

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 Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : Télécommunications

Spécialité : Systèmes des Télécommunications

Par : OUALI KHALED

Sujet

**Conception, réalisation et mesure d'une antenne microruban
miniature à base des métamatériaux pour le réseau mobile LTE**

Soutenu publiquement, le 22 / 06/ 2023 , devant le jury composé de :

M^f Boukli Hacene Noureddine
M^{me} Benosman Hayate
M^{me} Merad Faiza
M Benachenhou Kamila
M^{me} Belhadeh Yamina
Mr Rabah Mohammed Amine

Professeur
MCA
MRB
MCB
MCA
MRA

Université de Tlemcen
Université de Tlemcen
CDS de Oran
Université de Tlemcen
Université de Tlemcen
CDS de Oran

Président
Examinatrice
Socio-économique
Espace I2E
Encadreur
Co-Encadreur

Année universitaire : 2022/2023

REMERCIEMENT

Avant toute chose, je remercie ALLAH tout Puissant, miséricordieux et clément, pour m'avoir donné santé, patience, volonté et courage.

Je tiens cordialement à exprimer ma profonde et respectueuse reconnaissance à mon encadreur Mme BELHADEF Yamina pour la confiance qu'il m'a accordé en acceptant de diriger ce projet de fin d'études, ainsi que pour sa disponibilité, sa gentillesse, ses idées, ses orientations et ses précieuses conseils qui m'a permis de m'orienter vers les voies de recherche.

J'exprime aussi mes sincères remerciements à Monsieur Rabah Mohammed Amine pour ses idées et leurs différentes observations rigoureuses.

J'exprime ma gratitude à tous les professeurs et enseignants qui ont collaborés à notre formation durant notre expérience dans le centre I2E surtout Mr ZAKI SARI HASSOUN et toutes ces équipes.

J'exprime aussi mes sincères remerciements à Monsieur Boukli Hacene Nouredine, Professeur à l'université de Tlemcen, qui m'a fait l'honneur et le plaisir de présider le jury de ma soutenance.

Mes remerciements les plus respectueux et mon profond respect s'adressent également à mes examinateurs, Madame Benosman Hayate, Maître de conférences A à l'Université de Tlemcen, et Madame Benachenhou Kamila, Maitre de conférences (B) à l'Université de Tlemcen (Espace I2E), qui m'ont fait l'honneur et le plaisir d'examiner mon mémoire soigneusement. Je remercie aussi Madame Merad Fayza, Maitre de Recherches (A) au centre CDS de Oran, pour l'intérêt qu'elle a porté sur mon travail.

Enfin, mes remerciements vont également à tous les enseignants du département de Télécommunication à l'université de Tlemcen et à mes camarades de la promotion 2022/2023.

DEDICAS

Je dédie ce travail

A la lumière de ma vie, ma mère ALLAH Yarhamha et mon père.

A mes très chères sœurs : Fatima, Meriem et Nesrine.

A Mes très chers frères : Aymen, Bachir, Reda, Walid, Abdelatif et

Abdelhak

A mon beau-frère : Mohammed Seif Eddine.

A toute ma famille

A tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

Résumé

Dans ce mémoire, nous avons traité deux axes de recherches principaux. Tout d'abord, nous avons examiné en détail les caractéristiques des antennes patch, en abordant leurs différents types, formes et méthodes d'alimentation. Ensuite, nous avons également exploré comment optimiser les performances de ces antennes en utilisant des techniques de miniaturisation tel que les métamatériaux et approfondi le concept de miniaturisation dans différents domaines comme les antennes imprimées. Par la suite, nous avons examiné l'utilisation de métamatériaux, qui sont des matériaux artificiels avec des propriétés électromagnétiques uniques, pour concevoir et réaliser une antenne miniature pour les réseaux mobiles LTE. Les résultats de simulation obtenus montrent bien les avantages de cette approche, tel que la réduction de l'encombrement tout en gardant les mêmes performances de l'antenne initiale. D'autres techniques de miniaturisation qui sont ajoutées dans notre modèle proposé comme la technique DGS et les fentes afin d'améliorer les caractéristiques radioélectriques de la structure finale proposée. Les résultats de simulation et de mesures sont alors présentés et commentés.

Mots clés : Antennes imprimées, Techniques de miniaturisation, Métamatériaux, Conception, Réalisation, Mesure, Réseaux mobiles, LTE, CST Microwave Studio.

Abstract

In this mimory, we have addressed two main research axes. Firstly, we have thoroughly examined the characteristics of patch antennas, discussing their various types, shapes, and feeding methods. Furthermore, we have explored how to optimize the performance of these antennas using miniaturization techniques such as metamaterials, delving into the concept of miniaturization in different domains like printed antennas. Subsequently, we have investigated the use of metamaterials, which are artificial materials with unique electromagnetic properties, to design and implement a miniature antenna for LTE mobile networks. The simulation results clearly demonstrate the advantages of this approach, such as reducing the footprint while maintaining the same performance as the initial antenna. Other miniaturization techniques, such as the DGS technique and slots, have been incorporated into our proposed model to enhance the radioelectrical characteristics of the final structure. Simulation and measurement results are then presented and discussed.

Keywords: Printed antennas, Miniaturization techniques, Metamaterials, Design, Implementation, Measurement, Mobile networks, LTE, CST Microwave Studio

ملخص

في هذه المذكرة، تمت مناقشة محورين رئيسيين للبحث. أولاً، تم فحص سمات هوائيات الباتش بتفصيل، بمناقشة أنواعها المختلفة وأشكالها وأساليب تشغيلها. ثم، تم استكشاف كيفية تحسين أداء هذه الهوائيات باستخدام تقنيات التصغير مثل الميتاماتيريالز وتعمق في مفهوم التصغير في مجالات مختلفة مثل الهوائيات المطبوعة. بعد ذلك، تم فحص استخدام الميتاماتيريالز، وهي مواد اصطناعية تتمتع بخصائص كهرومغناطيسية فريدة، لتصميم وتنفيذ هوائي مصغر لشبكات المتنقلة. أظهرت نتائج المحاكاة المستحصلة مزايا هذا النهج، مثل تقليل الحجم والحفاظ في الوقت نفسه على أداء LTE الهوائي الأصلي. تمت إضافة تقنيات أخرى للتصغير في النموذج المقترح مثل تقنية والشقوق لتحسين الخصائص الكهرومغناطيسية للهيكل النهائي المقترح. تم ثم تقديم ومناقشة نتائج المحاكاة والقياسات.

الكلمات الرئيسية: هوائيات مطبوعة، تقنيات التصغير، الميتاماتيريالز، التصميم، التنفيذ، القياس، شبكات المحمول،

SOMMAIR

Résume	4
Abstract	4
ملخص.....	5
Liste des figure	8
La liste des tableaux	9
Liste des acronymes et abréviation	9
Introduction générale.....	11
CHAPITRE I : ANTENNES IMPRIMEES ET LES RESEAUX MOBILE LTE.....	13
I.1. Introduction.....	14
I.2. Antennes patchs	14
I.3. Différentes formes d'antennes	15
I.4. Avantages et les inconvénients	16
I.4.1. Avantages.....	16
I.4.1. Inconvénients	17
I.5. Types d'antennes patch.....	18
I.5.1. Antenne patch rectangulaire	18
I.5.2. Antenne patch circulaire	20
I.6. Caractéristiques de l'antenne patch	20
I.6.1. Impédance d'entrée de l'antenne	21
I.6.2. Coefficient de réflexion	21
I.6.3. Bande passante.....	22
I.6.4. VSWR (Voltage Standing Wave Ratio)	23
I.6.5. Directivité et le gain.....	23
I.6.6. Rendement	23
I.6.7. Diagramme de rayonnement	23
I.6.8. Polarisation de l'antenne	25
I.6.8.1. Polarisation rectiligne	26
I.6.8.2. Polarisation circulaire	26
I.6.8.3. Polarisation elliptique	26
I.7. Techniques d'alimentation.....	27
I.7.1. Alimentation directe par une ligne microruban [I.17][I.18][I.19]	27
I.7.2. Alimentation coaxiale [I.20]	28
I.7.3. Alimentation couplée par ouverture.....	29
I.8. Domaines d'application des antennes imprimées	31
I.9. Réseau mobile LTE.....	32
I.10. Conclusion	33
CHAPITRE II : TECHNIQUES DE MINIATURISATION ET LES METAMATERIAUX. 34	

II.1. Introduction	35
II.2. Techniques de miniaturisation.....	36
II.2.1. Fentes.....	36
II.2.2. Replissements	37
II.2.3. Court-circuit.....	37
II.2.4. Intégration des éléments localisés	38
II.2.4.1. Charge résistive	39
II.2.4.2. Charge capacitive.....	39
II.2.4.3. Charge inductive.....	39
II.3. Métamatériaux	40
II.3.1. Définition.....	40
II.3.2. Historique	40
II.3.3. Classification des métamatériaux	41
II.3.3.1. Matériaux ENG.....	42
II.3.3.2. Matériaux MNG	43
II.3.3.3. Matériaux doublement négative DNG.....	45
II.3.4. Cellules SRR (Split Ring Resonator)	45
II.3.5. Cellules RAFC résonateurs en anneaux fendus complémentaires ou (CSRR).....	47
II.3.6. Applications des métamatériaux.....	48
II.3.6.1. Applications des métamatériaux dans le domaine d'antennes	48
II.3.6.2. Applications des métamatériaux dans le domaine des filtres	50
II.3.7. Extraction de la permittivité effective ϵ_r et la perméabilité effective μ_r	51
II.3.7.1. Méthode de Nicolson-Rose-Weir (NRW)	51
II.3.7.2 Méthode de transmission-réflexion TR (Transmission-Réflexion method).....	53
II.3.7.3. Méthode de Smith.....	54
II.4. Conclusion	55
CHAPITRE III : SIMULATION ET RESULTATS	56
III.1. Introduction	57
III. 2. Définition du logiciel CST Microwave Studio	57
III.3. Conception d'une antenne patch rectangulaire	58
III.4. Adaptation de l'antenne patch initiale.....	60
III.5. Cellule RAFC (Résonateurs en anneaux fendus complémentaires ou CSRR)	64
III.6. Antenne patch miniature à base des métamatériaux	65
III.6.1. Etude paramétrique.....	66
III.6.1.1. Variation de la longueur L_{pa} du patch	66
III.6.1.2. Variation de la largeur W_{pa} du patch	67
III.6.2. Résultats de simulation.....	68
III.7. Antenne miniature avec la technique DGS	69

III.8. Réalisation d'antenne proposée.....	73
III.8.1. Coefficient de réflexion.....	74
III.8.2. VSWR	74
III.8.3. Comparaison.....	75
III.9. Conclusion.....	76
Conclusion générale	78
BIBLIOGRAPHIE	80
Annexe	87

Liste des figure

Figure I.1 : Structure d'antenne patch.

Figure I.2 : Différentes formes d'antennes patch.

Figure I.3 : Antenne patch rectangulaire.

Figure I.4 : Antenne patch circulaire.

Figure I.5 : Exemple sur coefficient de réflexion en fonction de la fréquence.

Figure I.6 : Exemple d'une bande passante d'une antenne.

Figure I.7 : Repère en coordonnées sphériques pour le calcul du champ rayonné en zone lointain.

Figure I.8 : Différents types de représentation des diagrammes de rayonnement
a) 2D polaire b) 2D cartésien c) 3D.

Figure I.9 : a) Diagramme dit « omnidirectionnel » dans le plan xoy et b) Diagramme dit « directif ».

Figure I.10 : Différents types de polarisation.

Figure I.11 : Patch alimenté par ligne micro

Figure I.12 : Antenne micro ruban alimenté par sonde.

Figure I.13 : Alimentation couplée par ouverture.

Figure I.14 : Alimentation couplée par proximité.

Figure I.15 : Présentation générale sur le système LTE .

Figure II.1 : Photo du prototype réalisé .

Figure II.2 : Exemple d'antenne PIFA repliée.

Figure II.3 : la miniaturisation en charge capacitif ou inductif.

Figure II.4 : (a) Antenne miniature différentielle inspirée d'une IFA chargée par une capacité distribuée

Figure II.5 : les différents classification des métamatériaux.

Figure II.6 : Cas correspondant à une propagation main droite.

Figure II.7 : Structure rouleau suisse introduite par Pendry.

Figure II.8 : Résonateur en Anneau Fendu RAF avec double anneaux sous la forme (a) circulaire et (b) carrée.

Figure II.9 : Géométries planaires des cellules unitaires d'un résonateur d'anneaux fendus.
a) RAF circulaire ; b) RAF carrée.

Figure II.10 : Perméabilité effective en fonction de la fréquence.

Figure II.11 : Différence entre une conception (a) RAF et (b) une conception complémentaire RAFC.

Figure III.1 : Interface du logiciel CST.

Figure III.2 : Antenne patch initiale.

Figure III.3 : Coefficient de réflexion de l'antenne patch initiale.

Figure III.4 : Antenne patch proposée.

Figure III.5 : Variation de la largeur W_{pa} .

Figure III.6 : Variation de la longueur L_g .

Figure III.7. (a) : Coefficient de coefficient.

(b) : Taux d'onde stationnaire.

(c) : Diagrammes de rayonnement en 2D à 2.6 GHz et à 5.075 GHz

(d) : Diagrammes de rayonnement en 3D à 2.6 GHz et à 5.075 GHz.

Figure III.8 : Cellule CSRR.

Figure III.9 : Résultats de simulation des paramètres S_{11} et S_{21} de la cellule CSRR.

Figure III.10 : Antenne patch à base des métamatériaux.

Figure III.11 : Coefficient de réflexion de l'antenne patch à base des métamatériaux.

Figure III.12 : Variation de la longueur L_{pa} de l'élément rayonnant de l'antenne.

Figure III.13 : Variation de la largeur W_{pa} de l'élément rayonnant de l'antenne.

Figure III.14 : Antenne miniature à base des métamatériaux, (a) : Vue de face : patch,

(b) : Vue arrière : plan de masse.

Figure III.15. (a) : Coefficient de réflexion

(b) : Taux d'onde stationnaire.

(c) : Diagramme de rayonnement polaire en 2D.

(d) : Diagramme de rayonnement en 3D.

Figure III.16 : Antenne miniature proposée avec la technique DGS et la technique de fentes,

(a) : Vue de face : patch, (b) : Vue arrière : plan de masse.

Figure III.17 : Variation de la longueur du plan de masse L_g .

Figure III.18 : Variation de la longueur du patch L_{pa} .

Figure III.19. (a) : Coefficient de réflexion

(d) : Calcul de la bande passante.

(c) : Rapport d'onde stationnaire.

(d) : Diagramme de rayonnement en 2D.

(e) : Diagramme de rayonnement polaire en 3D.

Figure III.20 : le test d'antenne propose

Figure III.21 : le coefficient de reflexion de l'antenne propose

Figure III.22 : le VSWR de l'antenne propose

Figure III.23 : la comparaison de coefficient de reflexion la simulation la realisation

Figure III.24 : la comparaison de VSWR la simulation la realisation

La liste des tableaux

Tableau I.1 : Avantages et inconvénients des antennes imprimées.

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

Tableau III.2 : Dimensions de l'antenne patch proposée.

Tableau III.3 : Dimensions de la cellule CSRR

Tableau III.4 : Dimensions de l'antenne miniature à base des métamatériaux

Liste des acronymes et abréviation

- MMIC : (Microwave monolithic integrated circuit).

- VSWR : Voltage Standing Wave Ratio
- WLAN : Wireless Local Area Network
- WI-FI : Wireless Fidelity
- GPS : Global Positioning System
- WSN : Wireless Sensor Network.
- GNSS : Global Navigation Satellite System
- LTE : Long Term Evolution
- OFDMA : Orthogonal Frequency Division Multiple Access)
- 4G : 4em generation
- WiMax : Worldwide Interoperability for Microwave Access.
- dB : Décibel.
- GHz: Gigahertz.
- MHz : Megahertz
- FPR : facteur de puissance rayonnée .
- RLC : resistors (R), inductors (L), and capacitors (C).
- RAF : les résonateurs en anneaux fendus
- CRAF : complémentaires des résonateurs en anneaux fendus
- PIFA : Planar Inverted-F Antenna
- IFA : antenne inversée en F
- DPS : double-positive material
- DNG : Les matériaux doublement négatifs (DNG),
- ENG : matériaux permittivité négative
- MNG : matériaux perméabilité négative
- SRR : Split Ring Resonator
- RAFC : Le Résonateur en Anneau Fendu Complémentaire
- CSRR : Complémentaire Split Ring Resonator
- NRW : Nicolson Ross Weir
- TR : Transmission-Réflexion method
- ϵr : la permittivité relative
- μr : la perméabilité relative
- MTM : Metamatériaux
- CST : Computer Simulation Technology
- FR- 4 : Flame Retardant 4
- DGS : Defected Ground Structure
- 2D : deux dimention
- 3D : trois dimention
- ω : Pulsation angulaire.
- ρ : Densité des électrons.
- λ : Longueur d'onde.
- S11 : Coefficient de réflexion.
- S21 : Coefficient de transmission.
- c_0 : Vitesse de la lumière dans le vide = $3 \times 10^8 m/s$

Introduction générale

L'avancement rapide des technologies de communication sans fil a conduit à une demande croissante pour des antennes petites, plus légères et plus efficaces. Dans ce contexte, la conception d'antennes micro-rubans miniatures basées sur les métamatériaux représente une approche prometteuse pour répondre à ces besoins. Les métamatériaux, en raison de leurs propriétés électromagnétiques inhabituelles, offrent de nouvelles opportunités pour la conception d'antennes compactes et performantes.

Le présent mémoire se concentre sur la conception d'une antenne micro-ruban miniature basée sur l'utilisation de métamatériaux dans le contexte du réseau LTE (Long Term Evolution). Le réseau LTE, également connu sous le nom de 4G, est largement utilisé pour les communications mobiles haut débit et offre des performances améliorées par rapport aux générations précédentes.

L'antenne micro-ruban, en tant que composant clé des systèmes de communications sans fils, présente de nombreux avantages, tels qu'une taille réduite, un poids léger, une faible consommation d'énergie et une bonne directivité. Cependant, la miniaturisation de ces antennes tout en maintenant des performances élevées restent un défi majeur. C'est là que l'utilisation des métamatériaux entre en jeu.

Les métamatériaux sont des structures artificielles périodiques qui exhibent des propriétés électromagnétiques inhabituelles, telles que l'indice de réfraction négatif, la résonance électrique et magnétique, et la capacité à manipuler les ondes électromagnétiques. Ces propriétés uniques des métamatériaux permettent de concevoir des antennes miniatures avec des caractéristiques améliorées, telles qu'une bande passante plus large, une directivité accrue et une efficacité de rayonnement optimisée.

L'objectif de ce mémoire est donc d'explorer les différentes méthodes et techniques de conception d'antennes micro-rubans miniatures à base de métamatériaux dans le contexte du réseau LTE.

Le premier chapitre est consacré à une exposition panoramique sur des généralités des antennes imprimées. Nous présentons une description de ces antennes et les différentes formes de l'antenne patch. Nous chercherons aussi à analyser les avantages et les limitations de ces antennes, leurs caractéristiques et les différentes techniques d'alimentations, ainsi que

les défis techniques et les considérations pratiques associées à leur mise en œuvre. On termine cette partie par une description générale sur le réseau mobile LTE.

Le deuxième chapitre est consacré à l'état de l'art sur les métamatériaux. Nous présentons en premier lieu les techniques de miniaturisation tels que les fentes, le court-circuit, le repliement, l'intégration des éléments localisés et les métamatériaux. Nous nous intéressons par la suite sur les différentes alternatives de modélisation des métamatériaux. Nous distinguerons ensuite leur classification en termes de paramètres effectifs. Un ensemble d'applications de métamatériaux dans le domaine des antennes et des circuits passifs comme les filtres sera exploré. Pour clôturer ce chapitre, nous présenterons les méthodes d'extraction des paramètres effectifs des métamatériaux.

Le dernier chapitre sera dédié à la conception et à la réalisation d'une antenne patch miniature à base des métamatériaux. En premier lieu, les étapes à suivre pour concevoir et simuler une antenne patch rectangulaire opérant à 2.6 GHz à l'aide du logiciel CST Microwave Studio sont fournies. En seconde lieu, une antenne miniature à base des métamatériaux a été conçue. Ensuite, nous avons utilisé la technique de la DGS (Defected Ground Structure) et inséré des fentes de forme rectangulaire sur le plan de masse afin d'améliorer les performances de l'antenne proposée. À la fin de ce chapitre, une comparaison entre les résultats de simulation et les résultats de mesure de l'antenne miniature à base des métamatériaux ont été présentés et commentés.

En conclusion, ce mémoire vise à fournir une vue d'ensemble approfondie de la conception d'antenne micro-ruban miniature basée sur les métamatériaux pour les réseaux LTE. En explorant les potentialités offertes par les métamatériaux et en surmontant les défis liés à la miniaturisation, nous espérons contribuer à l'avancement des technologies de communication sans fil en proposant de nouvelles structures antennes compactes et performantes à base de cellules métamatériaux pour les applications du futur. En outre, la mise en œuvre d'une antenne miniature multi-bandes à base des résonateurs métamatériaux, planaires, bidimensionnelles et tridimensionnelles permettant la couverture de plusieurs standards afin de réduire l'encombrement réservé à la partie antenne dans les terminaux mobiles.

CHAPITRE I : ANTENNES IMPRIMEES ET LES RESEAUX MOBILE LTE

I.1. Introduction

L'utilisation d'antennes imprimées a émergé dans les années 1950, mais ce n'est qu'à partir des années 1970 que leur développement s'est accéléré. Deux facteurs clés ont contribué à leur popularité : leur coût de fabrication réduit et leur capacité d'intégration. Aujourd'hui, les antennes imprimées sont largement utilisées dans de nombreux dispositifs électroniques et sont le choix privilégié pour les fréquences micro-ondes dans les systèmes de communication intégrés modernes.

La demande croissante de dispositifs micro-ondes abordables et compacts, nécessaires pour les communications spatiales, les télécommandes et les systèmes de contrôle, a conduit au développement des antennes imprimées, telles que les antennes plaques ou les antennes patch. Ces antennes sont basées sur des structures micro-ruban pour les applications micro-ondes. Les antennes imprimées sont souvent utilisées en réseau pour améliorer les performances et permettre la réalisation de fonctions spécifiques.[I.2].

Les systèmes de communication connaissent une évolution constante, ce qui a suscité d'importantes études dans le domaine des antennes. Les antennes revêtent aujourd'hui des formes très variées qui varient considérablement en fonction des applications, telles que les télécommunications mobiles, la télévision, la radio, les satellites, les systèmes de communication, les radars, la télédétection et la radioastronomie. Parmi les familles d'antennes les plus utilisées, on retrouve les antennes micro-rubans, également connues sous les noms d'antennes imprimées ou d'antennes patches.

Ces antennes se distinguent par leur faible coût de fabrication, leur possibilité de production en masse, leur polarisation linéaire et circulaire, ainsi que la possibilité de fabriquer simultanément des réseaux d'alimentation et d'adaptation avec l'antenne. [I.1].

Dans ce chapitre nous présenterons des généralités sur les antennes imprimées et ces principales caractéristiques. Ainsi, nous donnerons les avantages et les inconvénients de l'antenne patch. A la fin, nous précisons, les différentes techniques d'alimentation en technologie micro ruban, les domaines applications et les réseaux mobiles LTE de la quatrième génération.

I.2. Antennes patches

Une antenne imprimée est composée d'un substrat diélectrique et d'un plan de masse, sur lequel sont fixés un ou plusieurs éléments métallisés appelés "patches". Ces patches peuvent avoir diverses formes, telles que des rectangles, des carrés, des disques circulaires, des

anneaux, des triangles ou des dipôles, ce qui influence la manière dont l'antenne rayonne les signaux. Parmi ces formes, celle du patch rectangulaire est la plus couramment utilisée dans les antennes imprimées ces antennes également connue sous le nom d'antenne plaquée, est un type d'antenne relativement récent dont le développement et l'utilisation sont de plus en plus courants [I.3] [I.4].

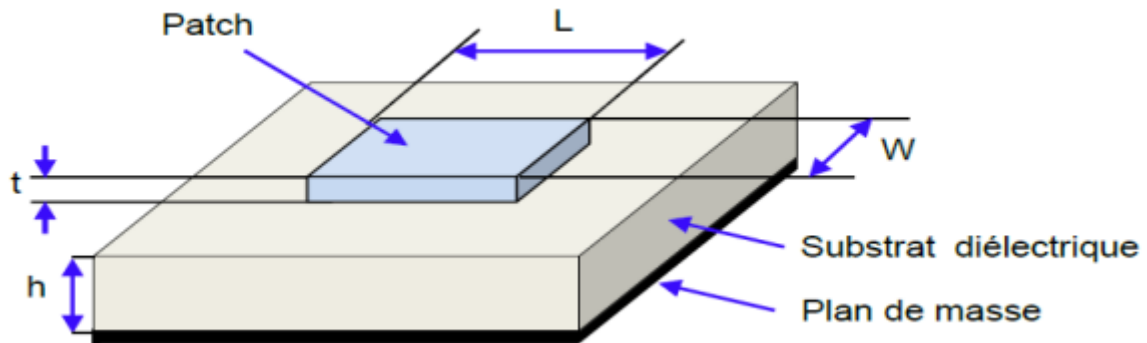


Figure I.1 : structure d'antenne patch.

I.3. Différentes formes d'antennes

Les antennes patch peuvent adopter différentes formes, telles que rectangulaire, carrée, circulaire ou sous la forme d'un dipôle. Ces formes sont largement utilisées en raison de leur facilité d'analyse et de fabrication, ainsi que de leur diagramme de rayonnement favorable. La Figure I.2 présente un aperçu visuel de ces différentes formes [I.5].

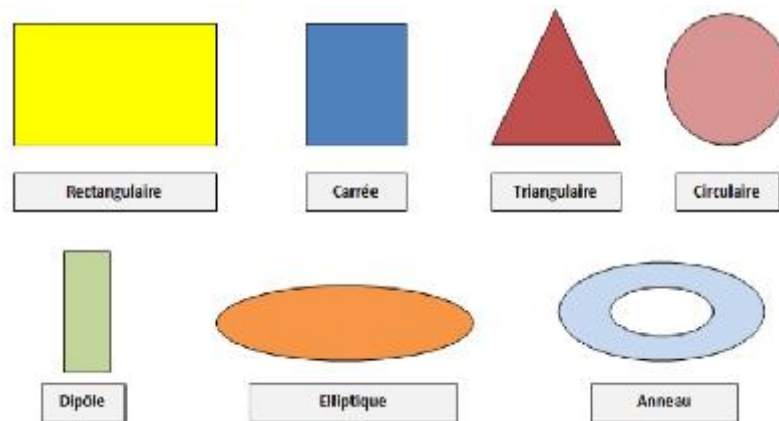


Figure I.2 : Différentes formes d'antennes patch [I.5].

Parmi toutes les formes des éléments rayonnants, le rectangle est le caractère le plus facile à appréhender pour la compréhension des mécanismes de rayonnement des antennes micro bandes [I.6].

I.4. Avantages et les inconvénients

Les antennes imprimées présentent de nombreux avantages et inconvénients par rapport aux antennes microondes classiques [I.7].

I.4.1. Avantages

- Faible poids, encombrement réduit, configurations conformes possibles.
- Faible coût de fabrication, production en masse possible.
- Polarisation linéaire et circulaire pour les télécommunications.
- Antennes multi bandes, multi polarisations possibles.
- Compatibilité avec les circuits hybrides et MMIC (Microwave monolithic integrated circuit).
- Réseaux d'alimentation et d'adaptation fabriqués simultanément avec l'antenne.
- Simplicité de leurs structures.
- Faible volume.
- Faible épaisseur.

I.4.1. Inconvénients

- Bande passante souvent étroite de l'ordre de 1 à 5% (pour les éléments résonants de Géométrie simple).
- Généralement faible gain.
- Facteur de qualité Q élevé, va d'environ 50 jusqu'à 75.
- Supportent uniquement des faibles puissances.
- Rendement limité de surface.
- Problèmes de tolérances de fabrication si les motifs imprimés sont petits.
- Risque de rayonnement parasite dû aux jonctions avec l'alimentation ou à la limitation du plan de masse.
- Difficulté d'élaborer des antennes à haute pureté de polarisation.

Le tableau I.1, représente un résumé sur les avantages et les inconvénients des antennes imprimées [I.7] :

Avantages	Inconvénients
Profil bas	Mauvais rendement
Poids faible	Bande passante étroite
Simple à fabriquer	Radiations parasites des alimentations, des jonctions et des ondes de surface
Conforme	Problème de tolérance
Coût de fabrication faible	Nécessite un substrat de bonne qualité avec une bonne tolérance de température
Peut être intégrée dans les circuits imprimés	Les structures empilées haute performance nécessitent des systèmes d'alimentation complexes
Facilité de création de structures empilées simples	Difficultés d'atteindre une bonne pureté de polarisation

Tableau I.1 : Avantages et inconvénients des antennes imprimées.

I.5. Types d'antennes patch

I.5.1. Antenne patch rectangulaire

Les antennes imprimées rectangulaires, connues sous le nom d'antennes patch rectangulaires (voir Figure I.3), sont fréquemment utilisées dans une variété d'applications de télécommunications. Elles peuvent être facilement modélisées en utilisant des méthodes telles que la méthode des lignes de transmission et la méthode des cavités résonantes. Ces approches permettent une modélisation précise des caractéristiques électromagnétiques de l'antenne, ce qui facilite la conception, l'optimisation et l'analyse de performances de ces antennes [I.8], [I.9].

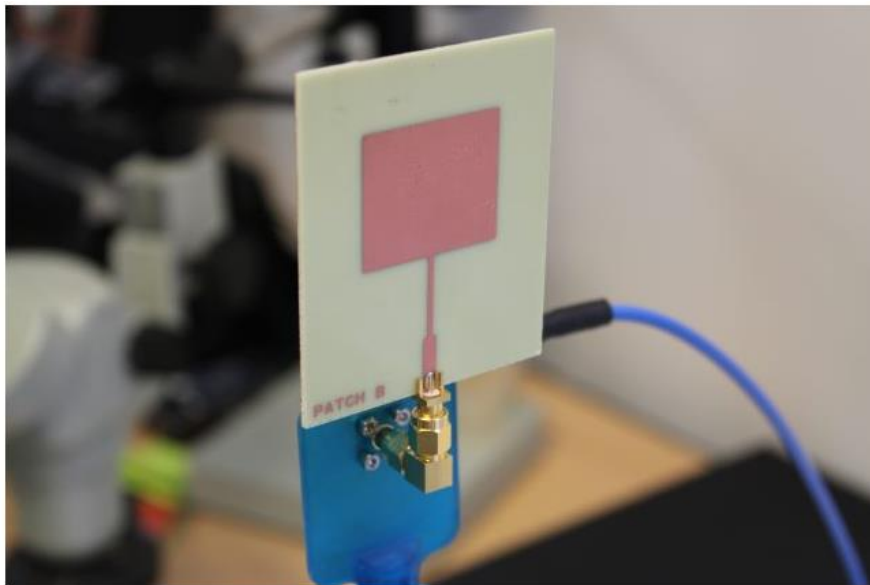


Figure I.3 : Antenne patch rectangulaire [I.8].

L'espace externe ainsi que le substrat sont considérés comme un milieu homogène avec une constante diélectrique effective ϵ_{reff} définie par l'équation (I.1) quand $W/h > 1$ (Figure I.5) [I.10].

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

Où : ϵ_{reff} est la constante diélectrique effective, ϵ_r est la constante diélectrique du substrat, W est la largeur de l'élément rayonnant et h est l'épaisseur du substrat.

En raison des effets de bord, électriquement, l'antenne patch semble supérieure à ses dimensions physiques.

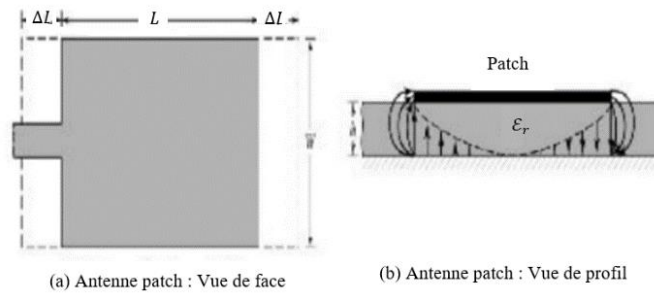


Figure I.4 : Dimensions réels et effectives d'une antenne Patch [I.10].

La longueur de l'antenne patch est allongée de part et d'autre par une quantité ΔL donnée par l'équation I.2 :

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \times \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \times (\frac{W}{h} + 0.264)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \times (\frac{W}{h} + 0.8)} \tag{I.2}$$

La longueur effective de l'antenne patch L_{eff} est alors donnée par l'équation I.3 suivante :

$$L_{eff} = L + 2 \times \Delta L \tag{I.3}$$

Aussi, $L = \frac{\lambda}{2}$ pour le mode dominant TM_{010} sans effets de bord. Pour ce mode, la fréquence de résonance de l'antenne patch rectangulaire est donnée par l'équation I.4 :

$$(f_r)_{010} = \frac{1}{2L\sqrt{\epsilon_r}\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} = \frac{c}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \tag{I.4}$$

Avec c est la célérité de la lumière dans l'espace libre. Depuis que les effets de bord sont comptés, cette fréquence va être donnée par la formule I.5 et $L_{eff} = \frac{\lambda}{2}$:

$$(f_{rc})_{010} = \frac{1}{2L_{eff}\sqrt{\epsilon_{reff}}\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} = \frac{c}{2(L+\Delta L)\sqrt{\epsilon_{reff}}} \tag{I.5}$$

Et par conséquent, nous pouvons définir un facteur Q dit facteur de marge (fringe factor) par la formule I.6 :

$$Q = \frac{(f_{rc})_{010}}{(f_c)_{010}} = \frac{L\sqrt{\epsilon_r}}{(L+\Delta L)\sqrt{\epsilon_{reff}}} \tag{I.6}$$

Pour avoir un élément rayonnant efficace, une largeur pratique (W) qui conduit à une bonne efficacité de rayonnement est donnée par la formule I.7 :

$$W = \frac{c}{2f_r} \times \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \tag{I.7}$$

I.5.2. Antenne patch circulaire

La structure d'une antenne patch sous forme d'un cercle est donnée par la figure I.5:

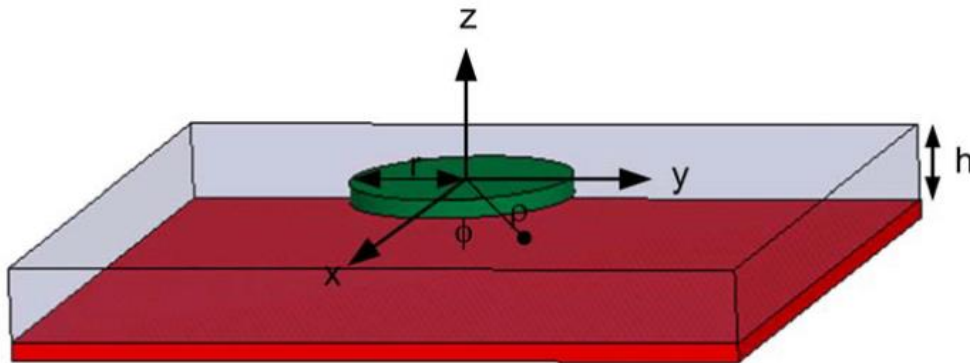


Figure I.5 : Antenne patch circulaire [I.11].

La fréquence de résonance de l'antenne patch circulaire qui est en fonction du rayon de l'élément rayonnant a et de la permittivité relative ϵ_r , en son mode dominant TM_{010} qui est donnée par la formule suivante [I.11]:

$$(f_r)_{110} = \frac{1,2412 c}{2\pi a \sqrt{\epsilon_r}} \tag{I.8}$$

Où : $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$ est la vitesse de la lumière dans l'espace libre,

$$\text{Avec } a = \frac{F}{\left\{1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r F} \left[\ln\left(\frac{\pi F}{2h}\right) + 1.7726 \right]\right\}^{\frac{1}{2}}} \tag{I.9}$$

$$\text{Et } F = \frac{8.791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}} \tag{I.10}$$

I.6. Caractéristiques de l'antenne patch

L'antenne imprimée est définie par les caractéristiques radioélectriques suivantes : Le coefficient de réflexion, la bande passante, le diagramme de rayonnement, la polarisation et le gain de l'antenne ... etc.

I.6.1. Impédance d'entrée de l'antenne

L'impédance d'entrée de l'antenne peut être considérée comme une impédance complexe [I.12] :

$$Z_e = R_e + jX_e \quad (1.11)$$

L'impédance d'entrée de l'antenne patch dépend non seulement de sa géométrie, mais également du couplage entre la ligne d'alimentation et l'antenne. L'objectif est d'avoir une impédance d'entrée aussi proche que possible de 50Ω en partie réelle, et nulle en partie imaginaire, ce qui dépend du type d'alimentation utilisé [I.3][I.5].

I.6.2. Coefficient de réflexion

On définit la qualité d'adaptation d'une antenne soit en donnant son impédance caractéristique (formule 1.12) (souvent 50 ohms), soit en donnant son coefficient de réflexion S_{11} (formule 1.13).

$$z_e = R + jX \quad (1.12)$$

$$|s_{11}|^2 = \frac{p_r}{p_t} \quad (1.13)$$

$|S_{11}|$ est le coefficient de réflexion en tension, donné par la formule (I.13) et exprimé en décibels. C'est le rapport entre la tension réfléchie et la tension transmise, sa valeur varie donc de 0 (aucune réflexion) à 1 (réflexion totale).

La mesure du coefficient de réflexion sert à déduire l'impédance d'entrée Z_e .

$$Z_e = Z_c \frac{1+s_{11}}{1-s_{11}} \quad (1.14)$$

Le paramètre S_{11} , qui correspond au coefficient de réflexion à l'entrée de l'antenne, reflète le niveau de transfert d'énergie de l'antenne. Sa valeur varie en fonction de la fréquence. Pour garantir une bonne adaptation dans la bande de fréquences souhaitée, il est nécessaire de respecter le critère suivant : $|S_{11}| \leq -10 \text{ dB}$. Cela signifie que le module de S_{11} doit être inférieur ou égal à -10 dB pour assurer une adaptation satisfaisante de l'antenne [I.13].

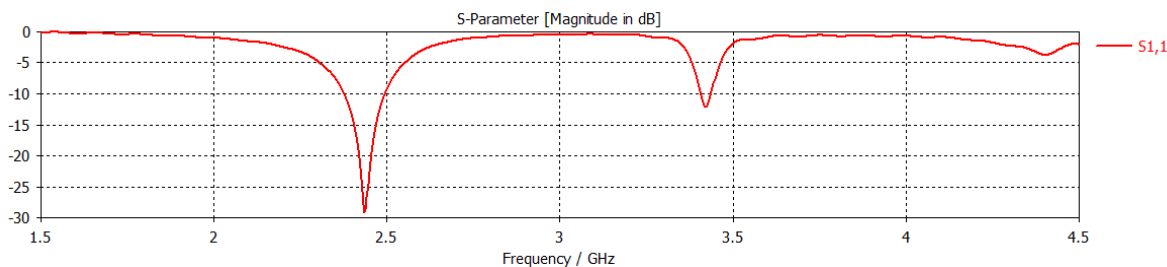


Figure I.6 : Exemple sur coefficient de réflexion en fonction de la fréquence.

I.6.3. Bande passante

La bande passante d'une antenne correspond à la plage de fréquences dans laquelle le transfert d'énergie de l'alimentation vers l'antenne (ou de l'antenne vers le récepteur) est maximal.

Dans la plupart des cas, la bande passante est déterminée en fonction du coefficient de réflexion.

Il n'existe pas de critères précis pour définir la limite du coefficient de réflexion. Cependant, il est courant d'utiliser comme critère un coefficient de réflexion inférieur à -10 dB sur toute la bande passante.

Certaines antennes sont très sélectives, c'est-à-dire qu'elles ont une bande passante très étroite, tandis que d'autres peuvent être utilisées sur une large plage de fréquences [I.14].

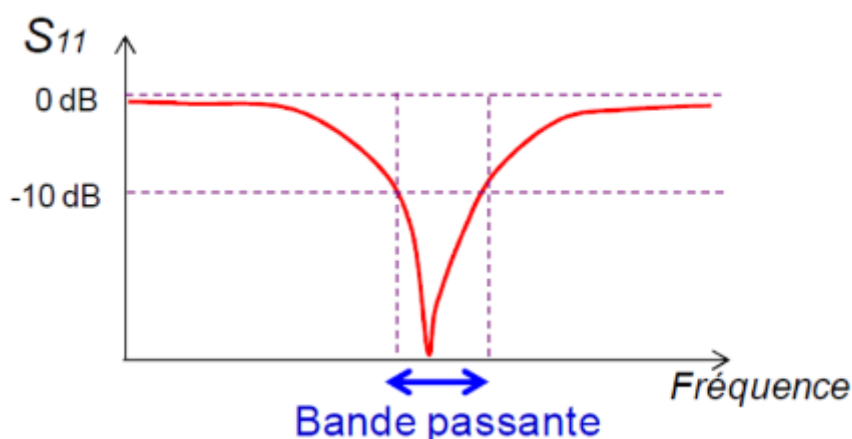


Figure I.7 : Exemple d'une bande passante d'une antenne.

I.6.4. VSWR (Voltage Standing Wave Ratio)

Le VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) est une mesure du rapport entre la tension maximale et la tension minimale le long d'une structure de ligne de transmission dans un modèle d'onde stationnaire. Il varie de 1 lorsque la chaîne est parfaitement adaptée à l'infini lorsque la chaîne est totalement désadaptée [I.15].

Il peut s'exprimer en fonction du coefficient de réflexion comme ce suit :

$$VSWR = \frac{1+|r|}{1-|r|} \quad (I.15)$$

I.6.5. Directivité et le gain

La directivité, ou gain en directivité, est définie comme le rapport de l'intensité du rayonnement dans une direction donnée à l'intensité du rayonnement d'une antenne de référence, supposée être une source isotrope. La directivité de l'antenne est donnée par l'expression suivante :

$$D(\theta, \phi) = 4\pi \frac{F(\theta, \phi)}{\int_0^\pi \int_0^{2\pi} F(\theta, \phi) \sin\theta \, d\theta \, d\phi} \quad (I.16)$$

La relation entre le gain et la directivité d'une antenne est donnée par l'équation suivante :

$$\eta_R = \frac{G(\theta, \phi)}{D(\theta, \phi)} \quad (I.17)$$

I.6.6. Rendement

Le rendement d'une antenne est le rapport entre la puissance totale rayonnée et la puissance d'alimentation.

$$\eta_R = \frac{p_r}{p_a} = \frac{\text{puissance totale rayonnée}}{\text{puissance d'alimentation}} \quad (I.18)$$

$$\eta_R = \frac{G(\theta, \phi)}{D(\theta, \phi)} \quad (I.17)$$

I.6.7. Diagramme de rayonnement

La densité de puissance rayonnée par une antenne se répartit dans l'espace environnant en fonction de sa géométrie et de son adaptation. Les diagrammes de rayonnement sont utilisés

pour représenter graphiquement cette répartition. Ils sont généralement donnés dans la "zone lointaine" de l'antenne et exprimés dans un repère en coordonnées polaires (Figure I.8).

Les diagrammes peuvent être représentés sur des figures en 2D (polaire ou cartésien) ou en 3D (Figure I.11).

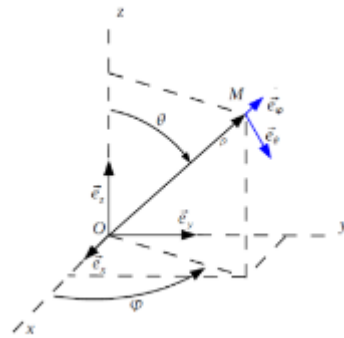


Figure I.8 : Repère en coordonnées sphériques pour le calcul du champ rayonné en zone lointain.

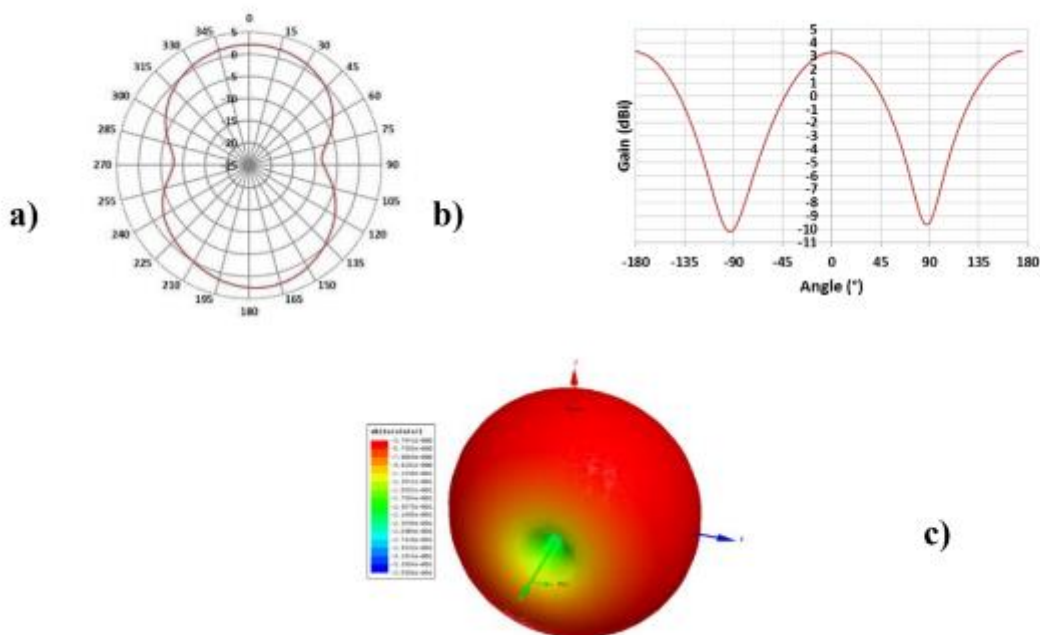


Figure I.9 : Des exemples sur les différents types de représentation des diagrammes de rayonnement
 a) 2D polaire b) 2D cartésien c) 3D.

Parmi la multitude de diagrammes possibles, trois types de diagrammes peuvent être identifiés [I.12]:

- Le diagramme dit isotopique si le diagramme de rayonnement de l'antenne est une sphère. En pratique l'antenne isotrope parfaite n'existe pas.
- Les diagrammes dits omnidirectionnels pour lesquels le rayonnement s'effectue de manière isotrope mais dans un seul plan de l'espace. Il existe des directions dans lesquelles l'antenne rayonne avec moins d'énergie. Pour certaines antennes omnidirectionnelles, il existe des directions dans lesquelles l'antenne ne rayonne pas. Ces directions sont dites aveugles (figure I.10).
- Les diagrammes dits directifs où la plus grande partie de la puissance rayonnée est concentrée dans un lobe appelé lobe principale et le reste de la puissance est distribuée dans de multiples lobes.

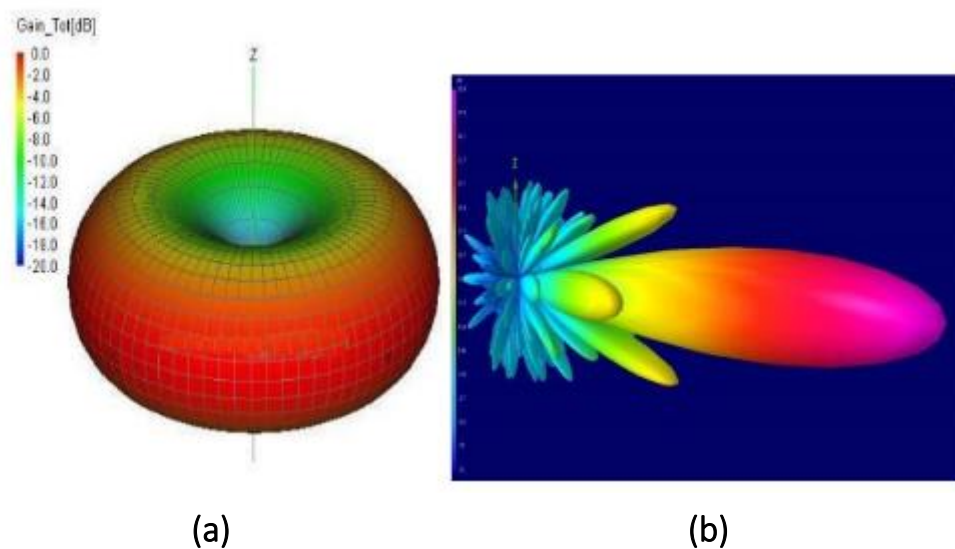


Figure I.10 : Exemple sur a) Diagramme dit « omnidirectionnel » dans le plan xoy et b) Diagramme dit « directif ».

I.6.8. Polarisation de l'antenne

Les ondes électromagnétiques propagent des champs vectoriels, on dit qu'elles sont polarisées. Le champ magnétique d'une onde plane se déduit directement du champ électrique qui est le seul à être utilisé pour définir la polarisation :

I.6.8.1. Polarisation rectiligne

Effectivement, dans une onde électromagnétique, le champ électrique reste parallèle à une direction fixe qui est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde. La direction de polarisation est déterminée par l'orientation des courants sur la surface de l'élément rayonnant de l'antenne. Ainsi, la position du point d'alimentation sur l'antenne joue un rôle crucial dans la détermination de la direction de polarisation, car elle est parallèle à la direction des courants circulant sur l'élément.

Par conséquent, la polarisation (tout comme l'orientation des courants sur les éléments) est parallèle à l'axe oy .

I.6.8.2. Polarisation circulaire

La polarisation d'une onde est dite circulaire lorsque l'extrémité du vecteur du champ électrique, à un point donné de l'espace, décrit un cercle au fur et à mesure que l'onde se propage. Il est important de noter que toutes les antennes ne sont pas polarisées de manière rectiligne [I.12].

I.6.8.3. Polarisation elliptique

Il est important de noter que la conception et la mise en œuvre d'une antenne avec une polarisation elliptique peuvent être complexes et requièrent des connaissances approfondies en théorie des antennes et en conception d'antennes

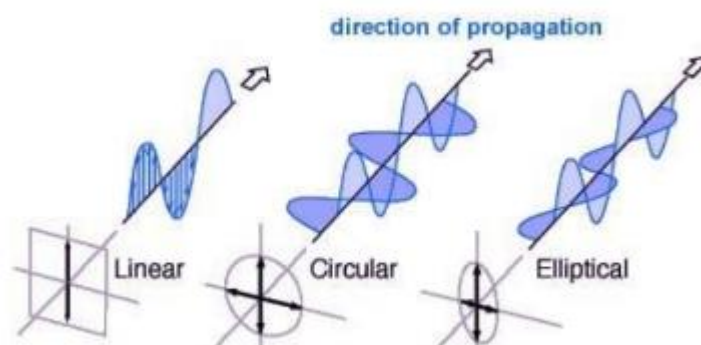


Figure I.11 : Différents types de polarisation.

I.7. Techniques d'alimentation

L'excitation joue un rôle crucial dans l'étude des antennes imprimées, car elle détermine la manière dont l'énergie est fournie à l'élément rayonnant. La méthode d'alimentation choisie a un impact direct sur le rayonnement de l'antenne et peut permettre de modifier ses performances. L'alimentation de l'antenne est également influencée par la manière dont elle est intégrée dans le dispositif global, en tenant compte de contraintes d'espace, de connectivité et d'adaptation aux autres composants du système. Une bonne conception de l'alimentation permet d'optimiser le rayonnement de l'antenne et d'assurer une performance optimale dans l'application spécifique [I.16].

Les méthodes d'alimentation des antennes plaques peuvent être classées en deux catégories :

- Les alimentations par contact (par sonde ou ligne micro ruban).
- Les alimentations par proximité (couplage électromagnétique par ligne ou fente).

I.7.1. Alimentation directe par une ligne microruban [I.17][I.18][I.19]

C'est l'une des techniques les plus couramment utilisées dans les antennes imprimées. Cependant, elle présente l'inconvénient de générer un rayonnement parasite, qui peut affecter les performances de l'antenne.

Dans la première situation, il existe une connexion directe entre une ligne microruban et l'élément rayonnant, comme illustré dans la figure I.12. Le point de connexion peut être positionné soit sur l'axe de symétrie du patch, soit déplacé complètement pour améliorer l'adaptation d'impédance [I.17].

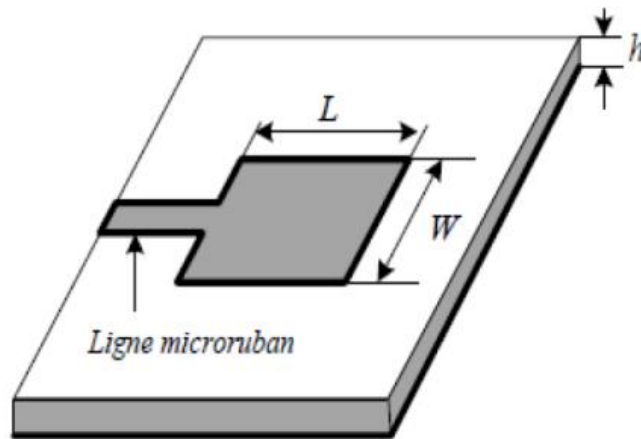


Figure I. 12 : Patch alimenté par ligne micro ruban [I.17].

I.7.2. Alimentation coaxiale [I.20]

L'alimentation coaxiale ou par sonde est une technique couramment utilisée pour alimenter les antennes micro-rubans, comme illustré dans la Figure I.13. Dans cette configuration, le conducteur central du connecteur coaxial traverse le diélectrique et est directement connecté au patch, tandis que le conducteur externe est relié au plan de masse.

L'un des avantages majeurs de cette méthode d'alimentation est sa flexibilité, car elle permet d'alimenter l'antenne à n'importe quel emplacement souhaité à l'intérieur du patch. Cela offre une plus grande liberté de conception et permet d'optimiser les performances de l'antenne en ajustant la position de l'alimentation. De plus, cette méthode est relativement simple à mettre en œuvre sur le plan de fabrication.

L'alimentation coaxiale présente également l'avantage d'une bonne adaptation d'impédance, ce qui contribue à minimiser les réflexions d'énergie et à améliorer l'efficacité de l'antenne.

Cependant, cette méthode présente des inconvénients au niveau du diagramme de rayonnement. En effet, la connexion génère un pic de courant localisé au niveau de l'élément rayonnant qui peut induire une dissymétrie dans le diagramme de rayonnement. De plus, des pertes apparaissent avec le perçage du plan de masse, du diélectrique ainsi que de l'élément plaqué.

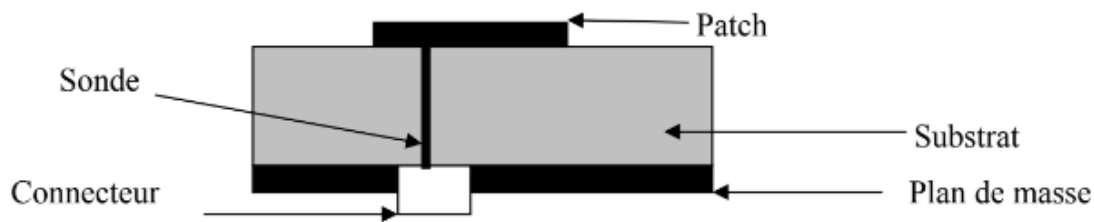


Figure I.13 : Antenne micro ruban alimenté par sonde.

I.7.3. Alimentation couplée par ouverture

Dans ce type d'alimentation, le patch de rayonnement et la ligne d'alimentation du micro-ruban sont séparés par un plan de masse, comme illustré dans la Figure I.14. La connexion entre le patch et la ligne d'alimentation est réalisée à travers une ouverture ou une fente dans le plan de masse [I.18] [I.21].

Dans cette configuration, on utilise généralement des matériaux à permittivité élevée pour le substrat inférieur, tandis que des matériaux à faible constante diélectrique sont utilisés pour le substrat supérieur afin d'optimiser le rayonnement du patch. Cette approche permet d'améliorer les performances de l'antenne en termes de bande passante et de gain.

Il convient de noter que ce type d'alimentation peut être plus complexe à concevoir en raison de la présence de couches multiples, ce qui entraîne une augmentation de l'épaisseur de l'antenne. Cependant, il offre l'avantage d'une bande passante élargie, ce qui permet à l'antenne de fonctionner sur une gamme plus étendue de fréquences.

Il est important de prendre en compte les considérations de conception liées à l'alimentation par ouverture ou fente, notamment en termes d'adaptation d'impédance, de polarisation et de rayonnement. Une analyse précise et une optimisation soignée sont nécessaires pour garantir les performances souhaitées de l'antenne tout en prenant en compte les contraintes liées à la structure multicouche.

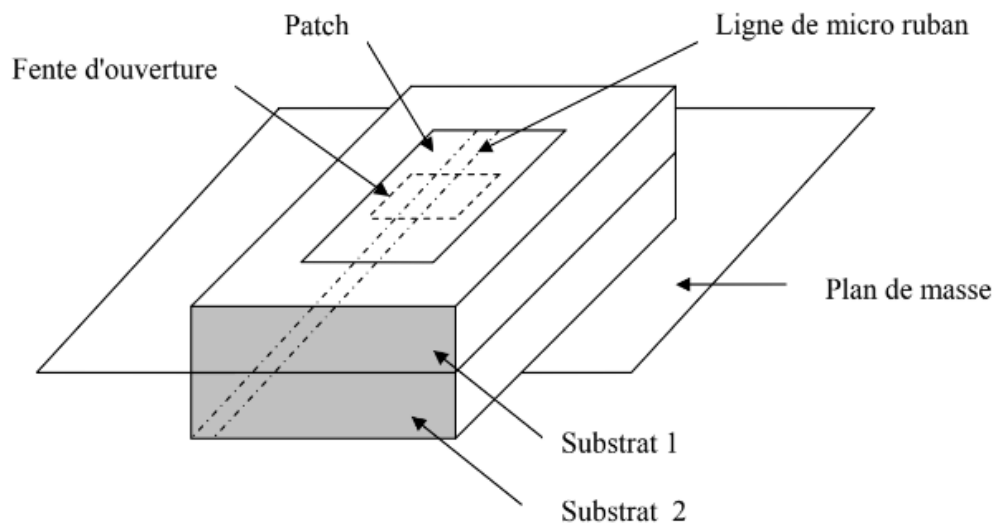


Figure I.14 : Alimentation couplée par ouverture.

I.7.4. Alimentation couplée par proximité

Ce type d'alimentation est représenté sur la Figure I.15, deux substrats diélectriques sont employés tels que la ligne d'alimentation est entre les deux substrats et le patch de rayonnement est sur le substrat supérieur.

L'avantage principal de cette technique d'alimentation est l'élimination du faux de rayonnement de l'alimentation et l'obtention d'une bande passante plus large et ceci par l'augmentation globale de l'épaisseur de l'antenne.

Parmi les inconvénients de cette méthode d'alimentation nous citons la difficulté de fabrication à cause des deux couches diélectriques nécessitant un alignement approprié, ainsi que la difficulté d'intégration de dispositifs actifs.

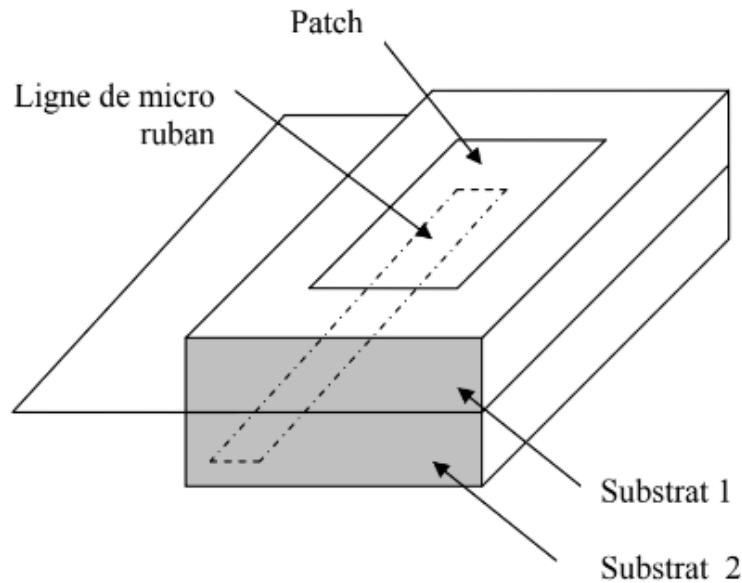


Figure I.15 : Alimentation couplée par proximité.

I.8. Domaines d'application des antennes imprimées

Voici les domaines d'application des antennes imprimées :

- Télécommunications mobiles : Les antennes imprimées sont largement utilisées dans les téléphones portables, les tablettes et autres dispositifs mobiles pour assurer une connectivité sans fil [I.23].
- Réseaux sans fil : Les antennes imprimées sont utilisées dans les réseaux sans fil tels que le Wi-Fi, le Bluetooth, les réseaux locaux sans fil (WLAN) et les réseaux de capteurs sans fil (WSN) [I.24].
- Radiodiffusion et télévision : Les antennes imprimées peuvent être utilisées pour les antennes de réception dans les radios et les téléviseurs, ainsi que pour les antennes de transmission dans les émetteurs [I.25].
- Radars : Elles sont couramment utilisées dans les systèmes radar, notamment pour la détection, la localisation et le suivi des objets [I.26].
- Systèmes de navigation : Les antennes imprimées peuvent être utilisées dans les systèmes de navigation par satellite tels que le GPS (Global Positioning System) et le GNSS (Global Navigation Satellite System) [I.27].
- Systèmes de surveillance : Les antennes imprimées sont utilisées dans les systèmes de surveillance sans fil, tels que les caméras de sécurité sans fil et les systèmes de surveillance environnementale [I.28].

- Aérospatiale et défense : Les antennes imprimées sont utilisées dans les avions, les satellites, les drones et les systèmes de communication militaires pour des applications de communication, de surveillance et de collecte de renseignements [I.29].

Ces domaines d'application ne sont qu'une sélection générale et les antennes imprimées peuvent être utilisées dans de nombreux autres domaines en fonction des besoins spécifiques. N'hésitez pas à me demander des informations plus détaillées sur un domaine d'application particulier si vous le souhaitez.

I.9. Réseau mobile LTE

La technologie LTE (Long Term Evolution) ou la 4G s'appuie sur un réseau de transport à commutation de paquet IP. Elle n'a pas prévu de mode d'acheminement pour la voix, autre que la VoIP, contrairement à la 3G qui transporte la voix en mode circuit.

Le LTE utilise des bandes de fréquences hertziennes d'une largeur pouvant varier de 1,4 MHz à 20 MHz, permettant ainsi d'obtenir (pour une bande 20 MHz) un débit binaire théorique pouvant atteindre 300 Mbit/s en « downlink », alors que la "vraie 4G" offre un débit descendant atteignant 1 Gbit/s. La technologie LTE repose sur une combinaison de technologies sophistiquées à même d'élever nettement le niveau de performances (très haut débit et latence) par rapport aux réseaux 3G existants. Le multiplexage OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) apporte une optimisation dans l'utilisation des fréquences en minimisant les interférences.

Le recours à des techniques d'antennes multiples (déjà utilisés pour le Wi-Fi ou le WiMax) permet de multiplier les canaux de communication parallèles, ce qui augmente le débit total et la portée.

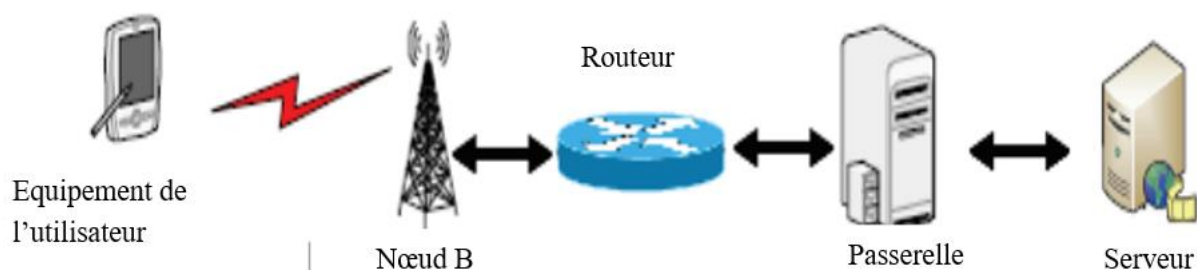


Figure I.16 : Présentation générale sur le système LTE [I.22].

La 4^{ème} génération vise à améliorer l'efficacité spectrale et à augmenter la capacité de gestion du nombre de mobiles dans une même cellule. Elle tente aussi d'offrir des débits élevés en situation de mobilité et à offrir une mobilité totale à l'utilisateur en établissant l'interopérabilité entre différentes technologies existantes. Elle vise à rendre le passage entre les réseaux transparent pour l'utilisateur, à éviter l'interruption des services durant le transfert intercellulaire, et à basculer l'utilisation vers le tout-IP.

I.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la géométrie de l'antenne imprimée et ces différentes formes. Puis, nous avons cité leurs avantages, leurs inconvénients et les caractéristiques radioélectriques de l'antenne patch tels que le coefficient de réflexion, le VSWR, l'impédance d'entrée de l'antenne, le gain, la directivité et le diagramme de rayonnement...etc) qui définissent les performances de l'antenne patch. Par la suite, nous avons consacré nous recherches sur les techniques d'alimentation de l'antenne patch ainsi que leurs avantages et inconvénients. Finalement, nous nous sommes intéressé aux réseaux mobiles LTE et ses différentes propriétés comme un exemple d'application pour notre projet Fin d'étude.

Le deuxième chapitre consiste à maîtriser les différentes techniques de miniaturisation de l'antenne patch et la technologie des métamatériaux.

CHAPITRE II : TECHNIQUES DE MINIATURISATION ET LES METAMATERIAUX

II.1. Introduction

Au cours des quarante dernières années, les avancées technologiques en matière de semi-conducteurs ont permis de réduire considérablement la taille et le poids des appareils électroniques grand public [II.1]. Un exemple frappant est celui des téléphones portables, dont la première version a été lancée par Motorola en 1983. Depuis lors, leur taille a considérablement diminué. [II.1]

En 1947, Wheeler a théorisé pour la première fois la miniaturisation des antennes [II.2]. Il a également commencé à se poser la question des limites de cette miniaturisation. En approximant les antennes par un circuit RLC parallèle ou série, selon leur mode de fonctionnement, il a établi un lien entre les paramètres de l'antenne et ses propriétés radiatives grâce au facteur de puissance rayonnée (FPR). Wheeler a ainsi été le premier à comprendre que la réduction de la taille d'une antenne impliquait une limite fondamentale à sa bande passante. Le FPR est lié directement au volume de l'antenne et est équivalent à l'inverse du facteur de qualité Q , ce qui est en fait équivalent à la bande passante des antennes miniatures [II.3].

Au cours des dernières années, les métamatériaux ont suscité un grand intérêt chez les chercheurs en raison de leurs propriétés uniques qui leur permettent de résoudre certains problèmes liés aux antennes et aux circuits micro-ondes. Les métamatériaux sont des structures composites qui se composent d'inclusions artificielles appelées cellules. Ces cellules sont intégrées dans un substrat diélectrique et ont une certaine forme. Les caractéristiques exceptionnelles et parfois paradoxales des métamatériaux sont difficiles à obtenir avec des matériaux naturels, mais peuvent être obtenues grâce à la sélection des paramètres de cellules corrects, tels que les dimensions, la forme et la configuration des cellules individuelles. La taille et la période des cellules de la plupart des métamatériaux sont beaucoup plus petites que la longueur d'onde de fonctionnement, ce qui leur permet d'être représentés comme un milieu homogène avec des valeurs effectives de permittivité et de perméabilité modifiables [II.4]. Les métamatériaux sont appliqués dans plusieurs domaines de la technologie des micro-ondes, notamment dans les antennes et les filtres [II.5][II.6][II.7][II.8].

Dans le deuxième chapitre, nous présentons, en premier lieu, les différentes techniques de miniaturisation, tels que la technique des fentes, des repliements et des courts-

circuits...etc. Ensuite, nous allons consacrer notre étude sur les métamatériaux d'une manière générale, ainsi que les résonateurs en anneaux fendus RAF et ces complémentaires CRAF. De même, notre attention sera focalisée sur les domaines d'applications des métamatériaux et leurs utilisations dans le domaine des antennes, de l'optique etc. Dans la dernière partie du chapitre, nous allons intéresser plus aux méthodes d'extraction des paramètres effectifs des métamatériaux.

II.2. Techniques de miniaturisation

Dans cette section, nous présentons une synthèse des méthodes les plus fréquemment utilisées pour réduire la taille des antennes, en utilisant des exemples récents tirés de la littérature scientifique. Ces approches visent toutes à artificiellement diminuer les dimensions du dispositif résonant. Elles incluent la manipulation de la géométrie de l'antenne, l'intégration d'éléments locaux et l'exploitation de matériaux spécifiques.

II.2.1. Fentes

Une approche couramment utilisée pour augmenter la longueur du trajet parcouru par les courants consiste à intégrer des fentes dans la structure rayonnante. Cette technique a pour effet de contraindre les courants à contourner les fentes, ce qui rallonge leur parcours. De plus, cela engendre des effets capacitifs et inductifs qui altèrent l'impédance d'entrée de l'antenne [II.9].

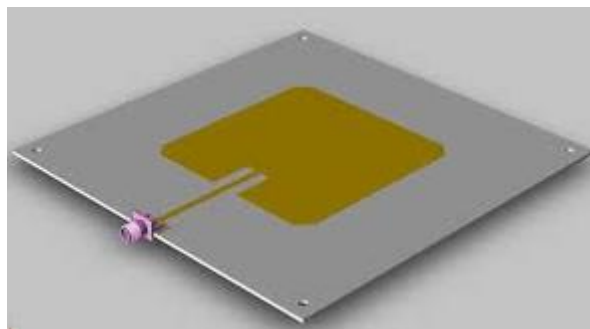


Figure II.1 : Photo du prototype réalisé avec fentes [II.10].

II.2.2. Repléments

Le repliement est une technique couramment utilisée pour réduire l'encombrement des antennes filaires et planaires. Cependant, il est important de l'employer avec prudence afin de ne pas compromettre excessivement les caractéristiques de rayonnement. Lors de la conception de l'antenne, il est essentiel de mener une étude approfondie afin de répondre aux besoins spécifiques de l'application pour laquelle elle sera utilisée. Il faut trouver un équilibre délicat entre la taille réduite de l'antenne et ses performances de rayonnement afin de garantir son efficacité optimale. Une attention particulière doit être portée aux contraintes de dimensionnement et aux exigences de performance pour assurer une conception réussie. [II.11][II.12][II.13]

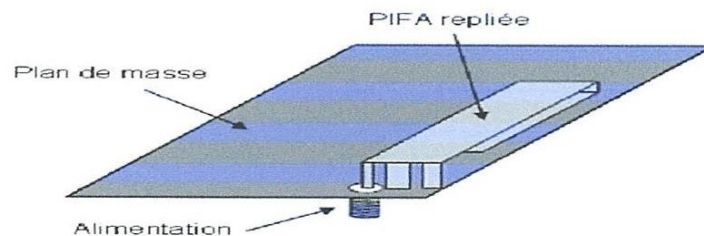


Figure II.2 : Exemple d'antenne PIFA repliée.

II.2.3. Court-circuit

L'utilisation de charges ou de courts-circuits est une méthode efficace pour réduire la taille de certaines antennes. Cependant, cela peut entraîner des compromis en termes de bande passante et d'efficacité de rayonnement. Une conception minutieuse est donc nécessaire pour maintenir une bonne adaptation de l'antenne tout en réduisant sa taille [II.14].

Grâce à cette technique, il est possible de réduire la taille de l'antenne jusqu'à 50%. Cependant, il convient de noter que cela peut entraîner une diminution de la bande passante et de l'efficacité de rayonnement. De plus, il est important de souligner que l'adaptation de la structure reste complexe et nécessite une conception méticuleuse afin de minimiser les pertes de radiation [II.14].

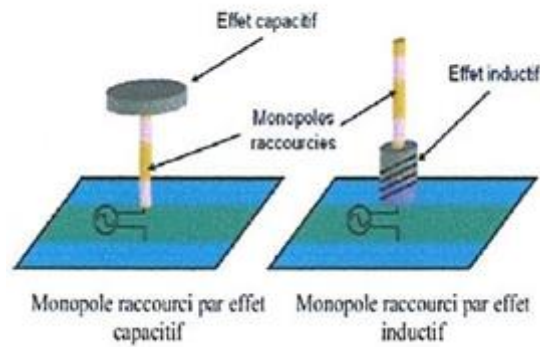


Figure II.3 : La miniaturisation en charge capacitif ou inductif.

II.2.4. Intégration des éléments localisés

Les méthodes précédemment mentionnées pour modifier la forme de l'antenne impliquent l'ajout de charges localisées ou de sections de ligne conductrice (capacitif ou inductif). L'objectif de ces techniques est d'augmenter artificiellement la longueur électrique de l'antenne, ce qui a pour effet de réduire sa fréquence de résonance [II.15].

Pour les composants discrets, des charges résistives, capacitives ou inductives peuvent être utilisées. Cependant, ces méthodes présentent l'inconvénient d'une perte d'efficacité de l'antenne due à la résistance ohmique [II.16].

Une amélioration maximale d'environ dix pourcent a été obtenue. En combinant l'optimisation de la largeur de piste [II.17] avec le chargement à la fois distribué et localisé par une capacité, une augmentation significative du rendement de rayonnement de cette antenne miniature a été réalisée, passant de 18% à plus de 60%.



Figure II. 4 : (a) Antenne miniature différentielle inspirée d'une IFA chargée par une capacité distribuée [II.16].

II.2.4.1. Charge résistive

La technique de charge résistive localisée implique l'ajout d'une résistance à un emplacement spécifique de l'antenne. Elle est utilisée pour modifier la géométrie de l'antenne et artificiellement augmenter sa longueur électrique, ce qui entraîne une diminution de sa fréquence de résonance. Bien que cette méthode soit efficace pour la modification de la forme de l'antenne, elle peut entraîner des pertes ohmiques et, par conséquent, une réduction de l'efficacité de rayonnement. Par conséquent, cette méthode n'est pas toujours préférable, et d'autres techniques, telles que l'utilisation de charges capacitives ou inductives, peuvent être employées pour modifier la géométrie de l'antenne.

II.2.4.2. Charge capacitive

La technique de charge capacitive localisée consiste à ajouter une capacité à un emplacement spécifique de l'antenne. Elle est utilisée pour modifier la géométrie de l'antenne et artificiellement augmenter sa longueur électrique, ce qui entraîne une diminution de sa fréquence de résonance. Les charges capacitives sont fréquemment employées dans les antennes pour accroître leur efficacité de rayonnement en créant un couplage capacitif entre les éléments de l'antenne. Cependant, l'utilisation de charges capacitives peut également entraîner des pertes d'efficacité de rayonnement en raison des pertes diélectriques et conductrices.

II.2.4.3. Charge inductive

La technique de charge inductive localisée implique l'ajout d'une inductance à un emplacement spécifique de l'antenne. Elle est utilisée pour modifier la géométrie de l'antenne et artificiellement augmenter sa longueur électrique, ce qui entraîne une diminution de sa fréquence de résonance. Les charges inductives sont souvent utilisées dans les antennes en boucle pour améliorer leur efficacité de rayonnement. Cependant, l'utilisation de charges inductives peut également entraîner des pertes d'efficacité de rayonnement en raison de l'impédance élevée de l'inductance.

II.3. Métamatériaux

II.3.1. Définition

Les métamatériaux se réfèrent à des matériaux artificiels qui exhibent des propriétés physiques supérieures à celles des matériaux naturels. Le préfixe "méta", dérivé du grec, signifie "au-delà de", soulignant ainsi que les métamatériaux dépassent les caractéristiques des matériaux naturels. En particulier dans le domaine de l'électromagnétisme, les métamatériaux se démarquent par leurs caractéristiques novatrices qui captivent l'imagination des chercheurs et des ingénieurs.

II.3.2. Historique

L'exploration des matériaux artificiels a débuté à la fin du 19e siècle. En 1898, J.C. Bose a réalisé la première expérience en micro-ondes en utilisant des fibres synthétiques torsadées pour induire une rotation de la polarisation des ondes électromagnétiques émises par un liquide, tel qu'une solution de sucre. Cependant, c'est à partir de 1967 que le concept de métamatériaux a été théorisé par Victor Veselago. Les premières réalisations pratiques de métamatériaux ont été réalisées en optique par le Dr Smith et John Pendroen en 2000 (et en 2006). Depuis lors, ces nouveaux matériaux ont fait l'objet d'études approfondies dans les laboratoires universitaires ainsi que par certains grands groupes industriels [II.18][II.19][II.20][II.21][II.22].

II.3.3. Classification des métamatériaux

Les métamatériaux sont classés en fonction des paramètres effectifs (la permittivité ϵ et la perméabilité μ). La classification est illustrée graphiquement par la figure II.5, selon le signe des propriétés électromagnétiques.

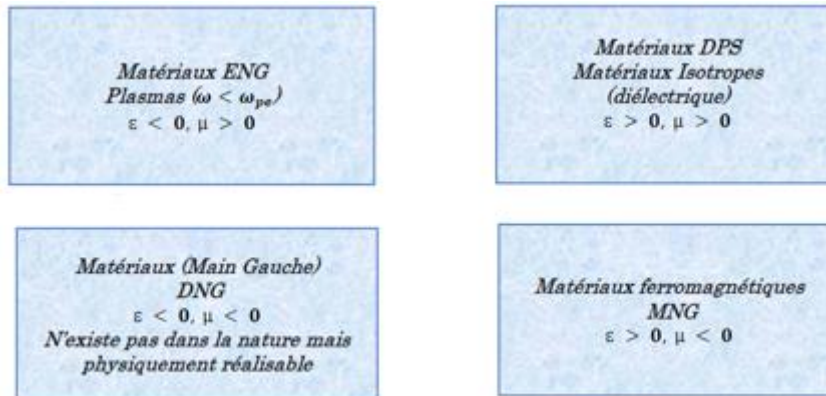


Figure II.5 : les différentes classifications des métamatériaux.

- Les matériaux doublement positives (DPS : double-positive materials) se caractérisent par des valeurs positives à la fois de la permittivité ($\epsilon > 0$) et de la perméabilité ($\mu > 0$). Dans ce cas, le milieu est considéré comme étant main droite, ce qui signifie que les champs électrique (E), magnétique (H) et le vecteur d'onde (K) forment un trièdre direct. Les matériaux diélectriques et magnétiques font partie de cette catégorie

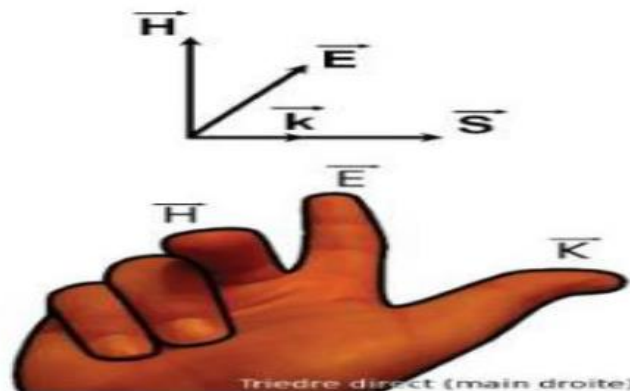


Figure II.6 : Cas correspondant à une propagation main droite.

- Les matériaux (ENG) sont appelés milieu EPSILON négative : caractérisés par une permittivité inférieure à zéro et une perméabilité qui est supérieure à zéro ($\epsilon < 0, \mu > 0$).
- Les matériaux (MNG) sont appelés milieu MUE négative : caractérisés par une permittivité positive et une perméabilité négative ($\epsilon > 0, \mu < 0$).
- Les matériaux doublement négatifs (DNG), ici la permittivité et la perméabilité sont les deux négatives à la fois ($\epsilon < 0, \mu < 0$), ce qui en résulte un indice de réfraction négative η . Ces matériaux sont des matériaux artificiels, non existant dans la nature mais physiquement réalisable.

II.3.3.1. Matériaux ENG

La permittivité négative est une caractéristique observée dans le domaine infrarouge et optique du spectre électromagnétique pour certains matériaux tels que les métaux alcalins. Cette propriété est largement inspirée par la physique des plasmas, qui présentent une permittivité négative en dessous de la fréquence du plasma. Une étude menée par Pendry et son équipe a démontré que l'arrangement périodique de tiges métalliques orientées parallèlement, ayant un rayon 'r' et une périodicité 'a', présente une réponse électromagnétique similaire à celle d'un plasma de faible densité [II.23].

La permittivité effective est donnée par l'équation suivante selon [II.23] :

$$\epsilon(\omega) = \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (\text{II.1})$$

La fréquence de plasma est calculée par l'expression suivante :

$$\omega_p = \frac{\rho e^2}{\epsilon_0 m_{eff}} \quad (\text{II.2})$$

Dans l'équation (II.2), ρ représente la densité d'électron, e sa charge et m_{eff} sa masse effective.

II.3.3.2. Matériaux MNG

Il est possible que dans le domaine des micro-ondes, certains matériaux ferromagnétiques aient une perméabilité négative. Cependant, ces matériaux sont connus pour être lourds et causer des pertes magnétiques importantes [II.24].

En 1999, Pendry a introduit une structure métallique artificielle appelée "rouleau suisse" (swiss-roll), comme illustré dans la figure II.7. Cette structure présente une résonance magnétique sans avoir besoin de composants magnétiques. Chaque rouleau suisse est composé d'un cylindre de rayon "R" sur lequel est enroulée une spirale conductrice isolée de "N" tours. L'espace entre deux tours consécutifs est désigné par "dc".

Ainsi, il n'y a aucun contact électrique entre les couches, comme rapporté dans [II.25].

Lorsqu'un champ magnétique alternatif est appliqué le long de l'axe du cylindre, cela induit un courant dans le conducteur.

La capacité résultante forme un circuit résonant qui permet la circulation du courant.

La perméabilité effective est calculée en utilisant l'équation suivante, rapportée dans [II.25]:

$$\mu_{eff} = 1 - \frac{f}{1 + \frac{2\sigma i}{\omega R \mu_0 (N-1)} - \frac{d_c c_0^2}{2\pi^2 R^3 (N-1) \omega^2}} \quad (\text{II.3})$$

c_0 : Vitesse de la lumière dans le vide = 3×10^8 m/s

ω : Pulsation angulaire.

σ : Conductivité de la feuille spirale.

R: Rayon intérieur de la bague plus petite

ε : Permittivité de l'isolant entre les couches conductrices.

f: Volume de la structure.

La perméabilité effective peut donc s'écrire sous la forme suivante [II.25]:

$$\mu_{eff} = 1 - \frac{f\omega^2}{\omega^2 - \omega_0^2 + i\Gamma\omega} \quad (\text{II.4})$$

Γ : Coefficient de réflexion.

ω_0 : Fréquence émise par le rayonnement de la source.

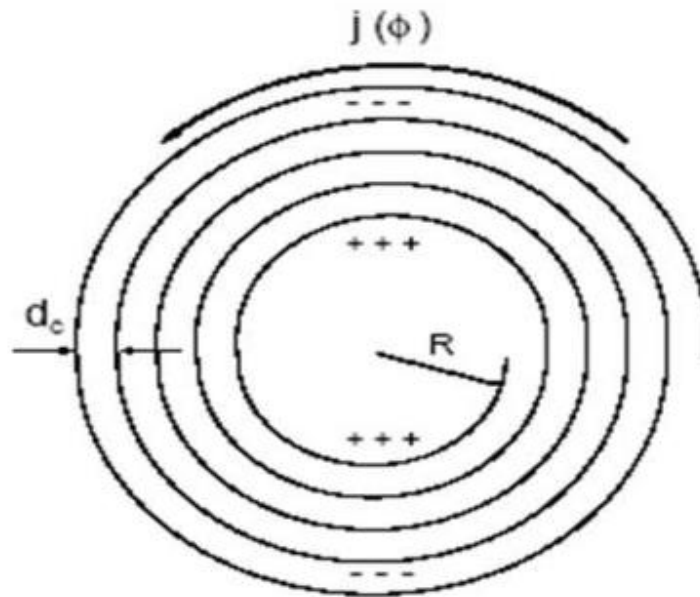


Figure II.7 : Structure rouleau suisse introduite par Pendry.

La structure du "rouleau suisse" résonne uniquement lorsque le champ magnétique est appliqué le long de son axe, et pas dans les autres directions. De plus, lorsque le champ électrique est parallèle aux cylindres, la structure du rouleau présente une absorption des ondes transverses incidentes. L'équipe de recherche a exploré différents types de Résonateurs en Anneau Fendu (RAF) présentant diverses formes géométriques, telles que des formes carrées, circulaires, etc., ainsi que des structures comportant un ou deux anneaux. Leur objectif était de réduire l'absorption de la structure du "rouleau suisse" [II.25].

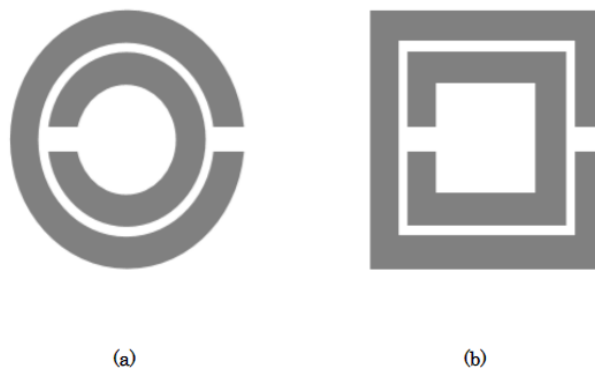


Figure II.8 : Résonateur en Anneau Fendu RAF avec double anneaux sous la forme (a) circulaire et (b) carrée.

II.3.3.3. Matériaux doublement négative DNG

Les matériaux doublement négatifs (DNG - Double Negative Materials) sont des matériaux qui présentent à la fois une permittivité relative et une perméabilité relative négatives. Cela signifie que ces matériaux ont la capacité de réfracter la lumière de manière inhabituelle, en inversant à la fois la direction de la propagation et la phase de l'onde électromagnétique. Les DNG sont souvent associés aux métamatériaux, qui sont des structures artificielles conçues pour avoir des propriétés électromagnétiques spécifiques. Les DNG ont suscité un grand intérêt dans le domaine de l'optique et des télécommunications en raison de leur capacité à manipuler la lumière de manière unique et à ouvrir de nouvelles possibilités pour le développement de dispositifs optiques avancés [II.25].

II.3.4. Cellules SRR (Split Ring Resonator)

En 1999, J. Pendry a introduit un composant artificiel appelé Résonateur en Anneau Fendu (RAF), qui présente une perméabilité effective négative dans une plage de fréquences étroite autour de sa fréquence de résonance [II.26] [II.27].

Les résonateurs peuvent avoir différentes formes géométriques et doivent être correctement dimensionnés pour assurer leur bon fonctionnement. Pour étudier l'effet électromagnétique de cet élément, il est généralement placé sur un substrat et inséré dans un guide d'onde ou une boîte de rayonnement, permettant ainsi de mesurer les paramètres électromagnétiques tels que la permittivité, la perméabilité et l'indice de réfraction à partir des coefficients de réflexion et de transmission. Pour activer les anneaux, un champ électromagnétique variable dans le temps est appliqué perpendiculairement à leurs surfaces.

Ce champ induit des courants à l'intérieur de la structure, en fonction de ses propriétés de résonance, ce qui engendre un champ électromagnétique pouvant s'opposer ou renforcer le champ incident. Cela conduit à une perméabilité effective positive ou négative. La Figure II.9 illustre deux exemples de géométries planaires de cellules unitaires RAF.

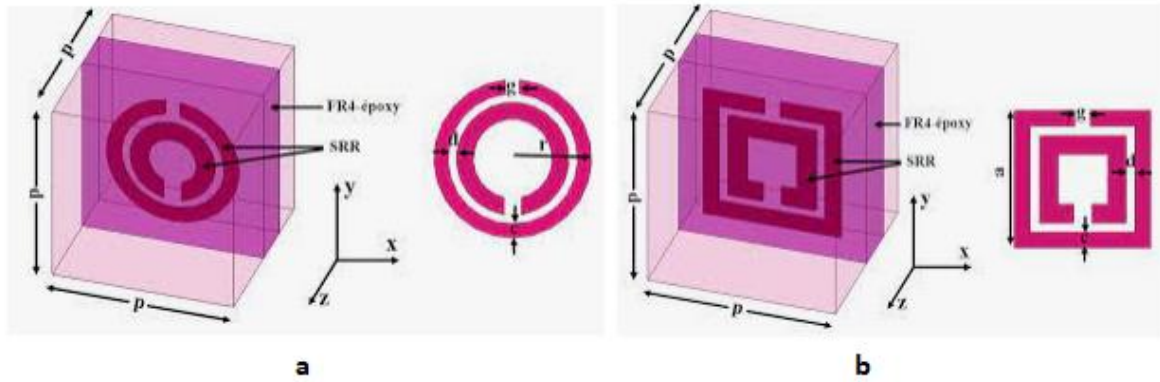


Figure II.9 : Géométries planaires des cellules unitaires d'un résonateur d'anneaux fendus.
 a) RAF circulaire ; b) RAF carrée.

L'expression approximative de la perméabilité effective d'une cellule SRR est donnée par l'expression suivante selon [II.28]:

$$\mu_{eff} = 1 - \frac{\frac{\pi r^2}{a}}{1 + \frac{2\sigma_i}{\omega r \mu_0} - \frac{3d}{\pi^2 r^3 \varepsilon_0 \varepsilon \omega^2}} \quad (\text{II.5})$$

a : Longueur de la cellule unitaire

σ_i : Conductivité électrique

r : Rayon de l'anneau antérieur

ω : Largeur de l'anneau

d : Distance radiale entre les anneaux intérieur et extérieur.

La Figure II.10 illustre la variation de la perméabilité en fonction de la fréquence. Cette représentation graphique met en évidence le fait que la perméabilité μ devient négative dans la plage de fréquences allant de la fréquence de résonance ω_{0m} à la fréquence du plasma magnétique ω_{pm} . Par conséquent, il est possible de conclure que dans cette plage de fréquences, le matériau présente des propriétés de métamatériaux magnétiques, avec une perméabilité négative.

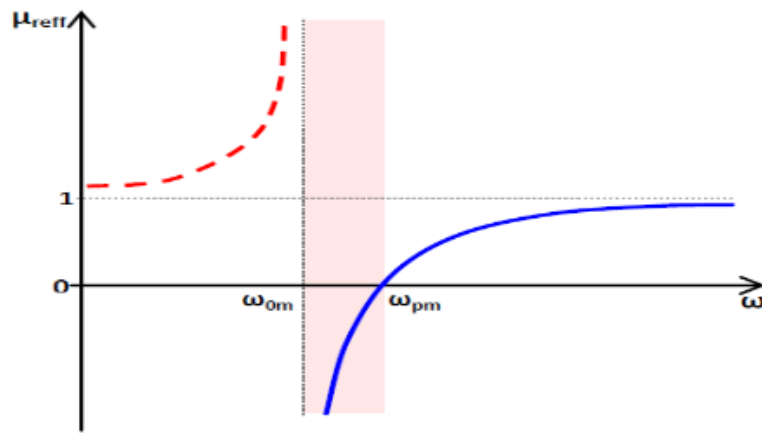


Figure II.10 : Perméabilité effective en fonction de la fréquence.

II.3.5. Cellules RAFC résonateurs en anneaux fendus complémentaires ou (CSRR)

Le Résonateur en Anneau Fendu Complémentaire (RAFC) est une structure dérivée du Résonateur en Anneau Fendu (RAF) ou Split Ring Resonator (SRR), qui a été introduit par Pendry en 1999. Le RAFC est conçu comme le complémentaire du RAF, avec une configuration différente. Au lieu d'avoir deux anneaux interrompus concentriques gravés sur un support diélectrique en métal, le RAFC utilise deux fentes en forme d'anneaux interrompus concentriques en cuivre disposées sur un substrat diélectrique. Cette modification dans la conception du RAFC remplace les parties conductrices (anneaux) et diélectriques (fentes) du RAF par des fentes et du cuivre respectivement. La Figure II.11 illustre clairement cette différence entre le RAF et le RAFC [II.29].

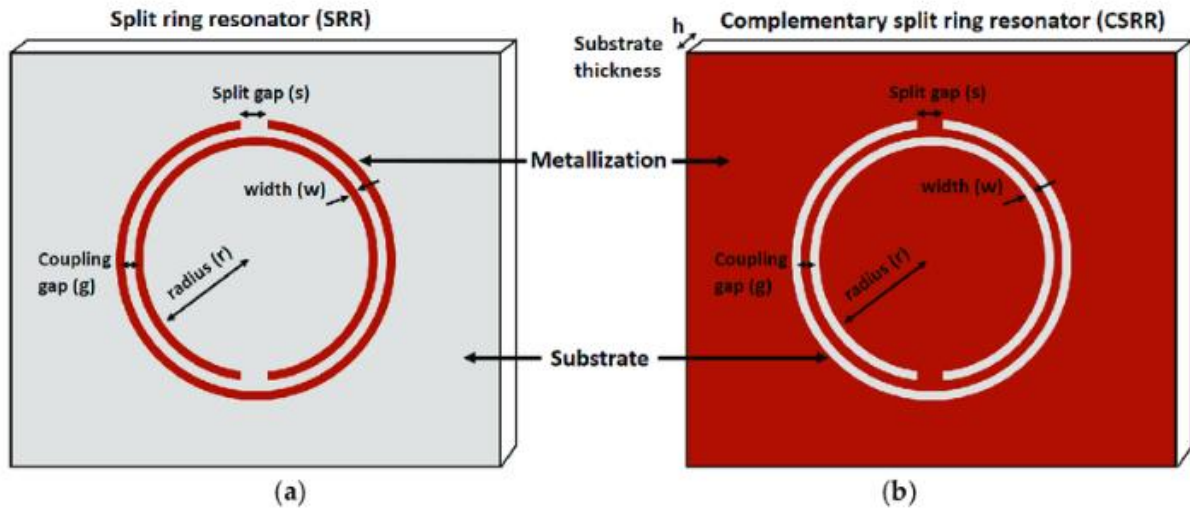


Figure II.11 : Différence entre une conception (a) RAF et (b) une conception complémentaire RAFC.

II.3.6. Applications des métamatériaux

Les métamatériaux jouent un rôle essentiel dans le domaine des télécommunications, en particulier dans la conception d'antennes et de filtres. Ces dernières années, l'intérêt pour l'utilisation des métamatériaux dans les antennes a considérablement augmenté en raison de leurs capacités à améliorer les performances des antennes. Les métamatériaux permettent d'élargir la bande passante des antennes, ce qui est crucial pour la transmission et la réception de signaux à large spectre. De plus, ils offrent la possibilité de rejeter les bandes de fréquences indésirables, améliorant ainsi la sélectivité des antennes [II.30-II.35].

II.3.6.1. Applications des métamatériaux dans le domaine d'antennes

Les métamatériaux ont considérablement amélioré les performances des antennes. Dans cette section, nous allons présenter des exemples tirés de travaux antérieurs qui ont démontré que l'intégration d'une ou plusieurs cellules métamatériaux a conduit à des améliorations significatives.

➤ *Utilisation d'une cellule métamatériaux de type RAFC pour obtenir une antenne compacte*

Il existe de nombreuses solutions techniques qui sont utilisées pour concevoir des antennes compactes, comme le substrat diélectrique à haute permittivité des antennes microbandes [II.39], les broches de court-circuit [II.36] [II.37], les murs de court-circuit [II.38], l'insertion de certaines perturbations dans la structure de l'antenne, l'application de la géométrie fractale,..etc. Récemment, de nombreux concepteurs ont utilisé des métamatériaux comme structure de masse défectueuse (DGS) pour réduire la taille de l'antenne. Dans ce cas, les cellules unitaires des métamatériaux ont des propriétés inhabituelles à la fréquence de résonance de l'antenne conçue ; la dimension de ces cellules unitaires est égale à la taille des parties enlevées de la DGS [II.40].

➤ *Utilisation des métamatériaux pour l'amélioration de gain de l'antenne patch*

Il est nécessaire de surmonter le faible gain dans les antennes microbandes pour assurer une transmission et une réception de systèmes d'informations adéquates. Les concepteurs se tournent souvent vers l'utilisation de métamatériaux comme solution pour améliorer le gain des antennes.

➤ *Utilisation des métamatériaux de type RAFC pour élargir la bande passante*

Les métamatériaux sont utilisés également pour élargir la bande passante de l'antenne patch. Pour atteindre cet objectif, les métamatériaux sont utilisés comme superstrat placé au-dessus de la surface de rayonnement (comme la méthode d'amélioration du gain).

L'application des métamatériaux comme cellule DGS permet non seulement de réduire la taille mais aussi d'augmenter la largeur de la bande passante.

➤ *Utilisation des métamatériaux pour concevoir une antenne multi-bande*

L'utilisation de métamatériaux dans la conception des antennes permet d'obtenir des performances améliorées, une taille réduite et la possibilité de créer des antennes multi-bandes en ajustant la fréquence de résonance. Cela ouvre de nouvelles perspectives pour les applications des antennes dans les télécommunications [II.43].

Les métamatériaux présentent la capacité de soutenir des indices de réfraction négatifs aux fréquences de résonance et de mettre en œuvre des structures de cellules unitaires symétriques. Cette propriété peut être exploitée pour concevoir des antennes multi-fréquences de taille réduite par rapport aux antennes traditionnelles [II.41].

Une combinaison de métamatériaux avec une antenne imprimée ou fractale permet de créer une antenne à caractère multi-bande. La taille de cette antenne est principalement déterminée par la fréquence la plus basse [II.42].

II.3.6.2. Applications des métamatériaux dans le domaine des filtres

L'intégration de métamatériaux dans la conception de filtres présente des avantages significatifs, notamment l'élargissement de la bande passante et la possibilité de concevoir des filtres multibandes. Ces avancées ouvrent de nouvelles perspectives pour répondre aux besoins actuels du marché des télécommunications.

Dans la suite, nous mettons en évidence deux exemples de recherches antérieures qui illustrent l'intérêt d'incorporer des métamatériaux dans la conception de filtres.

La première utilité des métamatériaux réside dans leur capacité à élargir la bande passante des filtres. Grâce à leurs propriétés électromagnétiques uniques, les métamatériaux permettent de manipuler les ondes et de créer des structures compactes tout en offrant une réponse en fréquence étendue. Ainsi, il est possible de concevoir des filtres à large bande passante tout en conservant des dimensions réduites.

Le deuxième avantage des métamatériaux est leur capacité à permettre la conception de filtres multibandes. Grâce à la possibilité d'exploiter la réfraction négative, les métamatériaux permettent de concevoir des structures de filtres capables de filtrer simultanément plusieurs bandes de fréquences. Cette fonctionnalité permet d'optimiser l'utilisation du spectre des fréquences et de répondre aux exigences croissantes des communications multifréquences.

➤ *Utilisation d'une cellule métamatériaux de type RAF carré pour concevoir un filtre coupe bande*

Dans [II.44], H. Laljet al. ont présenté l'un des exemples les plus connus de l'application d'une cellule RAF pour concevoir un filtre coupe bande.

Le filtre coupe bande conçus est constitué d'une simple ligne micro ruban de 50Ω avec une cellule RAF carré placé à proximité et gravé sur un substrat de type Duroid et un plan de masse totale

➤ *Utilisation d'un réseau de cellule métamatériaux RAFC pour concevoir un filtre multi bande*

L'utilisation d'un réseau de cellules métamatériaux RAFC offre une approche intéressante pour la conception de filtres multi-bandes. Cette méthode permet de réaliser un filtrage sélectif dans plusieurs bandes de fréquences en ajustant les paramètres géométriques des cellules RAFC. Cette technologie présente un potentiel significatif pour répondre aux exigences croissantes des systèmes de communication multi-bandes dans le domaine des télécommunications [II.51].

L'exploitation des cellules métamatériaux dans le domaine des filtres est une solution performante et qui répond aux exigences de marché actuel des télécommunications.

II.3.7. Extraction de la permittivité effective ϵ_r et la perméabilité effective μ_r

Les scientifiques se sont récemment intéressés aux méthodes d'extraction efficace des paramètres des métamatériaux, afin de caractériser leurs propriétés électromagnétiques. Plusieurs méthodes sont disponibles à cet effet, telles que la méthode de Nicolson Ross Weir (NRW), la méthode de Smith, la méthode de transmission réflexion (TR), et bien d'autres.

Ces méthodes permettent d'extraire de manière efficace les paramètres des métamatériaux, fournissant ainsi des informations précieuses sur leurs caractéristiques électromagnétiques.

II.3.7.1. Méthode de Nicolson-Rose-Weir (NRW)

La méthode de Nicolson-Ross-Weir, également connue sous le nom de méthode NRW, est une technique couramment utilisée pour caractériser les propriétés des matériaux.

La méthode Nicolson-Ross-Weir (NRW) est une approche utilisée pour extraire les propriétés électromagnétiques d'un milieu composite, telles que l'indice de réfraction η , l'impédance d'onde Z , ainsi que les paramètres effectifs ϵ_r et μ_r [II.45].

Cette méthode repose sur l'analyse des paramètres de réflexion et de transmission (S_{ij}) mesurés ou simulés. En utilisant ces données, la méthode NRW permet de déterminer les propriétés électromagnétiques du milieu composite, ce qui est particulièrement utile pour la caractérisation des métamatériaux et d'autres matériaux artificiels [II.46].

Parmi les avantages de la méthode NRW, on peut citer :

- Rapide, non répétitif.
- Applicable aux guides d'ondes et à la ligne coaxiale.

Le coefficient de réflexion est déterminé comme suit [II.47] :

$$\Gamma = \frac{(z_0 - 1)}{(z_0 + 1)} \quad (\text{II.6})$$

Z_0 est l'impédance relative pour la permittivité et la perméabilité effective :

$$z_0 = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \quad (\text{II.7})$$

Les paramètres S (S_{11} et S_{21}) sont exprimés comme suit :

$$S_{11} = \frac{(1 - \Gamma^2)z}{(1 - \Gamma^2 z^2)} \quad (\text{II.8})$$

$$S_{21} = \frac{(1 - z^2)\Gamma}{1 - \Gamma^2 z^2} \quad (\text{II.9})$$

A partir de S_{11} et S_{21} , les deux vecteurs V_1 et V_2 sont créés comme suit :

$$V_1 = S_{21} + S_{11} \quad (\text{II.10})$$

$$V_2 = S_{21} - S_{11} \quad (\text{II.11})$$

L'approche de Nicolson-Rose-Weir (NRW) est utilisée pour séparer les paramètres effectifs depuis le coefficient de réflexion S_{11} et le coefficient de transmission S_{21} . Donc les paramètres effectifs (ϵ_{eff} , μ_{eff}) sont calculés comme suit :

$$\epsilon_r = \frac{c}{j\pi f d} \times \frac{(1 - v_1)}{(1 + v_1)} \quad (\text{II.12})$$

$$\mu_r = \frac{c}{j\pi f d} \times \frac{(1-v_2)}{(1+v_2)} \quad (\text{II.13})$$

L'indice de réfraction est calculé à partir des paramètres S (**S11** et **S21**) :

$$\eta = \frac{c}{j\pi f d} \times \sqrt{\frac{(s_{21}-1)^2 - s_{11}^2}{(s_{21}+1)^2 - s_{11}^2}} \quad (\text{II.14})$$

Avec:

f : Bande de fréquences en GHz

d : Epaisseur de substrat en m.

II.3.7.2 Méthode de transmission-réflexion TR (Transmission-Réflexion method)

La méthode de transmission-réflexion (TR) est une approche largement utilisée pour le calcul de l'indice de réfraction η des métamatériaux. Elle est considérée comme l'une des méthodes les plus précises pour déterminer les paramètres effectifs ' ϵ_{eff} ' et ' μ_{eff} ' des métamatériaux, qui sont des matériaux composites composés de réseaux d'inclusions métalliques de formes complexes. En utilisant cette méthode, l'indice de réfraction η peut être calculé directement à partir des paramètres de transmission-réflexion (S_{ij}) mesurés ou simulés. La méthode TR est particulièrement adaptée à la caractérisation des métamatériaux, car elle prend en compte les interactions complexes entre les ondes électromagnétiques et les structures métalliques présentes dans le matériau [II.48].

Effectivement, la méthode TR permet un calcul direct de l'indice de réfraction η des métamatériaux. Elle implique également la détermination de l'impédance du matériau Z et de l'indice de branchement m . Il est important de noter que les paramètres diélectriques ϵ et magnétiques μ des métamatériaux peuvent varier en fonction de la fréquence des ondes électromagnétiques. Ainsi, en utilisant la méthode TR, il est possible de caractériser ces variations de ϵ et μ à différentes fréquences, ce qui permet d'obtenir une meilleure compréhension des propriétés électromagnétiques des métamatériaux sur une large bande de fréquences [II.49].

L'impédance Z est donnée par :

$$Z = \pm \sqrt{\frac{(1+s_{11})^2 - s_{21}^2}{(1-s_{11})^2 - s_{21}^2}} \quad (\text{II.15})$$

L'indice de réfraction η est calculé par la relation suivante :

$$\eta = \frac{1}{k_0 d} \{ [\ln(e^{ink_0 d})]'' + 2m\pi \} - i[\ln(e^{ink_0 d})]' \quad (\text{II. 16})$$

[]'' : Représente un nombre complexe.

[]' : Représente la partie réel de nombre complexe.

k_0 : Vecteur d'onde.

d : Epaisseur de substrat en mètre

m : Indice des branchements.

Après le calcul de Z et η , on peut obtenir la permittivité effective ε_{eff} et la perméabilité effective μ_{eff} , en appliquant les relations suivantes :

$$\varepsilon = \frac{\eta}{z} \quad (\text{II. 17})$$

$$\mu = \eta \times z \quad (\text{II. 18})$$

II.3.7.3. Méthode de Smith

Le Dr. Smith a analysé ses travaux en utilisant une méthode claire qui se base sur l'extraction des paramètres tels que S_{ij} , l'impédance Z , l'indice de réfraction η , la permittivité ε_r et la perméabilité μ_r effectives. Cette méthode permet d'extraire les paramètres effectifs de manière univoque en raison de la nature multidimensionnelle de la fonction cosinus inverse [II.50].

L'impédance z est défini comme suit [II.50] :

$$Z = \pm \sqrt{\frac{(1+s_{11})^2 - s_{21}^2}{(1-s_{11})^2 - s_{21}^2}} \quad (\text{II. 19})$$

Avec

L'indice de réfraction η est basé sur la fonction cosinus inverse comme suit :

$$\eta = \frac{1}{kd} \cos^{-1} \frac{1-s_{11}^2+s_{21}^2}{2s_{21}} \quad (\text{II. 20})$$

Avec :

k : Vecteur d'onde en espace libre.

d : Epaisseur de substrat en mètre.

Après le calcul de Z et η , on peut obtenir la permittivité effective ϵ_r et la perméabilité effective μ_r en appliquant les relations suivantes :

$$\epsilon = \frac{\eta}{z} \quad (\text{II. 21})$$

$$\mu = \eta \times z \quad (\text{II. 22})$$

II.4. Conclusion

Dans ce chapitre introductif, nous avons présenté dans la première partie les techniques de miniaturisation. Les techniques de miniaturisation ont été largement étudiées et appliquées dans différents domaines tels que la microélectronique, les télécommunications, les capteurs, etc. Il est clair que les techniques de miniaturisation continueront d'être un domaine de recherche important pour les années à venir, avec des applications potentielles dans divers domaines. Ces techniques ont permis de réaliser des dispositifs compacts et performants avec des dimensions réduites.

Et dans la deuxième partie nous avons présenté un rappel théorique des métamatériaux, qui sont caractérisés par des propriétés électromagnétiques exceptionnelles (permittivité et/ou perméabilité négatives). Ensuite, nous avons exposé les classifications et les domaines d'applications de la technologie métamatériaux. Finalement, nous avons cité les méthodes d'extraction de la permittivité effective ϵ_r et la perméabilité effective μ_r des métamatériaux.

Dans le troisième chapitre, nous allons concevoir et réaliser une structure d'antenne patch miniature à base des métamatériaux à la fréquence de résonance 2.6 GHz selon les réseaux mobiles LTE.

CHAPITRE III : SIMULATION ET RESULTATS

III.1. Introduction

Dans notre projet de fin d'étude, nous allons concevoir et réaliser une antenne patch miniature à base des métamatériaux pour les réseaux mobiles LTE.

Nous allons tout d'abord donner un bref aperçu sur le logiciel de conception CST Microwave studio. Notre première tâche consistera à concevoir une antenne patch rectangulaire initiale suivant un cahier de charge où nous allons calculer ses dimensions à partir des équations théoriques d'une antenne patch rectangulaire [I.10], puis l'adapter à la fréquence de résonance 2.6 GHz en ajoutant des fentes de forme rectangulaire sur l'élément rayonnant ce qui va réduire l'encombrement de l'antenne initiale et améliorer l'adaptation.

La deuxième partie de ce chapitre sera consacrée à la reconfiguration fréquentielle de l'antenne que nous avons conçue, en utilisant ces cellules CSRR insérés sur le plan de masse de l'antenne proposée ce qui diminuée sa fréquence de résonance. Par la suite, nous allons réduire encore l'encombrement de l'antenne proposée qui fonctionne dans la bande de fréquence 2.6 GHz et qui trouve leur application dans les réseaux mobiles LTE.

Finalement, nous allons appliquer la technique de DGS et insérer des fentes sur le plan de masse afin de réduire toujours la taille de l'antenne finale proposée et d'améliorer ces performances (Gain, bande passante, adaptation ...Etc).

III. 2. Définition du logiciel CST Microwave Studio

La société allemande CST (Computer Simulation Technology) a été créée en 1992 et a lancé la première version de CST Microwave Studio en 1998.

Le logiciel CST est utilisé pour résoudre les équations qui décrivent le champ électromagnétique. Pour cela, il fait appel à la méthode des intégrales finies (FIT), qui a été développée par Tomas Weiland en 1977 lors de sa thèse universitaire à Darmstadt.

Cette méthode consiste à reformuler les équations intégrales de Maxwell de manière discrète, de façon à les rendre compatibles avec l'informatique et à pouvoir résoudre des problèmes impliquant des géométries complexes.

La FIT décrit les équations de Maxwell sur un espace de grille, tout en préservant les propriétés de conservation de l'énergie et en utilisant des équations différentielles spécifiques

telles que l'équation de Poisson ou l'équation d'onde. Il s'agit d'une approche très sophistiquée qui peut être utilisée à la fois dans le domaine temporel et dans le domaine fréquentiel [III.1].

Une fois le modèle de structure choisi, nous accédons à l'interface d'utilisateur du CST.

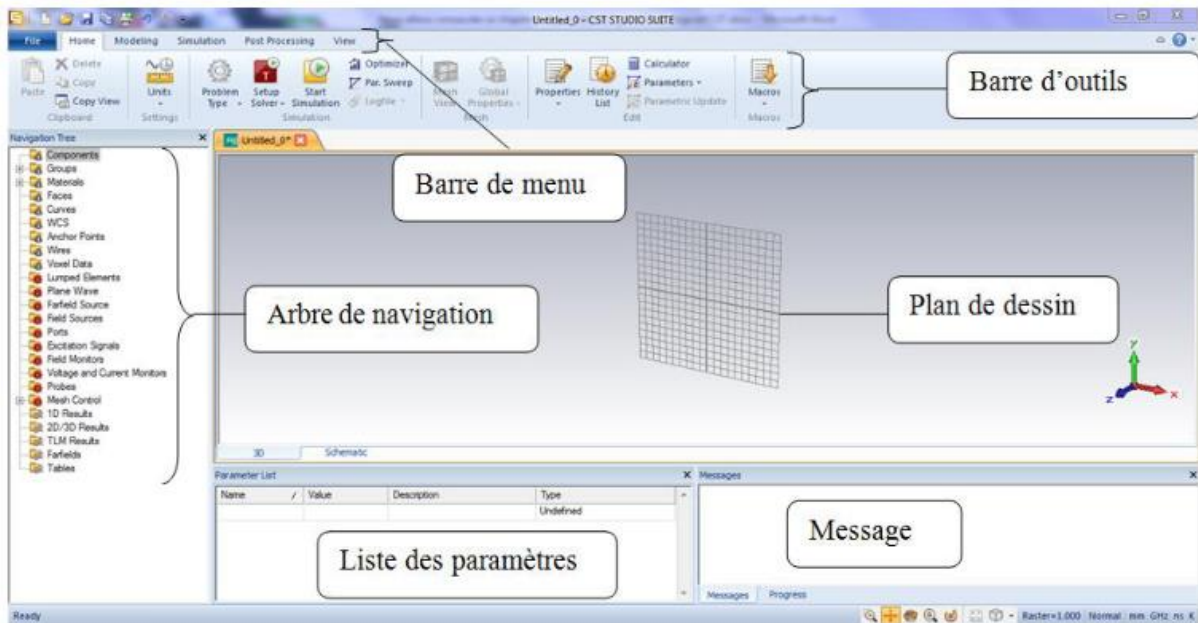


Figure III.1 : Interface du logiciel CST.

III.3. Conception d'une antenne patch rectangulaire

L'antenne initiale est une antenne patch rectangulaire constituée d'un patch rectangulaire ($W_p \times L_p$) alimentée par une ligne micro ruban d'impédance caractéristique $Z_c = 50\Omega$, avec un substrat ($W \times L$) de type FR-4 d'une permittivité relative $\epsilon_r = 4.3$ et d'une épaisseur $h = 1.6$ mm. Le plan de masse ($W \times L$) recouvre toute la face arrière du substrat. Le métal utilisé pour les conducteurs (patch, ligne micro ruban et plan de masse) est le cuivre.

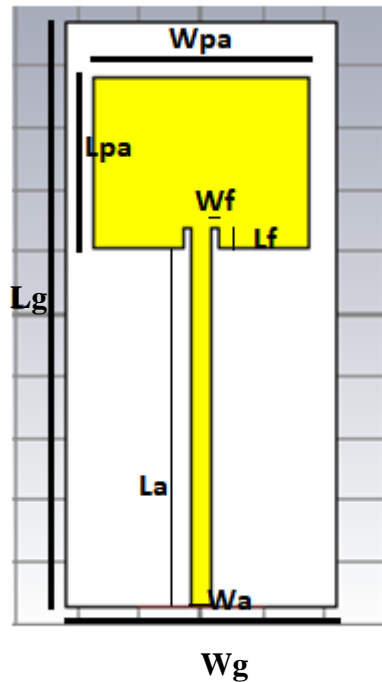


Figure III.2 : Antenne patch initiale.

Les dimensions de l'antenne patch initiale sont déterminées à partir des équations théoriques selon la référence [I.10]. Ces dimensions sont indiquées dans le tableau suivant :

Paramètres	Wg	Lg	Wpa	Lpa	Wa	La	h	T	Wf	Lf
Dimensions (mm)	44	94.15	35	27.46	1	57.685	1.6	0.035	1.5	3

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

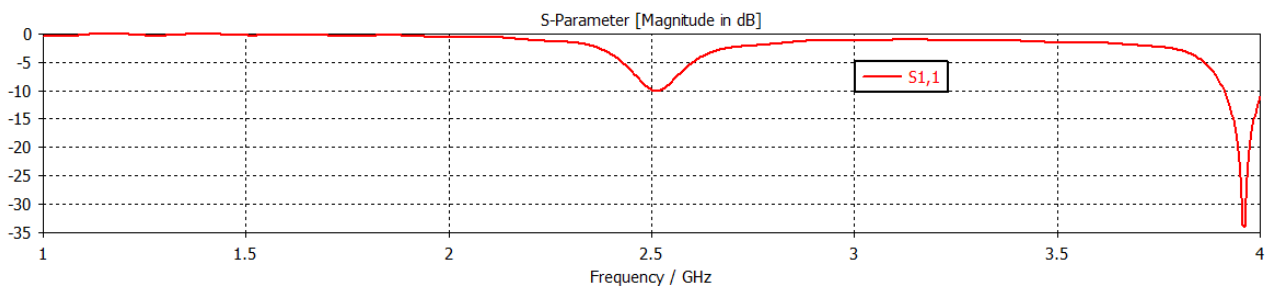


Figure III.3 : Coefficient de réflexion de l'antenne patch initiale.

D'après la figure III.3, on remarque une désadaptation à la fréquence de résonance 2.6 GHz tel que le coefficient de réflexion est de -5 dB. Pour améliorer l'adaptation de

l'antenne, nous avons effectué une étude paramétrique et ajouté des fentes sur l'élément rayonnant.

III.4. Adaptation de l'antenne patch initiale

Notre objectif est adapté l'antenne initiale à la fréquence de résonance 2.6GHz pour l'application LTE. L'antenne patch proposée est obtenue après une étude paramétrique et par l'insertion des fentes de forme rectangulaire sur l'élément rayonnant (figure III.4). Les nouvelles dimensions de l'antenne patch proposée sont montrées dans le tableau III.2 sachant que $W_{s1}=W_{s3}$; $L_{s1}=L_{s3}$; $W_{f1}=W_{f2}$ et $L_{f1}=L_{f2}$. (les fentes sont symétrique) .

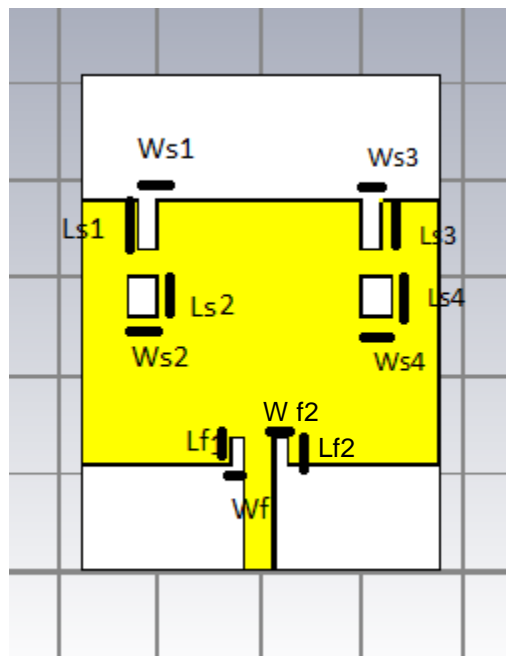


Figure III.4 : Antenne patch proposée.

III.4.1. Etudes paramétriques

III.4.1.1. Variation de la largeur Wpa du patch

L'effet des différentes largeurs du patch Wpa en fonction de la fréquence est présenté sur la figure III.5. Il est évident que la puissance réfléchie de l'antenne diminue lorsque la largeur du patch est augmentée.

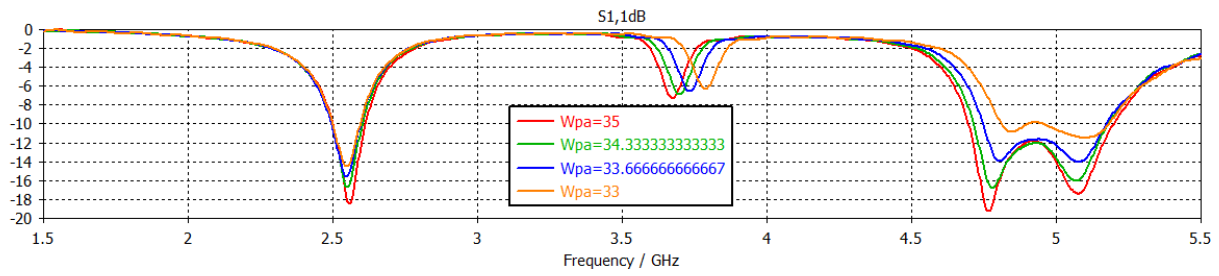


Figure III.5 : Variation de la largeur Wpa.

III.4.1.2. Variation de la longueur Lg du plan de masse

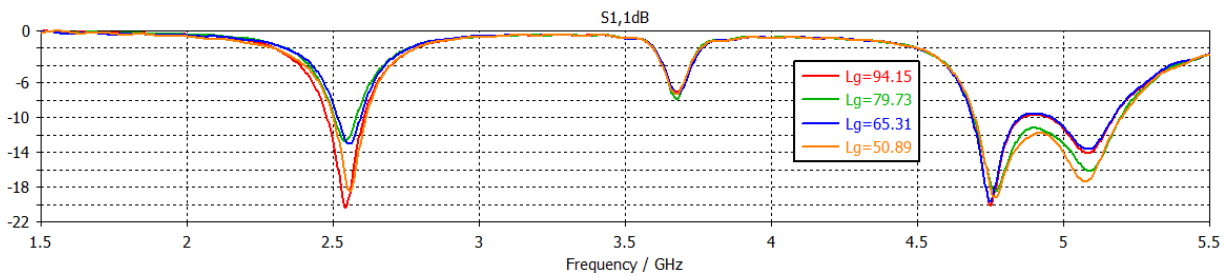


Figure III.6 : Variation de la longueur Lg.

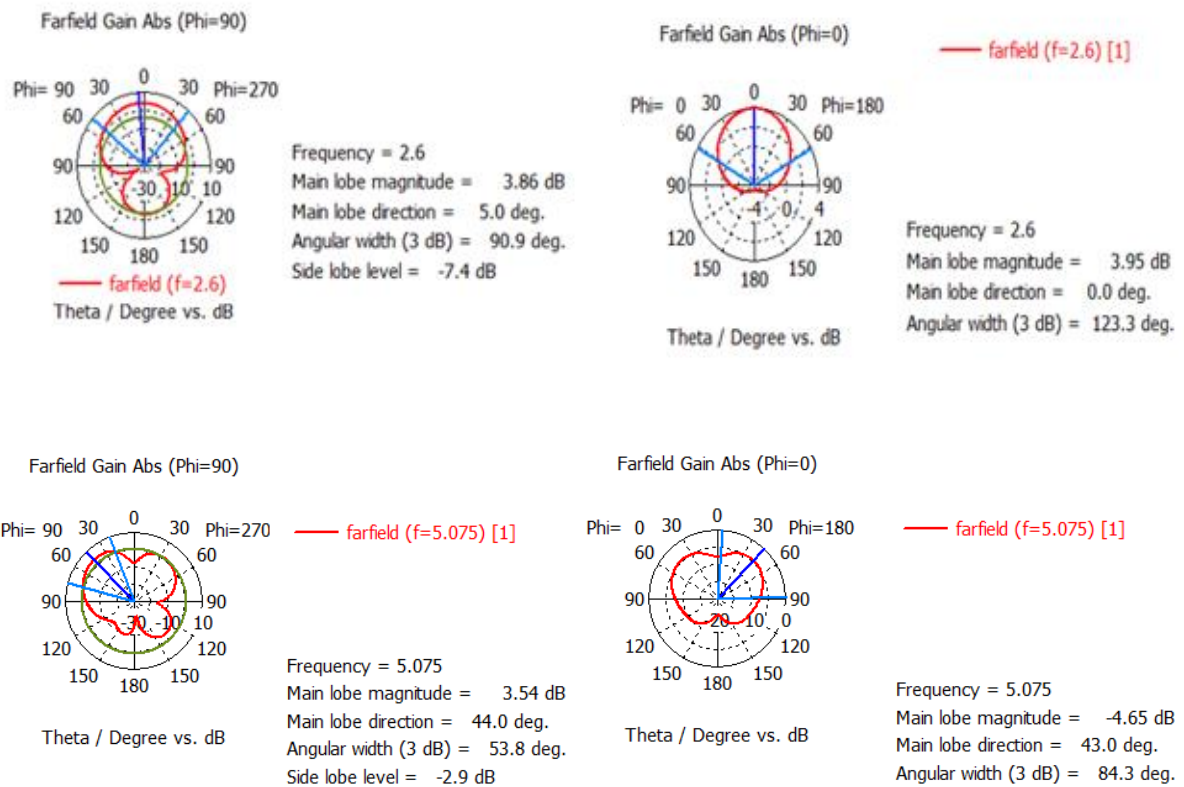
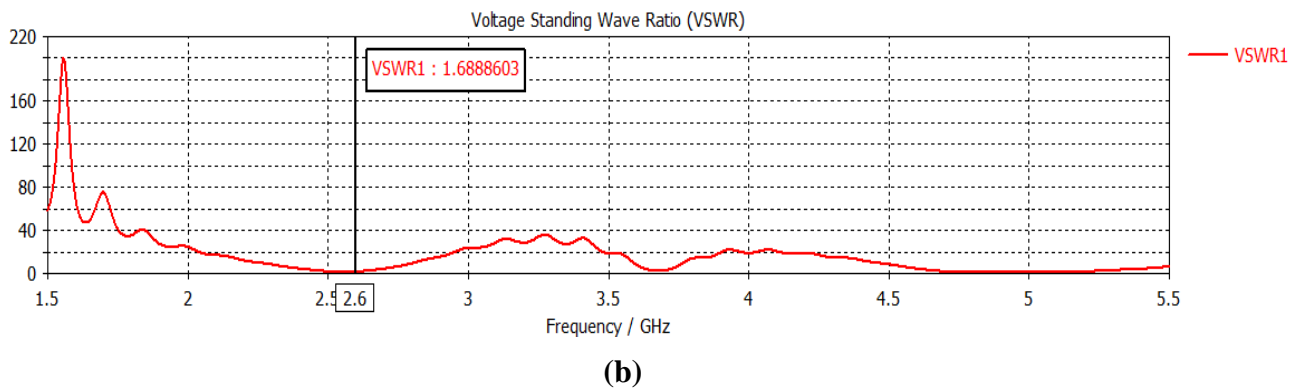
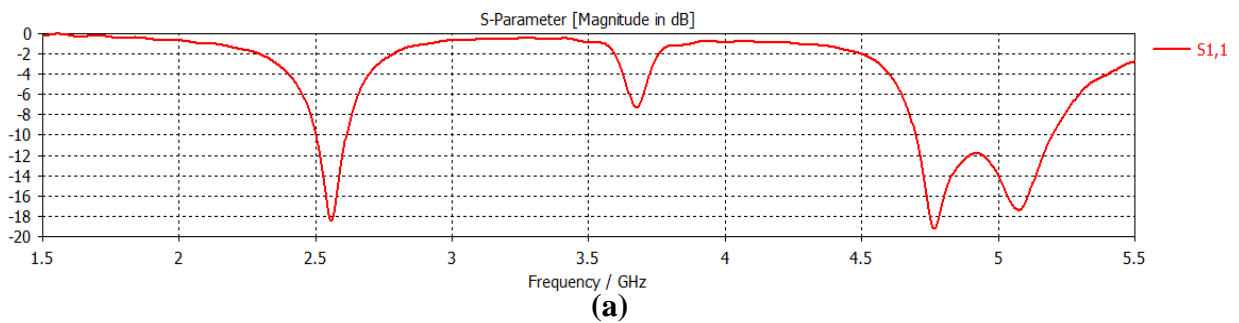
Sur le tableau III.2, on donne les dimensions de l’antenne patch proposée.

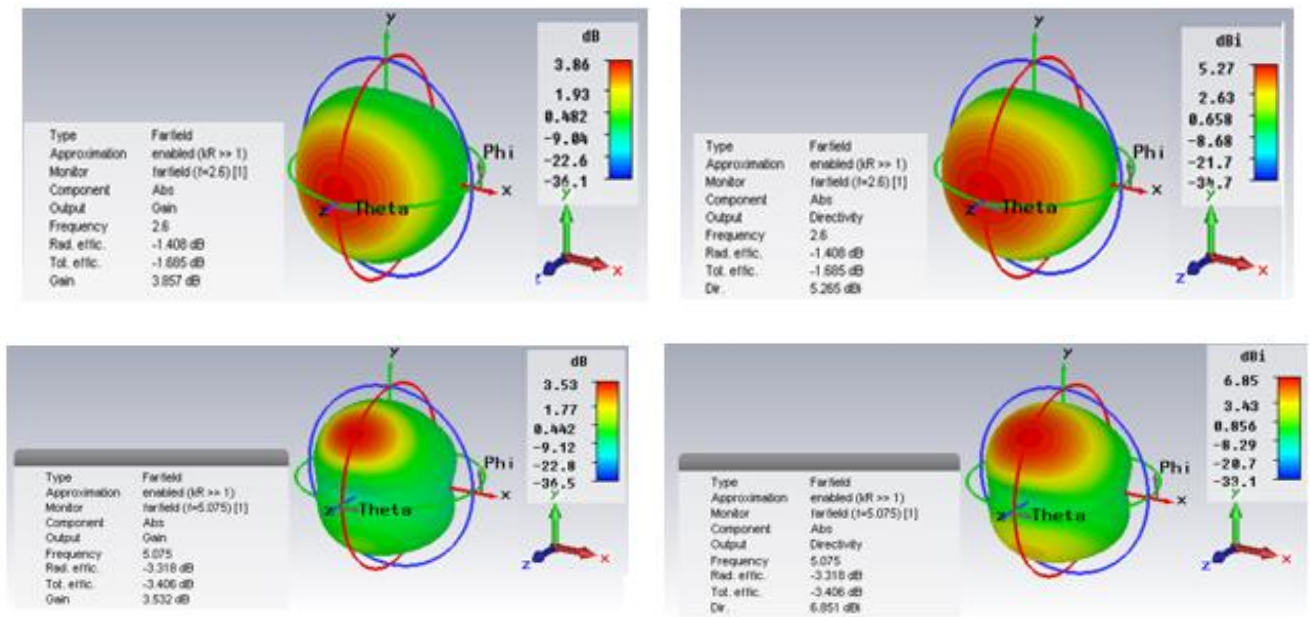
Paramètres	Wg	Lg	Wpa	Lpa	Wa	La	Ws1	Ls1	Ws2	Ls2	Wf1	Lf1
Dimensions (mm)	35.32	50.89	35	27.46	2	10.61	2	6	3	4	1.5	2

Tableau III.2 : Dimensions de l’antenne patch proposée.

III.4.2. Résultats de simulation

Sur la figure III.7. ((a), (b), (c), et (d)), on représente respectivement le coefficient de réflexion, le VSWR et les diagrammes de rayonnement en 2D et en 3D de l’antenne proposée aux fréquences de résonances 2.6 GHz et 5.075 GHz respectivement.





(d)

Figure III.7. (a) : Coefficient de coefficient.
 (b) : Taux d'onde stationnaire.
 (c) : Diagrammes de rayonnement en 2D à 2.6 GHz et à 5.075 GHz
 (d) : Diagrammes de rayonnement en 3D à 2.6 GHz et à 5.075 GHz.

Sur la figure III.7.(a), on remarque que l'antenne proposée est bien adaptée aux deux fréquences de résonances 2.6 GHz et 5.075 GHz avec des pics du coefficients de réflexion inférieurs aux -19.346 dB et -17.421 dB respectivement, ce qui donne un fonctionnement bi-bandes selon les réseaux mobiles LTE et Wi-Fi. De même, le taux d'onde stationnaire montre clairement que l'adaptation est parfaite tel que le VSWR est inférieur à 2 aux deux fréquences de résonances désirées. La bande passante est comprises entre [2.5 GHz – 2.62 GHz] et entre [4.703GHz – 5.202GHz] à -10 dB autour des pics de coefficients de réflexion. On constate alors que l'antenne présente un fonctionnement bi-bandes avec des bandes passantes étroites aux fréquences de résonances choisies.

La figure III.7.(c), montre que le diagramme de rayonnement polaire en 2D pour la fréquence de résonance 2.6 GHz est composé de deux lobes d'ouvertures différentes ce qui donne un diagramme de rayonnement dipolaire pour le plan H ($\Phi = 90^\circ$) et d'une seule lobe d'ouverture importante pour le plan E ($\Phi = 0^\circ$). De même, pour la fréquence de résonance 5.075 GHz, le diagramme de rayonnement en 2D assemble plusieurs lobes d'ouvertures différentes pour le plan E ($\Phi = 0^\circ$) ce qui présente un rayonnement quasi omnidirectionnel. Pour mieux voir le comportement du rayonnement de l'antenne proposée dans l'espace, on

présente dans la figure III.7.(d), les diagrammes de rayonnement en 3D simulés par le logiciel CST Microwave studio, pour les deux fréquences de résonances 2.6 GHz et 5.075 GHz. Le gain de l'antenne est de l'ordre de 3.86dB et de 3.53 dB pour les deux fréquences de résonances respectivement.

III.5. Cellule RAFC (Résonateurs en anneaux fendus complémentaires ou CSRR)

Cette partie est consacrée à l'étude d'une cellule CSRR à base de métamatériaux à la fréquence de résonance 2.6 GHz. L'idée pour réaliser cette structure consiste à superposer deux réseaux des fils métalliques ou SRRs (Sling Ring Resonator). Les dimensions des fils métalliques ont été optimisées dont les valeurs sont mentionnées sur le tableau III.3. Les fils sont imprimés sur un substrat diélectrique de type FR4 ayant les caractéristiques suivantes : [permittivité relative ($\epsilon_r = 4.3$) et épaisseur ($h=1.6$ mm)]. La largeur des fentes est égale à 0.377mm et la distance entre les deux anneaux est autour de 0.6mm.

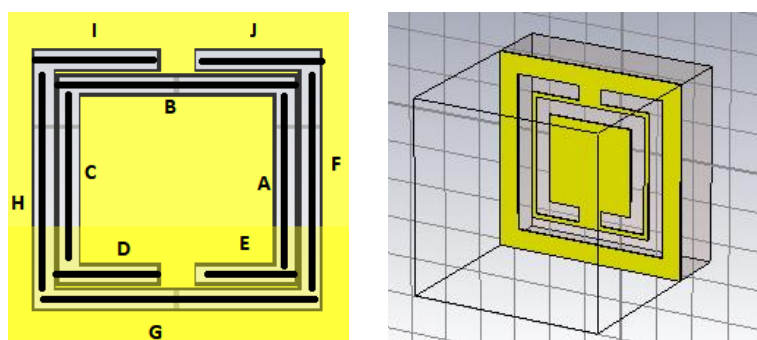


Figure III.8 : Cellule CSRR.

Paramètres	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Dimensions (mm)	3.246	4	3.246	1.705	1.705	4.146	4.9	4.146	2.155	2.155

Tableau III.3 : Dimensions de la cellule CSRR.

Sur la figure III.9, on représente les résultats de simulation du coefficient de réflexion S11 et du coefficient de transmission S21 de la cellule CSRR adaptée à la fréquence de résonance 2.6GHz par le logiciel CST Microwave studio.

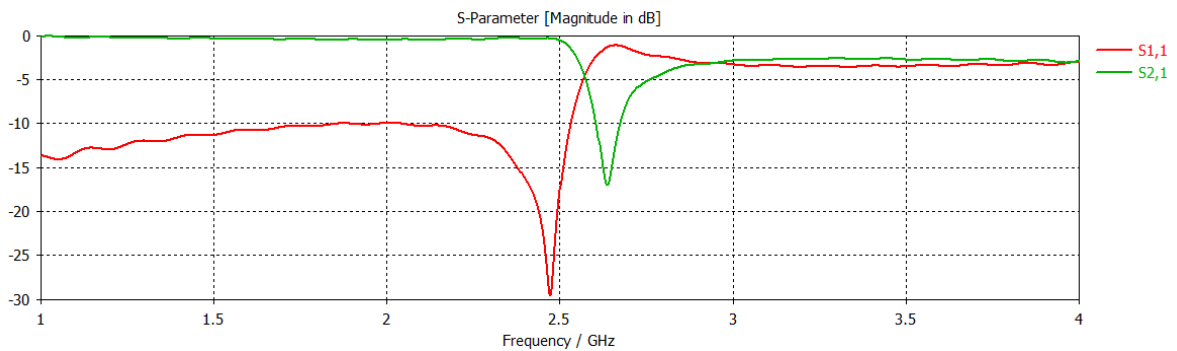


Figure III.9: Résultats de simulation des paramètres S11 et S21 de la cellule CSRR.

Les résultats de simulation des paramètres S montrent un comportement coupe bande autour de la fréquence 2.6 GHz. Une réflexion (S11) tend vers 0dB avec une transmission (S21) très atténuée autour de -15.56 dB (Figure III.9). Ces observations sont typiques aux milieux à perméabilité négative comme décrit dans [III.1].

III.6. Antenne patch miniature à base des métamatériaux

L'étape suivante de notre étude consiste à reconfigurer l'antenne patch proposée par l'insertion des cellules CSRR sur le plan de masse afin de réduire la fréquence jusqu'au 2.44 GHz (Figure III.10). Cette technique permet par la suite de réduire l'encombrement de l'antenne et d'augmenter la fréquence de résonance à 2.6 GHz.

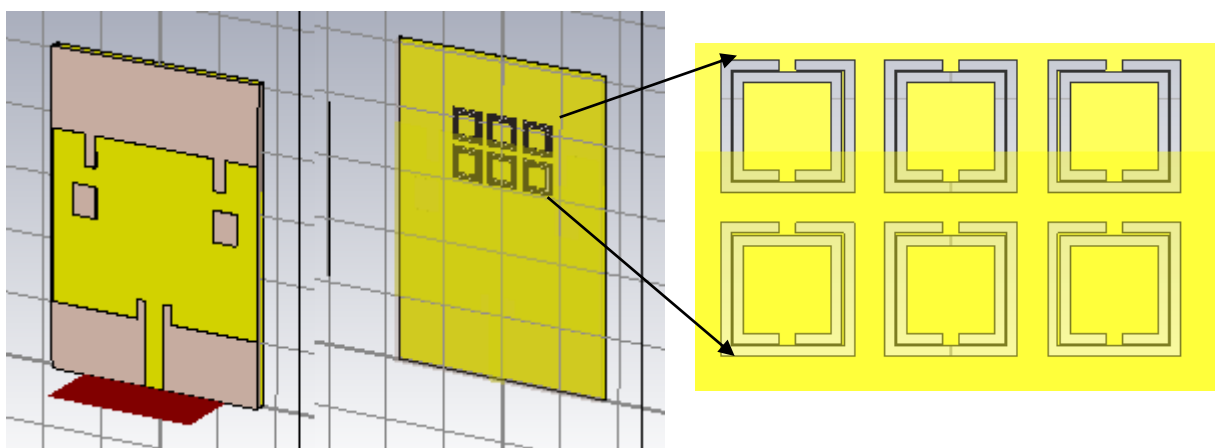


Figure III.10 : Antenne patch à base des métamatériaux.

La figure III.11 illustre le coefficient de réflexion de l'antenne patch proposée après l'insertion des cellules CSRR sur le plan de masse.

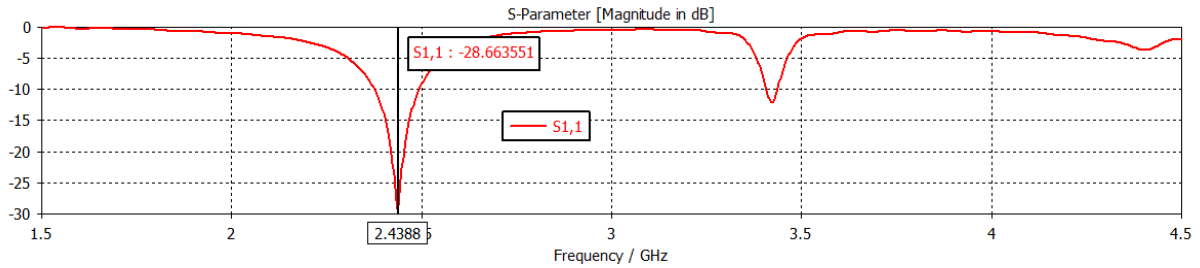


Figure III.11 : Coefficient de réflexion de l'antenne patch à base des métamatériaux.

D'après le résultat obtenu, nous avons atteint un niveau de coefficient de réflexion de -27.47 dB à une fréquence de 2.438 GHz. Ce résultat est obtenu avec l'ajoute des cellules CSRR sur le plan de masse. Cette technique donne une possibilité de réduire la taille de l'antenne tout en induisant un décalage de la fréquence de résonance de l'antenne vers les hautes fréquences.

III.6.1. Etude paramétrique

III.6.1.1. Variation de la longueur L_{pa} du patch

Pour cette étude, le paramètre noté L_{pa} varie de 25.83 mm à 27.46 mm avec un pas de 0.543 mm, en fixant les autres paramètres géométriques de l'antenne. Le résultat obtenu de cette étude est présenté sur la figure III.12. Ce paramètre influence beaucoup plus sur la fréquence de résonance de l'antenne. La diminution de ce paramètre permettra d'améliorer l'adaptation de l'antenne vers la fréquence de fonctionnement 2.6 GHz.

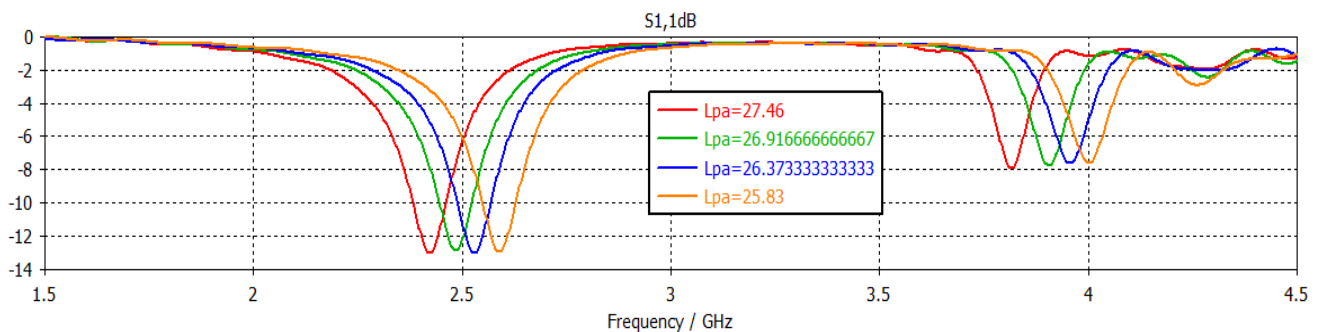


Figure III.12 : Variation de la longueur L_{pa} de l'élément rayonnant de l'antenne.

III.6.1.2. Variation de la largeur W_{pa} du patch

De même, nous avons estimé l'influence de la largeur de l'élément rayonnant du patch sur l'adaptation de l'antenne. Ce paramètre modifie principalement la puissance réfléchie de l'antenne et la bande passante comme illustré sur la figure III.13. La diminution de la largeur de l'élément rayonnant induit une réduction de l'adaptation ainsi qu'un léger décalage vers les basses fréquences de la fréquence de fonctionnement.

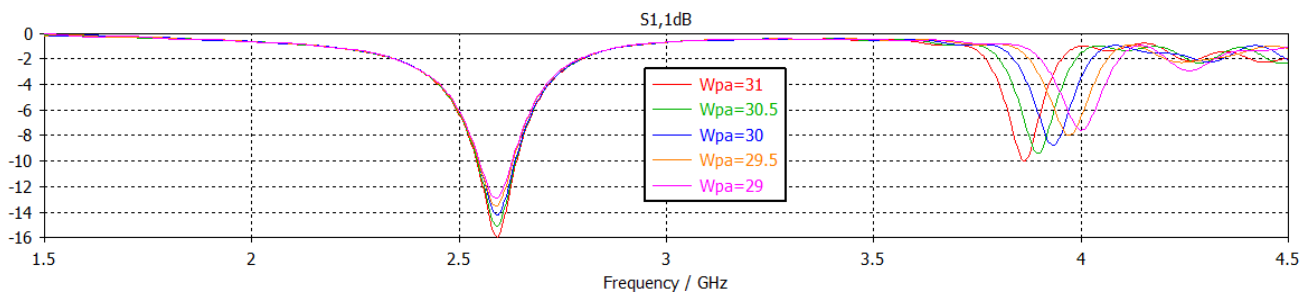


Figure III.13 : Variation de la largeur W_{pa} de l'élément rayonnant de l'antenne.

La figure III.14 illustre la géométrie de l'antenne patch miniature à base des métamatériaux obtenue après l'étude paramétrique.

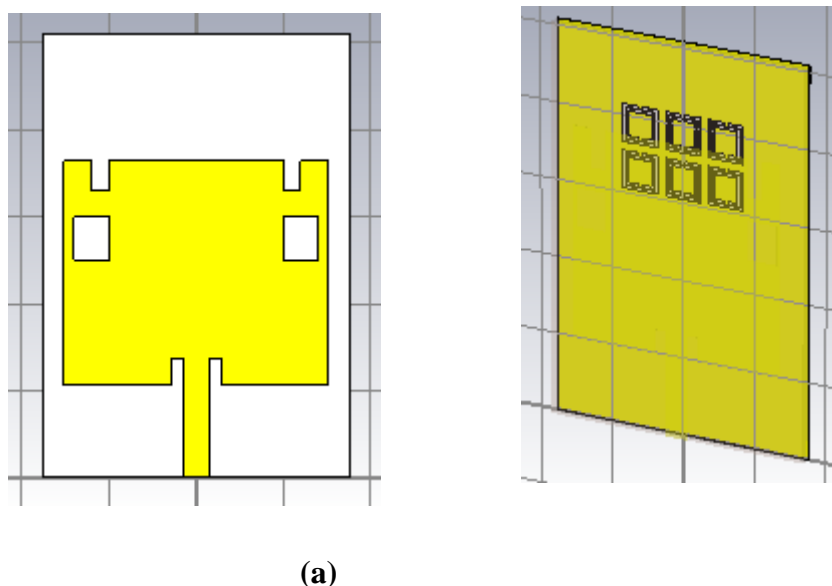


Figure III.14 : Antenne miniature à base des métamatériaux, (a) : Vue de face : patch, (b) : Vue arrière : plan de masse.

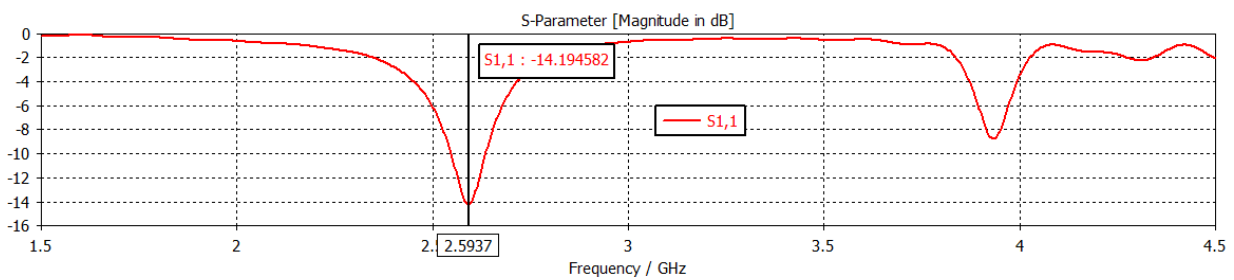
Les dimensions de l'antenne miniature sont présentées sur le tableau III.4 :

Paramètres	W	L	Wpa	Lpa	Wa	La
Dimensions (mm)	35.32	50.89	30.33	25.83	2	10.61

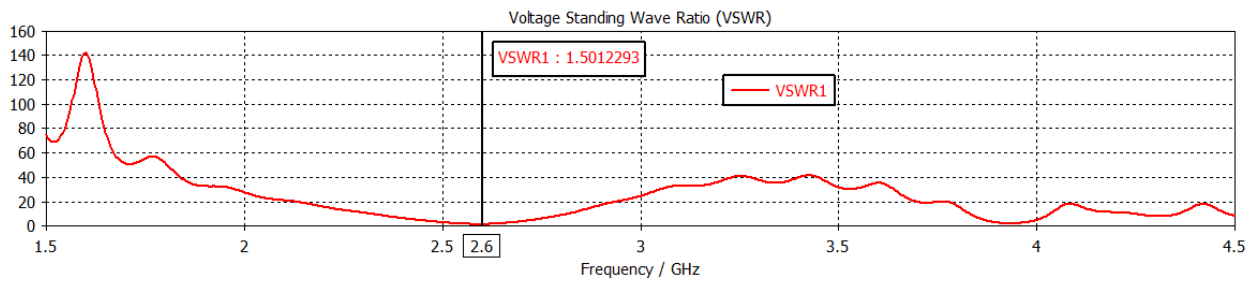
Tableau III.4 : Dimensions de l’antenne miniature à base des métamatériaux.

III.6.2. Résultats de simulation

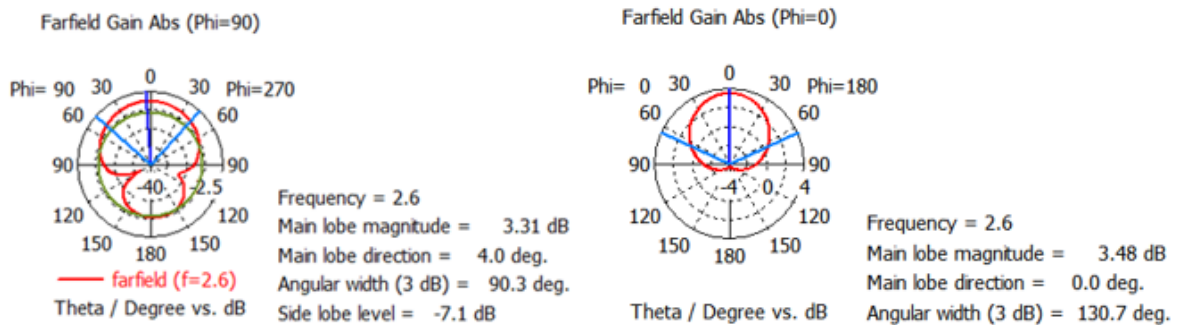
Les figures suivantes présentent le coefficient de réflexion, le rapport d’onde stationnaire et les diagrammes de rayonnement en 2D et en 3D de l’antenne patch miniature proposée.



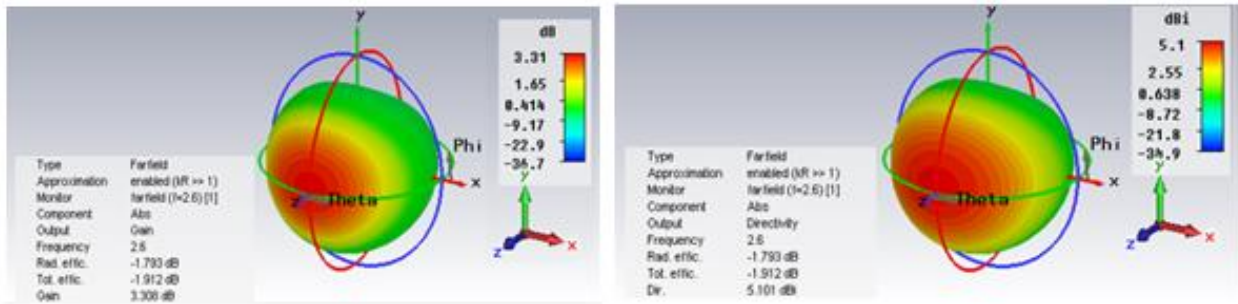
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure III.15. (a) : Coefficient de réflexion
 (b) : Taux d'onde stationnaire.
 (c) : Diagramme de rayonnement polaire en 2D.
 (d) : Diagramme de rayonnement en 3D.

D'après les études paramétriques effectuées et les résultats de simulation obtenus, nous avons pu concevoir une antenne miniature à base des résonateurs CSRR pour le réseaux mobile LTE. On remarque que la diminution de la longueur L_{pa} et la largeur W_{pa} du patch engendre une réduction de la taille de l'antenne patch proposée, tel que le taux de miniaturisation est 19%. Les performances radioélectriques de la structure miniature conçue restent acceptables où le coefficient de réflexion est de -14.19 dB et le taux d'onde stationnaire est inférieur à 2 (VSWR=1.5) à la fréquence de fonctionnement 2.6 GHz. Les résultats obtenus montrent que l'antenne miniature est bien adaptée à la fréquence de résonance 2.6 GHz. La bande passante est comprise entre [2.547 GHz – 2.63 GHz].

Les mêmes graphes des diagrammes de rayonnements en 2D que l'antenne patch précédente sont illustrés sur la figure III.15.(c) mais avec une petite diminution dans le gain et la directivité de l'antenne selon les diagrammes de rayonnements en 3D. Les valeurs du gain de la directivité de l'antenne miniature sont de 3.31dB et 5.1dBi respectivement, ce qui donne une efficacité autour de 64.9%.

Pour améliorer les performances radioélectriques de l'antenne miniature proposée, nous allons appliquer la technique de DGS (Defected Global Structure) afin d'augmenter le gain, la bande passante et l'adaptation de la structure finale proposée.

III.7. Antenne miniature avec la technique DGS

Sur la figure III.16, on représente l'antenne miniature proposée avec la technique de DGS où nous avons inséré des fentes de formes rectangulaires sur le plan de masse dont ces

paramètres géométriques ($sx1$, $sx2$, $sy1$ et $sy2$) sont indiqués sur la figure ci-dessous tels que $sx1 = sy1 = 3\text{mm}$, $sx2 = 2\text{mm}$ et $sy2 = 13\text{mm}$.

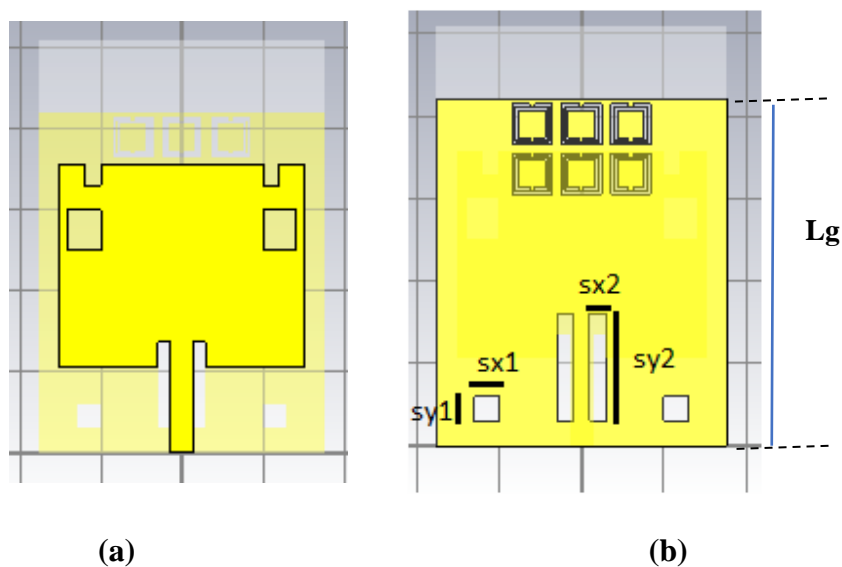


Figure III.16 : Antenne miniature proposée avec la technique DGS, (a) : Vue de face : patch, (b) : Vue arrière : plan de masse.

III.7.1. Etudes paramétriques

III.7.1.1. Variation de la longueur du plan de masse Lg

Pour étudier l'influence de la longueur du plan de masse sur l'adaptation de l'antenne patch, nous avons varié la longueur Lg de 40 mm à 46 mm avec un pas de 2 mm. La diminution de la longueur du plan de masse ramène à une meilleure adaptation tel que la valeur de Lg choisie est 42mm.

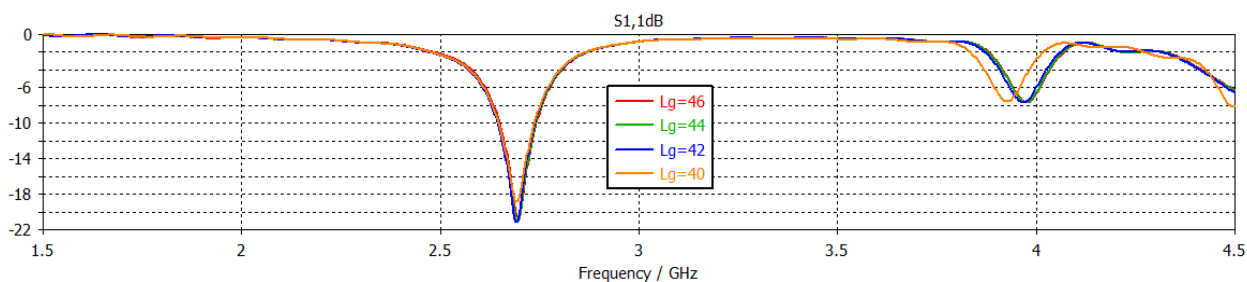


Figure III.17 : Variation de la longueur du plan de masse Lg .

III.7.1.2. Variation de la longueur du patch Lpa

Le deuxième paramètre qui influence sur l'adaptation et la fréquence de résonance est la longueur du patch Lpa en fixant Lg à 42mm. La diminution de ce paramètre de 25.83mm à 25.05mm implique un décalage de la fréquence vers les hautes fréquences avec une augmentation légère de l'adaptation selon la figure III.18. La meilleure valeur choisie pour Lpa est 25.05 mm.

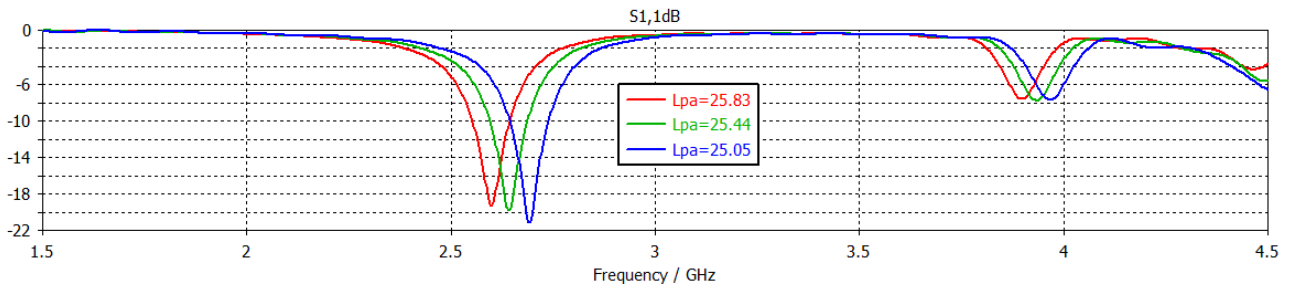
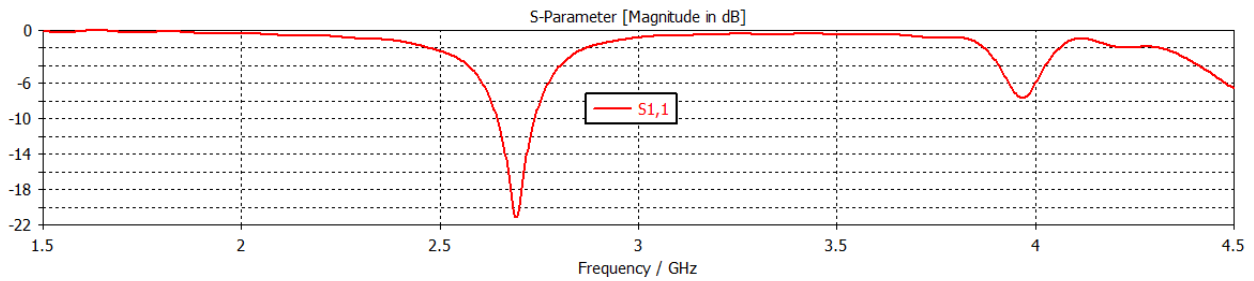
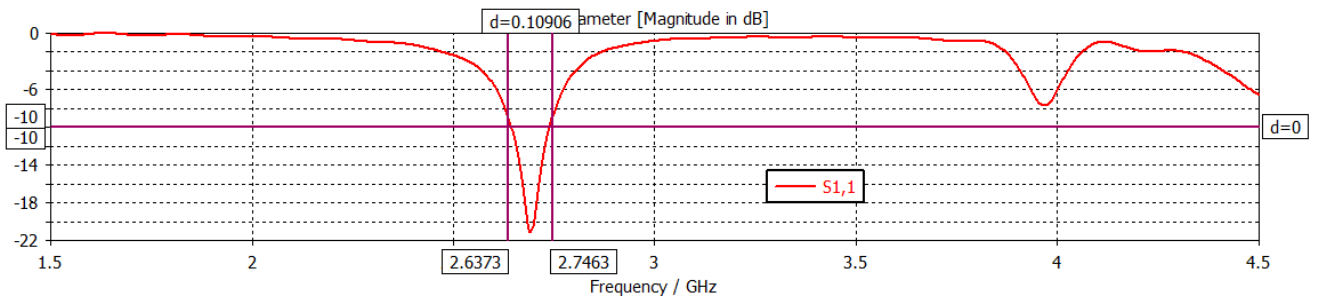


Figure III.18 : Variation de la longueur du patch Lpa .

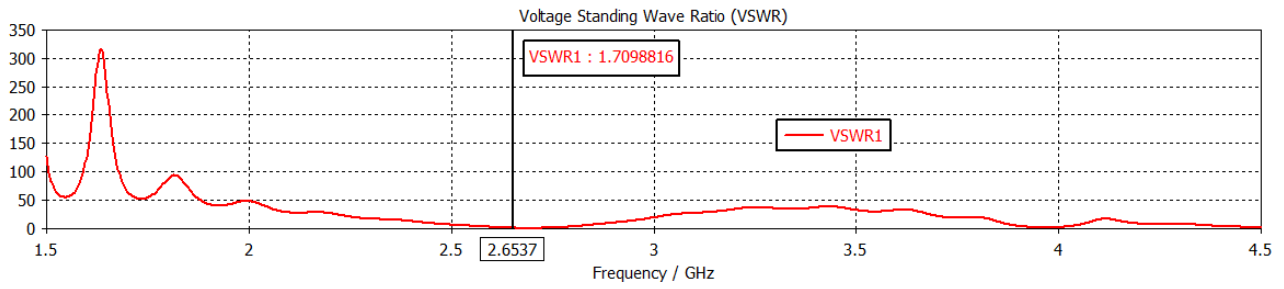
Le coefficient de réflexion, le rapport d'onde stationnaire et les diagrammes de rayonnement en 2D et 3D sont indiqués sur la figure III.19 de l'antenne finale miniature.



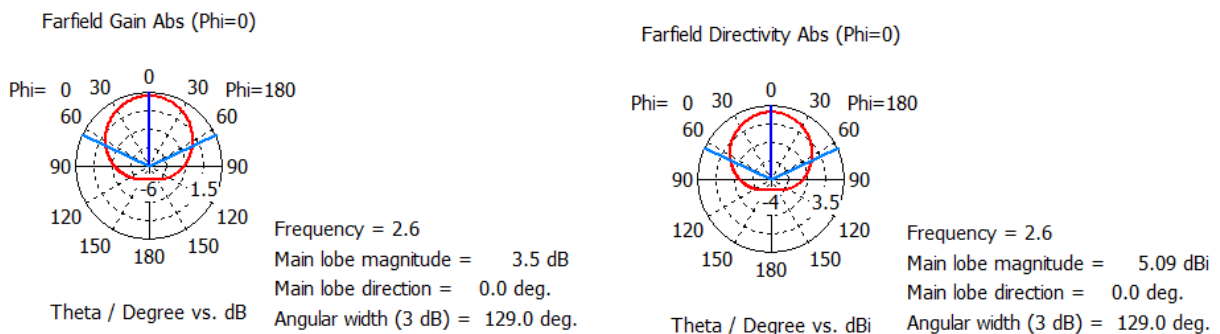
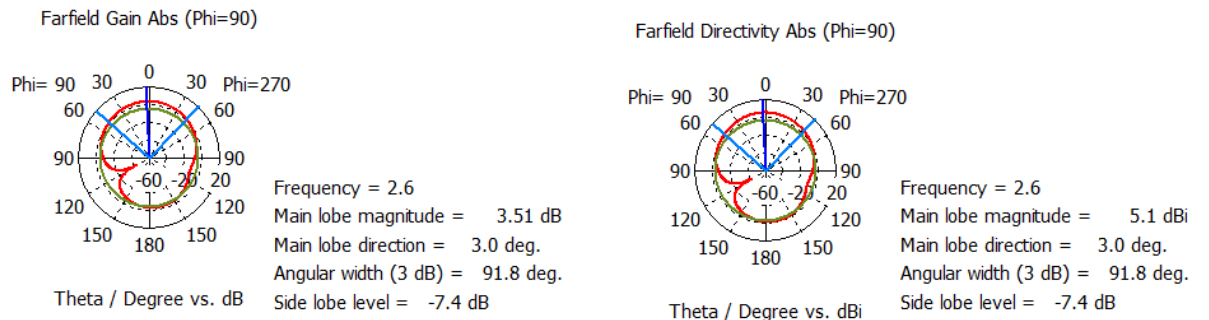
(a)



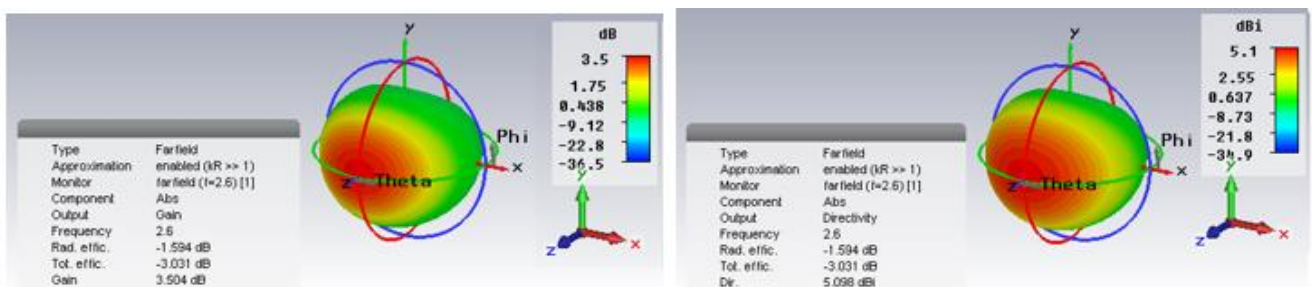
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure III.19. (a) : Coefficient de réflexion
 (d) : Calcul de la bande passante.
 (c) : Rapport d'onde stationnaire.
 (d) : Diagramme de rayonnement en 2D.
 (e) : Diagramme de rayonnement polaire en 3D.

D'après les résultats de simulation obtenus par le logiciel CST Microwave Studio de la structure finale avec la technique DGS, nous observons une amélioration considérable dans l'adaptation, la bande passante et le gain de l'antenne avec une réduction légère de la taille de l'antenne (21.06%).

Nous remarquons que le coefficient de réflexion est inférieur à -24dB à la fréquence de fonctionnement 2.6GHz, ce qui donne une adaptation parfaite à la fréquence choisie. La largeur de la bande passante est calculée à -10dB comme le montre la figure III.19.(b). On voit bien qu'elle est de l'ordre de 107.8 MHz.

Le tracé bidimensionnel du diagramme de rayonnement de cette antenne permet de visualiser ses lobes dans deux plans vertical et horizontal. La figure III.19.(d) montre que, soit pour $\phi=0^\circ$ ou soit pour $\phi=90^\circ$, le diagramme est principalement composé d'un lobe plus important. En observant les diagrammes de rayonnements 3D, on peut constater que le gain est d'environ 3.48dB et la directivité est de 5.11dB.

III.8. Réalisation d'antenne proposée

Après la réalisation de l'antenne patch proposée, à la fois sur la face supérieure et inférieure, par l'entreprise ALMITECH situé à Kouba à Alger. Par la suite, nous avons effectué la soudure de connecteur de type SMA à l'emplacement désigné pour l'excitation de l'antenne.

La configuration de mesure de l'antenne est illustrée dans la figure suivante.

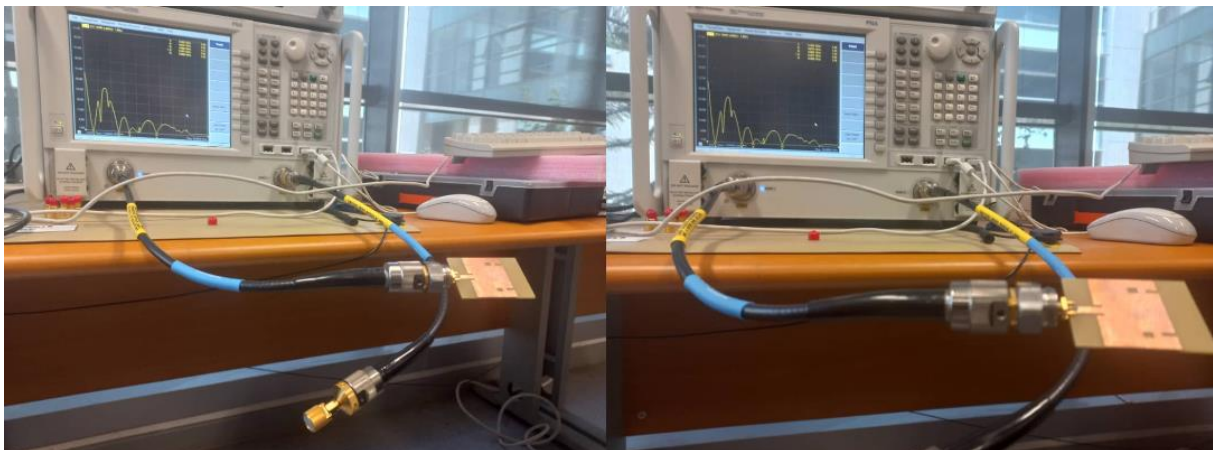


Figure III.20 : Test de l'antenne proposée.

III.8.1. Coefficient de réflexion

Après avoir effectué la calibration de l'analyseur de spectre dans la plage de fréquences de 2 GHz à 10 GHz, les résultats obtenus sont les suivants :

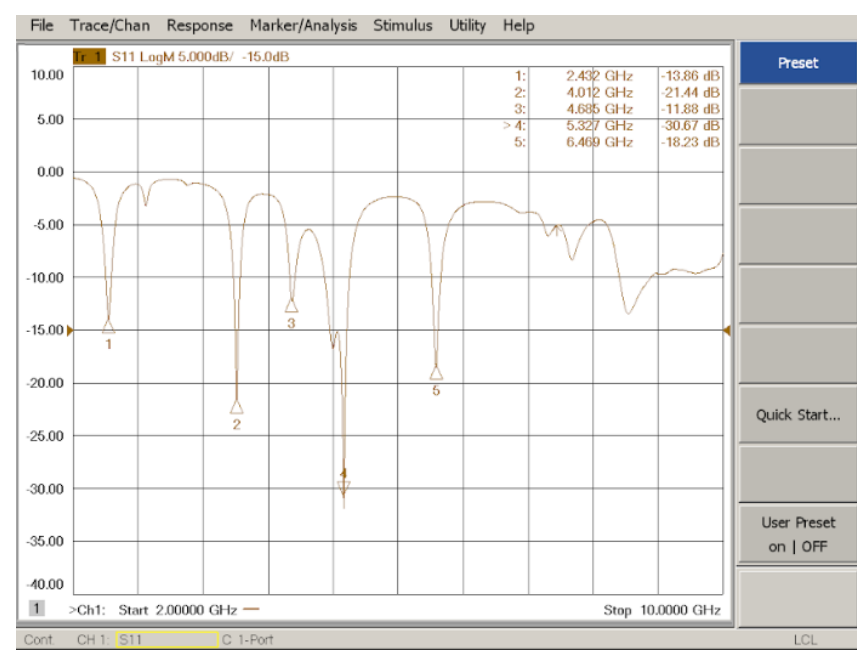


Figure III.21 : Mesure du coefficient de réflexion de l'antenne proposée.

III.8.2. VSWR

La figure ci-dessous représente le résultat de mesure du VSWR

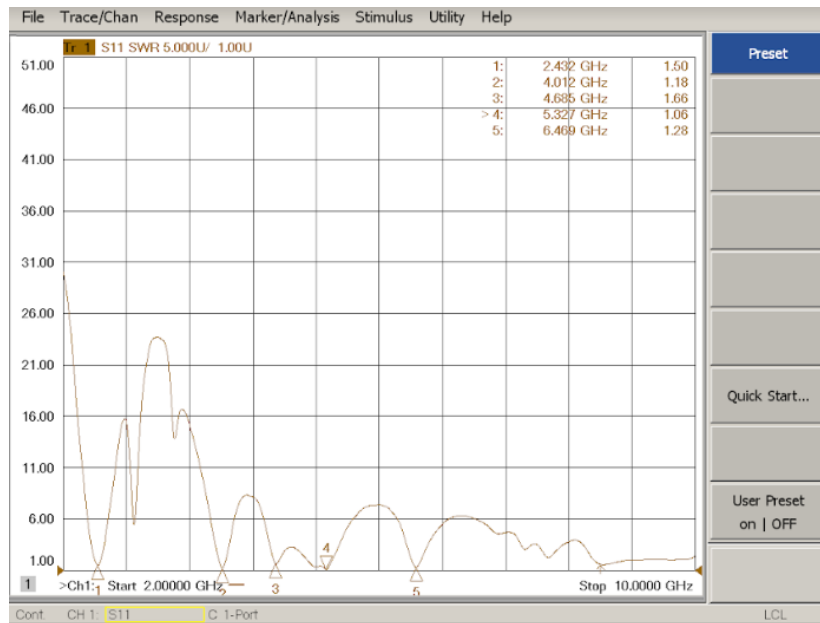


Figure III.22 : Mesure du VSWR de l’antenne proposée.

III.8.3. Comparaison

Après avoir exportés les résultats de l’analyseur, nous avons confronté les résultats de mesures avec les résultats de simulation électromagnétique. La comparaison est présentée sur les figures ci-dessous :

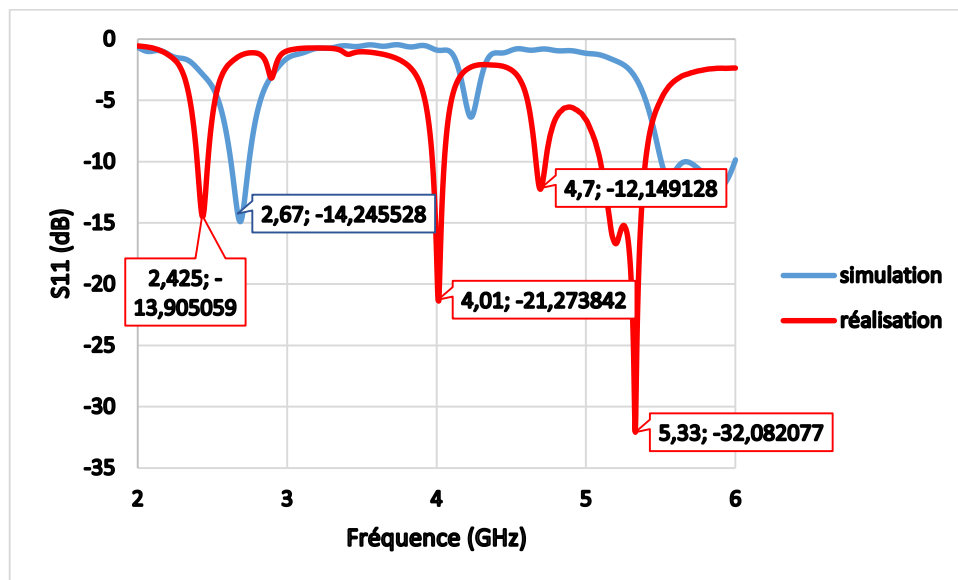


Figure III.23 : Comparaison entre le coefficient de réflexion de la simulation et de la réalisation.

Nous remarquons d’après la figure III.23 que les résultats de simulation et de mesure ne sont pas identiques. Nous avons obtenu un fonctionnement multibandes de l’antenne réalisée

avec des pics de coefficients de réflexion qui sont décalés vers les fréquences hautes par rapport à la même structure conçue. Selon notre application, la fréquence de résonance est décalée à 2.42 GHz avec un pic de S11 mesuré de -13.90dB.

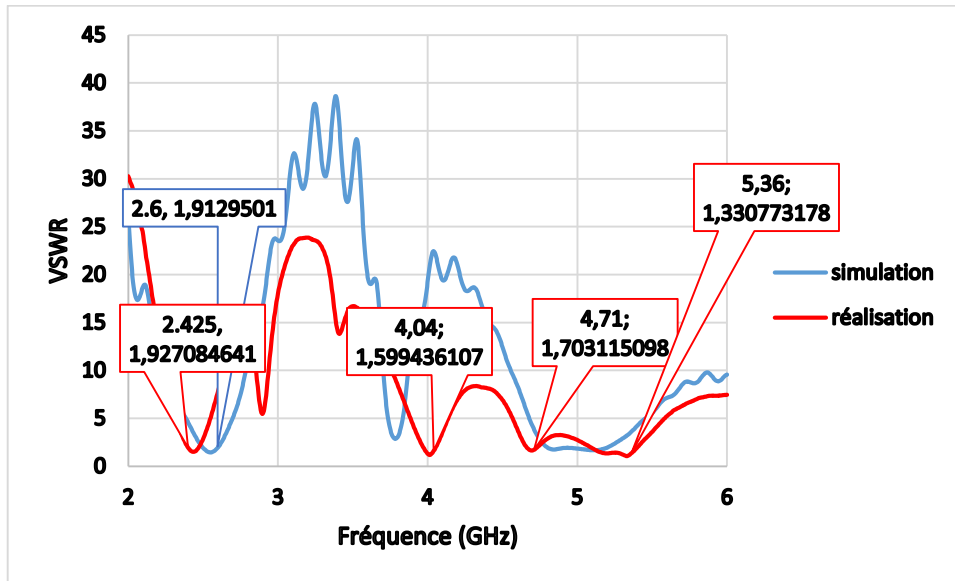


Figure III.24 : Comparaison entre le VSWR de la simulation et de la réalisation.

Nous remarquons que les rapports d'ondes stationnaires VSWR mesuré et simulé sont compris entre 1 et 2 pour les deux fréquences de résonances 2.43GHz et 2.6 GHz respectivement ce qui donne une très bonne adaptation de l'antenne patch proposée.

III.9. Conclusion

Notre travail est divisé en trois parties essentielles. Premièrement, nous avons étudié et conçu une antenne patch rectangulaire à fentes simulée par l'outil CST Microwave Studio à la fréquence de résonance 2.6GHz pour les réseaux mobiles LTE. En second lieu, nous avons appliqué la technique des métamatériaux sous formes des résonateurs CSRR insérés sur le plan de masse de l'antenne patch proposée. Les cellules CSRR engendrent une diminution de la taille de l'antenne avec un taux de miniaturisation acceptable de 19% et une adaptation parfaite à la fréquence Choisie. Par la suite, nous avons appliqué d'autres techniques pour améliorer beaucoup plus les résultats obtenus comme la technique DGS et la technique de fentes. Nous avons visualisé une augmentation dans les performances radioélectriques de l'antenne finale avec un taux de miniaturisation de 21.06%. Enfin, une brève comparaison est suivie entre les résultats de simulations et les résultats expérimentales afin de montrer les avantages et les performances de notre modèle antennaire proposé.

[III.1] D. Seetharamdoo “*Étude des métamatériaux à indice de réfraction négatif : paramètres effectifs et applications antennaires potentielles*”, Thèse de doctorat, Université de RENNES I, (2006).

Conclusion générale

Les avancées dans les antennes micro-ruban, les techniques de miniaturisation et les métamatériaux ouvrent de nouvelles opportunités pour le développement de dispositifs de communication plus compacts, plus performants et plus polyvalents. Ces avancées ont un impact significatif dans divers domaines, tels que les télécommunications, les systèmes de surveillance, les applications médicales...Etc. Cependant, il reste encore des défis à relever, notamment la réduction de l'encombrement de l'antenne, l'optimisation des performances, la réduction des coûts de fabrication et l'amélioration de l'efficacité énergétique.

Les antennes micro-ruban se distinguent par leur taille compacte, leur facilité d'intégration et leur large bande passante, ce qui en fait des composants privilégiés pour les systèmes de communication mobiles.

Dans la première partie de ce travail, nous avons examiné les différents types d'antennes micro-ruban, leurs caractéristiques et leurs types d'alimentation, ainsi que leurs domaines d'application variés, allant des réseaux mobiles aux systèmes de radar et de navigation par satellite.

Les avancées dans les techniques de miniaturisation, telles que l'utilisation de fentes et de matériaux composites, ont permis de réduire considérablement la taille des antennes tout en préservant leurs performances. L'introduction des métamatériaux a ouvert de nouvelles possibilités passionnantes pour la conception d'antennes miniaturisées et performantes.

Dans partie suivante, nous avons exposé les techniques de miniaturisation et les métamatériaux qui ouvrent des perspectives prometteuses dans le domaine des communications mobiles. Par la suite, nous avons intéressé aux matériaux composites où nous avons présenté leurs classifications, leurs domaines d'applications et les méthodes d'extraction des paramètres effectives des matériaux.

Dans le dernier chapitre, nous avons étudié et conçu initialement une antenne miniature à base des métamatériaux avec des résonateurs CSRR à la fréquence de fonctionnement 2.6 pour les réseaux mobiles LTE en utilisant l'outil de simulation CST Microwave Studio qui permet d'analyser et de valider les performances de l'antenne proposée. Pour améliorer les résultats obtenus, nous avons appliqué par la suite la technique de DGS et inséré des fentes sur le plan de masse de l'antenne proposée. Finalement, les structures conçus ont été réalisées

et mesurées afin de valider expérimentale les résultats de simulation obtenus et les misent en œuvre pratiquement.

La poursuite de la recherche dans ces domaines, ainsi que la collaboration entre les chercheurs, les ingénieurs et l'industrie, sont essentielles pour exploiter pleinement le potentiel des antennes micro-ruban miniaturisées basées sur des métamatériaux. Ces avancées technologiques continueront à façonner notre avenir en permettant des communications plus rapides, des dispositifs plus compacts et des systèmes sans fil plus avancés.

BIBLIOGRAPHIE

Chapitre I :

- [I.1] G. A. Deschamps, "Microstrip Microwave Antennas", presented at the Third USAF Symp, on Antennas, 1953.
- [I.2] D. H. Schaubert, R. J. Acosta, and C. R. Pfeiffer, "Microstrip Antennas", in Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, John Wiley & Sons, Inc., 1999, pp. 432-438.
- [I.3] D. M. Pozar, "Microwave Engineering", John Wiley & Sons, Inc., 2012.
- [I.4] K. F. Lee, K. Y. Chow, C. H. Chan, and T. I. Yuk, "Planar Microwave Engineering", Cambridge University Press, 2004.
- [I.5] C. A. Balanis, "Antenna theory: analysis and design", 3rd ed, 2005 .
- [I.6] M. BOUHOUS Adil, "Utilisation de la méthode de la phase stationnaire et des réseaux de neurones artificiels pour la modélisation d'un résonateur micro-ruban à structure ouverte", Magister en électronique, Option : Traitement du signal, 2011.
- [I.7] J. R. James and P. S. Hall, "Broadband microstrip antennas", IEE Electromagnetic,
- [I.8] D. G. Fang, "Antenna theory and microstrip antennas", BocaRaton, FL: CRC Press/Taylor & Francis, 2010.
- [I.9] O. Picon and M. Bellanger, "Les antennes théorie, conception et application", Paris: Dunod : L'Usine nouvelle, 2009.
- [I.10] C. A. Balanis, "Antenna theory: analysis and design", 3rd ed. HOBOKEN , NJ :jhone wiley 2005.
- [I.11] Antenna Theory, Analysis and Design de John Wiley& Sons (bouquin sur les antennes très complet), mise a jour en Septembre 2021.
- [I.12] D. M. Pozar, and S. M. Voda , " A rigorous analysis of a microstripline fed patch antenna," IEEE Transactions on Antennas and Propagations, Vol. AP-35, N°. 12, pp. 1343-1350, December 1987.
- [I.13] G. Le Ray C. Marchais et A. Sharaiha, "Stripline slot antenna for UWB communications", IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett., 5, 2006.
- [I.14] A. boyer (cour_ antenne_oct11_v4_5RT) INSA Toulouse octobre 2011.
- [I.15] radiation efficiency of an antenna december 24, 2021.

- [I.16] Dube, S., & Gupta, K. C. (2012). *Advances in Microstrip and Printed Antennas*. Wiley.
- [I.17] A. K. Bhattacharyya, "Long rectangular patch antenna with a single feed," *IEEE Transactions on Antennas and Propagations*, Vol. 38, N°. 7, pp. 987-993, July 1990.
- [I.18] C. A. Balanis, "Antenna theory analysis and design," 2eme edition John Wiley and Sons, 1997.
- [I.19] D. M. Pozar, and S. M. Voda, "A rigorous analysis of a microstripline fed patch antenna", *IEEE Transactions on Antennas and Propagations*, Vol. AP-35, N°. 12, pp. 1343-1350, December 1987.
- [I.20] M. Diblang, "Développement du concept de l'antenne a résonateur bie pour la génération de la polarisation circulaire", Université de Limoges, Thèse de doctorat 20 mars 2006.
- [I.21] A. Boufrioua, "Contribution à l'étude des antennes a patch résistifs et parfaitement conducteur tenant compte d'une source d'excitation et des nouvelles formes asymptotiques de courant", thèse de Doctorat, Institut d'électronique, Université de Constantine, 11 /2006.
- [I.22] GHASSEN.A. A, MAHAMOD.I et KASMIRAN.J, "Modeling and Performance Evaluation of LTE networks with diffirent TCP variant", 2011.
- [I.23] Balanis, C. A., "Antenna Theory : Analysis and Design" , John Wiley & Sons.
- [I.24] Garg, R., Bhartia, P., Bahl, I., & Ittipiboon, A. (2001), "Microstrip Antenna Design Handbook. Artech House, 2005.
- [I.25] Collin, R. E., "Antennas and Radiowave Propagation", McGraw-Hill Education, 2013.
- [I.26] Skolnik, M. I., "Introduction to Radar Systems", McGraw-Hill Education, 2008.
- [I.27] Misra, P., & Enge, P. (Eds.), "Global Positioning System : Signals, Measurements, and Performance (2nd ed.)", Ganga-Jamuna Press, 2006.
- [I.28] Ghosh, A., & Roy, J., "Printed MIMO Antenna Engineering", CRC Press, 2018.
- [I.29] Stutzman, W. L., & Thiele, G. A., "Antenna Theory and Design", John Wiley & Sons, 2012.

Chapitre II :

- [II.1] H. Saito, K. Inoue, M. Takenaka, & M. Sasaki. (2019). The past, present, and future of Si technology. *Science and Technology of Advanced Materials*, 20(1), 650-666.
- [II.2] J. A. Wheeler. (1947). Fundamental Limitations of Small Antennas. *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, 35(12), 1479-1484.

- [II.3] C. A. Balanis. (2005). *Antenna Theory: Analysis and Design*. John Wiley & Sons.
- [II.4] BURIK, Iryna A., ZHURBA, V. O., VOROBYOV, G. S., et al. *Metamaterials: Theory, classification and application strategies*. Журнал нано-та електронної фізики, 2016, no 8, No 4 (2), p. 04088-1-04088-11.
- [II.5] URUL, Bülent. « Gain enhancement of microstrip antenna with a novel DNG material». *Microwave and Optical Technology Letters*, 2020, vol. 62, no 4, p. 1824-1829.
- [II.6] AMMARI Amina et BOUIDIA Ibtissem, « Contribution à la conception de nouveaux filtres multi-bandes à base de métamatériaux : Résonateur en Anneaux Fendus Complémentaire RAFC ». Mémoire de Master, spécialité: systèmes des télécommunications, université de Kasdi Merbah Ouargla, 2019.
- [II.7] Hicham Lalj, « Conception et caractérisation de filtres et systèmes antennaires reconfigurables chargés par des résonateurs Métamatériaux sub-longueurs d'onde ». Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de doctorat en physique, université de Rennes, Avril 2014.
- [II.8] Cao TN, Krzysztofik WJ. *Metamaterials in Application for Improving the Parameters of Antennas*, *Telecommunication Review and Telecommunication News*. Warsaw, Poland: SIGMA-NOT. pp. 300-303. DOI: 10.15199/59.2018.6.34. Yearbook XCI/LXXXVII, Notebook No. 6/2018, ISSN 1230-3496, e-ISDN 2449-7487.
- [II.9] S. Maci, G. Biffi Gentili, P. Piazzesi and C. Salvador, "Dual-band slot-loaded patch antenna," in *IEE Proceedings - Microwaves, Antennas and Propagation*, vol. 142, no. 3, pp. 225-232, Jun 1995.
- [II.10] C. Delaveaud and S. Sufyar, "A miniaturization technique of a compact omnidirectional antenna," 2009 3rd European Conference on Antennas and Propagation, Berlin, 2009, pp. 384- 388.
- [II.11] K. L. Lau, S. H. Wong and K. M. Luk, "Wideband Folded Feed L-Slot Folded Patch Antenna," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 8, no. , pp. 340-343, 2009.
- [II.12] A. Latif, R. Hilal and A. A. Ouahman, "Investigation on folded patch antenna for cellular applications," *Computers and Communications*, 2008. ISCC 2008. IEEE Symposium on, Marrakech, 2008, pp. 824-830.
- [II.13] M. Wahib, S. Clauzier, S. Mikki and Y. Antar, "A 2.45 GHz novel electrically small planar dipole antenna," 2016 International Workshop on Antenna Technology (iWAT), Cocoa Beach, FL, 2016, pp. 106-109.
- [II.14] Balanis, C. A. (2016). *Antenna theory: analysis and design (Fourth Edition)*. John Wiley & Sons, Inc.

[II.15] C. Rowell and R. Murch, "A Capacitively Loaded PIFA for Compact Mobile Telephone Handsets," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 45, no. 5, pp. 837–842, May 1997.

[II.16] F. Sarrazin, S. Pflaum and C. Delaveaud, "Radiation Efficiency Improvement of a Balanced Miniature IFA-Inspired Circular Antenna," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, no. , pp. 1309-1312, 2017.

[II.17] F. Sarrazin, S. Pflaum and C. Delaveaud, "Optimisation de l'efficacité de rayonnement d'une antenne miniature chargée par une capacité," 20èmes Conférences JNM, Saint Malo, France, mai 2017.

[II.18] J.C. Bose. On the rotation of plane of polarisation of electric waves by a twisted structure. 1898.

[II.19] Victor Veselago. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . *Soviet Physics Uspekhi*, 10(4):509-514, 1968.

[II.20] D.R. Smith, W.J. Padilla, D.C. Vier, S.C. Nemat-Nasser, and S. Schultz. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. *Physical Review Letters*, 84(18):4184-4187, 2000.

[II.21] J.B. Pendry. Negative refraction makes a perfect lens. *Physical Review Letters*, 85(18):3966-3969, 2000.

[II.22] S. Zhang, W. Fan, K.J. Malloy, S.R.J. Brueck, N.C. Panoiu, and R.M. Osgood. Demonstration of metal-dielectric negative-index metamaterials with improved performance at optical frequencies. *Journal of the Optical Society of America B*, 23(3):434-438, 2006.

[II.23] Mondher LABIDI, « Conception et application des métamatériaux pour des circuits RF ». Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de doctorat en Technologies de l'information et de Communications, L'Ecole Supérieure des Communications, Tunis. 2012

[II.24] DEMIREL, E., OZDEMIR, M., et AKTAS, B. Negative Refractive Index Ferromagnetic Materials with Negative Permeability at Zero Applied Magnetic Field. *Applied Magnetic Resonance*, 2009, vol. 36, no 1, p. 69.

[II.25] Tahar BOUGOUTAIA, « Analyse et conception des antennes microstrip à base de métamatériaux ». Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de doctorat en électronique, université de M'sila, Mai 2018.

[II.26] Badreddine Mohamed OUAGAGUE, « Etude Théorique et Expérimentale des Métamatériaux et des Techniques d'Agilité (MEMS, BST) pour la Conception des Circuits RF Miniatures et Reconfigurables ». Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de doctorat en optoélectronique et microondes, université de Toulouse 3, Septembre 2014.

- [II.27] JOSEP Canet-Ferrer, *Metamaterials in Application to Improve Antenna Parameters in Metamaterials and Metasurfaces*, IntechOpen, 2019. 300pages.
- [II.28] Yassine BENACHOUR, « Optimisation de cristaux photoniques pour l'optique non linéaire ». Thèse de doctorat en physique, université de Paris-Sud, 2008.
- [II.29] Mohammed El amine CHAIB, « Modélisation et caractérisation de fonctions électroniques générées par des dispositifs à métamatériaux ». Thèse de Magister en Systèmes des Réseaux de Télécommunication, université de Tlemcen, 2012.
- [II.30] AMMARI Amina et BOUIDIA Ibtissem, « Contribution à la conception de nouveaux filtres multi-bandes à base de métamatériaux : Résonateur en Anneaux Fendus Complémentaire RAFC ». Mémoire de Master, spécialité: systèmes des télécommunications, université de Kasdi Merbah Ouargla, 2019.
- [II.31] URUL, Bülent. Gain enhancement of microstrip antenna with a novel DNG material. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2020, vol. 62, no 4, p. 1824-1829.
- [II.32] Darine KADDOUR, « Conception et réalisation de filtres RF passe-bas à structures périodiques et filtres Ultra Large Bande, semi localisés en technologie planaire ». Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de doctorat en Optique et Radiofréquences, université de JOSEPH FOURRIER, juillet 2007.
- [II.33] Hicham Lalj, « Conception et caractérisation de filtres et systèmes antennaires reconfigurables chargés par des résonateurs Métamatériaux sub-longueurs d'onde ». Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de doctorat en physique, université de Rennes, Avril 2014.
- [II.34] PANDEY, G. K., SINGH, H. S., BHARTI, P. K., et al. Metamaterial-based UWB antenna. *Electronics letters*, 2014, vol. 50, no 18, p. 1266-1268.
- [II.35] Cao TN, Krzysztofik WJ. *Metamaterials in Application for Improving the Parameters of Antennas*, Telecommunication Review and Telecommunication News. Warsaw, Poland: SIGMA-NOT. pp. 300-303. DOI: 10.15199/59.2018.6.34. Yearbook XCI/LXXXVII, Notebook No. 6/2018, ISSN 1230-3496, e-ISDN 2449-7487
- [II.36] Y. Hwang, Y. P. Zhang, G. X. Zheng, et T. K. C. Lo, "Planar inverted F antenna loaded with high permittivity material", *Electronics Letters*, vol. 31, no 20, p. 1710–1712, 1995.
- [II.37] C. Luxey, R. Staraj, G. Kossiavas, et A. Papiernik, "Antennes imprimées : Techniques et domaines d'applications", *Techniques de l'ingénieur. Electronique*, vol. 5, no E3311, 2007.
- [II.38] K. L. Wong et K. P. Yang, "Modified planar inverted F antenna", *Electronics letters*, vol.34, no 1, p. 7–8, 1998.

- [II.39] Adrien GODARD, Conception et Réalisation d'un Radar Ultra Large Bande Impulsionnel Agile (300MHz3GHz), Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de doctorat en Electronique des Hautes Fréquences, Photonique et Systèmes, université de Limoge, Octobre 2009.
- [II.40] F. Raval, Y.P. Kosta, H. Joshi, "Reduced size patch antenna using complementary split ring resonator as defect-ed ground plane", International Journal of Electronics and Communications, Int. J. Electron. Commun. (AEÜ) 69 (2015), pp. 126–1133.
- [II.41] R. Rajkumar, K. U. Kiran "A compact metamaterial multiband antenna for WLAN/WiMAX/ITU band applications", International Journal of Electronics and Communications (AEÜ), pp. 599–604.
- [II.42] W.J.Krzysztofik, "Fractals in Antennas and Metamaterials Applications", in "Fractal Analysis -Applications in Physics, Engineering and Technology", F. Brambila (ed.), Publier par INTECH Open Science, Rijeka, Croatia, Print ISBN 978-953-51-3191-5, Online ISBN978-953-51-3192-2, June 2017.
- [II.43] Veselago V.G. The electrodynamic of substances with simultaneously negative values of J and μ . Soviet Physics Uspekhi, January-February 1968, 10, 5009-514.
- [II.44] Hicham Lalj, « Conception et caractérisation de filtres et systèmes antennaires reconfigurables chargés par des résonateurs Métamatériaux sub-longueurs d'onde ». Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de doctorat en physique, université de Rennes, Avril 2014.
- [II.45] SMITH, D. R., VIER, D. C., KOSCHNY, Th, et al. Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials. Physical review E, 2005, vol. 71, no 3, p. 036617.
- [II.46] BENMOSTEFA Naima « modélisation des structures électromagnétiques millimétriques agiles à base des métamatériaux : application aux filtres », Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de doctorat, Tlemcen, 2014.
- [II.47] HASAN, Md, FARUQUE, Mohammad Rashed Iqbal, ISLAM, Sikder Sunbeam, et al. A new compact double-negative miniaturized metamaterial for wideband operation. Materials, 2016, vol. 9, no 10, p. 830.
- [II.48] ISLAM, Sikder Sunbeam, FARUQUE, Mohammad Rashed Iqbal, et ISLAM, Mohammad Tariqul. A new direct retrieval method of refractive index for the metamaterial. Current Science, 2015, p. 337-342.
- [II.49] ASHRAF, F.,ULLAH, M. A., ALAM, M. S., et al. Mathematical characterization of coupled Pi-shaped DNG metamaterial structure. In : 2017 International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering (ECCE). IEEE, 2017. p. 794-797.

[II.50] SMITH, D. R., VIER, D. C., KOSCHNY, Th, et al. Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials. Physical review E, 2005, vol. 71, no 3, p. 036617.

[II.51] Iyer, A. K., & Kakkattu, J. M. (2016). Design and analysis of multi-band filter using metamaterial split ring resonator. 2016 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT).

Chapitre III:

[III.1] D. Seetharamdoo “*Étude des métamatériaux à indice de réfraction négatif : paramètres effectifs et applications antennaires potentielles*”, Thèse de doctorat, Université de RENNES I, (2006).

Annexe

1-La valeur

Performance améliorée du réseau LTE : Les antennes micro ruban à base de méta matériaux offrent une performance supérieure dans la transmission et la réception des signaux LTE. Elles permettent une meilleure qualité de communication, une portée étendue et une réduction des interférences, offrant ainsi une expérience utilisateur améliorée.

Large bande passante : Les antennes à base de méta matériaux sont capables de prendre en charge des bandes de fréquences plus larges, ce qui permet une transmission de données plus rapide et une capacité accrue pour gérer le trafic LTE croissant. Cela permet aux opérateurs de télécommunications d'offrir des services haut débit de qualité à un plus grand nombre d'utilisateurs.

Miniaturisation : Les antennes micro ruban à base de méta matériaux sont conçues pour être miniatures, ce qui permet une intégration facile dans des dispositifs compacts tels que les smartphones, les tablettes, les modems, les drones, etc. Cette miniaturisation n'affecte pas les performances de l'antenne, offrant ainsi des options de conception flexibles pour les fabricants de dispositifs sans fil.

Efficacité énergétique : Les antennes à base de méta matériaux sont optimisées pour une efficacité énergétique maximale, ce qui permet une utilisation plus durable des appareils sans fil. Elles consomment moins d'énergie lors de la transmission et de la réception des signaux LTE, ce qui prolonge la durée de vie de la batterie des dispositifs mobiles et réduit les coûts d'utilisation pour les utilisateurs.

Faible profil encombrant : Les antennes micro ruban à base de méta matériaux ont un profil encombrant réduit, ce qui les rend discrètes et esthétiquement attrayantes. Cela permet une intégration harmonieuse dans les infrastructures urbaines, les bâtiments, les véhicules, etc., sans compromettre la qualité du signal LTE.

Adaptabilité aux différentes fréquences LTE : Les antennes à base de méta matériaux peuvent être conçues pour s'adapter à différentes fréquences utilisées dans le réseau LTE, telles que les bandes de fréquences inférieures et supérieures. Cette adaptabilité permet une utilisation polyvalente des antennes dans diverses régions et configurations réseau.

Résistance aux interférences : Les antennes micro ruban à base de méta matériaux sont conçues pour réduire les interférences provenant d'autres sources, ce qui garantit une qualité de signal élevée et une connectivité stable dans des environnements encombrés ou urbains où les interférences sont courantes.

Fiabilité et durabilité : Les antennes à base de méta matériaux sont construites pour résister aux conditions environnementales difficiles telles que les intempéries, les vibrations, les températures extrêmes, etc. Elles sont robustes et fiables, ce qui garantit une performance stable et continue du réseau LTE.

Facilité de déploiement : Les antennes micro ruban à base de méta matériaux sont conçues pour être faciles à installer et à déployer. Elles peuvent être fixées rapidement et facilement sur divers supports tels que les poteaux, les toits, les mâts, etc., ce qui réduit les délais et les coûts d'installation pour les opérateurs de télécommunications.

Réduction des coûts d'infrastructure : Les antennes à base de méta matériaux offrent une efficacité de couverture améliorée, ce qui permet de réduire le nombre d'antennes nécessaires pour couvrir une zone donnée. Cela se traduit par des économies significatives pour les opérateurs de télécommunications en termes de coûts d'acquisition, d'installation et de maintenance des infrastructures de réseau LTE.

2- Les clients

Opérateurs de télécommunications : Les opérateurs de télécommunications constituent un segment clé pour les antennes micro ruban miniature à base de méta matériaux dans le réseau LTE. Ils utilisent ces antennes pour améliorer la performance de leurs réseaux, étendre la couverture géographique, augmenter la capacité et offrir des services haut débit de qualité à leurs abonnés. Les opérateurs de télécommunications recherchent des solutions d'antennes innovantes et efficaces pour répondre à la demande croissante de connectivité LTE.

Fabricants d'équipements de télécommunications : Les fabricants d'équipements de télécommunications constituent un autre segment important. Ils intègrent les antennes micro ruban miniature à base de méta matériaux dans leurs produits tels que les smartphones, les routeurs, les modems, les équipements de communication sans fil, etc. Ces fabricants recherchent des antennes miniatures, performantes et économes en énergie pour améliorer les capacités de leurs dispositifs et offrir une connectivité LTE avancée à leurs clients.

Entreprises de déploiement de réseaux de communication : Les entreprises de déploiement de réseaux de communication jouent un rôle essentiel dans l'installation et la mise en service des infrastructures de réseau LTE. Elles peuvent être des sous-traitants ou des partenaires des opérateurs de télécommunications. Ces entreprises nécessitent des antennes micro ruban à base de méta matériaux pour des déploiements rapides et efficaces, en garantissant une performance optimale des réseaux LTE dans différentes configurations, telles que les zones urbaines, les zones rurales et les sites spécifiques.

Fournisseurs de services Internet sans fil : Les fournisseurs de services Internet sans fil sont des acteurs importants dans le domaine de la connectivité. Ils fournissent des services Internet haut débit sans fil aux utilisateurs résidentiels et aux entreprises, en utilisant souvent des technologies LTE. Les antennes micro ruban à base de méta matériaux leur permettent d'améliorer la qualité du signal, d'élargir la couverture et d'offrir des débits plus élevés à leurs clients. Les fournisseurs de services Internet sans fil sont donc intéressés par des solutions d'antennes innovantes pour offrir une meilleure expérience utilisateur.

Fabricants d'équipements électroniques grand public : Les fabricants d'équipements électroniques grand public, tels que les fabricants de téléviseurs, les fabricants d'appareils ménagers intelligents, les fabricants de dispositifs IoT, etc., peuvent également être des segments de clientèle pour les antennes micro ruban à base de méta matériaux. Ces fabricants intègrent des fonctionnalités de connectivité sans fil LTE dans leurs produits pour offrir des services avancés et une connectivité étendue. Les antennes micro ruban miniatures à base de méta matériaux répondent à leur besoin de solutions compactes, performantes et compatibles avec le réseau LTE.

Intégrateurs de systèmes de télécommunications : Les intégrateurs de systèmes de télécommunications sont des acteurs spécialisés qui conçoivent, développent et mettent en

œuvre des solutions de communication complètes pour des clients spécifiques, tels que les entreprises, les municipalités, les organismes gouvernementaux, etc. Ils peuvent intégrer les antennes micro ruban miniature à base de méta matériaux dans leurs solutions globales pour fournir des réseaux LTE avancés et des services de communication sans fil fiables et sécurisés.

Organismes de recherche et universités : Les organismes de recherche et les universités constituent un segment important, car ils sont engagés dans la recherche et le développement de nouvelles technologies et de nouvelles applications pour les antennes micro ruban miniature à base de méta matériaux. Ces acteurs contribuent à l'avancement des connaissances et à l'innovation dans le domaine des antennes et des réseaux sans fil, en collaborant souvent avec des entreprises pour la recherche et les projets de développement.

3- la relation avec les clients

Engagement pré-vente : L'entreprise doit établir un fort engagement pré-vente en offrant des conseils d'experts aux clients potentiels. Cela peut inclure des consultations techniques approfondies, des études de faisabilité, des simulations de performance et des recommandations personnalisées. L'objectif est de démontrer la valeur ajoutée des antennes micro ruban à base de méta matériaux et de fournir aux clients potentiels les informations nécessaires pour prendre des décisions éclairées.

Collaboration étroite : Une collaboration étroite avec les clients est essentielle pour comprendre leurs besoins spécifiques en matière d'antennes micro ruban à base de méta matériaux. Cela peut impliquer des réunions régulières, des échanges d'informations approfondis et une écoute active des commentaires des clients. En comprenant parfaitement les exigences et les objectifs des clients, l'entreprise peut adapter ses solutions pour répondre à leurs besoins spécifiques.

Personnalisation des solutions : L'entreprise doit être prête à personnaliser les solutions en fonction des besoins uniques de chaque client. Cela peut impliquer des ajustements de conception, des fréquences spécifiques, des caractéristiques de polarisation adaptées, etc. En offrant des solutions personnalisées, l'entreprise démontre son engagement à fournir des produits adaptés aux besoins spécifiques de chaque client, renforçant ainsi les relations et la satisfaction client.

Support technique continu : Un support technique continu est essentiel pour maintenir des relations solides avec les clients. Cela peut inclure une assistance téléphonique, une assistance en ligne, des visites sur site et des formations supplémentaires. L'entreprise doit s'assurer que les clients reçoivent une assistance rapide et efficace pour résoudre

tout problème technique, répondre à leurs questions et les aider à tirer pleinement parti des antennes micro ruban à base de méta matériaux.

Gestion proactive des problèmes : L'entreprise doit adopter une approche proactive dans la gestion des problèmes et des préoccupations des clients. Cela signifie être réactif aux plaintes ou aux problèmes signalés par les clients, communiquer de manière transparente sur les mesures prises pour les résoudre, et mettre en œuvre des actions correctives pour éviter que les problèmes ne se reproduisent à l'avenir. La gestion proactive des problèmes renforce la confiance des clients et témoigne de l'engagement de l'entreprise envers leur satisfaction.

Établissement de partenariats à long terme : L'entreprise vise à établir des partenariats à long terme avec les clients, en favorisant des relations durables et mutuellement bénéfiques. Cela peut inclure la création de contrats de service à long terme, l'offre de mises à niveau technologiques régulières, des programmes de fidélité et des avantages exclusifs pour les clients fidèles. L'objectif est de créer une relation de confiance, où l'entreprise est considérée comme un partenaire stratégique dans le déploiement et la gestion des antennes micro ruban à base de méta matériaux

4- les canneaux

Vente directe : L'entreprise peut opter pour une vente directe où elle vend directement ses produits aux clients finaux. Cela peut se faire via un site de commerce électronique, où les clients peuvent passer des commandes en ligne. La vente directe permet à l'entreprise de maintenir un contrôle direct sur les ventes, d'interagir directement avec les clients et de recueillir des commentaires précieux..

Distribution en gros : L'entreprise peut travailler avec des distributeurs en gros spécialisés dans les équipements de télécommunications. Ces distributeurs achètent les antennes en gros auprès de l'entreprise et les distribuent à leur réseau de revendeurs, tels que les revendeurs de télécommunications, les intégrateurs de systèmes, les installateurs de réseaux, etc. Cela permet d'atteindre un large public et de bénéficier du réseau de distribution existant des partenaires.

Salons et événements spécialisés : La participation à des salons professionnels, des conférences et des événements spécialisés dans le domaine des télécommunications et des technologies sans fil peut être un moyen efficace de promouvoir les antennes micro ruban à base de méta matériaux. Cela permet à l'entreprise de présenter ses produits, d'établir des contacts avec des clients potentiels, des partenaires et des experts du secteur, et de renforcer sa présence sur le marché.

Présence sur des plateformes en ligne pour faciliter la découverte et l'achat des produits : Pour faciliter la découverte et l'achat des produits d'une entreprise spécialisée dans la

conception d'une antenne micro ruban miniature à base de méta matériaux dans le réseau LTE, il est recommandé de se concentrer sur les plateformes en ligne pertinentes.

5- les partenaires

Fournisseurs de méta matériaux : Les fournisseurs de méta matériaux sont des partenaires clés pour l'entreprise, car ils fournissent les matériaux essentiels pour la fabrication des antennes micro ruban. Ces partenaires peuvent être des fabricants spécialisés dans la production de méta matériaux avancés, tels que des structures à métamatériaux, des nanostructures ou d'autres composants nécessaires à la fabrication des antennes. L'entreprise doit établir des relations solides avec ces fournisseurs pour garantir un approvisionnement régulier et de haute qualité en méta matériaux.

Fabricants d'équipements de télécommunications : Les fabricants d'équipements de télécommunications sont des partenaires clés pour l'entreprise, car ils intègrent les antennes micro ruban à base de méta matériaux dans leurs produits finaux, tels que les smartphones, les routeurs, les modems, les dispositifs IoT, etc. L'entreprise doit établir des partenariats avec ces fabricants pour intégrer ses antennes dans leurs produits et bénéficier de leur réseau de distribution existant.

Opérateurs de télécommunications : Les opérateurs de télécommunications sont des partenaires stratégiques pour l'entreprise, car ils déploient et exploitent les réseaux LTE. En travaillant en collaboration avec les opérateurs, l'entreprise peut fournir ses antennes micro ruban à base de méta matériaux dans le cadre des déploiements de réseaux LTE. Ces partenariats permettent à l'entreprise d'accéder à une base de clients existante, de bénéficier de leur expertise dans le déploiement des réseaux et de renforcer sa crédibilité sur le marché.

Distributeurs et revendeurs : Les distributeurs et revendeurs spécialisés dans les équipements de télécommunications sont des partenaires clés pour l'entreprise. Ils achètent les antennes en gros auprès de l'entreprise et les distribuent à leur réseau de revendeurs et d'intégrateurs de systèmes. Ces partenaires contribuent à élargir la portée de l'entreprise, à atteindre un public plus large et à faciliter la disponibilité des antennes sur le marché.

Instituts de recherche et universités : Les instituts de recherche et les universités sont des partenaires clés pour l'entreprise, car ils sont souvent à l'avant-garde de la recherche et du développement dans le domaine des méta matériaux et des antennes. La collaboration avec ces partenaires permet à l'entreprise de bénéficier des dernières avancées scientifiques et technologiques, d'explorer de nouvelles applications pour les antennes micro ruban à base de méta matériaux et de renforcer sa position en tant qu'entreprise innovante.

6- Les activités

Recherche et développement : La recherche et le développement sont des activités clés pour l'entreprise. Cela comprend la recherche sur les méta matériaux, les techniques de fabrication, les conceptions d'antennes innovantes, les tests de performance, etc. L'objectif est de développer des antennes micro ruban à base de méta matériaux performantes, compactes et adaptées aux exigences du réseau LTE.

Conception et modélisation : Une activité essentielle consiste à concevoir et à modéliser les antennes micro ruban à base de méta matériaux. Cela implique l'utilisation de logiciels de modélisation électromagnétique pour simuler et optimiser les performances des antennes, y compris le rendement, la directivité, la bande passante, la polarisation, etc. La conception doit prendre en compte les contraintes liées à la taille miniature et à l'utilisation de méta matériaux.

Prototypage et fabrication : Une fois les conceptions finalisées, l'entreprise passe à la phase de prototypage et de fabrication des antennes. Cette activité comprend la fabrication des composants, l'assemblage des antennes, les tests de fonctionnement et de performance, ainsi que l'optimisation des processus de production pour garantir une qualité constante. L'entreprise doit être en mesure de produire des antennes en série pour répondre à la demande du marché.

Tests et validation : Les tests et la validation sont des activités cruciales pour s'assurer que les antennes micro ruban à base de méta matériaux répondent aux normes de performance et de qualité. Cela implique des tests de laboratoire pour mesurer les caractéristiques électromagnétiques, les tests de compatibilité électromagnétique (CEM), les tests de durabilité, les tests d'interférence, etc. Les résultats des tests sont utilisés pour valider les performances des antennes et optimiser leur conception.

Certification et conformité : Pour commercialiser les antennes sur le marché, l'entreprise doit s'assurer qu'elles sont conformes aux normes et réglementations en vigueur. Cette activité comprend la certification auprès d'organismes de réglementation, tels que la Federal Communications Commission (FCC) ou l'European Telecommunications Standards Institute (ETSI). L'entreprise doit garantir que ses antennes répondent aux exigences en termes de fréquences, de puissance, de sécurité, etc.

Marketing et promotion : L'activité de marketing et de promotion est essentielle pour faire connaître les antennes micro ruban à base de méta matériaux et générer de la demande sur le marché. Cela comprend l'élaboration d'une stratégie marketing, la création de supports promotionnels, la participation à des salons professionnels, la réalisation de démonstrations, la gestion des relations publiques, la création de contenu marketing, etc. L'objectif est de sensibiliser les clients potentiels et de générer des leads

7 -Les ressource clé

Les matériaux : les matériaux utilisé pour fabriquer l'antenne micro ruban à base de méta matériaux est une ressource clé qui influence directement les performances, la miniaturisation,

la fiabilité et l'avantage concurrentiel de l'entreprise. Parmi ces matériaux c'est le key le FR4 on est besoin aussi une ligne d'alimentation

Expertise technique : L'expertise technique est une ressource clé pour l'entreprise. Cela comprend une équipe de chercheurs, d'ingénieurs et de spécialistes possédant une connaissance approfondie des méta matériaux, des antennes micro ruban et des technologies de télécommunications. Cette expertise permet à l'entreprise de concevoir, développer et fabriquer des antennes de haute qualité et de rester à la pointe de l'innovation dans le domaine.

Laboratoires et équipements de recherche : L'entreprise doit disposer de laboratoires et d'équipements de recherche avancés pour mener des expériences, des tests et des simulations électromagnétiques. Ces ressources comprennent des logiciels de modélisation, des analyseurs de réseau, des équipements de test de compatibilité électromagnétique (CEM), des équipements de mesure précis, etc. Ces ressources permettent à l'entreprise d'optimiser les performances des antennes et de valider leur conformité aux normes.

Capacités de fabrication : La capacité de fabrication est une ressource clé pour l'entreprise. Cela comprend des installations de production équipées pour fabriquer les composants des antennes, assembler les produits finis et assurer la qualité de fabrication. Les ressources de fabrication doivent être adaptées à la production en série des antennes micro ruban miniature à base de méta matériaux, tout en garantissant une qualité élevée et une efficacité de production.

8- Les coûts

Coûts de recherche et développement : entre (1000da et 5000 da)

Les coûts de recherche et développement peuvent inclure les salaires des chercheurs, les équipements de laboratoire, les matériaux pour les prototypes, les outils de simulation et les logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO).

Ces coûts peuvent varier considérablement en fonction de l'étendue de la recherche et de l'innovation requises pour développer les antennes micro ruban miniature à base de méta matériaux.

Coûts des matériaux : (4000da jusqu a 6000da)

Les méta matériaux utilisés dans la conception des antennes peuvent avoir des coûts variables en fonction de leur composition, de leur disponibilité et de leur complexité de fabrication.

Il peut également y avoir des coûts associés à l'acquisition d'autres matériaux nécessaires à la construction des antennes, tels que les substrats, les revêtements et les connecteurs.

Coûts de fabrication : 2000da

Les coûts de fabrication des antennes micro ruban miniature peuvent inclure la fabrication de circuits imprimés, le découpage du métal, le traitement des matériaux, l'assemblage et le contrôle de qualité.

Ces coûts peuvent varier en fonction du volume de production, des techniques de fabrication utilisées et des compétences nécessaires pour produire les antennes.

Coûts de tests et de certification : 1000da

Les antennes doivent être testées pour vérifier leur performance, leur compatibilité électromagnétique et leur conformité aux normes réglementaires.

Les coûts peuvent inclure les frais de laboratoire pour les tests, les équipements de mesure, les services de certification et les licences nécessaires pour commercialiser les antennes.

Coûts de marketing et de distribution : (10000da jusqu'à 50000da)

Pour commercialiser les antennes et atteindre les clients, des coûts de marketing peuvent être engagés, tels que la création de matériel promotionnel, les frais de participation à des salons professionnels, les campagnes publicitaires en ligne, etc.

Les coûts de distribution peuvent inclure les frais d'expédition, de stockage et de logistique pour livrer les antennes aux clients.

9- revenue

Ventes directes aux clients : (30000da)

Les revenus peuvent provenir de la vente directe des antennes aux clients finaux. Cela peut inclure des entreprises, des opérateurs de télécommunications, des intégrateurs de systèmes ou d'autres parties intéressées par l'utilisation des antennes dans le réseau LTE.










Licences et accords de partenariat : (100000da-500000da)

Vous pouvez générer des revenus en accordant des licences d'utilisation de votre technologie d'antenne à d'autres entreprises ou en établissant des partenariats stratégiques pour intégrer vos antennes dans leurs produits ou solutions.

Cela peut impliquer des accords de licence, des droits de propriété intellectuelle ou des contrats de co-développement.

Les contrats de fourniture avec les opérateurs de télécommunications (25000 da pour une quantité de +100 pièces)

sont une source de revenus clé pour les entreprises spécialisées dans la conception d'antennes micro ruban miniatures à base de méta matériaux dans le réseau LTE

<p>Partenaires clés </p> <ul style="list-style-type: none"> -Fournisseurs de méta matériaux -Fabricants d'équipements de télécommunications -Opérateurs de télécommunications -Distributeurs et revendeurs 	<p>Activités </p> <ul style="list-style-type: none"> -Recherche et développement -La fabrication et prototypage -Test et validation -Conception et modélisation <p>Les ressources </p> <ul style="list-style-type: none"> -Les matériaux -Capacités de fabrication -Laboratoires et équipements de recherche 	<p>Propositions </p> <p>valeur</p> <ul style="list-style-type: none"> -Performance améliorée du réseau LTE - Miniaturisation - Facilité de déploiement - Fiabilité et durabilité -large bande passante - Innovation technologique et expertise en méta matériaux - Conception adaptée aux contraintes d'espace et de coût 	<p>Relation </p> <ul style="list-style-type: none"> -Engagement pré-vente -Personnalisation des solutions -Gestion proactive des problèmes -Établissement de partenariats à long terme <p>Canaux </p> <ul style="list-style-type: none"> -Vente direct -distribution en gros - Présence sur des plateformes en ligne 	<p>Clients </p> <ul style="list-style-type: none"> -Opérateurs de télécommunications -Fabricants d'équipements de télécommunications -Entreprises de conception de produits électroniques -Fournisseurs de services Internet sans fil -Intégrateurs de systèmes de telecommunication
<p>Coûts </p> <ul style="list-style-type: none"> -Coûts de recherche et de développement 2000 da -Coûts de conception et de modélisation des antennes: 1000da -Coûts de prototypage et de fabrication des antennes en série:4000da -Coûts de tests et de validation par 1000 da -Coûts de marketing et de promotion 10000 da -Distributeurs et revendeurs (1000da jusqu'à 5000 da) 		<p>Revenus </p> <ul style="list-style-type: none"> -Ventes directes des antennes micro ruban miniature 30000da par pièce -Contrats de fourniture avec les opérateurs de télécommunications (la quantité+100 antenne prix de 25000da) -Licences de propriété intellectuelle(entre 100000da et 500000da) 		

