cellule CSRR plus adaptée à une utilisation dans des dispositifs planaires [33].

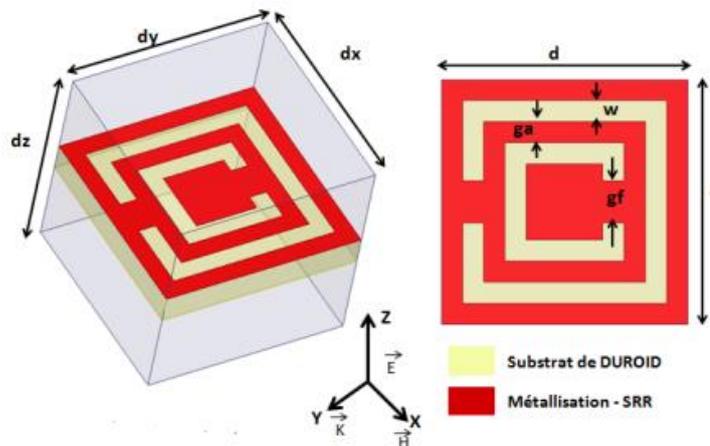


Figure I. 15– Configuration de la cellule unitaire CSRR dans sa boîte de calcul [33].

## I.5 La technologie 5G

### I.5.1 Spectre de fréquence de la 5G

Le déploiement de la technologie 5G implique l'utilisation de bandes de fréquences spécifiques sur le spectre des ondes radioélectriques. Le choix de la bande de fréquences est un compromis entre la couverture du réseau et sa capacité à transporter un volume élevé de données [35]. Pour garantir une bonne couverture, les fréquences basses sont privilégiées en raison de leurs meilleures propriétés de propagation. Elles permettent d'étendre la portée du signal et d'assurer une connectivité fiable sur de grandes distances. En revanche, pour augmenter la capacité du réseau et répondre aux demandes croissantes en termes de débit, les fréquences plus élevées sont préférées [34].

Les fréquences de 3.4 GHz à 3.8 GHz sont cruciales pour la 5G, et les antennes conçues pour cette bande doivent équilibrer la directivité, le gain, et l'adaptabilité pour maximiser les performances du réseau. Le spectre de fréquence de 3.4 GHz à 3.8 GHz est une partie essentielle de la bande C, utilisée couramment pour les déploiements 5G. Cette gamme de fréquences présente des avantages spécifiques en termes de conception et de performance des antennes [34].

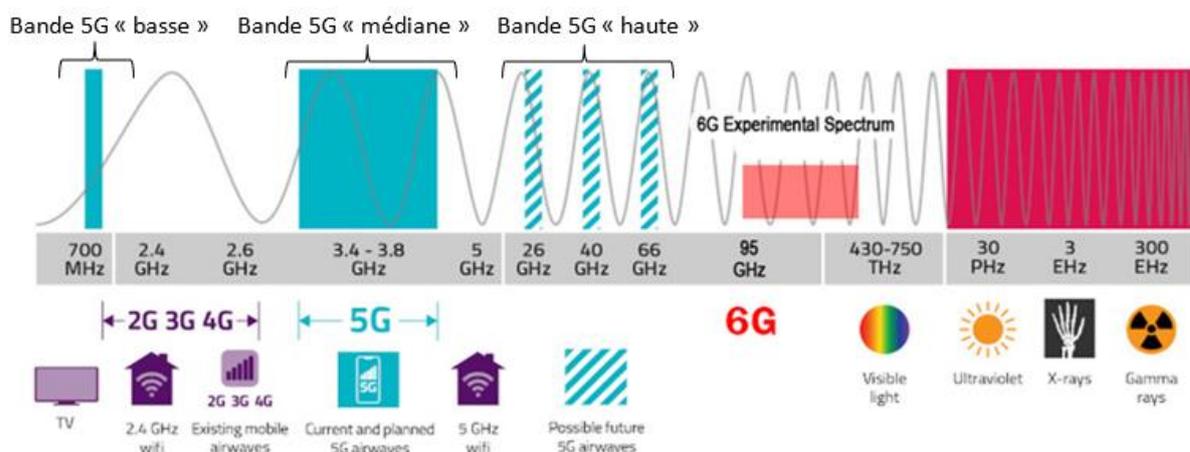


Figure I. 16– Spectre électromagnétique en 5G [34].

## **I.5.2 Caractéristiques des Antennes pour la Bande 3.4 GHz - 3.8 GHz**

Le spectre de fréquence de 3.4 GHz à 3.8 GHz est une partie essentielle de la bande C, utilisée couramment pour les déploiements 5G. Cette gamme de fréquences présente des avantages spécifiques en termes de conception et de performance des antennes [35].

### **I.5.2.1 Taille des Antennes**

À des fréquences de 3.4 GHz à 3.8 GHz, les antennes peuvent être relativement compactes tout en offrant des performances élevées. La longueur d'onde à ces fréquences est de l'ordre de quelques centimètres, ce qui permet des conceptions d'antennes efficaces et maniables [35].

### **I.5.2.2 Types d'Antennes**

Des antennes de type patch, micro-ruban, sont couramment utilisées pour cette gamme de fréquences en raison de leur efficacité et de leur capacité à gérer des signaux multiples [35].

## **I.5.3 Application des antennes imprimées miniature pour la 5G**

Les antennes imprimées miniatures sont essentielles pour réaliser les promesses de la 5G, offrant des avantages en termes de miniaturisation, performances à haute fréquence, flexibilité et coût. Leur application couvre une vaste gamme de secteurs, rendant possible une nouvelle génération de dispositifs connectés et intelligents, nous pouvons citer à titre d'exemple [36]:

**1. Smartphones et Tablettes:** La miniaturisation des antennes permet d'incorporer plusieurs antennes dans un espace réduit, améliorant la connectivité et la vitesse des appareils mobiles.

**2. IoT et Domotique:** Les antennes imprimées miniatures sont idéales pour les dispositifs IoT nécessitant une connectivité 5G, tels que les capteurs domestiques, les caméras de sécurité, et les appareils électroménagers intelligents.

**3. Véhicules Connectés :** Dans les véhicules, les antennes imprimées peuvent être intégrées dans des espaces restreints, supportant des communications rapides et fiables pour les systèmes de navigation et de divertissement.

**4. Santé et Bien-être :** Les dispositifs portables et les vêtements intelligents utilisent des antennes imprimées pour transmettre des données de santé en temps réel via la 5G, améliorant les soins et le suivi des patients.

## **I.6 Conclusion**

Dans ce premier chapitre, nous avons proposé un aperçu des antennes patch imprimée, en abordant leurs caractéristiques, les techniques d'alimentation utilisées et les paramètres permettant de décrire leurs performances. Nous avons également discuté du concept des métamatériaux en mettant en avant leurs propriétés, leurs classifications ainsi que leurs différents types, qui ont été brièvement présentés. Pour des applications planaires, nous avons proposé, ensuite, la conception d'une cellule SRR complémentaire, même nous avons concevoir une antenne patch miniature a 3.5GHz à base de métamatériaux pour applications en 5 G dans la bande de fréquence [3.4-3.8] GHz.

# Chapitre *II*

---

Simulations et résultats

---

## SIMULATIONS ET RÉSULTATS

### II . Introduction

L'objectif de notre travail de mémoire est de simuler, miniaturiser et concevoir une antenne patch de forme circulaire. Les résultats de simulations présentés ont été obtenus en utilisant le logiciel de simulation électromagnétique CST (MICROWAVE STUDIO), en se concentrant sur le coefficient de réflexion  $S_{11}$ , la bande passante, le diagramme de rayonnement et la distribution de courant. L'antenne circulaire miniature proposée est adaptée à la fréquence de 3.5 GHz dans la bande [3.4-3.8] GHz destinée aux applications de la 5G.

Nous allons commencer par une présentation du logiciel de simulation, suivie par la définition du cahier de charge utilisé dans notre travail. Par la suite, nous allons présenter toutes les étapes de la miniaturisation de l'antenne circulaire proposée avec la technique des méta matériaux CSRR. Les résultats de simulation obtenus sont présentés et discutés dans les sections appropriées. Enfin, le prototype de l'antenne circulaire miniature proposé sera présenté avec ses résultats de mesure.

#### II.1 Présentation de l'outil de simulation

CST STUDIO SUITE est une entreprise créée en 1992 qui a été développée pendant de nombreuses années afin de proposer des solutions de calcul parmi les plus performantes et précises dans le domaine de la conception électromagnétique [37], [39]. Un logiciel spécialement conçu pour la simulation électromagnétique en 3D des composants haute fréquence (HF), comme les antennes, les filtres et les coupleurs, est CSTMICROWAVE STUDIO (CST MWS). La technique des intégrales finies (FIT : Finite Integration Technique) est employée dans les simulations réalisées avec CST MWS ce qui permet de résoudre les problèmes électromagnétiques (EM) en utilisant les équations de Maxwell sous forme intégrale [3], [38]. Cet outil présente, comme tous les simulateurs 3D, l'avantage de pouvoir

toutes sortes de structures homogènes, peu importe la technologie utilisée [8], [39].

Ce programme offre les avantages suivants :

- Il offre la possibilité de traiter différentes structures, qu'elles soient homogènes ou inhomogènes, peu importe le type de technologie utilisée.
- Il nécessite de grandes ressources informatiques.
- Les calculs nécessitent la résolution de grands systèmes matriciels.
- Avant de débiter un projet, il est primordial de maîtriser parfaitement le logiciel, surtout si celui-ci inclut des opérations complexes. Cela est particulièrement vrai pour la conception de structures sans forme géométrique définie et pour la gestion des conditions aux limites afin d'éviter les conflits entre une surface de radiation et une surface conductrice [3].

Cependant, le logiciel présente également quelques inconvénients :

- La simulation a une durée variable en fonction du volume du projet, ce qui entraîne une fluctuation de la durée.

### II.1.1 Description générale du logiciel :

Tout d'abord, pour démarrer la simulation, lancez le logiciel et une interface apparaîtra pour créer un nouveau projet, comme illustré dans la Figure (II-1). Ensuite, cliquez sur "create project" et choisissez le type ainsi que la zone de simulation que vous souhaitez réaliser, comme indiqué dans la Figure (II-2).

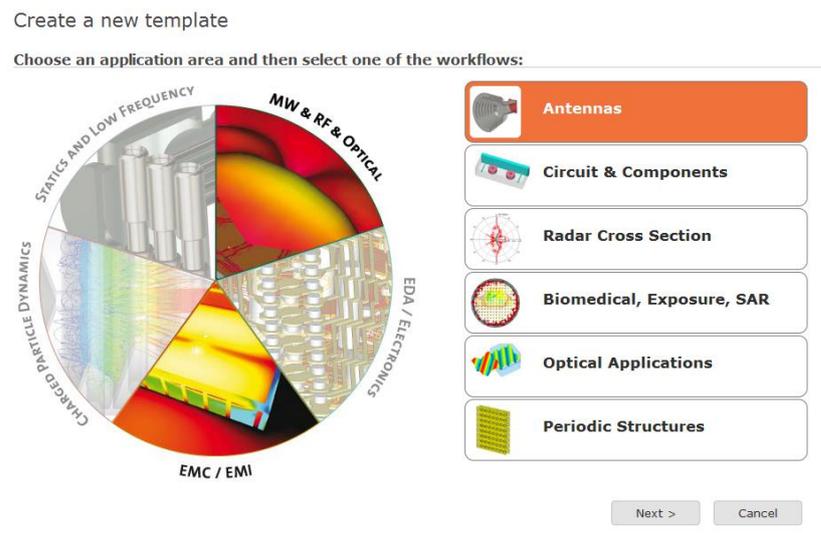


Figure II. 1– Création d'un nouveau projet.

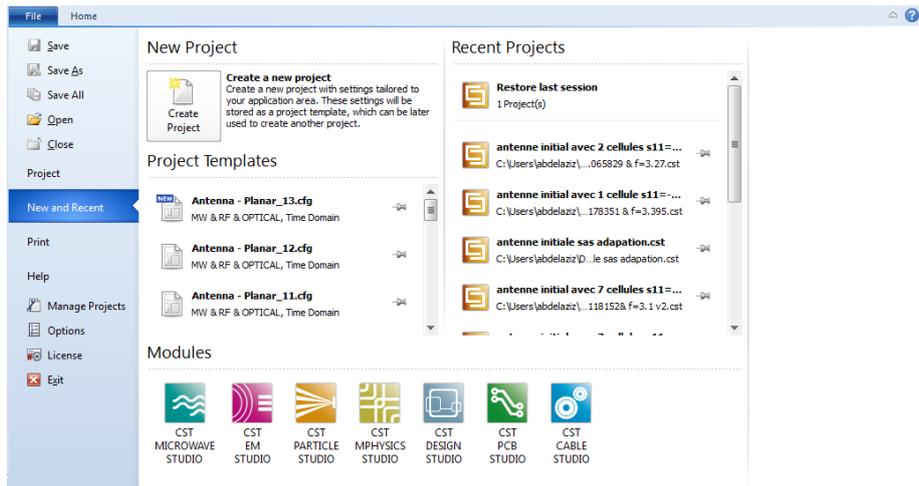


Figure II. 2– Choix du type et de la zone de simulation

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

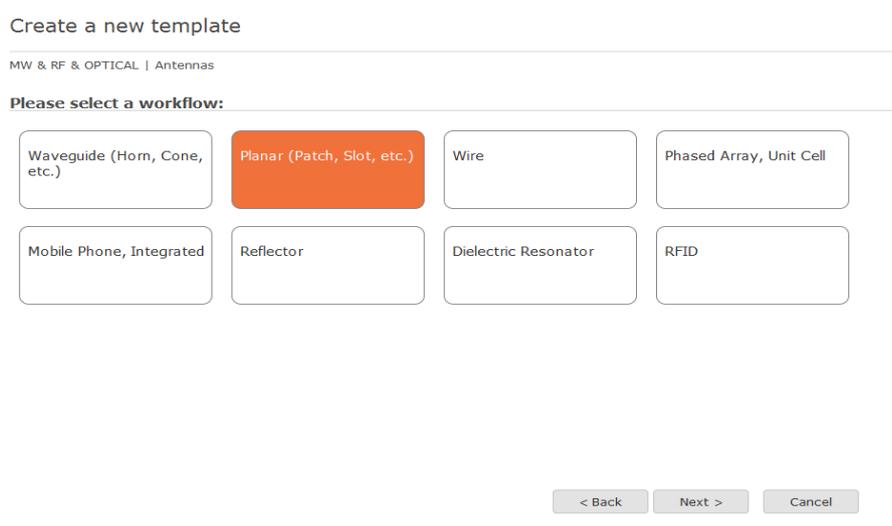


Figure II. 3– Choix du type d'antenne

Contrairement à d'autres logiciels de simulation électromagnétique, CST propose différentes techniques de simulation dans le but d'être utilisé dans plusieurs domaines de recherche. Parmi les techniques proposées par CST, nous nous intéressons particulièrement au "Domaine Temporel" (Time Domain).

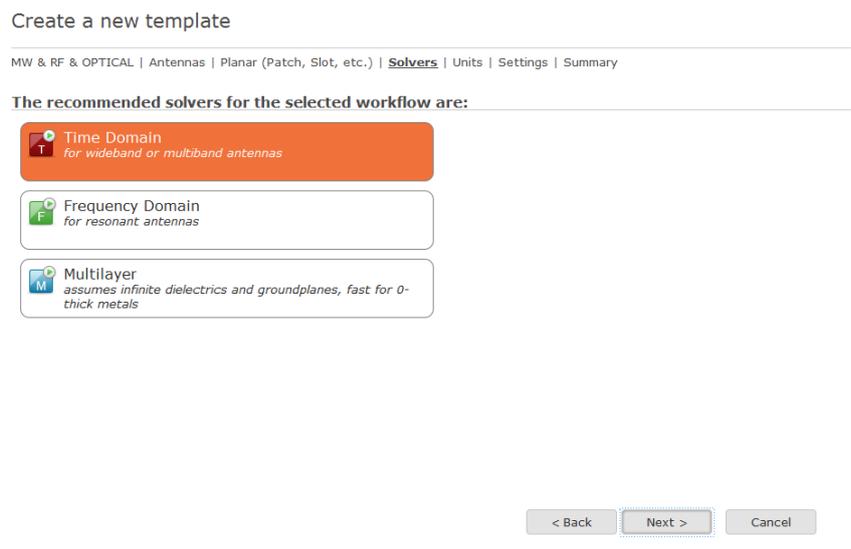


Figure II. 4– Choix de la technique de simulation

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

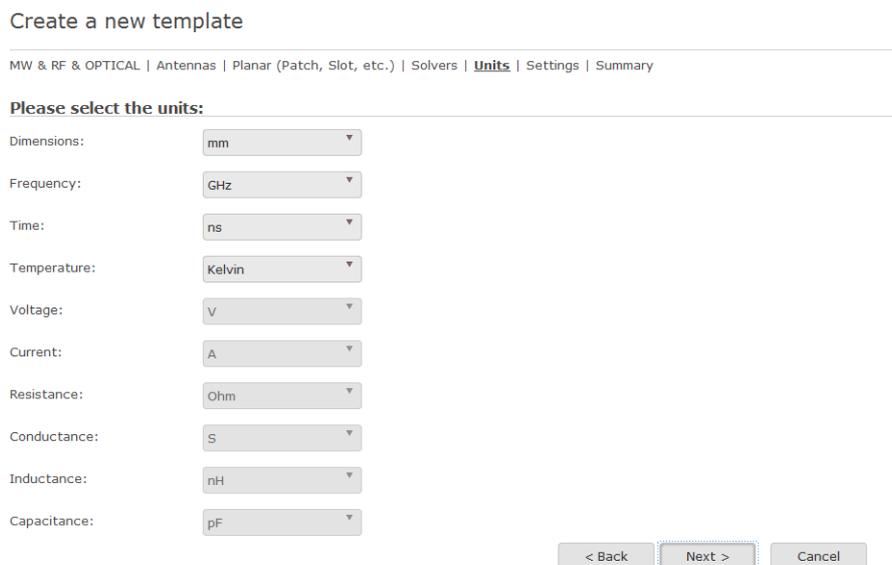


Figure II. 5– choix des unités de différents paramètres

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

### II.1.2 L’Interface de CST

L’interface utilisateur est commune à tous les modules, assurant un environnement cohérent, qui accélère la prise en main lors de la diversification des simulations Les outils

principaux sont accessibles sur le ruban. L'interface contient les fonctionnalités permettant la modélisation, la gestion de la simulation et le post-traitement.

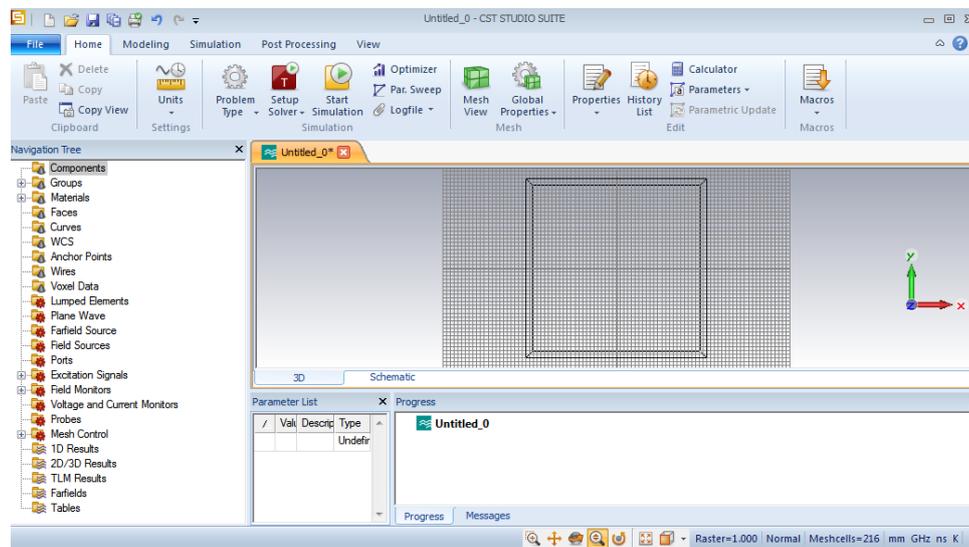


Figure II. 6– Interface principal de logiciel CST

## II. 2 Conception et simulation d'une antenne patch circulaire

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

### Le cahier de charge

Les composants de l'antenne	Le type de matériaux	La hauteur (mm)	Permittivité diélectrique
Le patch	Cuivre	0.035	----
Le plan de masse	Cuivre	0.035	----
Le substrat	FR-4	1.5	4.3
La ligne d'alimentation	Cuivre	0.035	-----

Tableau II 1– cahier de charge de l'antenne proposée

L'antenne simulée est donnée par la figure II.7:

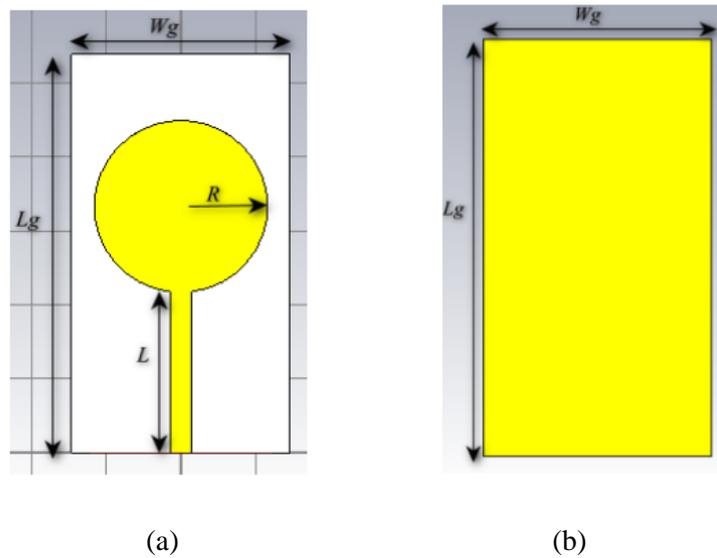


Figure II. 7– Géométrie de l'antenne circulaire

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

Paramètres de l'antenne patch circulaire	Equation	Légende
Le rayon R	$R = F \left\{ 1 + \frac{2h}{\pi F \epsilon_r} \left[ \ln \left( \frac{\pi F}{2h} \right) + 1.7726 \right] \right\}^{-1/2}$ <p>Avec :</p> $F = \frac{8.791 \times 10^9}{f r \sqrt{\epsilon_r}}$	Fr : fréquence de Résonance
Longueur effective de la ligne (Leff)	$L = \frac{C}{2f \sqrt{\epsilon_r}}$	εr : permittivité du substrat
Plan de masse et substrat	$L_g = 2 * R + L_0 + 6 * h$ $W_g = 2 * R + 6 * h$	h : l'épaisseur du substrat

Tableau II 2– Paramètres de l'antenne patch circulaire

**Avec :**

**h** : l'épaisseur du substrat

**Fr** : fréquence de résonance.

Les dimensions du substrat et du plan de masse ( $L_g$ ,  $W_g$ ) sont données en fonction des dimensions du patch par les relations empiriques suivantes :

$$L_g = 2 \times R + L + 6 \times h$$

$$W_g = 2 \times R + 6 \times h$$

Les valeurs des dimensions de l'antenne patch sont données sur le tableau II.3 :

Paramètres	Dimensions (mm)
R	11.7
$L_g$	53.9
$W_g$	32.2
L	21.7
Wl	2.9

Tableau II 3– Paramètres géométriques de l'antenne de base.

### II.2.1 Résultat de simulation :

Le coefficient de réflexion de l'antenne initiale est donné par la Figure II. 1.

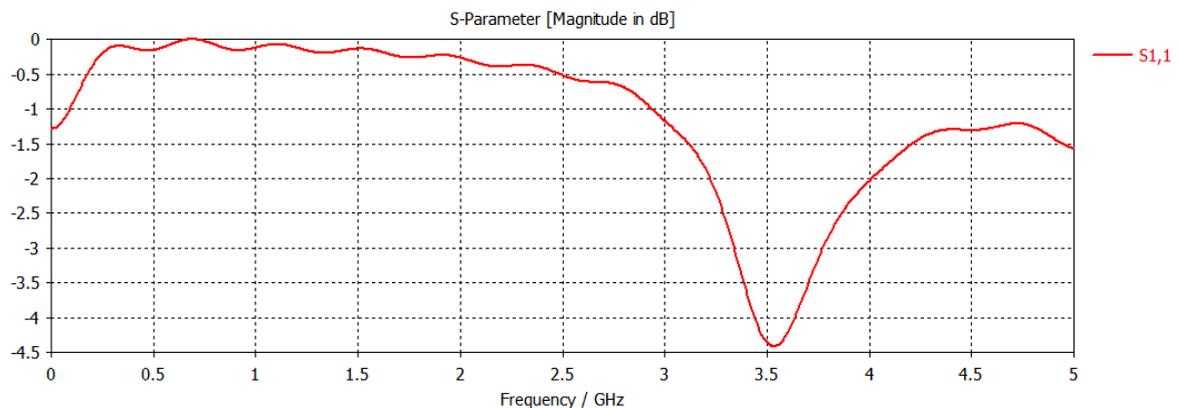


Figure II. 8– Coefficient de réflexion de l'antenne initiale.

La figure montre un coefficient de réflexion de  $-4.5$  dB à la fréquence  $3.535$  GHz, l'antenne n'est pas adaptée pour la 5G.

### II.3 Adaptation de l'antenne patch circulaire :

Pour adapter l'antenne, on a utilisé la technique d'adaptation avec encoche. Les encoches sur le patch et la ligne d'alimentation ont été utilisées, comme illustré dans la figure II.9.

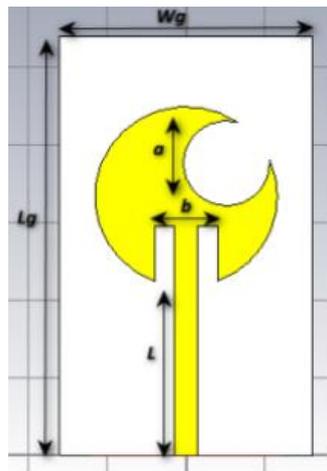


Figure II. 9– Antenne circulaire avec encoches.

#### II.3.1 Résultats de simulations

##### II.3.1.1 paramètre S11

Nous avons fait une étude paramétrique sur les encoches de dimensions ( a, b) de l'antenne de la figure II.9, les valeurs retenues sont présentés dans le tableau II.4.

Simulations	Dimensions des encoches		Résultat	
	a	b	Fr (GHz)	S11
Simulation A	5.7	4.7	3.4795	-25.177
Simulation B	4.5	5.3	3.5159	-21.479
Simulation C	4	5.5	3.6333	-19.769
Simulation D	5.3	4.3	3.5365	-50.368
Simulation E	5.5	4.5	3.5001	-28.284

Tableau II 4– Etudes paramétriques

Les conclusions de la simulation sont présentées dans la figure II.10.

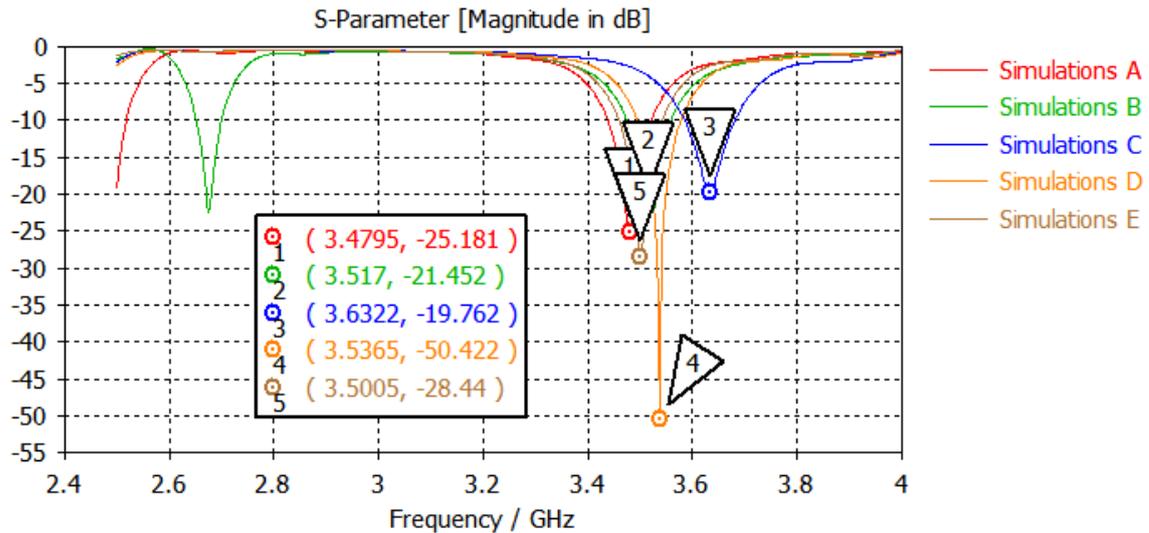


Figure II. 10– Coefficient de réflexion de l’antenne patch circulaire proposée

La figure II.10 montre que la meilleure adaptation est obtenue avec un S11 de -28.44 dB à 3.5GHz.

### II.3.1.2 VSWR

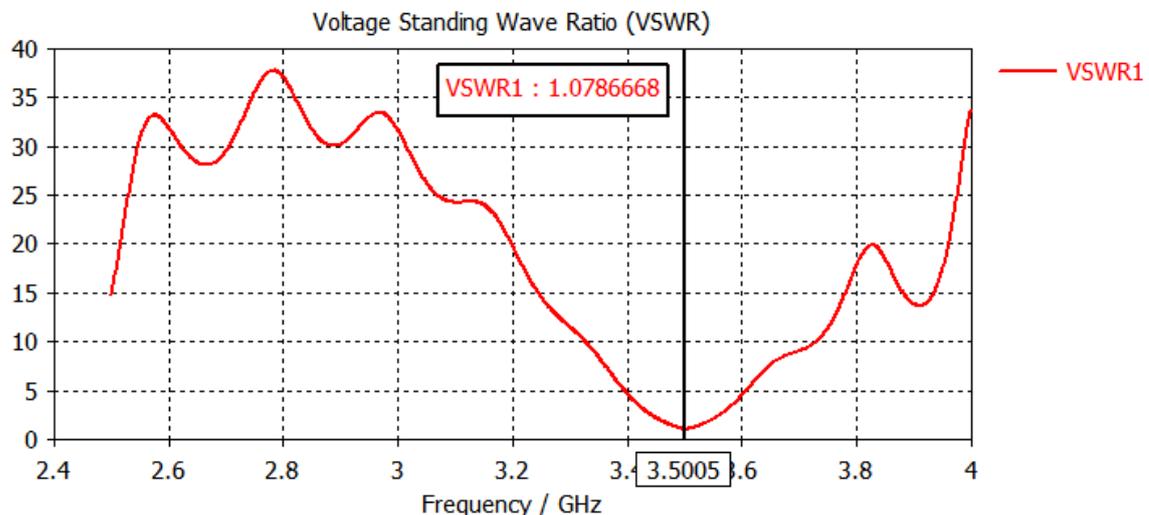


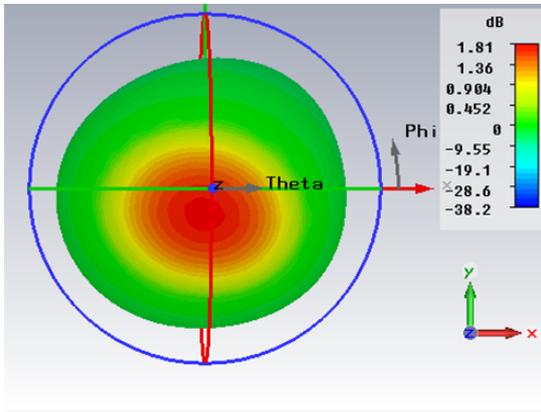
Figure II. 11– VSWR de l’antenne circulaire.

La figure II.11 donne un VSWR de 1.078 à la fréquence 3.5GHz, l’antenne est très bien adaptée.

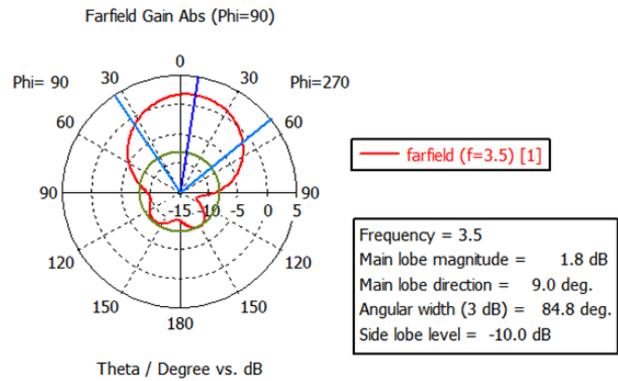
### II.3.1.3 Diagramme de rayonnement

CST offre la possibilité de voir les graphiques de rayonnement en 3D de l’antenne, ce qui présente la distribution de l’énergie dans l’espace, cela permet de donner des informations

sur le gain et la directivité de l'antenne. Il offre également la possibilité de visualiser le rayonnement sur un plan polaire (2D), ce qui permet d'obtenir une idée sur l'angle d'ouverture. Les figures (II-12 – II-13) présentent respectivement le diagramme de rayonnement en 3D et polaire de notre antenne circulaire initiale proposée.

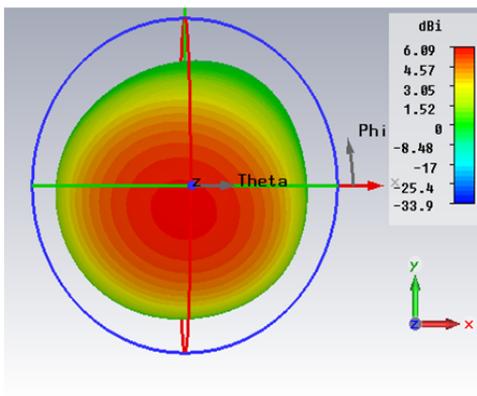


(a)

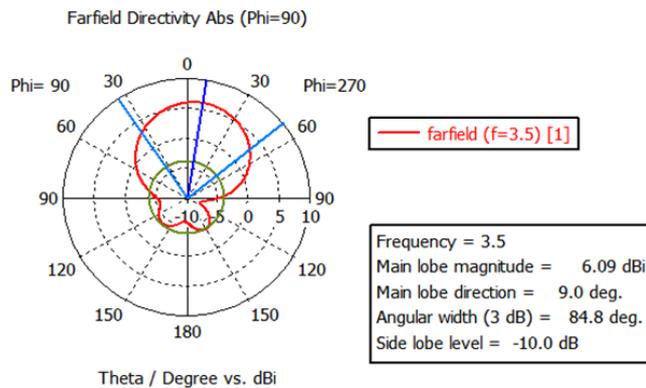


(b)

Figure II. 12– Diagramme de rayonnement en gain de l’antenne circulaire proposée



(a)



(b)

Figure II. 13– Directivité de l’antenne circulaire proposée

D’après les figures II.12 et II.13, Les diagrammes de rayonnement de l'antenne circulaire initiale sont clairement présentés et simulés sous CST sont quasi-omnidirectionnels dans le plan supérieur avec un gain de 1.81 dB et une directivité de 6.09 dBi, l’angle d’ouverture de cette antenne est de 84.8deg.

## II.4 Miniaturisation de l'antenne patch circulaire proposée

Dans ce qui suit, nous allons miniaturiser l'antenne patch circulaire avec les cellules métamatériaux CSRR, pour permettre son intégration dans les nouveaux dispositifs électroniques comme les smart phones.

### II.4.1 Etude de la cellule CSRR

La figure II. 14 illustre la structure de la cellule métamatériaux CSRR utilisée dans notre travail. Les dimensions de la cellule métamatériaux CSRR proposée sont présentées dans le Tableau II. 5.

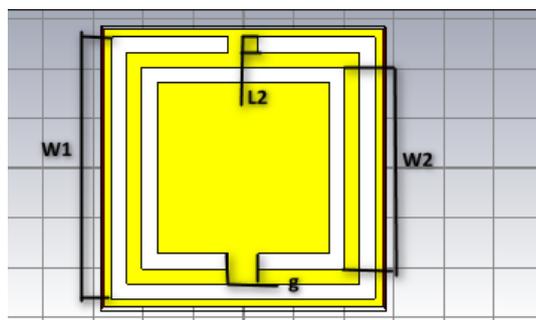


Figure II. 14– La cellule CSRR [41]

Paramètres	Dimensions (mm)
W2	4
W1	5.2
L2	0.3
G	0.59

Tableau II 5–Dimensions de la cellule métamatériaux CSRR proposée [41]

La Figure II.2 présente les résultats de simulation en termes de Coefficients de réflexion S11 et de transmission S21 :

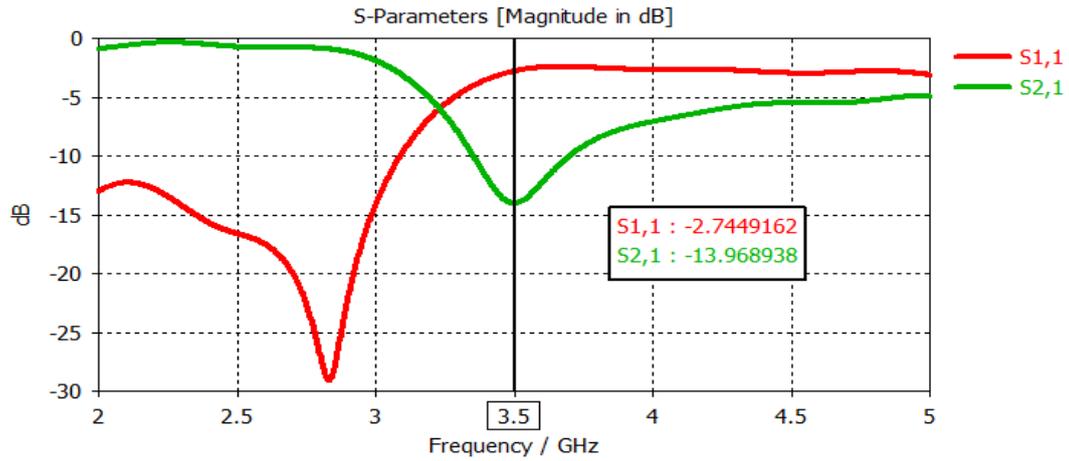


Figure II. 15– Coefficients de réflexion et de transmission de la cellule CSRR.

La figure II.15 donne des valeurs inférieures à -2,74 dB et -13,97 dB respectivement à la fréquence de résonance de 3,5 GHz.

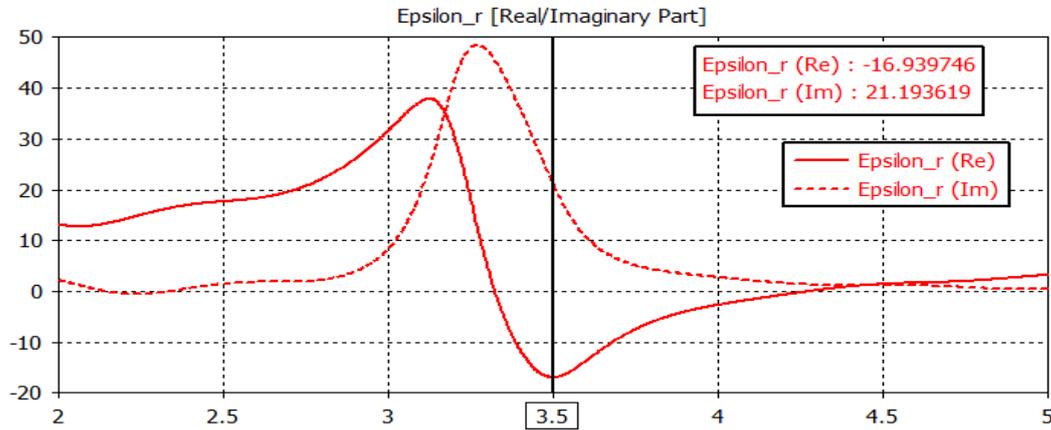


Figure II. 16– La permittivité de la cellule CSRR proposée.

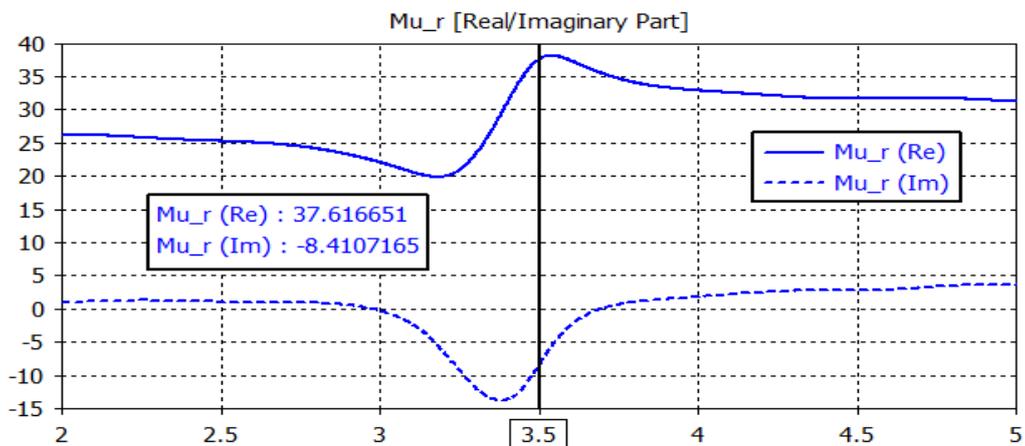
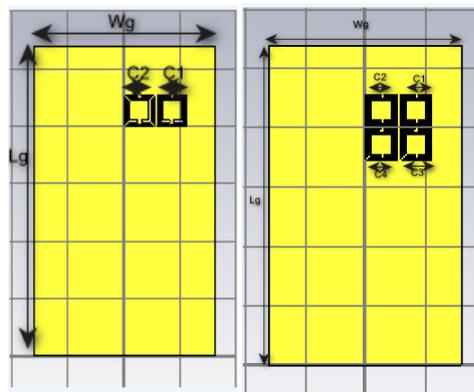


Figure II. 17– la perméabilité de la cellule CSRR proposée.

Les Figures II.3 et II.4 présentent la permittivité relative ( $\epsilon_r$ ) et la perméabilité relative ( $\mu_r$ ) de la cellule CSRR respectivement. La permittivité relative ( $\epsilon_r$ ) présente une partie réelle négative dans la bande de fréquence autour de la résonance de 3,5 GHz. En revanche, la partie réelle de la perméabilité relative ( $\mu_r$ ), demeure positive sur toute la plage de travail. Dans ce qui suit nous allons insérer cette cellule sur le plan de masse de l'antenne patch circulaire proposée pour sa miniaturisation.

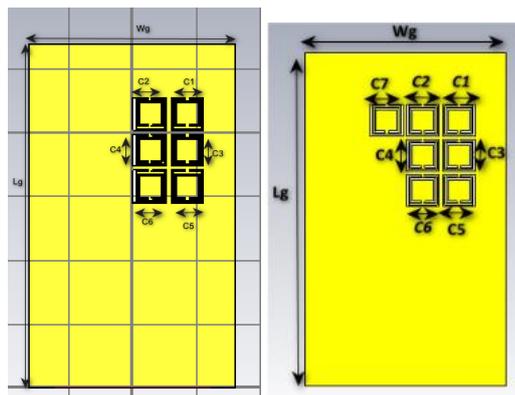
**II.4.2 Insertion des cellules CSRR sur le plan de masse de l'antenne circulaire**

La Figure II. 5 illustre le plan de masse de l'antenne circulaire chargée avec 2, 4, 6, 7 cellules CSRR pour atteindre une meilleure miniaturisation de l'antenne :



(2 cellules CSRR)

(4 cellules CSRR)



(6 cellules CSRR) (7 cellules CSRR)

Figure II. 18– insertions de la cellule CSRR sur le plan de masse.

### II.4.3 Résultats de simulations

#### II.4.3. 1 Coefficients de réflexions

La figure II.19 montre les résultats de simulation du S11 après l'insertion des cellules CSRR (C2, C4, C6, C7) sur le plan de masse :

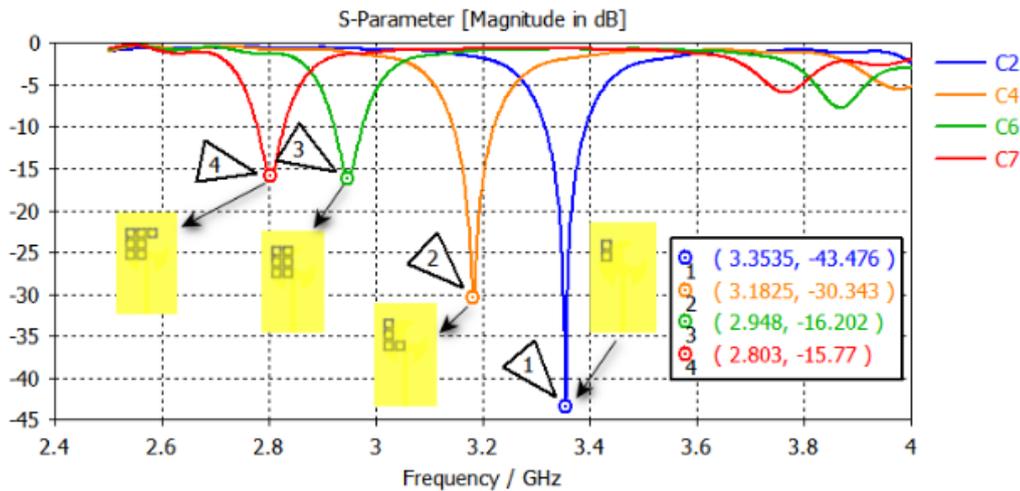


Figure II. 19– Résultats du coefficient de réflexions avec cellule CSRR

Nous remarquons qu'après insertion de 7 cellules CSRR, la fréquence est diminuée à 2.80GHz, nous allons maintenant miniaturiser puis adapter l'antenne circulaire à la fréquence 3.5 GHz. Plusieurs études paramétriques ont été établies sur les dimensions de l'encoche du patch et la ligne d'alimentation, pour atteindre la fréquence souhaitée dans la bande [3.4-3.8] GHz.

#### II.4.3. 2 Etudes paramétriques :

Le tableau II-6 affiche les résultats de l'analyse paramétrique concernant les dimensions de l'antenne patch circulaire miniature :

Paramètres	Dimensions initiales	Simulation A	Simulation B	Simulation C	Simulation D	Simulation E
R (mm)	11.6	11	10.7	10	9.6	9
L (mm)	21.7	21	20.3	19.7	18.4	17.8

Tableau II 6– Etudes paramétriques des dimensions de l'antenne circulaire miniature.

La Figure II. 20 montre les résultats de simulations de l'étude paramétrique effectuée :

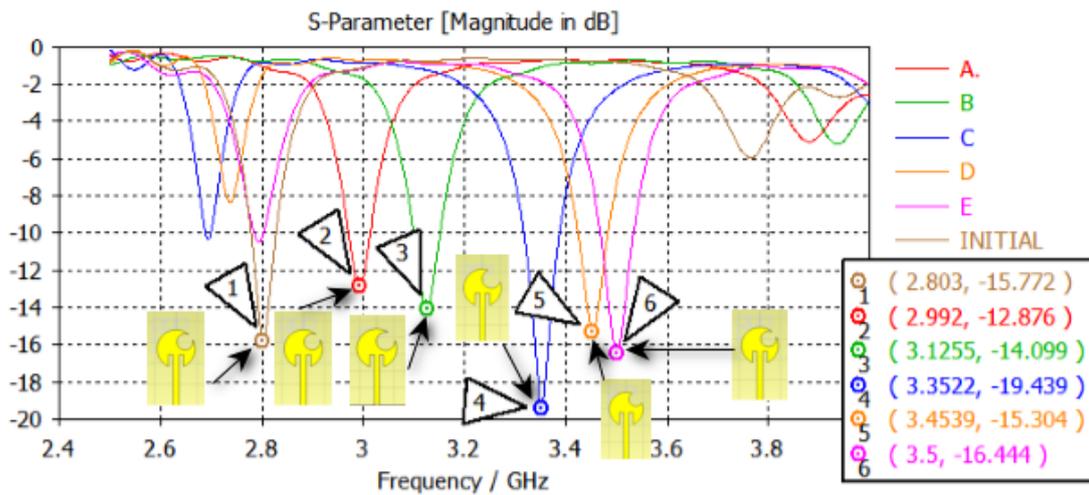


Figure II. 20– Résultats du Coefficient de réflexion S11 avec l’étude paramétrique

La figure II.21 montre le résultat final de l’antenne patch circulaire miniature à la fréquence 3.5 GHz avec les dimensions du tableau II.7 :

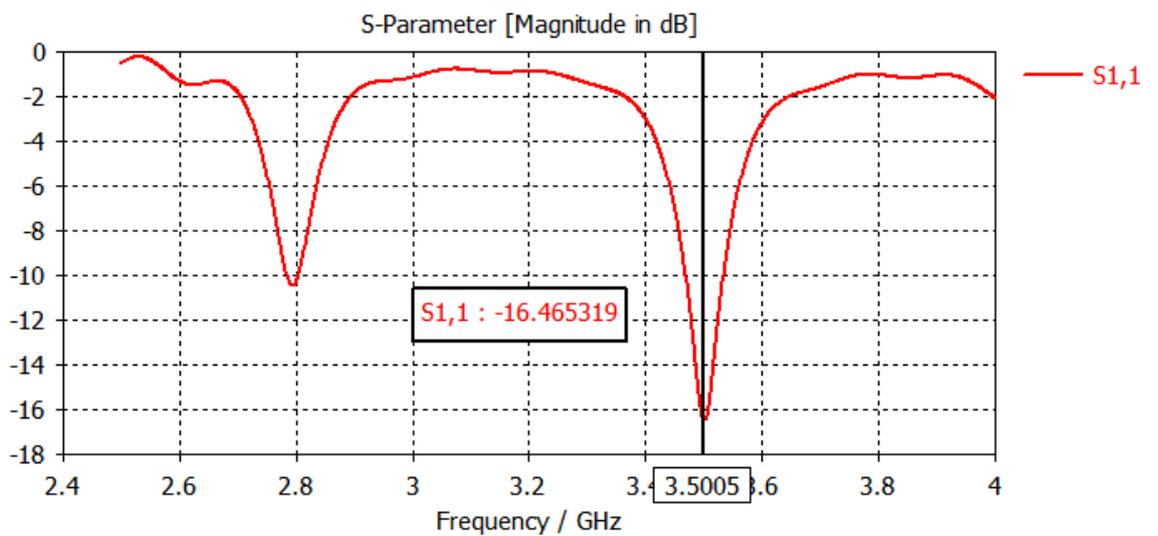


Figure II. 21– Coefficient de réflexion S11 de l’antenne patch circulaire miniature à la fréquence 3.5GHz

Paramètres	Dimensions initiales	Dimensions finales
R (mm)	11.6	9
L (mm)	21.7	17.8

Tableau II 7– Dimensions finale de l’antenne circulaire miniature.

D’après le tableau II.7, le taux de miniaturisation atteint est de 30.30%.

**II.4.3. 3 VSWR**

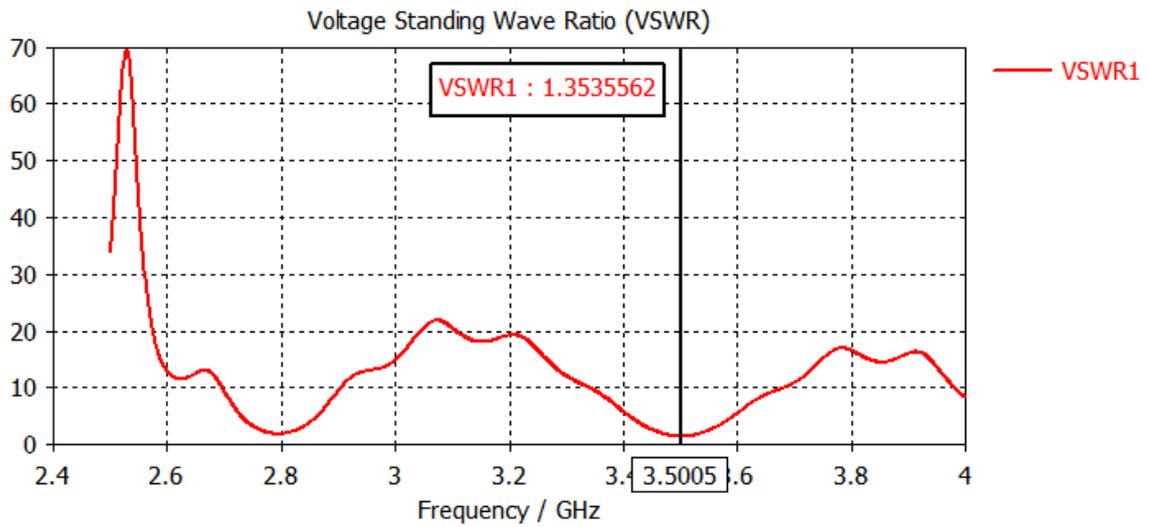


Figure II. 22– VSWR de l’antenne miniature proposée.

La figure II-22 montre que le paramètre VSWR est de 1.35 à la fréquence 3.5GHz

**II.4.3.4 Diagramme de rayonnement**

Les figures (II.23 – II.24) présentent respectivement le diagramme de rayonnement en 3D et polaire de notre antenne circulaire miniature proposée.

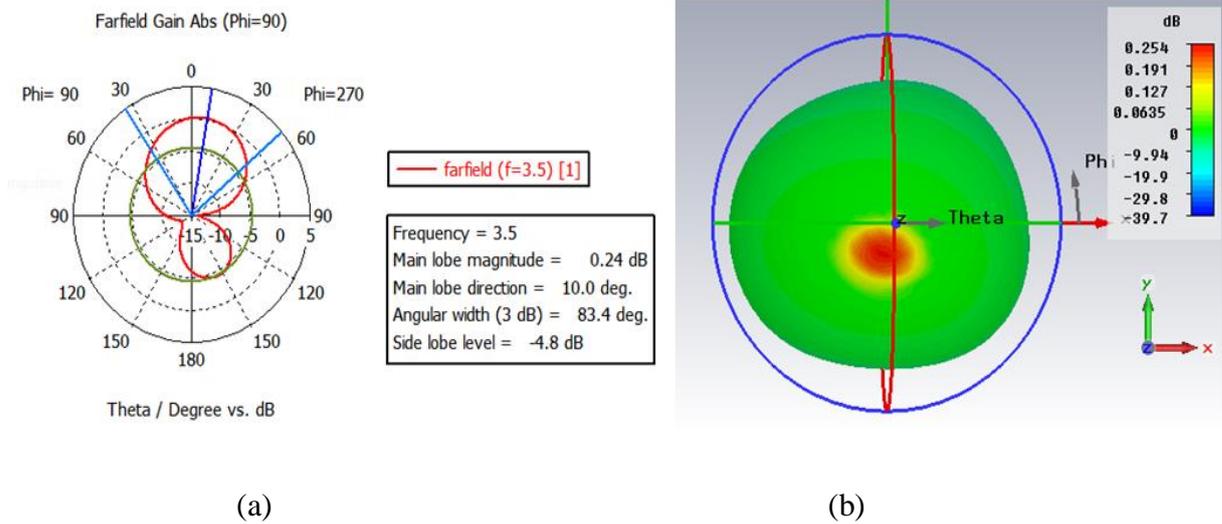


Figure II. 23– Diagramme de rayonnement en gain de l'antenne circulaire miniature proposée, (a) Gain en 3D et (b) en polaire.

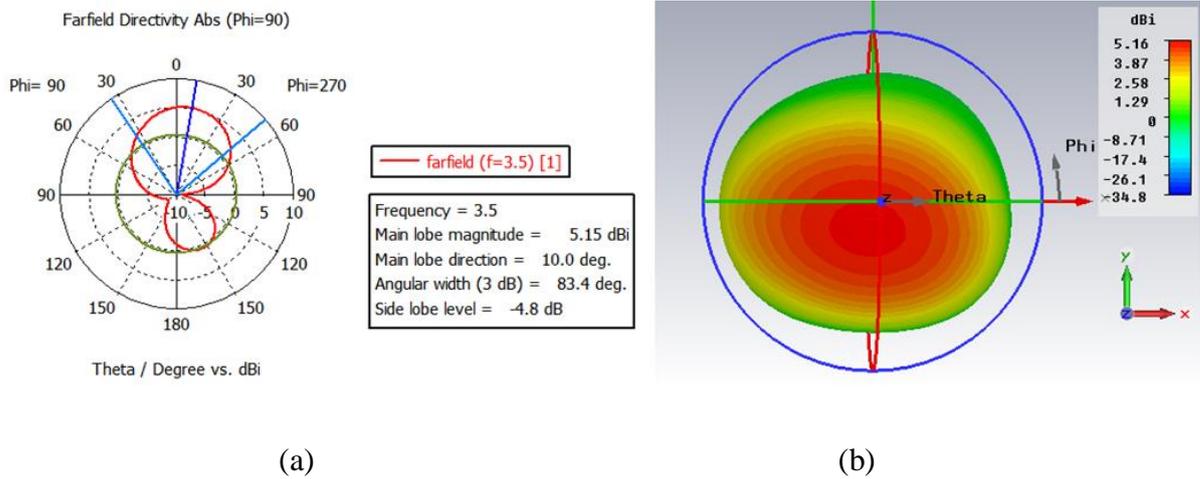


Figure II. 24– Diagramme de rayonnement en directivité de l'antenne circulaire miniature proposée, (c) 3D et (d) en polaire.

Figure II.22 montre un gain de 0.2546 dB qui est faible pour usage dans des applications de la 5G. Nous allons introduire dans la session suivante pour la méthode du plan de masse partiel pour une bonne amélioration du gain.

## II.5 Amélioration du gain de l'antenne patch circulaire miniature proposée

Deux fentes seront ajoutées sur le plan de masse pour augmenter le gain de l'antenne. La configuration finale de notre antenne patch circulaire miniature proposée est illustrée dans la figure II-25.

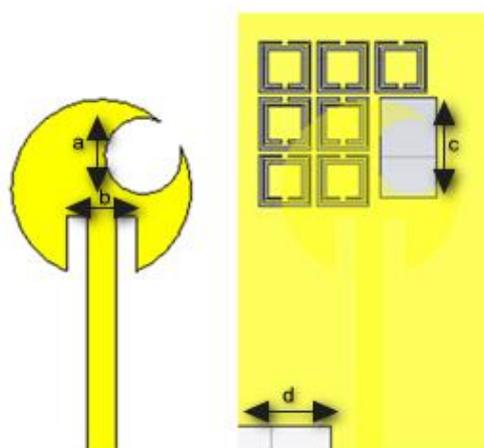


Figure II. 25– La géométrie finale de l'antenne patch circulaire miniature proposée.

Les dimensions finales de l'antenne patch miniature sont données sur le tableau II.8 :

Paramètres	Dimensions (mm)
R	9
Lg	44.8
Wg	27
L	17.8
Wl	2.9

Tableau II 8– Dimensions finale de l’antenne patch circulaire miniature.

### II.5.1 Résultats de simulations

#### II.5.1.1 Coefficient de réflexion

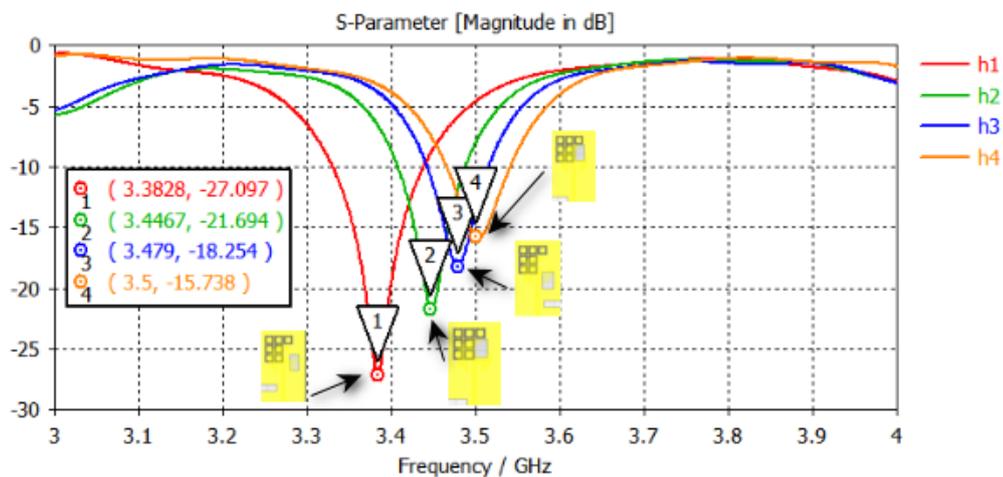


Figure II. 26– Coefficients de réflexion S11 de l’antenne miniature proposée avec la technique de plan de masse partiel.

Après usage de la technique du plan de masse partiel, nous avons réussi à adapter l’antenne patch circulaire miniature à la fréquence 3.5GHz avec un S11 de -15.73dB comme la montre la figure II.26.

### II.5.1.2 VSWR

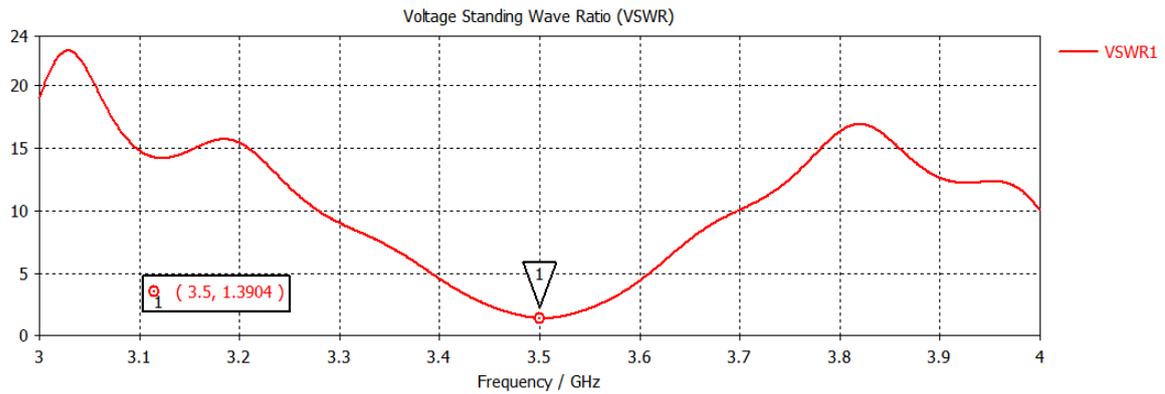


Figure II. 27– VSWR de l’antenne miniature proposée.

La figure II-27 montre que le paramètre taux d’onde stationnaire (VSWR1) présente une valeur de 1.3904, il est inférieur à 2, ce qui résume que l’antenne miniature est bien adaptée.

### II.5.1.3 Diagramme de rayonnement

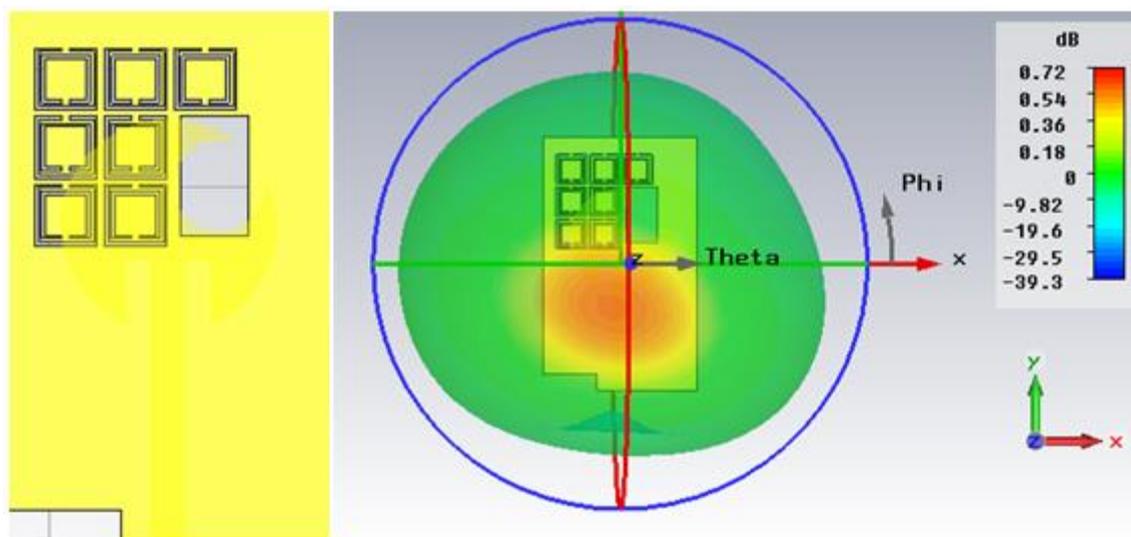


Figure II. 28– Diagrammes de rayonnement de l’antenne patch circulaire miniature adapté à 3.5GHz.

La figure II.28 montre une amélioration du gain à la valeur de 0.72 dB. L’antenne peut être utilisée pour des applications de la 5G.

### II.5.1.4 La distribution de courant

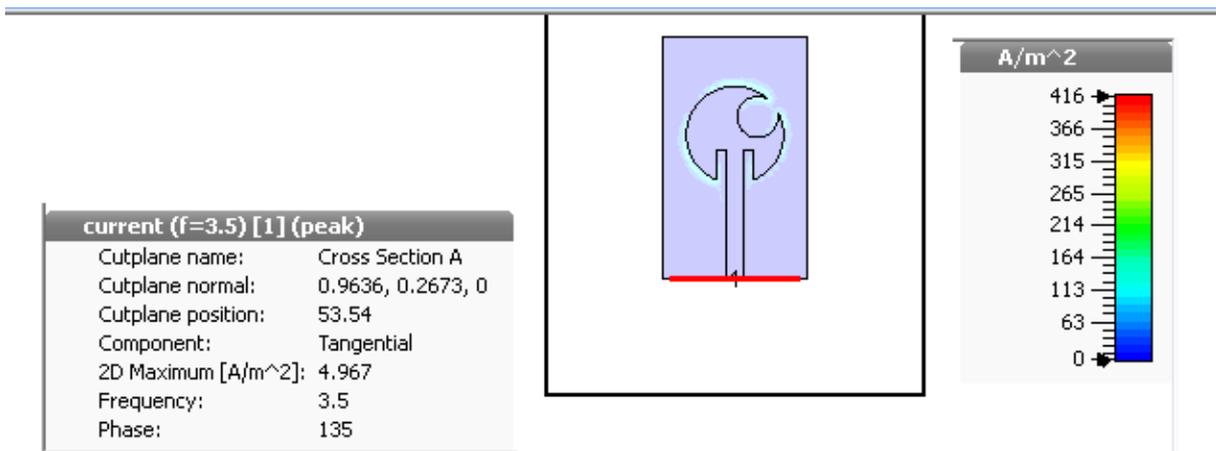


Figure II. 29– La distribution de courant de l’antenne patch circulaire miniature.

La figure II.29 montre la distribution du courant sur l’antenne patch circulaire miniature.

### II.6 Prototype et mesure des antennes patch circulaire simple et miniature

Nous avons fabriqué et testé nos antennes patch en forme circulaire simple et miniature dans le laboratoire de télécommunications de Tlemcen, en utilisant un analyseur de réseau VNA (23 MHz - 6200 MHz). Figure II.30 et 31 illustrent les résultats des mesures, où nous avons obtenu un S11 de -13,5 dB à la fréquence de 3.542 GHz et -14.6dB à la fréquence 3.562 GHz. Ces résultats concordent avec ceux des simulations, ce qui nous permet de conclure que notre antenne est prête à être intégrée pour des applications dédiées à la 5G.



Figure II. 30–Mesure de l'antenne patch circulaire simple avec l'analyseur réseau.

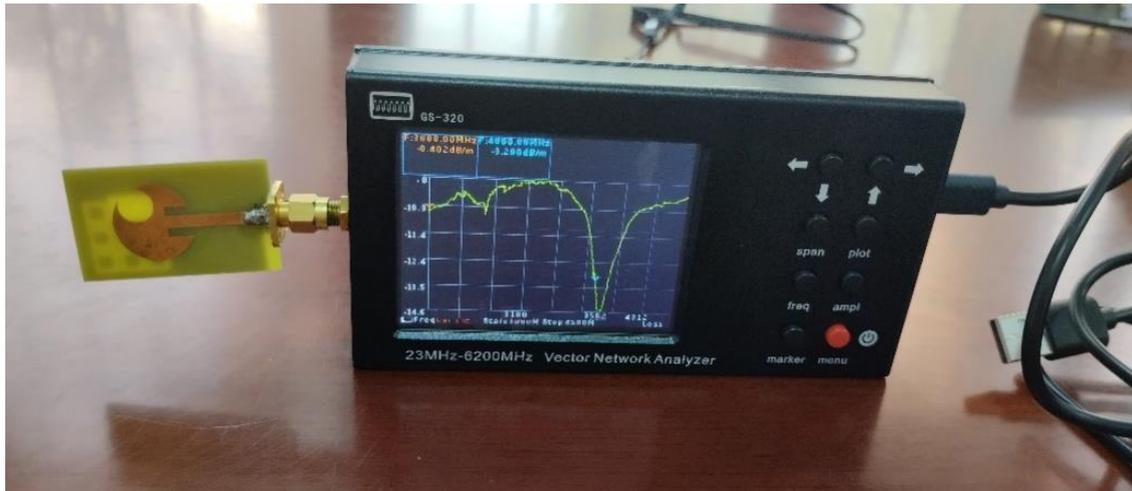


Figure II. 31– Mesure de l'antenne patch circulaire miniature avec l'analyseur réseau.

## II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons conçu une antenne patch circulaire miniature avec sept cellules CSRR destinée pour des applications de la 5G à la fréquence 3.5GHz. Les résultats de simulations sont très satisfaisants en termes de S11 ; gain et directivité. Nous avons atteint un taux de miniaturisation de 30.30%, l'antenne patch circulaire proposé peut être intégrer facilement dans des dispositifs électroniques.

---

## Conclusion générale

---

L'utilisation des métamatériaux pour les antennes patch présente de nombreux avantages, notamment une miniaturisation significative sans compromettre les performances. Les métamatériaux permettent un contrôle précis de la permittivité et de la perméabilité, améliorant ainsi le gain, la directivité et la bande passante de l'antenne. Leur intégration dans les systèmes 5G est particulièrement bénéfique, car elle permet de concevoir des antennes compactes et efficaces, répondant aux exigences de performance élevées de la 5G tout en facilitant leur intégration dans des dispositifs électroniques variés. Dans ce travail de mémoire, nous avons fait la conception et la réalisation d'une antenne patch circulaire miniature utilisant des métamatériaux pour des applications 5G dans la bande de 3,4 à 3,8 GHz démontrent le potentiel significatif de ces technologies avancées. En exploitant les propriétés uniques des métamatériaux, nous avons pu obtenir une miniaturisation de 30,30% par rapport aux antennes traditionnelles, tout en maintenant des performances élevées.

La recherche continue sur les métamatériaux et comme perspectives de ce travail, nous pourrions continuer à concevoir des antennes avec des performances encore meilleures en termes de gain, de bande passante et de directivité, répondant ainsi aux besoins croissants des technologies sans fil de prochaine génération.

**BIBLIOGRAPHIE**

- [1] Kumar, A., & Kumar V, D. (2013). "High-performance metamaterial patch antenna". *Microwave and Optical Technology Letters*, 55(2), 409-413.
- [2] Pooja Prakash, Mahesh P Abegaonkar, A Basu, and Shiban K Koul. "Gain enhancement of a cpw-fed monopole antenna using polarization-insensitive amc structure". *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 12 :1315–1318, 2013.
- [3] Deschamps, G. A. (1953). "Microstrip microwave antennas", presented at the Third USAF Symp. On Antennas.
- [4] Lewin, L. (1960). "Radiation from discontinuities in strip-line". *Proceedings of the IEE-Part C: Monographs*, 107(12), 163-170.
- [5] Ghouti, B., & Ikram, B. (2018). "Conception et réalisation d'une antenne miniature pour l'application LTE". Université Aboubakr Belkaïd Tlemcen, 2019.
- [6] Delorme, B. (2010). "Les antennes dans les réseaux de téléphonie mobile".
- [7] Picon, O., Cirio, L., Ripoll, C., Baudoin, G., Bercher, J. F., & Villegas, M. (2009). "Les antennes: Théorie, conception et applications". Dunod, Paris, ISBN 978-2-10-054245-1.
- [8] Pozar, D. M. (1992). "Microstrip antennas". *Proceedings of the IEEE*, 80(1), 79-91.
- [9] Delorme, B. (2010). "Les antennes dans les réseaux de téléphonie mobile".
- [10] Lynda, B., & Lila, C. (2018). "Miniaturisation de l'antenne PATCH sous CST ". Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri.
- [11] YANG, L. (2020). "The measurement of antenna VSWR by means of a Vector Network Analyzer".
- [12] Chorfi, H. (2012). "Conception d'un nouveau système d'antenne réseau conforme en onde millimétrique". Université du Québec en Abitibi-Temiscamingue (Canada).
- [13] Hamid, C. (2012). "Conception D'un Nouveau System D'antenne Réseau Conforme En Onde Millimétrique". Maitrise En Ingénierie, Université De Québec A Chicoutimi

[14] Zohra, B. T., & Yamina, B. A. S. (2018). "Réalisation d'une Interface graphique de Calcul des paramètres d'antennes patch et conception logicielle". Mémoire de Fin d'Etudes MASTER. Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent.

[15] ] Boyer, A. (2011). Support de cours énoncé de travaux dirigés. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse 5ème Année Réseau et Télécom, pp. 79, [Online]. Available: alexandre.boyer@insa-toulouse.fr.

[16]. Kaur, N., Sharma, N., & Singh, N. (2017). "A study of different feeding mechanisms in microstrip patch antenna". International Journal of Microwaves Applications, 6(1), 4-8.

[17] Kumar, A., Gupta, N., & Gautam, P. C. (2016). "Gain and bandwidth enhancement techniques in microstrip patch antennas-a review". International Journal of Computer Applications, 148(7).

[18] Christina, G. (2022). "A Review on Novel Microstrip Patch Antenna Designs and Feeding Techniques". IRO Journal on Sustainable Wireless Systems, 4(2), 110-120.

[19] Valleau, J. (2016). "Miniaturisation d'antennes très large bande pour application spatiales". Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT).

[20] Wheeler, H. A. (1947). "Fundamental limitations of small antennas". Proceedings of the IRE, 35(12), 1479-1484.

[21] Volakis, J. L., Chen, C. C., & Fujimoto, K. (2010). "Small antennas: miniaturization techniques & applications". *Automatika*. 53. 20-30. 10.7305/automatika.53-1.164.

[22] Pendry, J. B., Holden, A. J., Robbins, D. J., & Stewart, W. J. (1999). "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena". *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 47(11), 2075-2084.

[23] Arab, T. (2018). "Etude des matériaux composites (Titanate oxyde): application pour la réalisation des substrats d'antennes miniatures". Thèse de doctorat. Université de Setif.

[24] Sarah Sufyar, " Contribution à l'étude d'antenne Miniature Reconfigurables en fréquence par association d'éléments actifs ". Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2011

- [25] Hamidah, M. N., Hikmaturokhman, A., & Wahyuningrum, R. D. (2023, November). "Assessing 5G Network Deployment Strategies in an Industrial Zone: A Case Study on Coverage and Capacity Planning". In 2023 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (COMNETSAT) (pp. 518-524). IEEE.
- [26] Stutzman, W. L., & Thiele, G. A. (2012). "Antenna theory and design". John Wiley & Sons.
- [27] McCartney, A. M., Hyland, E. M., Cormican, P., Moran, R. J., Webb, A. E., Lee, K. D., ... & O'Connell, M. J. (2019). "Gene Fusions derived by transcriptional readthrough are Driven by Segmental Duplication in Human". *Genome biology and evolution*, 11(9), 2678-2690.
- [28] Rakholiya, A. A., & Langhnoja, N. V. (2017). "A review on miniaturization techniques for microstrip patch antenna". *International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education*, 3(2), 4281-4287.
- [29] Walser, R. M. (2001, July). "Electromagnetic metamaterials". In *Complex Mediums II: beyond linear isotropic dielectrics* (Vol. 4467, pp. 1-15). SPIE.
- [30] Smith, D. R., & Kroll, N. (2000). "Negative refractive index in left-handed materials". *Physical review letters*, 85(14), 2933.
- [31] Canet-Ferrer, J. (Ed.). (2019). "Metamaterials and metasurfaces". *BoD—Books on Demand*. doi: 10.5772/intechopen.73359.
- [32] James, J. R., Hall, P. S., & Wood, C. (1986). *Microstrip antenna: theory and design* (Vol. 12). Iet.
- [33] Lalj, H. (2014). "Conception et caractérisation de filtres et systèmes antennaires reconfigurables chargés par des résonateurs Métamateriaux sub-longueurs d'onde". Thèse de doctorat, INSA de Rennes).
- [34] Nassima, B. (2013). "Conception des antennes PIFA mono-bande et multi-bande GSM, DCS, PCS, UMTS et WIFI". Mémoire de fin d'étude de master académique, Université de Tlemcen.

[35] Fofana, S. (2020). "Design and characterization of reconfigurable antenna array in the 3.4-3.8 GHz band: contribution to the reduction of Energy consumption". Thèse de doctorat, Université Rennes 1.

[36] Diallo, K. (2021). "Antennes miniatures basses fréquences, reconfigurables pour le LTE". Thèse de doctorat, Université Côte d'Azur; Université Cheikh Anta Diop (Dakar).

[37] Mr. MERIAH S.M. (2013)." Présentation du logiciel de simulation CST Studio Suite présente ". Université Abou bekr belkaid de Tlemcen,

[38] M. Corriveau (2006)"Modélisation et Conception D'une Antenne Micro-Onde De Type Micro Ruban Avec Radome".Université Du Québec.

[39]. BEN TAHAR, Z., & BEN ABDESSELAM, S. Y. (2019). "Réalisation d'une Interface graphique de Calcul des paramètres d'antennes patch et conception logicielle".Mémoire de fin d'étude de master académique,Université de Ain temouchent.

[40] Balanis, C. A. (2016). "Antenna theory: analysis and design". John wiley & sons

[41] Moussa, F. Z., Ferouani, S., & Belhadeif, Y. (2022). "New Design of Metamaterial Miniature Patch Antenna with DGS for 5G Mobile Communications". Microwave Review, 28(2),pp. 9–16.