

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 : TELECOMMUNICATION

Spécialité : Systèmes des télécommunications

Par : SERIARI AYOUB AMINE

&

ZEKHNINI Mohammed Ibrahim

Sujet

Etude et conception des absorbants métamatériaux ultra minces et larges bandes

Soutenu le 26 / 06 / 2022, devant le jury composé de :

M KAMECHE Samir	Professeur	Université de Tlemcen	Président
Mme BENOSMAN Hayet	MCA	Université de Tlemcen	Examinatrice
Mme BENMOSTEFA Naima	MCA	Université de Tlemcen	Encadrante

Année universitaire : 2021 /2022

REMERCEMENTS

Nos remerciements à ALLAH avant tout, pour ses bienfaits indénombrables, de nous avoir aidé dans l'accomplissement de ce projet, qui représente une étape conséquente de notre parcours professionnel.

*Nous souhaitons exprimer notre plus profonde gratitude à Madame **BENMOSTEFA Naima** maitre de conférences à l'université de Tlemcen, notre encadrante pour nous avoir soutenus et guidés tout au long de ce mémoire, sa patience, sa gentillesse, sa disponibilité et ses directives ont été très bénéfiques. Cela a été un grand plaisir de la consulter afin de peaufiner notre manuscrit.*

*Nos remerciements les plus respectueux s'adressent à Monsieur **KAMECHE Samir** professeur à l'université de Tlemcen, qui nous a fait l'honneur et le plaisir de présider le jury de notre soutenance.*

*Nous exprimons aussi nos sincères remerciements à Madame **BENOSMAN Hayet** Maître de conférence à l'université de Tlemcen, d'avoir acceptée d'examiner et évaluer notre travail et l'enrichir par ces propositions.*

Nous remercions tous les enseignants qui ont participé à notre formation au département de télécommunication et tout le personnel administratif de la faculté des sciences et de la Technologie.

Nous soulignons une profonde gratitude pour nos camarades, particulièrement la promotion de deuxième année Master Systèmes des Télécommunications

DEDICACE

C'est grâce à Allah seul que j'ai pu achever ce travail.

*Je le dédie à mes très chers parents **Mohammed** et **Nacera AZZOUZ** qui m'ont accompagné dans chaque pas de ma vie, qui m'ont encouragé et soutenu. Merci pour votre amour, pour votre patience infini. Que ce modeste travail soit le fruit de vos sacrifices.*

*A mes chères sœurs **Fadela, Imene, Fatma, Khadidja** et mon cher frère **Abdellah** mon bras droit, qui m'avez toujours soutenus et encouragé durant ces années d'études.*

*A toute ma famille et mes chers cousins **Yassine** et **Fouad**, au nom de nos meilleurs moments et souvenirs inoubliables.*

*A mon cher ami **Mohammed El-Mehdi KADDOUR** qui m'a soutenu dans les moments difficiles*

A tous mes amis proches. Et tous les étudiants de ma promotion.

AMINE AYOUB SERIARI

A mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que dieu te garde dans son vaste paradis, à toi mon père.

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur, ma mère que j'adore

A mes chères sœurs et mes frères mes bras droit.

A toute ma famille et mes chers cousins.

A tous mes amis de proche et de loin. Et tous les étudiants de ma promotion.

ZEKHNINI MOHAMMED IBRAHIM

RESUME

Les métamatériaux sont des composites qui ont élargi le concept de matière. Grâce aux propriétés électromagnétiques surnaturelles qui présentent.

Le terme métamatériau sert à désigner un matériau composite artificiel qui présente des propriétés électromagnétiques qu'on ne retrouve pas dans un matériau naturel. Il s'agit généralement de structures périodiques, diélectriques ou métalliques qui permettent de jouer sur les propriétés EM des matériaux. Il existe plusieurs types de métamatériaux électromagnétiques, les plus connus sont les absorbants métamatériaux, ces absorbants sont destinés à absorber efficacement le rayonnement électromagnétique, ils présentent des propriétés qui ont attiré les tentions de nombreuses recherches, cela a permet d'ouvrir des porte à plusieurs application dans différents domaines tel que les photodétecteurs, capteurs, camouflage, les communications sans fil. Récemment une nouvelle application a vu le jour c'est la collecte d'énergie électromagnétique.

Ce mémoire a pour objectifs d'étudier théoriquement les conditions nécessaires pour réaliser des structures absorbantes de faible épaisseur basée sur les SRR, pour les applications d'aviation et collecte d'énergie électromagnétique. Les simulations sont traitées sous logiciel HFSS.

Mots-Clés : Métamatériau, Absorbants, Aviation, collecte d'énergie électromagnétique, HFSS.

ABSTRACT

Metamaterials are introduced as an effective medium where the designer can control the electromagnetic properties by engineering the geometry that exhibits unnatural material with singular properties. Thanks to these properties, metamaterials can be used to manipulate electromagnetic waves by absorbing, filtering, enhancing or bending waves. As a consequence, extensive potential applications are foreseen as microwave and optical filters, high sensitivity detectors, invisible cloaks, energy harvesting using perfect absorbers and so on. Particularly, the branch of metamaterial perfect absorber (MPA) has garnered interest because it can achieve unity absorptivity of electromagnetic waves at scales that are much smaller than the wavelength. The objective of this thesis is to study theoretically the conditions necessary to realize thin absorbing structures based on SRR. The simulations are processed under HFSS software.

Keywords: Absorber, Metamaterial, aviation ,Electromagnetic Energy Harvesting, HFSS.

ملخص

المواد الخارقة عبارة عن مواد مُصممة لتكون لها خاصية غير موجودة في المواد التي تظهر بشكل طبيعي. مصنوعة من مجموعة متعددة العناصر مصممة من مواد مركبة مثل المعادن والبلاستيك. يتم ترتيب المواد عادةً في أنماط متكررة ، بمقاييس أصغر من الأطوال الموجية للظواهر التي تؤثر عليها. لا تستمد المواد الخارقة خصائصها من خصائص المواد الأساسية ، ولكن من هياكلها المصممة من جديد. دقة الشكل ، الهندسة ، الحجم ، الاتجاه والترتيب يمنحهم خصائصهم الذكية القادرة على التلاعب بالموجات الكهرومغناطيسية : عن طريق حظر أو امتصاص أو تعزيز أو تقويس الأمواج ، لتحقيق فوائد تتجاوز ما هو ممكن مع المواد. يمكن أن تؤثر المواد الخارقة المصممة بشكل مناسب على أمواج الإشعاع الكهرومغناطيسي أو الصوت بطريقة لم تلاحظ في المواد الخام. أهداف هذه الأطروحة هي الدراسة النظرية للظروف اللازمة لإنتاج هياكل لأجهزة امتصاص رقيقة تعتمد على SRR. تتم معالجة عمليات المحاكاة تحت برنامج HFSS

كلمات مفتاحية : المواد الخارقة ، أجهزة امتصاص ، طيران ، تجميع الطاقة الكهرومغناطيسية .

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	2
CHAPITRE I ETAT DE L'ART DES METAMATERIAUX	
I.1 INTRODUCTION	5
I.2 DEFINITION DES METAMATERIAUX	5
I.3 HISTORIQUE DE REALISATION DES METAMATERIAUX	5
I.4 PROPAGATION ELECTROMAGNETIQUE DANS UN MILIEU HOMOGENE.....	6
I.4.1 CAS D'UN MILIEU DOUBLEMENT NEGATIF (METAMATERIAUX).....	7
I.5 SYNTHESE DES METAMATERIAUX	10
I.5.1 APPROCHE RESONANTE.....	10
I.5.2 COMPOSITE RIGHT LEFT HANDED CRLH (COMPOSITION MAIN DROITE ET GAUCHE).....	16
I.6 APPLICATION DES METAMATERIAUX.....	19
I.6.1 LE CAMOUFLAGE (CLOAKING)	20
I.6.2 LA MINIATURISATION.....	22
I.6.3 LA SELECTIVITE	23
I.6.4 LES SUPER LENTILLES.....	24
I.7 CONCLUSION.....	25
CHAPITRE II LES ABSORBANTS METAMATERIAUX	
II.1 INTRODUCTION	27
II.2 ABSORBANTS METAMATERIAUX	27
II.3 LES TYPES D'ABSORBANTS ELECTROMAGNETIQUE	28
II.3.1 ABSORBANTS DIELECTRIQUES	28
II.3.2 ABSORBANTS STRUCTURAUX.....	28
II.3.2.1 ABSORBANTS PYRAMIDAUX.....	28
II.3.2.2 ABSORBANTS CHARGES PROGRESSIVEMENT (TAPED LOADING ABSORBER)	29
II.3.2.3 ABSORBANTS A COUCHES D'ADAPTATION D'IMPEDANCE (MATCHING LAYER ABSORBER)	29
II.3.3 ABSORBANTS RESONANTS	30
II.3.4 ABSORBANTS MAGNETIQUES.....	31
II.3 THEORIE DES ABSORBANTS METAMATERIAUX.....	32
II.3.1 THEORIE D'ABSORPTION.....	32
II.3.2 CONCEPTION D'ABSORBANTS METAMATERIAUX	33

II.4 ABSORBANTS METAMATERIAUX A BANDE ETROITE.....	34
II.5 ABSORBANTS A METAMATERIAUX A LARGE BANDE	36
II.6 ABSORBANTS A METAMATERIAUX ACCORDABLES EN FREQUENCE	38
II.7 ABSORBANTS A METAMATERIAUX COHERENTS.....	40
II.8 CONCLUSION.....	42

CHAPITRE III ABSORBANT METAMATERIAU ULTRA-MINCE A LARGE BANDE POUR LA TECHNOLOGIE D'AVIATION

III.1 INTRODUCTION.....	45
III.2 CONCEPTION D'ABSORBANT ET RESULTAT DE SIMULATION	45
III.3 ETUDE PARAMETRIQUE DE LA CELLULE UNITAIRE MMA	46
III.3.1 INFLUENCE DE LA GEOMETRIE DE L'ABSORBANT SUR LE COEFFICIENT DE REFLEXION.....	46
III.3.2 INFLUENCE DE L'EPAISSEUR DU SUBSTRAT SUR LE COEFFICIENT DE REFLEXION ...	48
III.3.3 INFLUENCE DE LA LONGUEUR DU PATCH CARRE CENTRE	49
III.4 MECANISME D'ABSORPTION ET PERFORMANCE DE L'ABSORBANT.....	50
III.5 CONCLUSION.....	55

CHAPITRE IV ABSORBANT METAMATERIAU POUR APPLICATIONS DE LA COLLECTE D'ENERGIE ELECTROMAGNETIQUE

IV.1 INTRODUCTION	
IV.I ABSORBANT METAMATERIAU MULTICOUCHES A ANNEAUX FENDUS CARRES POUR LES COMMUNICATIONS SANS FIL.....	58
IV.I.1 CONCEPTION ET CONFIGURATION NUMERIQUE DE LA STRUCTURE PROPOSEE.....	58
IV.I.2 RESULTATS DE LA SIMULATION :.....	59
IV.I.3 ETUDE PARAMETRIQUE CE LA CELLULE UNITAIRE	60
IV.I.3.1 INFLUENCE DU SUBSTRAT.....	62
IV.I.3.2 INFLUENCE D'ANGLE D'INCIDENCE SUR L'ABSORPTION.....	64
IV.I.3.3 INFLUENCE DE LA LARGEUR DES LIGNES SRR.....	64
II. ABSORBANT METAMATERIAU LARGE BANDE POUR LES APPLICATIONS DE COLLECTE D'ENERGIE POUR LA 5G	
IV.II.1 INTRODUCTION :.....	66
IV.II.2 CONCEPTION DE L'ABSORBANT ET RESULTAT DE SIMULATION	66
IV.II.3 ETUDE PARAMÉTRIQUE DE LA CELLULE UNITAIRE.....	69
IV.II.3.1 INFLUENCE DU PARAMETRE W SUR LE COEFFICIENT DE REFLEXION	69
IV.II.3.2 INFLUENCE DES ANGLES D'INCIDENCE SUR LE COEFFICIENT L'ABSORPTION	70

IV.II.4 CONCLUSION	71
CONCLUSION GENERALE	74
REFERENCES.....	75

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : schéma de la réflexion-transmission d'une onde plane lors d'un saut d'indice : réfraction normale à droite, et réfraction négative à gauche.	6
Figure I.2 : (a) Trièdre direct (matériaux main droite) et (b) trièdre indirect (matériaux main gauche)	8
Figure I.3 : Propagation d'une onde plane à travers un milieu selon le signe de ces paramètres constitutifs (permittivité et perméabilité).	8
Figure I.4 : Loi de Snell-Descartes lors du passage d'une onde d'un milieu main droite (a) vers un milieu main droite (angle positif), (b) vers un milieu main gauche (angle négatif).	10
Figure I.5 : Structure du réseau de fils métalliques minces proposé par Pendry pour avoir un milieu à permittivité négative [5] [6].	12
Figure I.6 : Exemple de la permittivité (partie réelle) d'un réseau de fils, la permittivité est négative, elle reprend une valeur positive à la fréquence plasma électrique (environ 22.3 GHz), le champ électrique est orienté en parallèle avec les fils [6].	12
Figure I.7 : Les SRR proposés par Pendry pour avoir un milieu à perméabilité négative [4]	13
Figure I.8 : (a) Exemple de la perméabilité d'un réseau de SRR, la perméabilité (partie réelle) devient négative à environ 8.5 GHz. (b) La permittivité (partie réelle) reste toujours positive. Le champ magnétique est orienté selon l'axe du SRR [6].	14
Figure I.9 : Structure proposé par D.Smith qui combine les fils minces et les SRR pour avoir un milieu doublement négatif (métamatériau).	
Figure I.10 Exemple de la permittivité et de la perméabilité d'un réseau constitué de fils minces et de SRR, on observe l'existence d'une bande de fréquences entre 8.5 et 9 GHz où les deux sont négatives [6].	15
Figure I.11 : Modèle de tronçon de ligne classique (main droite) avec pertes.	16
Figure I.12 : Modèles de tronçons de ligne duale (main gauche) avec pertes. LL CL.	17
Figure I.13 : Diagrammes de dispersion correspondant aux deux cas idéaux de lignes main gauche et de ligne main droite.	18
Figure I.14 : Modèles de tronçons de ligne CRLH : (a) sans pertes. (b) avec pertes.	18
Figure I.15 : Diagramme de dispersion correspondant à une ligne CRLH, si $\omega_1 \neq \omega_2$ nous avons un cas non équilibré (présence d'une bande interdite), si $\omega_1 = \omega_2$ nous avons un cas équilibré.	19
Figure I.16 : Schématisation du phénomène de camouflage. A gauche le principe de l'optique transformationnelle,. A droite la représentation 3D de ce que serait un gradient d'indice artificiel capable de déformer les ondes électromagnétiques (traits noirs) par le principe de l'optique transformationnelle.[14].	21
Figure I.17 : Vérification expérimentale par Smith et al. en 2006 de la cape d'invisibilité 2D. (A), la simulation de la cape avec des paramètres idéaux. (B), la simulation avec les paramètres réels du matériau. (C), sans la cape. (D), les mesures [17].	21
Figure I.18 : Photo d'une antenne patch miniaturisée grâce à une couche de métamatériau à la perméabilité améliorée. Le facteur de miniaturisation pour ce type d'antenne est de l'ordre de 3 à 6 selon la fréquence de travail (Buell et al., 2014 [19])	22
Figure I.19 : Exemple d'une couche d'absorbant par Hao et al. à base de métamatériau métallique, fonctionnant dans l'infrarouge [21].	23

Figure I.20 : Exemple d'un métamatériau plan ayant une grande sensibilité en fréquence au THz	23
Figure I.21 : Focalisation avec une lentille ordinaire (a) et une super lentille (b).	24
Figure II.1 : illustration de la disposition d'un absorbant pyramidal	29
Figure II.2 : Illustration de l'absorbant chargé progressivement et de l'absorbant à couche d'adaptation d'impédance	30
Figure II.3 : Illustration du phénomène d'interférences destructrices.	31
Figure II.4 : Illustration de courbes typiques de progression de la permittivité et de la perméabilité d'un matériau magnétique en fréquence	33
Figure II.5 : (a) Cellule unitaire du premier absorbant à métamatériau planaire, (b) réflexion, transmission et absorbance simulées à la fréquence micro-ondes [59]	37
Figure II.6 : (a) Cellule unitaire d'un absorbant à métamatériau dendritique et (b) spectres d'absorption simulés et mesurés [61].	37
Figure II.7: Vue schématique de l'absorbant à métamatériau en dents de scie et de son spectre d'absorption [71].	38
Figure II.8 : (a) Vue schématique de l'absorbant à métamatériau d'eau, (b) vue couche par couche de la cellule unitaire, et (c) vue en plan de coupe de la couche d'eau. (d) Spectres d'absorption de l'absorbant à métamatériau d'eau, de la couche d'eau complète soutenue par une masse métallique et du métamatériau sans eau [82].	39
Figure II.9 : (a) Vue schématique de l'absorbant à métamatériau à base de silicium et (b) sa cellule unitaire. (c) Spectres d'absorption de métamatériaux à base de silicium avec des trous coniques et circulaires [84].	40
Figure II.10 : (a) Spectres d'absorption expérimentaux et (b) simulés du métamatériau diélectrique étirable mécaniquement. Mécaniquement étirable. (c) Schéma de l'étirement des résonateurs diélectriques sur une fine couche de caoutchouc conducteur. (d) Distribution du champ magnétique à la fréquence de résonance [96].	41
Figure II.11 : (a) Cellule unitaire en forme de croix avec des fils de graphène et (b) vue schématique de l'absorbant à métamatériau. (c) Absorption de l'absorbant à métamatériau sous différentes tensions de polarisation [99].	42
Figure III.1 : Structure de la cellule unitaire de l'absorbant : (a) indique la vue 3D d'une cellule unitaire de l'absorbant conçue en utilisant un matériau composite, c'est-à-dire la structure du résonateur en cuivre (en haut), le substrat FR4 (au milieu) et la masse	46
Figure III.2 : variation des coefficients de réflexion en fonction de la géométrie	47
Figure III.3 : variation des coefficients d'absorption en fonction de la géométrie	48
Figure III.4 : Variation du coefficient de réflexion en changeant l'épaisseur du substrat "h" de 0,8 mm à 2,4 mm.	49
Figure III.5 : Influence de variation de la longueur du patch carré centré "P" (de 1,2 mm à 2.8 mm) sur le coefficient d'absorption.	50
Figure III.6 : Modèle de circuit d'impédance équivalent du circuit de l'absorbant en termes de résistance en série (R), d'inductance (L) et de capacité (C).	51
Figure III.7 : Coefficient de réflexion pour différents angles d'incidence « θ » à « $\Phi = 0$ »	53
Figure III.8 : influence des différents angles d'incidence sur le coefficient de réflexion S11 (a) : mode TE seulement (b) mode TM seulement	54
Figure IV.1 : (a) Structure multicouche proposée,(b) Dimensions des SSR et épaisseurs de couches	58

Figure IV.2: Absorption des résonateurs individuels et des résonateurs couplés	60
Figure IV.3 : Coefficient d'absorption des combinaisons par paire de trois résonateurs.	61
Figure IV.4 : Coefficient d'absorption de la structure proposée et structure a un seul substrat	62
Figure IV.5 : Comparaison d'absorption pour la structure proposée et la structure à quatre couches.	63
Figure IV.6 : Influence de l'angle d'incidence sur le coefficient d'absorption de la structure à trois couches.	64
Figure IV.7 : Coefficients d'absorption pour différentes valeurs de w .	65
Figure IV.8 : Absorbant proposés avec les paramètres de conception.	67
Figure IV.9 : Coefficient de réflexion	68
Figure IV.10 : Coefficient d'absorption	69
Figure IV.11: Coefficient de réflexion avec différentes valeurs du paramètre (W)	70
Figure IV.12 : Influence des angles d'incidence sur l'absorption	71

LISTE DES TABLEAUX

Tableau III.1 : Valeurs estimées de R, L et C à 12,5 GHz.....	52
Tableau IV.1 : Les dimensions géométriques de la structure.	59
Tableau IV.2: Les valeurs des paramètres de la structure.....	67

SYMBOLES ET ABREVIATIONS

ε : permittivité

μ : perméabilité

ε_0 : permittivité du vide

μ_0 : perméabilité du vide

ε_r : permittivité relative

μ_r : perméabilité relative

σ : conductivité électrique

ρ : résistivité

n : indice de réfraction

v_φ : vitesse de phase

v_g : vitesse de groupe

E : champ électrique

B : champ magnétique

D : déplacement électrique

H : excitation magnétique

MTM : métamatériau

MMA : absorbant à métamatériau

MPA : Metamaterial Perfect Absorber

SRR : split-Ring-Resonator

EM : Electromagnétique

IEM : Interférences Electromagnétiques

HFSS : High Frequency Structure Simulator

IOT : Internet Of Things

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'évolution rapide et moderne de la communication sans fil provoque des interférences électromagnétiques (EM) et contamine l'environnement par la pollution EM. Ces interférences influencent le comportement typique des systèmes ou des dispositifs. Par conséquent, il y a une demande croissante pour le développement de matériaux et de techniques appropriés pour supprimer les conséquences du rayonnement électromagnétique.

L'utilisation des métamatériaux est une solution prometteuse au problème des IEM. Les MTM sont généralement décrites comme un milieu homogène artificiel mis en œuvre par l'utilisation d'éléments métalliques ou diélectriques sous-longueurs d'onde qui dévoilent des caractéristiques EM inhabituelles qui ne prévalent pas dans le monde naturel. Ces caractéristiques sont conçues en fonction de leur structure plutôt que de la constitution du matériau. Les caractéristiques inhabituelles des MTM dépendent de la forme, de la taille et de la géométrie de la structure plutôt que de leur constitution. De nombreuses caractéristiques exotiques des MTM ont déjà été révélées, étudiées et mises en œuvre dans divers secteurs. Les MTM peuvent modifier individuellement la permittivité effective (ϵ) et la perméabilité (μ) en ajustant de manière appropriée leurs paramètres structurels. Les MTM ont captivé l'attention de nombreux chercheurs en raison de leurs propriétés inhabituelles telles que le double comportement négatif, le comportement gaucher, l'indice de réfraction négatif, la vitesse de phase négative, etc. Les applications des MTMs sont très vastes, couvrant l'électromagnétisme, l'optique, la nanoélectronique, dispositifs biomédicaux et le domaine militaire.

Une des applications prometteuses des MTM est dans le domaine de la conception des absorbants EM, où les propriétés requises des MTM peuvent être intelligemment accomplies par adopter une conception et une structure particulière. Les absorbants métamatériaux MMA sont l'un des secteurs les plus développés parmi les diverses réalisations des MTM.

Le but de ce mémoire est d'étudier des absorbants d'ondes électromagnétiques à base de métamatériaux fonctionnant dans les bandes de fréquence différentes. Par la suite nous analyserons ces structures absorbantes sous logiciel HFSS (High Frequency Structure Simulator)

Dans le premier chapitre, nous abordons l'état de l'art sur les métamatériaux, la propagation électromagnétique des ondes dans divers milieux en exploitant les équations de Maxwell ainsi que des applications potentielles.

Dans le deuxième chapitre, nous discutons théorie et quelques points clés concernant les techniques des différents absorbants existants, ainsi que la théorie et la caractérisation des absorbants parfaits de métamatériau (MPA).

Le troisième chapitre est dédié à des simulations d'un absorbant large bande insensible à la polarisation pour les applications d'aviation

Le dernier chapitre concerne des structures d'absorbants qui sont proposées fonctionnant dans les bandes de fréquence utilisées en télécommunications (WLAN, WIMAX, 5G, télécommunications spatiales).ces absorbants sont utilisé pour collecte de l'énergie électromagnétique. Le taux d'absorption et les résultats obtenus sont mis en évidence dans les simulations proposées.

CHAPITRE I
L'ÉTAT DE L'ART
DES
METAMATERIAUX

I.1 INTRODUCTION

Des matériaux artificiels ayant des caractéristiques exceptionnelles, capables de manipuler les ondes électromagnétiques en bloquant, absorbants et même en déviant ces ondes, d'une manière qui n'est pas observée dans les matériaux qui se trouve dans la nature. Les métamatériaux sont une nouvelle classe de matériaux fonctionnels qui ont fait l'intérêt d'un grand nombre de recherches.

Dans ce premier chapitre nous définissons le concept général des métamatériaux. Nous dressons aussi un rappel théorique de la propagation électromagnétique dans les métamatériaux en partant des équations de Maxwell, quelques exemples d'applications sont également cités.

I.2 DEFINITION DES METAMATERIAUX

Les métamatériaux également appelés 'Matériaux main gauche' sont des milieux artificiels, dont la structure périodique sub-longueur d'onde permet d'avoir un contrôle sur la permittivité (ϵ), la perméabilité (μ), ou les deux grandeurs à la fois, offrant la possibilité d'un indice négatif, une condition qui n'existe pas dans la nature. Ce sont des matériaux qui extraient leurs propriétés de leur structure plutôt que le matériau dont ils sont composés.

I.3 HISTORIQUE DE REALISATION DES METAMATERIAUX

La première et l'une des contributions les plus importantes à ce sujet a été faite en 1968 par V. G. Veselago qui a déclaré que les matériaux avec permittivité négative et perméabilité négative sont théoriquement possibles [1]. En 1999, John Pendry a identifié un moyen pratique de fabriquer des métamatériaux gauchers qui ne suivait pas la règle conventionnelle de la main droite [2]. Il a proposé sa conception d'une structure à fil mince (TW) disposée périodiquement qui illustre la valeur négative de la permittivité efficace [3]. Il a été montré que la structure a une fréquence de plasma faible que l'onde dans le régime de micro-onde. En raison de sa faible fréquence de plasma, cette structure peut produire une permittivité négative efficace aux fréquences de micro-onde. Il a également été démontré que la perméabilité magnétique négative pouvait être obtenue à l'aide d'un ensemble de résonateurs à anneau fendu [4].

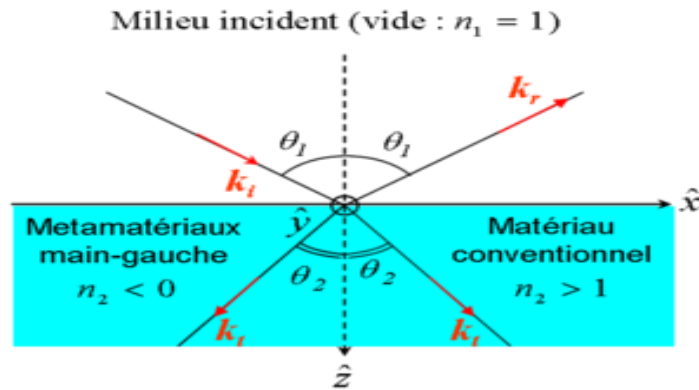


Figure I.1 : schéma de la réflexion-transmission d'une onde plane lors d'un saut d'indice : réfraction normale à droite, et réfraction négative à gauche.

I.4 PROPAGATION ELECTROMAGNETIQUE DANS UN MILIEU HOMOGENE

Avant d'aborder la physique des métamatériaux, il est d'abord pertinent de donner un bref aperçu de la théorie électromagnétique. Nous commençons par les équations de Maxwell, Pour une onde électromagnétique qui se propage dans un milieu homogène, on peut réécrire les équations de Maxwell sous la forme suivante :

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (I.1)$$

$$\nabla \times H = -\frac{\partial D}{\partial t} \quad (I.2)$$

Avec :

$$B = \mu H \quad \text{et} \quad D = \varepsilon E \quad (I.3)$$

E représente le champ électrique, H le champ magnétique, B l'induction magnétique et D l'induction électrique, ε la permittivité électrique, μ la perméabilité magnétique avec :

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad \text{et} \quad \varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0 \quad (I.4)$$

Pour une onde plane qui se propage selon la direction z, un caractère ondulatoire ($e^{j\omega t}$) et propagatif ($e^{-\gamma z}$) sont associés aux champs électromagnétiques E et H. L'équation de propagation s'écrit alors :

$$E = E_0 e^{j\omega t} e^{-\gamma z} \quad \text{et} \quad H = H_0 e^{j\omega t} e^{-\gamma z} \quad (\text{I.5})$$

La variation des champs E et H étant liée par les équations de Maxwell, l'onde est représentée fréquemment par un seul de ses champs : en général le champ électrique dans un but de simplification. E_0 Représente l'amplitude du champ électrique, ω la pulsation qui est définie par :

$$\omega = 2 \pi f \quad (\text{I.6})$$

Avec f la fréquence.

Dans l'équation de propagation (1.4), γ est appelée la constante de propagation, elle est définie par :

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (\text{I.7})$$

Avec α l'atténuation, β la constante de phase. Selon la forme de la constante de propagation γ on définit trois cas : La valeur de γ est purement réelle : $\gamma = \alpha$ l'onde électromagnétique est évanescence, elle décroît exponentiellement lors de sa propagation.

La valeur de γ est purement imaginaire : $\gamma = j\beta$ l'onde électromagnétique est propagative. La valeur de γ est complexe : $\gamma = \alpha + j\beta$ l'onde électromagnétique est propagative avec un terme de pertes. Si on considère l'onde qui se propage sans pertes, on peut écrire les équations (I.4) :

$$E = E_0 e^{j\omega t} e^{-jkz} \quad \text{et} \quad H = H_0 e^{j\omega t} e^{-jkz} \quad (\text{I.8})$$

Avec k le nombre d'onde, sachant que dans l'hypothèse d'une propagation TEM :

$$\beta = k \quad (\text{I.9})$$

A partir des équations (I.1),(1,2), (I.3) et (I.8), on peut réécrire les équations de Maxwell sous cette forme :

$$k \times E = \omega \mu H \quad \text{et} \quad k \times H = -\omega \varepsilon \quad (\text{I.10})$$

I.4.1 CAS D'UN MILIEU DOUBLEMENT NEGATIF (METAMATERIAUX)

A partir de l'équation (I.10), nous pouvons déduire qu'avec ε et μ simultanément positives, les vecteurs $\vec{E}, \vec{H}, \vec{K}$ forment un trièdre direct ou main droite Figure (I.2.a). Le flux d'énergie est décrit par le vecteur de Poynting qui s'écrit :

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (\text{I.11})$$

Par conséquent \vec{S} et \vec{K} suivent la même direction. Nous pouvons également déduire qu'une autre possibilité satisfait cette équation, c'est le cas où ε et μ sont simultanément négatives. Dans ce

cas, les vecteurs $\vec{E}, \vec{H}, \vec{K}$ forment un trièdre indirect ou main gauche Figure (I.2.b). C'est l'hypothèse théorique qui était introduite pour la première fois en 1964 par Veselago [1].

Le chercheur russe a exposé plusieurs propriétés physiques d'un tel matériau qui n'existe pas dans la nature d'où le nom de métamatériau. Ces propriétés seront exposées par la suite.

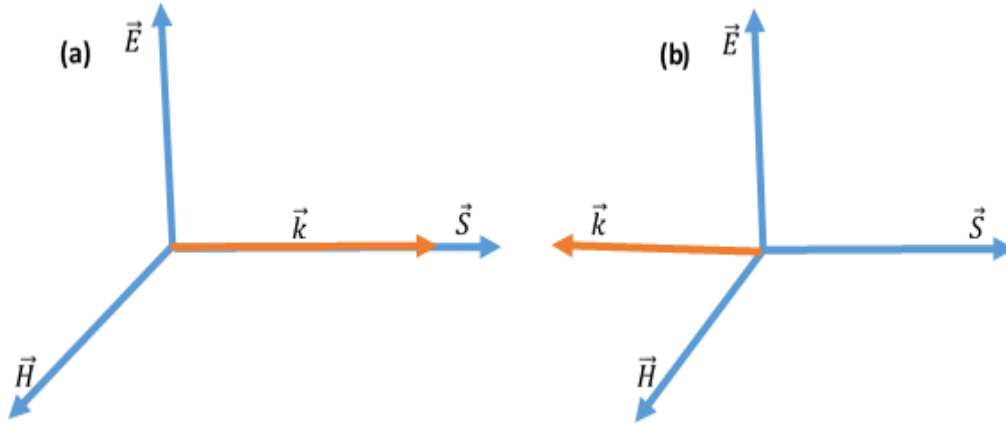


Figure I.2 : (a) Trièdre direct (matériaux main droite) et (b) trièdre indirect (matériaux main gauche)

En général, la réponse électromagnétique d'un matériau quelconque face à une onde électromagnétique incidente est déterminée par ses deux paramètres intrinsèques ϵ_r et μ_r . Donc, selon les signes de ϵ_r et μ_r , quatre combinaisons sont possibles. La Figure (I.3) représente les différents types de matériaux selon ces combinaisons.

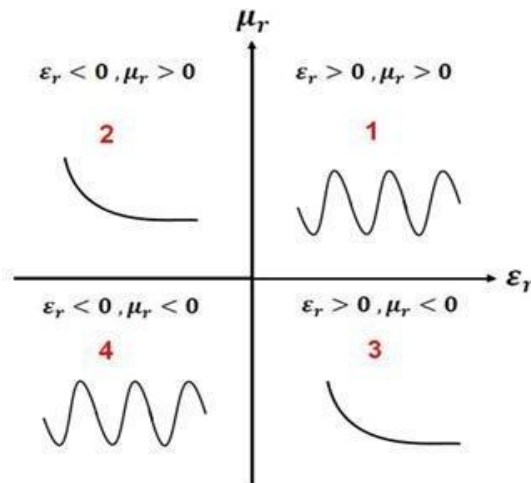


Figure I.3 : Propagation d'une onde plane à travers un milieu selon le signe de ces paramètres constitutifs (permittivité et perméabilité).

Les cadrans 1 et 4 sont les zones qui satisfont l'équation de propagation (I.10), donc l'onde propage.

Le cas où $\epsilon_r > 0$ et $\mu_r > 0$ (main droite) représente le cas des matériaux classique comme les diélectriques.

Le cas ou $\epsilon_r < 0$ et $\mu_r < 0$ (main gauche) représente le cas des métamatériaux.

Les zones 2 et 3 sont des zones où l'onde ne se propage pas (onde évanescente). Le cas où $\epsilon_r > 0$ et

$\mu_r < 0$ représente le cas des ferrites. Le cas où $\epsilon_r < 0$ et $\mu_r > 0$ représente le cas des plasmas.

Revenons au cas qui nous intéresse (cadrans 4), comme noté auparavant, les métamatériaux appelés également matériaux main gauche ou encore matériaux doublement négatifs n'existent pas dans la nature.

La vitesse de phase est définie par l'équation (I.11) et la vitesse de groupe par l'équation (I.12).

$$v_\varphi = \frac{\omega}{k} \quad (I.12)$$

$$v_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} \quad (I.13)$$

Le fait que les trois vecteurs $\vec{E}, \vec{H}, \vec{K}$ forment un trièdre indirect implique que la vitesse de phase et la

vitesse de groupe de l'onde sont dans des directions opposées :

$$\text{Milieu main droite : } v_\varphi > 0 \text{ (k > 0)} \quad \text{et} \quad v_g > 0 \quad (I.14)$$

$$\text{Milieu main gauche : } v_\varphi < 0 \text{ (k < 0)} \quad \text{et} \quad v_g > 0 \quad (I.15)$$

Le fait que ϵ_r et μ_r soit toutes les deux négatives implique que l'indice de réfraction n du milieu est négatif, car :

$$n = \pm \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (I.16)$$

Cela provoque l'inversion de la loi de Snell-Descartes, car lors du passage d'un milieu main droite à un milieu main gauche, l'onde réfractée sera transmise du même côté de la normale que l'onde incidente.

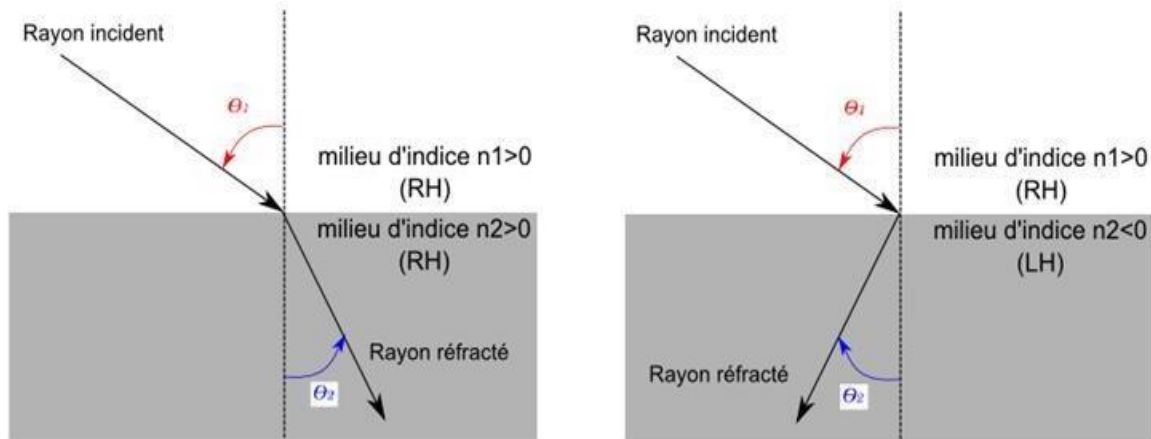


Figure I.4 : Loi de Snell-Descartes lors du passage d'une onde d'un milieu main droite (a) vers un milieu main droite (angle positif), (b) vers un milieu main gauche (angle négatif).

Les matériaux main gauche impliquent d'autres changements sur des phénomènes physiques bien connus, comme l'inversion de l'effet Doppler, l'inversion de l'effet Cerenkov et l'inversion de la convergence et de la divergence dans les lentilles concaves et convexes respectivement.

I.5 SYNTHÈSE DES METAMATERIAUX

I.5.1 Approche Résonante

La réalisation pratique du premier métamatériau a été obtenue grâce à l'évolution en trois étapes. D'abord, la réalisation d'un milieu avec une permittivité négative. Puis, d'un milieu avec une perméabilité négative. Enfin, la superposition des deux milieux pour obtenir un milieu doublement négatif.

I.5.1.1 Milieu A Permittivité Négative

La dépendance fréquentielle de la permittivité des métaux suit le modèle de Drude :

$$\varepsilon_r(f) = 1 - \frac{f_{pe}^2}{f^2 + j f_c f} \quad (I.17)$$

Avec f_{pe} la fréquence plasma électrique donnée par l'équation (I.17), f_c est la fréquence de collision donnée par l'équation (I.18).

$$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{n e^2}{\epsilon_0 m_e}} \quad (\text{I.18})$$

$$\omega_c = \frac{1}{\tau} \quad (\text{I.19})$$

Avec n la densité d'électrons, e la charge élémentaire, m_e la masse, τ le temps de collision. Si on considère le cas idéal dans l'équation (I.17), c'est-à-dire une partie imaginaire nulle, on déduit que les métaux présentent naturellement une permittivité négative en dessous de leur fréquence plasma électrique. Au vu des valeurs des éléments de l'équation (I.18), cette fréquence plasma électrique se situe typiquement dans le domaine du visible et de l'ultraviolet. Par exemple, elle est de 2184 THz pour l'or, 3570 THz pour l'aluminium et 1788 THz pour le cuivre [3].

Pour avoir une permittivité négative dans le domaine des micro-ondes, J. Pendry a proposé d'abaisser la fréquence plasma électrique [4] [5]. La solution consiste à diluer le métal en créant un réseau périodique de fils minces métalliques séparés par de l'air figure (I.5), cela permet d'abaisser la densité des électrons dans l'équation (I.18) car il revient à définir un milieu effectif régi également par le modèle de Drude, où n devient n_{eff} (I.19). De plus, le courant qui circule le long des tiges métalliques induit un champ magnétique qui agit à son tour sur les charges en rendant leur masse effective plus élevée, m_e devient m_{eff} (I.21).

$$n_{eff} = \frac{n \pi r^2}{a^2} \quad (\text{I.20})$$

$$m_{eff} = \frac{\mu_0 e^2 \pi r^2 n}{2\pi} \ln\left(\frac{a}{r}\right) \quad (\text{I.21})$$

Avec n la densité d'électrons dans les tiges métalliques, r leur rayon et a l'espacement (le pas du réseau).

L'effet combiné de la dilution du milieu et de l'augmentation de la masse effective permet donc de diminuer la fréquence plasma électrique. Cette astuce a permis de créer un milieu présentant une permittivité négative exploitable dans le domaine des micro-ondes. Un exemple de permittivité en fonction de la fréquence d'un réseau de fils métalliques est présenté dans la Figure (I. 6).

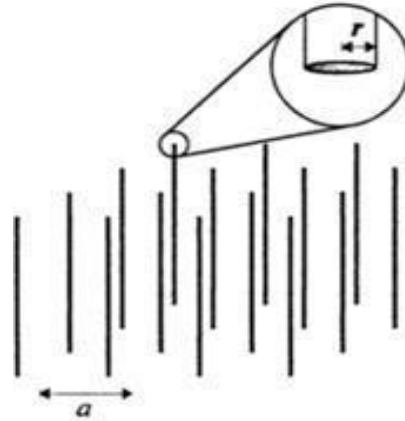


Figure I.5 : Structure du réseau de fils métalliques minces proposé par Pendry pour avoir un milieu à permittivité négative [5] [6].

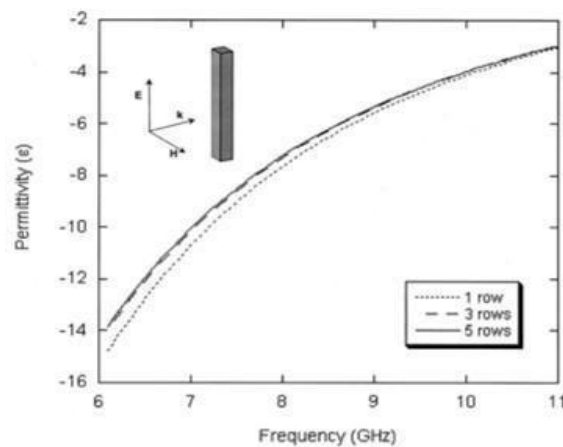


Figure I.6 : Exemple de la permittivité (partie réelle) d'un réseau de fils, la permittivité est négative, elle reprend une valeur positive à la fréquence plasma électrique (environ 22.3 GHz), le champ électrique est orienté en parallèle avec les fils [6].

I.5.1.2 Milieu A Perméabilité Négative

Le magnétisme artificiel consiste à créer un comportement magnétique sans utiliser de matériaux magnétiques mais juste des conducteurs métalliques classiques. Pendry a proposé en 1999 un circuit appelé résonateur à anneau fondu (SRR) [4]. Il s'agit de deux cercles métalliques ouverts couplés. Ils sont excités par un champ électromagnétique dont le champ magnétique est dirigé selon l'axe des cercles Figure (I.7).

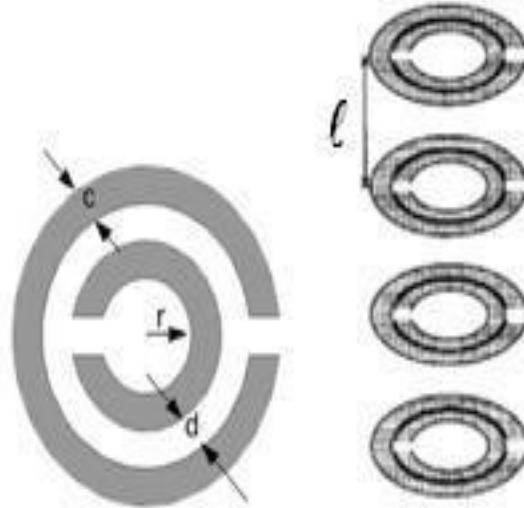


Figure I.7 : Les SRR proposés par Pendry pour avoir un milieu à perméabilité négative [4]

La dépendance fréquentielle de la perméabilité suit un modèle de Lorentz donné par l'équation (I.22).

$$\mu_{eff}(\omega) = 1 - \frac{\omega_{pm}^2 - \omega_m^2}{\omega(\omega + j\Gamma) - \omega_m^2} \quad (I.22)$$

Avec ω_m la fréquence de résonance magnétique, ω_{pm} la fréquence plasma magnétique, Γ les pertes métallique du SRR. Ces fréquences peuvent s'écrire en fonction des paramètres géométriques des SRR Figure (I.7) à l'aide des équations :

$$\omega_m = \sqrt{\frac{3 l c_0^2}{\pi \ln(\frac{2c}{d}) r^3}} \quad (I.23)$$

$$\omega_{pm} = \frac{\omega_m}{\sqrt{1 - \frac{\pi r^2}{a^2}}} \quad (I.24)$$

Si les pertes métalliques sont suffisamment faibles, le SRR donne une valeur de perméabilité négative dans la bande de fréquences comprises entre ω_m et ω_{pm} . Un exemple est présenté dans la Figure (I.8), la perméabilité d'un SRR carré passe par une valeur négative autour de 8.5 GHz, la permittivité quant à elle reste positive.

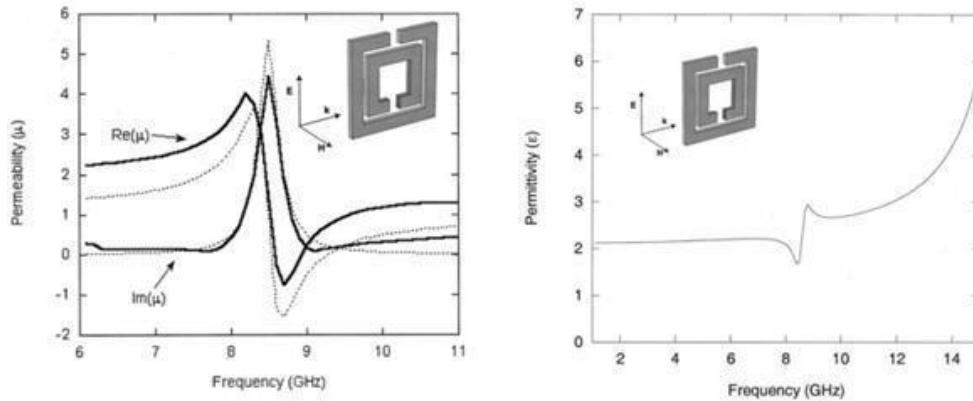


Figure I.8 : (a) Exemple de la perméabilité d'un réseau de SRR, la perméabilité (partie réelle) devient négative à environ 8.5 GHz. (b) La permittivité (partie réelle) reste toujours positive. Le champ magnétique est orienté selon l'axe du SRR [6].

I.5.1.3 Milieu Doublement Négatif

La première démonstration expérimentale d'un milieu composite doublement négatif a été présentée par D. Smith en 2000 [4], [7], [8]. En s'inspirant des travaux de J. Pendry, il a superposé un réseau de fils et un réseau de SRR Figure (I.9). Il a observé ainsi une transmission à travers ce milieu dans la bande de fréquence dans laquelle la permittivité et la perméabilité sont négatives. Cette expérimentation a démontré pour la première fois la théorie des milieux main gauche introduite par Veselago, qui prévoit une propagation des ondes électromagnétiques à travers un milieu doublement négatif. Ce fut le premier métamatériau réalisé.



Figure I.9 : La structure proposée par D. Smith qui combine les fils minces et les SRR pour avoir un milieu doublement négatif (métamatériaux) .

La Figure (I.10) présente la permittivité et la perméabilité d'une structure faite de superposition du réseau de fil Figure (1.5) et du réseau de SRR Figure (I.7), cette superposition donne une bande de fréquence entre 8.5 et 9 GHz où ϵ et μ sont toutes deux négatives.

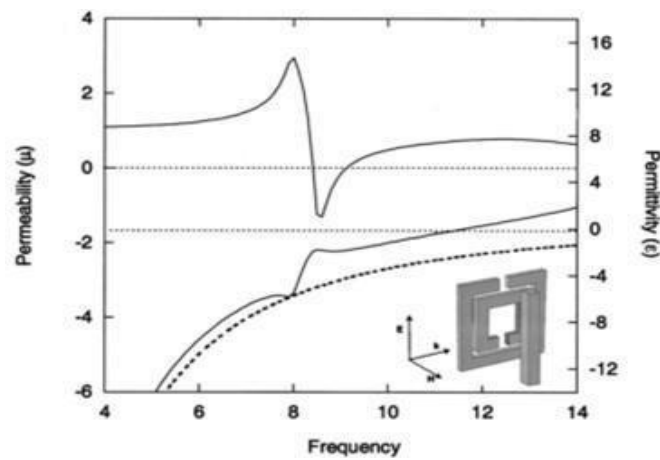


Figure I.10 Exemple de la permittivité et de la perméabilité d'un réseau constitué de fils minces et de SRR, on observe l'existence d'une bande de fréquences entre 8.5 et 9 GHz où les deux sont négatives [6].

Pour avoir une bonne adaptation d'impédance avec l'air, les valeurs de ϵ et μ doivent être proches comme le montre l'équation de l'impédance normalisée :

$$Z_n = \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \quad (I.25)$$

I.5.2 Composite right left handed CRLH (composition main droite et gauche)

En 2002, les deux groupes de recherche de C. Caloz, T. Itoh [9] [10] et G. Eleftheriades [11] [12] [13] ont introduit une nouvelle approche basée sur les lignes de transmission. Cette approche permet d'exploiter pleinement les propriétés des métamatériaux dans le domaine des micro-ondes. Cette approche a pris ses origines dans la théorie des lignes de transmission. En effet, une ligne de propagation classique en mode TEM peut être modélisée par un réseau de cellules unitaires identiques mises en cascade. La longueur de la cellule unitaire (tronçon de ligne) est choisie petite devant la longueur d'onde. Dans le cas idéal, cette cellule est composée d'une inductance en série L_R et d'une capacité en parallèle C_R . Dans le cas réel, on ajoute un élément R lié aux pertes métalliques et un élément G lié aux pertes diélectriques Figure (I.11).

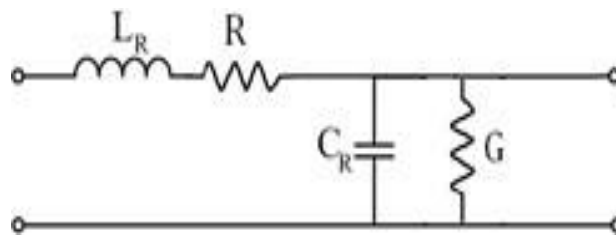


Figure I.11 : Modèle de tronçon de ligne classique (main droite) avec pertes.

La constante de propagation dans la ligne s'écrit :

$$\gamma = \alpha + j\beta = \pm\sqrt{ZY} \quad (\text{I.26})$$

Avec Z l'impédance des éléments série et Y l'admittance des éléments parallèles. Dans le cas idéal on a :

$$\beta = \omega\sqrt{L_R C_R} \quad (\text{I.27})$$

La tension $V(z)$ et le courant $I(z)$ dans la ligne sont liés par les équations des télégraphistes :

$$\frac{\partial V(z)}{\partial z} = -I(z)Z \quad \text{et} \quad \frac{\partial I(z)}{\partial z} = -V(z)Y \quad (\text{I.28})$$

Les équations de Maxwell pour une propagation selon z peuvent s'écrire :

$$\frac{\partial E(z)}{\partial z} = j\omega\mu H \quad \text{et} \quad \frac{\partial H(z)}{\partial z} = j\omega\varepsilon E \quad (\text{I.29})$$

Il est possible d'identifier les équations des télégraphistes (I.27) aux équations de Maxwell (I.29) en faisant correspondre la tension au champ électrique et le courant au champ magnétique, la permittivité et la perméabilité peuvent s'écrire alors :

$$\varepsilon = \frac{Y}{j\omega} \quad \text{et} \quad \mu = \frac{Z}{j\omega} \quad (\text{I.30})$$

La permutation dans le modèle électrique de la capacité et de l'inductance permet d'avoir une permittivité et une perméabilité toutes deux négatives, c'est la topologie duale de la ligne de transmission classique qu'on appellera ligne de transmission main gauche (LH-TL) Figure (I.12).

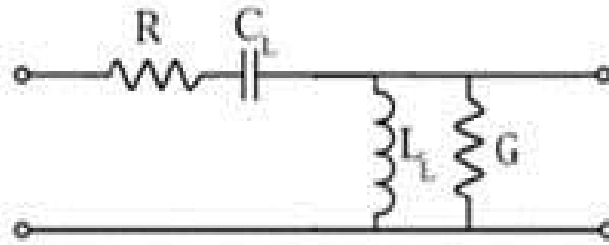


Figure I.12 : Modèles de tronçons de ligne duale (main gauche) avec pertes. LL CL.

$$\beta = -\frac{1}{\omega\sqrt{L_L C_L}} \quad (\text{I.31})$$

Le diagramme de dispersion de la ligne main droite est sous forme d'une droite compte tenu de la relation de dispersion (I.26), les vitesses de phase et de groupe définies par les équations (I.12) et (I.13) sont de même signe positif. Pour la ligne main gauche le diagramme est dispersif et β prend des valeurs négatives compte tenu de la relation de dispersion (I.31), dans ce cas les vitesses de phase et de groupe sont opposées. Le signe négatif de β permet d'avoir une vitesse de groupe toujours positif (la pente des courbes est toujours positive) ce qui correspond à un cas physique où l'énergie se propage dans une direction positive Figure (I.13).

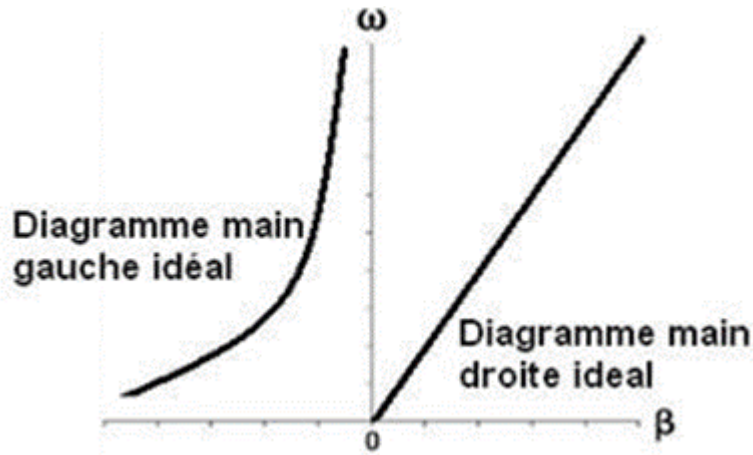


Figure I.13 : Diagrammes de dispersion correspondant aux deux cas idéaux de lignes main gauche et de ligne main droite.

Dans la pratique, il est difficile d'avoir une ligne purement main gauche, car les éléments main gauche ont besoin d'interconnexions pour les relier ce qui fait intervenir automatiquement des tronçons de ligne classique et donc des éléments main droite. On parle alors dans le cas pratique d'une ligne composite main droite / main gauche ou ligne CRLH Figure (I.14.a). La Figure (I.14.b) représente le modèle CRLH après intégration des pertes.

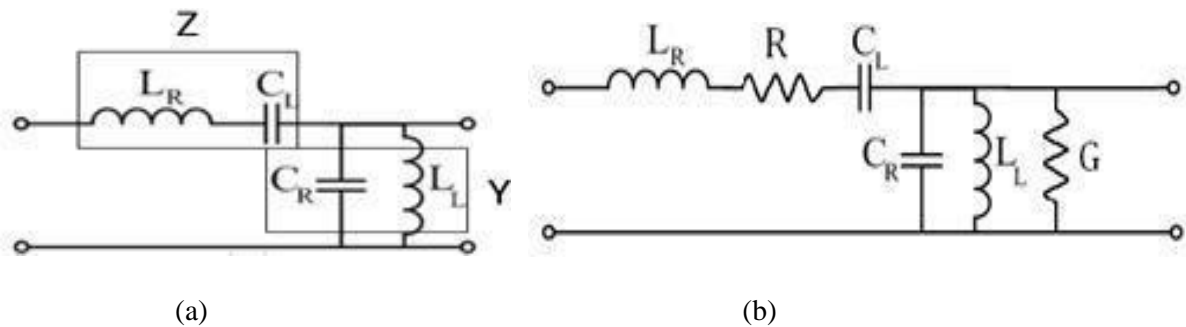


Figure I.14 : Modèles de tronçons de ligne CRLH : (a) sans pertes. (b) avec pertes.

Dans le cas du modèle CRLH sans pertes, on a :

$$\beta = \pm \sqrt{\omega^2 L_R C_L + \frac{1}{\omega^2 L_L C_L} - \left(\frac{L_R}{L_L} + \frac{C_R}{C_L}\right)} \quad (\text{I.32})$$

La valeur de β tend vers un comportement purement main gauche en basses fréquences et vers un comportement purement main droite vers les hautes fréquences. Une bande interdite peut exister entre les deux bandes de transmission main droite et main gauche Figure (I.15).

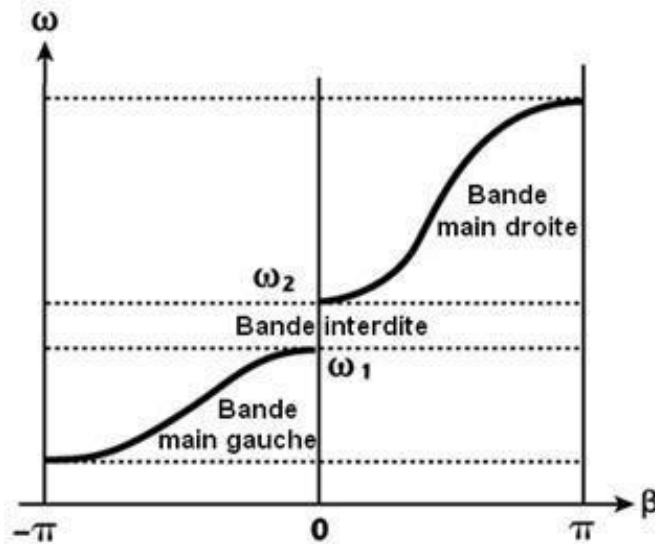


Figure I.15 : Diagramme de dispersion correspondant à une ligne CRLH, si $\omega_1 \neq \omega_2$ nous avons un cas non équilibré (présence d'une bande interdite), si $\omega_1 = \omega_2$ nous avons un cas équilibré.

Les deux fréquences qui délimitent la bande interdite sont données par :

$$\omega_1 = \min\left(\frac{1}{\sqrt{L_R C_L}}, \frac{1}{\sqrt{L_L C_R}}\right) \quad \text{et} \quad \omega_2 = \max\left(\frac{1}{\sqrt{L_R C_L}}, \frac{1}{\sqrt{L_L C_R}}\right) \quad (\text{I.33})$$

Cette bande interdite peut ne pas exister, la transmission est alors continue entre la bande main gauche et la bande main droite. Ce cas est appelé cas équilibré, il est produit lorsque $\omega_1 = \omega_2$, c'est à dire lorsque les deux résonances du circuit sont égales :

$$\sqrt{L_R C_L} = \sqrt{L_L C_R} \quad (\text{I.34})$$

I.6 APPLICATION DES METAMATERIAUX

Si les métamatériaux jouissent d'un intérêt croissant ces dernières années, c'est pour les retombées technologiques énormes qu'ils laissent entrevoir, via notamment :

- Les techniques de camouflage
- La miniaturisation
- La sélectivité
- Les super lentilles

Ces techniques peuvent servir tant dans le domaine militaire que médical, aérospatial, ou simplement dans les télécommunications. Bien qu'il en existe d'autres, nous détaillerons ici ces quelques applications importantes des métamatériaux, à l'aide d'exemples tirés de la littérature,

I.6.1 LE CAMOUFLAGE (CLOAKING)

Un métamatériau est une structure périodique composite sub-longueur d'onde permettant d'avoir des propriétés que l'on ne trouve pas dans la nature en ayant un contrôle sur la propagation des ondes dans ce milieu. Récemment, une nouvelle manière de contrôler la propagation d'une onde électromagnétique a vu le jour et porte le nom d'optique transformationnelle. Son formalisme est décrit dans l'article de référence de Pendry en 2006, où il explique comment, par une déformation progressive de l'espace, certaines zones peuvent être rendues invisibles pour une onde incidente. [14]. Cette méthode revient à « tordre » les ondes électromagnétiques, à la manière d'un mirage, au point de rendre une zone de l'espace non irradiée par cette onde, et donc invisible (et aveugle) (figure I.16.1). Changer les propriétés physiques d'un milieu afin de modifier l'espace lui-même avait déjà été abordé par André Nicolet dans un article de 1994, sans grande répercussion cependant [15]. Cette possibilité a également été discutée par Andrew Ward et John Pendry en 1996 via un article commun [16]. Discussion qui a entraîné cette fois-ci une étude théorique plus approfondie, l'article de Pendry *et al.* en 2006 et sa vérification expérimentale la même année en sont la concrétisation [14]- [17]. John Pendry lui-même résume ces recherches sur le camouflage dans un article de 2009, riche en références [18]

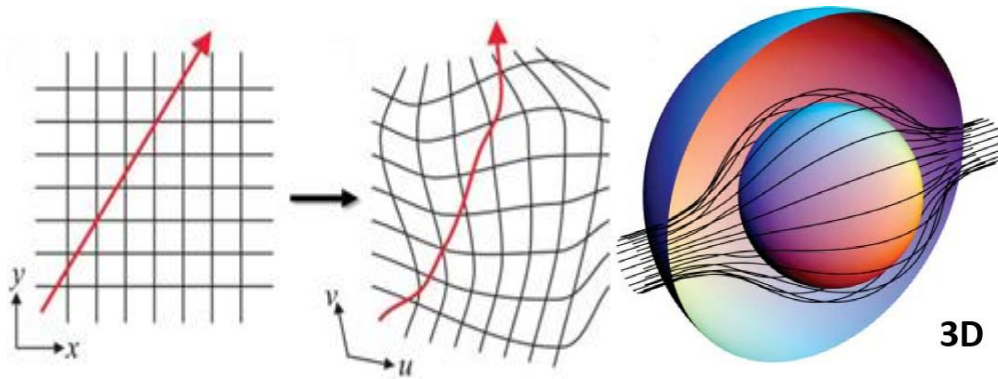


Figure I.16 : Schématisation du phénomène de camoufrage. A gauche le principe de l'optique transformationnelle, A droite la représentation 3D de ce que serait un gradient d'indice artificiel capable de déformer les ondes électromagnétiques [14].

Il y a en réalité deux aspects dans le domaine du camoufrage : la cape d'invisibilité (trois dimensions) et le tapis d'invisibilité, ou carpet cloak (deux dimensions). A l'heure actuelle, aucun dispositif à trois dimensions n'a été réalisé pour le camoufrage, seule la technique du tapis d'invisibilité existe. C'est en novembre 2006 que David R. Smith de l'université de Duke montre pour la première fois la faisabilité de ce dispositif dans le domaine des micro-ondes [17], comme on le voit sur la figure I.17 Grâce à ce dispositif, une onde plane incidente ne voit pas son front d'onde modifié par la présence d'un objet au centre du tapis, comme cela devrait se passer normalement. Par une variation graduelle de l'indice de réfraction, l'onde se déforme puis se reforme progressivement, quasiment à l'identique en sortie de dispositif.

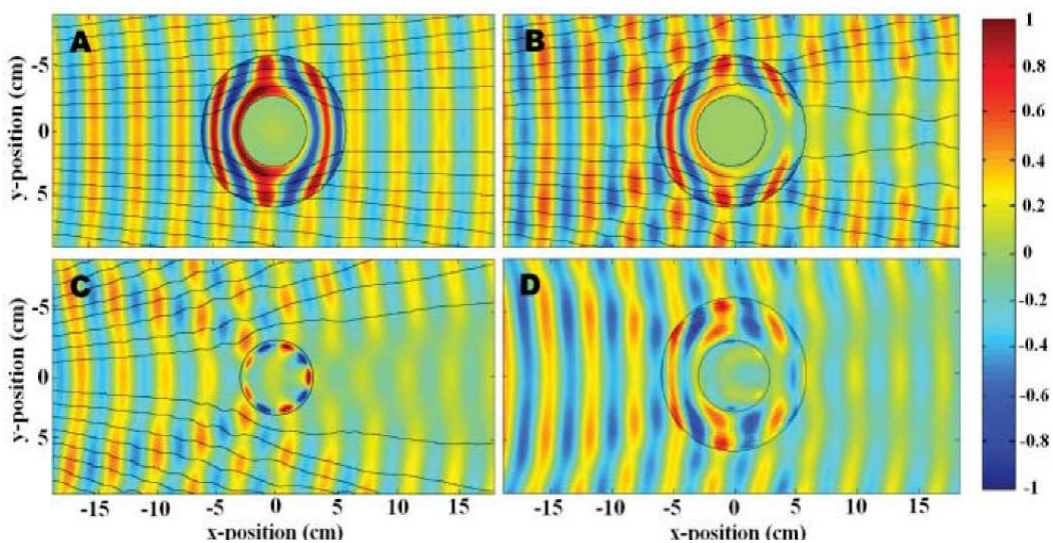


Figure I.17 : Vérification expérimentale par Smith et al. en 2006 de la cape d'invisibilité 2D.

(A), la simulation de la cape avec des paramètres idéaux. (B), la simulation avec les paramètres réels du matériau. (C), sans la cape. (D), les mesures [17].

I.6.2 LA MINIATURISATION

Les métamatériaux permettent une miniaturisation de la plupart des dispositifs classiques tels que les antennes, les guides d'ondes, les absorbants, les capteurs, etc. nous présenterons ici deux exemples d'applications. La figure I.18 montre une antenne patch améliorée posée sur une couche de métamatériau, à la perméabilité très supérieure à 1 résonante. Les auteurs montrent que les dimensions de cette antenne sont réduites d'un facteur 3 à 6 par rapport à une antenne classique sans métamatériau [19]. A l'heure actuelle les antennes se font de plus en plus petites, jusqu'à atteindre des dimensions nanométriques. Suite au succès des ADM, on voit apparaître des dispositifs de nano-antennes « tout- diélectrique », qui rencontrent un intérêt croissant également [20].

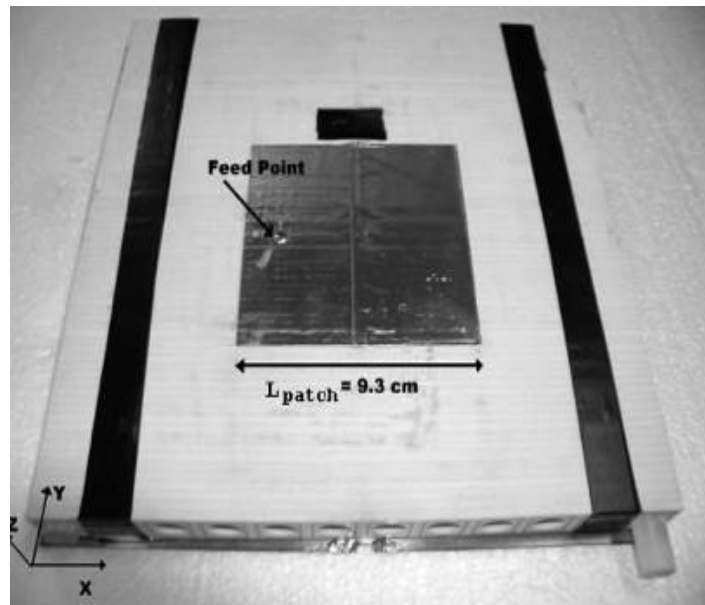


Figure I.18 : Photo d'une antenne patch miniaturisée grâce à une couche de métamatériau à la perméabilité améliorée. Le facteur de miniaturisation pour ce type d'antenne est de l'ordre de 3 à 6 selon la fréquence de travail (Buell et al., 2014 [19])

Second exemple de miniaturisation : les absorbants. On voit sur la figure I.19 un cas d'absorbant en métamatériaux, fonctionnant aux infrarouges. L'épaisseur de l'absorbant en question est de l'ordre de 100 nm, soit 15 fois plus petit que la longueur d'onde du pic d'absorption, avec une efficacité d'absorption de l'ordre de 88% [21]. L'utilisation de métamatériaux permet dans ce cas précis de réduire considérablement les dimensions de l'absorbant tout en conservant une efficacité de fonctionnement élevée. Il a été montré que le fait d'avoir un métamatériau à la perméabilité résonante permet

d'amplifier cette dernière ($\mu_r \int 1$) et ainsi de diminuer considérablement l'épaisseur d'un absorbant [22].

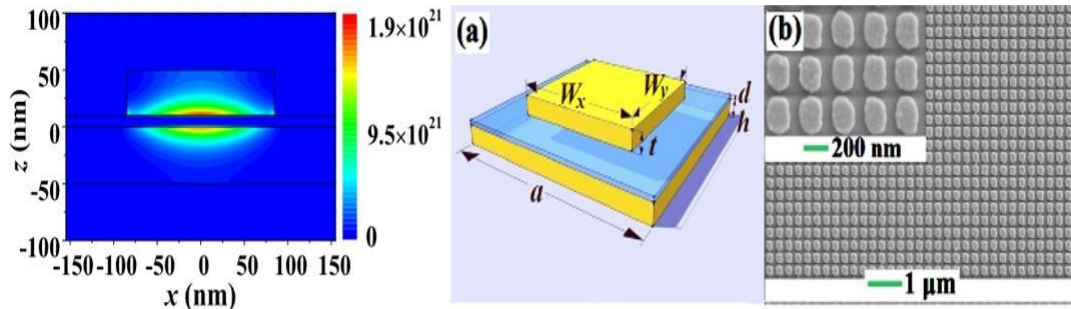


Figure I.19 : Exemple d'une couche d'absorbant par Hao et al. à base de métamatériau métallique, fonctionnant dans l'infrarouge [21].

I.6.3 LA SELECTIVITE

De par leurs dimensions sub-longueur d'onde, les métamatériaux ont aussi un intérêt dans la fabrication de capteurs performants. Cette potentialité fut soulignée dès 1999 par Pendry [2]. Un exemple de cette sensibilité est illustré par les structures métalliques de Liu *et al.* en 2009 [23]. La rupture de symétrie dans les « atomes » de ce métamatériau permet l'apparition de modes de résonances supplémentaires, plus fins, donc plus précis. C'est grâce à la diminution de cette largeur en fréquence, visible à droite sur la figure I.19, que l'on parle de meilleure sensibilité des métamatériaux, et donc, par extension, d'une meilleure sélectivité que les matériaux classiques, puisqu'ils distingueront deux fréquences là où d'autres n'en distingueront qu'une seule.

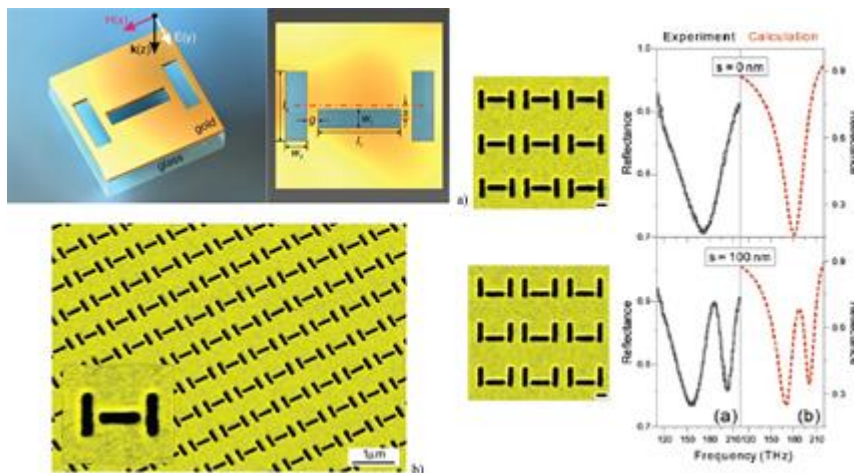


Figure I.20 : Exemple d'un métamatériau plan ayant une grande sensibilité en fréquence au THz

I.6.4 LES SUPER LENTILLES

L'application la plus directe du phénomène de réfraction négative sont les lentilles dites « super lentille », parfois désignées par le terme lentilles parfaite. En effet, ces dispositifs permettent de dépasser la limite de résolution spatiale d'un système de mesure en descendant en-dessous de la limite de diffraction. Les super lentilles utilisent les propriétés des métamatériaux à indice de réfraction négatif qui grâce à leur permittivité diélectrique et leur perméabilité magnétique négatives vont réfracter la lumière dans la direction opposée de la réfraction classiques [24].

Les lentilles classiques focalisent les ondes lumineuses se propagent dans leur milieu, mais les métamatériaux permettent de focaliser non pas les ondes propagées mais les ondes évanescentes qui voient leur intensité décroître exponentiellement avec la distance figure (I.28). C'est grâce à ces ondes que des détails plus fins que la longueur d'onde peut être observée [25]. C'est John Pendry qui a montré en 2000 la faisabilité d'un tel dispositif [26], principe mis en application quatre ans plus tard conjointement avec Smith [27]. Le principe de fonctionnement de ces lentilles est schématisé sur la figure I.21. Par commodité nous utilisons les règles de l'optique géométrique (conditions LHI, milieu non-dispersif) pour appliquer la relation de Snell-Descartes :

$$n_1 \sin(\diamond_1) = n_2 \sin(\diamond_2) \quad (\text{I.35})$$

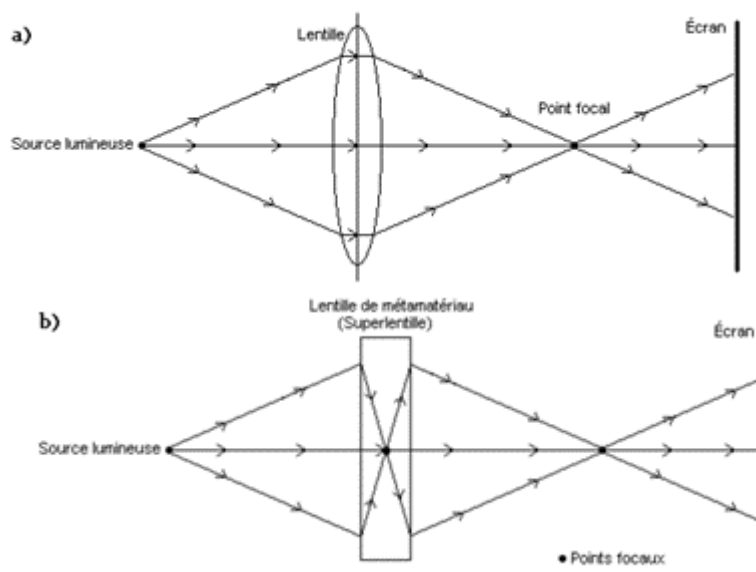


Figure I.21 : Focalisation avec une lentille ordinaire (a) et une super lentille (b).

I.7 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons exposé la théorie des métamatériaux, en partant des formules de Maxwell. Nous avons pu établir théoriquement la physique de la propagation des ondes dans un milieu doublement négatif tout en retraçant quelques propriétés qui en résultent.

Nous avons décrit par la suite les deux approches qui permettent de synthétiser les métamatériaux. La première approche est basée sur les réseaux de fils et les résonateurs magnétiques, cela permet de concevoir des milieux doublement négatifs en agencant un milieu à permittivité négative en utilisant la théorie des plasmas avec un milieu à perméabilité négative en exploitant la base du magnétisme artificiel. Le second abord est établi sur la théorie des lignes de transmission, elle assimile une cellule unitaire d'un réseau de métamatériaux à un fragment de ligne de transmission. Cette dernière approche a permis une avancée importante de l'ingénierie des métamatériaux pour la conception de circuit planaire. Dans la dernière partie nous avons cité quelques exemples d'application des métamatériaux

CHAPITRE II
LES ABSORBANTS
METAMATERIAUX

II.1 INTRODUCTION

Au début des années 2000, la perspective passionnante des indices négatifs a suscité beaucoup de recherches sur les MTMs. On s'est vite rendu compte que les métamatériaux pouvaient aller au-delà de l'indice négatif, et en fait pourraient être accordés et optimisés pour de nombreuses propriétés électromagnétiques souhaitées dans un régime de fréquence arbitraire.

L'un des types de métamatériaux les plus répandus est probablement l'absorbant à métamatériau (MMA). Il a été démontré pour la première fois en 2008 dans le régime à micro-ondes où une absorption de 88 % a été atteinte à 11,5 GHz [28]. L'assemblage de base d'un MMA consiste en une structure résonnante sur un plan du sol séparé par une couche diélectrique [29]. Cela a été démontré dans une grande partie du spectre électromagnétique, des micro-ondes aux régimes optiques et a été utilisé dans de nombreuses applications et dispositifs [29].

Dans ce chapitre, nous allons parler de la théorie des absorbants électromagnétiques, les conceptions et les caractérisations des absorbants à métamatériaux.

II.2 ABSORBANTS METAMATERIAUX

La théorie des absorbants parfaits métamatériaux (MPA) a suscité l'intérêt parce qu'elle peut atteindre l'absorptivité unitaire des ondes électromagnétiques à des échelles qui sont beaucoup plus petites que la longueur d'onde. Depuis la première démonstration expérimentale d'MPA en 2008 par N. I. Landy et al. [28], un grand nombre d'efforts [30-36] ont été déployés sur les absorbants métamatériaux pour obtenir une absorption multibande, une absorption à large bande, une absorption insensible à la polarisation, et absorption par grand angle incident. Normalement, les métamatériaux peuvent être réalisés à travers plusieurs types de structures telles que les structures à cristaux photoniques [37-40], les structures à base de lignes de transmission [41-44], les structures à résonance et les matériaux diélectriques complets [45]. MPA appartient à la structure de résonance, donc il fonctionne dans la bande étroite.

Les applications des absorbants ressortent principalement du domaine de la Compatibilité Electromagnétique (CEM) et de la discrétion radar. Ils interviennent ainsi pour réduire les problèmes d'interférences entre les bandes de fréquences des systèmes de télécommunication terrestres et/ou spatiaux.

II.3 LES TYPES D'ABSORBANTS ELECTROMAGNETIQUE

II.3.1 Absorbants Diélectriques

Ce type d'absorbants est basique. Ce sont des mousses, des polymères ou des structures alvéolaires chargées de carbone ou de particules métalliques (fer, aluminium, cuivre)... Ces matériaux sont réalisés pour avoir la plus haute constante de perte diélectrique transforme ainsi en chaleur le maximum de l'onde incidente. L'impédance de ce type de matériau n'est pas fortement adaptée à l'impédance de l'espace libre. Ainsi, ils peuvent présenter une forte réflexion à leur interface. Ces matériaux peuvent être trouvés dans l'industrie. Les recherches récentes sur les absorbants diélectriques se concentrent davantage sur les matériaux polymères conducteurs [46]. Ils ont la particularité d'avoir une faible permittivité relative et une perte diélectrique très forte. La fabrication de ce type de matériau est assez complexe où il est généralement déposé sur le textile pour avoir une certaine résistance.

II.3.2 Absorbants Structuraux

On sait qu'une onde est réfléchi à l'interface du matériau proportionnellement à l'impédance de ce dernier. A partir de cette observation, trois catégories d'absorbants (couches pyramidales, progressivement chargées et couches d'adaptation d'impédance) ont été développées pour améliorer la diffusion de l'onde dans une couche d'absorption diélectrique. Pour une bonne atténuation sur une large bande, ce type de matériau nécessite une grande épaisseur avec un poids important. Nous nous sommes principalement concentrés sur la structure de l'absorbant pyramidal qui est utilisé dans la chambre anéchoïque.

II.3.2.1 Absorbants Pyramidaux

Les absorbants pyramidaux sont généralement des matériaux épais avec des structures régulièrement espacées de forme pyramidale ou conique disposées perpendiculairement à la surface [47]. Les absorbants pyramidaux ont été développés de telle manière que l'interface a une transition progressive de l'impédance de l'air à celle de l'absorbant. La hauteur et la périodicité des pyramides ont tendance à être dans l'ordre de la longueur d'onde. Ces absorbants fournissent de très bonnes performances. L'inconvénient des absorbants pyramidaux est leur épaisseur et leur tendance à être fragiles. Cette catégorie s'applique à la fabrication de chambres anéchoïques.

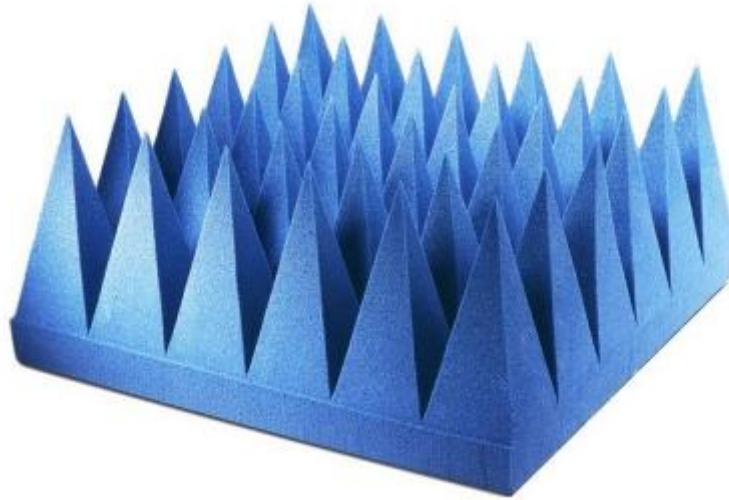


Figure II.1 : illustration de la disposition d'un absorbant pyramidal

II.3.2.2 Absorbants Chargés Progressivement (Taped Loading Absorber)

Ce type de matériau est généralement composé d'une plaque d'un matériau à faible perte associée à une plaque d'un matériau à pertes élevées. L'avantage de ces matériaux est qu'ils sont plus minces que les absorbants pyramidaux, mais moins efficaces [46].

II.3.2.3 Absorbants a Couches D'adaptation D'impédance (Matching Layer Absorber)

L'absorbant de couche d'adaptation d'impédance tente de réduire l'épaisseur requise pour les matériaux chargés progressivement. Ce type d'absorbant fournit une couche de transition d'absorption entre l'onde incidente et les matériaux absorbants. La couche de transition a une valeur d'impédance entre les impédances des deux milieux. L'idée est d'avoir une transition d'impédance entre différents environnements. Cette mise en correspondance se produit lorsque l'épaisseur de la couche d'adaptation est un quart de la longueur d'onde de l'onde incidente voir figure (II.2) et avec :

$$Z_2 = \sqrt{Z_1 Z_3} \quad (\text{II.1})$$

L'adaptation d'impédance se produit alors seulement à la fréquence voulue. Ce type d'absorbant est donc à bande étroite.

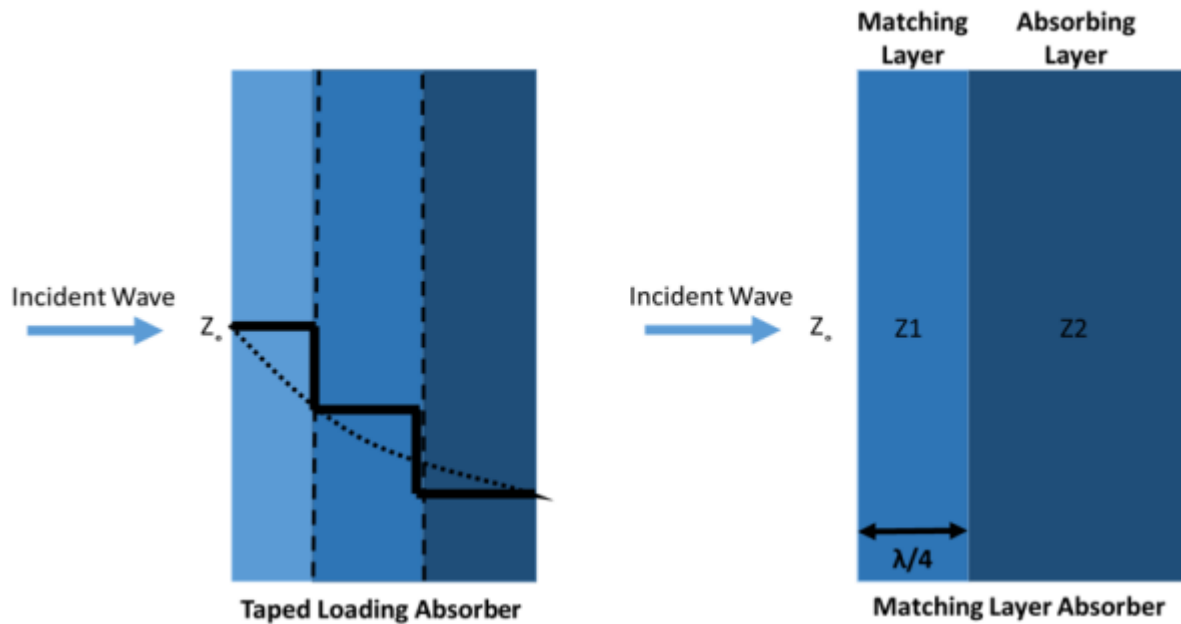


Figure II.9 : Illustration de l'absorbant chargé progressivement et de l'absorbant à couche d'adaptation d'impédance

II.8.3 Absorbants Résonants

Les matériaux absorbants résonants (tuned en anglais) comprennent la couche Dällenbach [48], Salisbury [49] et Jaumann [50]. Dans cette classe de matériaux, l'impédance n'est pas nécessairement adaptée entre le milieu de l'onde incidente et celui qui absorbe. Ces matériaux sont fins et n'absorbent pas toute l'énergie à laquelle ils sont soumis. Ils opèrent par l'interférence destructrice des ondes réfléchies. Le mécanisme utilisé utilise la réflexion et la transmission à la première interface. L'onde réfléchie subit un décalage de phase de 180° . L'onde transmise traverse le milieu absorbant jusqu'au plan métallique qui la reflète.

Cette seconde réflexion subit également un déphasage de 180° dans le milieu absorbant avant la propagation des ondes vers le milieu de l'onde incidente. Si la distance optique parcourue par l'onde transmise est un multiple de demi-longueurs d'onde, les deux ondes réfléchies seront déphasées à l'interface, ce qui provoquera des interférences destructrices. Si l'amplitude de deux ondes réfléchies est égale, l'intensité totale réfléchie est nulle. Pour cela, ce type d'absorbant nécessite une épaisseur considérable essentiellement dans les régions de fréquence inférieure lorsque la longueur d'onde est dimensionnelle

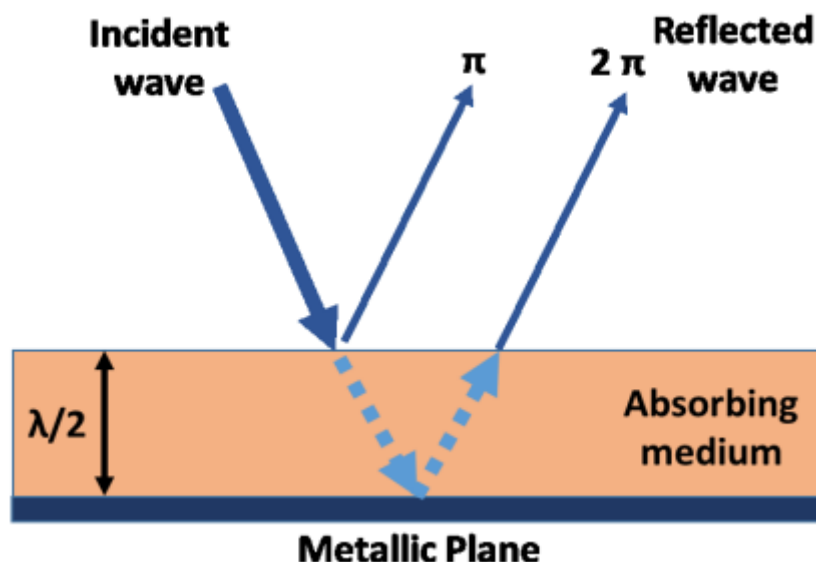


Figure II.3 : Illustration du phénomène d'interférences destructrices.

II.8.4 Absorbants Magnétiques

Les absorbants magnétiques sont basés sur l'utilisation de particules de fer ou de ferrite dans un diélectrique de type polymère, mousse ou structure en nid d'abeille. L'homogénéité de la répartition des particules dans l'absorbant est un facteur à prendre en compte lors de la conception de ce type de matériau. D'autres types de particules peuvent être utilisés mais sont moins courants. Malgré le poids induit par les particules qui composent l'absorbant magnétique, l'avantage principal de ce type d'absorbant est leur faible épaisseur, pouvant atteindre un centième de la longueur d'onde à leur première résonance. Ces matériaux fonctionnent dans une large bande de fréquence allant des MHz aux GHz. La fréquence de fonctionnement dépend exclusivement de la taille des particules qui les constituent.

Les propriétés des particules de fer et de ferrite ont été mesurées et calculées [51 – 52]. Les matériaux précédents présentaient une perméabilité proche de celle de l'espace libre ($\mu_r=1+j0$). Pour ce type de matériau, c'est ce paramètre que l'on va changer afin d'obtenir plus de libertés pour la conception d'absorbant. Si l'on considère l'expression de l'impédance caractéristique Z_c et de l'indice de réfraction n d'un matériau, la perméabilité relative μ_r est aussi importante que la permittivité relative ϵ_r dans la conception d'un absorbant :

$$Z = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} Z_0 \quad (\text{II.2})$$

$$n = \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \quad (\text{II.3})$$

CHAPITRE II LES ABSORBANTS METAMATERIAUX

Les matériaux magnétiques naturels purs (avec $\epsilon_r = 1+j0$) n'existent pas. Par conséquent les matériaux employés pour réaliser des absorbants magnétiques ont également une composante diélectrique à prendre en compte. Les recherches réalisées permettent d'obtenir un large panel de possibilités quant à la perméabilité et la permittivité.

Il est ainsi possible d'utiliser le fait que la perméabilité est importante à basse fréquence puis diminue rapidement avec l'augmentation de la fréquence et que la perméabilité a un fonctionnement linéaire légèrement décroissant en fréquence afin de réaliser des absorbants à large bande ou qui couvrent uniquement certaines bandes.

Des couches de Dällenbach ont été brevetées à base de matériaux magnétiques comportant de la ferrite [53]. Ce procédé permet en empilant deux couches ou plus d'augmenter la bande d'absorption.

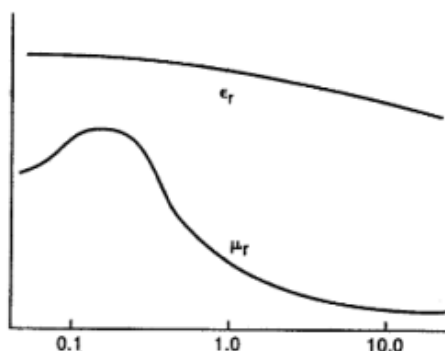


Figure II.4 : Illustration de courbes typiques de progression de la permittivité et de la perméabilité d'un matériau magnétique en fréquence

II.3 THEORIE DES ABSORBANTS METAMATERIAUX

II.3.1 THEORIE D'ABSORPTION

Le coefficient d'absorption d'un métamatériau est déterminé par deux paramètres de base tels qu'ils sont décrits en relation (II.4).

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) \quad (\text{II.4})$$

où $R(\omega)$ et $T(\omega)$ représentent respectivement les coefficients de réflexion et de transmission dépendant de la fréquence.

Afin d'éliminer le coefficient de transmission, la structure MTM doit être conçue de manière à ce que les parties imaginaires de leur permittivité électrique efficace et de leur perméabilité magnétique soient suffisamment grandes. En effet, ce sont les seuls paramètres qui contribuent à la perte de métamatériaux [54]. Deux méthodes sont couramment utilisées pour annuler les pertes de transmission. La première méthode consiste à utiliser une combinaison de couches multiples

dans la conception des métamatériaux afin de bloquer la transmission des ondes EM. La seconde méthode utilise un plan de sol métallique avec une épaisseur beaucoup plus grande que sa profondeur de peau dans la fréquence de travail afin de refléter l'onde transmise [55-56]. Une fois que les pertes de transmission sont éliminées, le taux de réflexion est la menace restante empêchant l'atteinte d'une absorption parfaite. La vitesse de réflexion d'une structure MTM peut être minimisée en contrôlant ses paramètres géométriques qui conduisent à la modification des propriétés de la structure (permittivité électrique effective et perméabilité magnétique) et régulent également l'impédance de la structure. À la fréquence de résonance, l'impédance de la structure MTM correspond à l'impédance d'espace libre qui se produit à taux d'absorption élevé et taux de réflexion très minimum (absorption parfaite est acquise en ce moment).

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (\text{II.5})$$

Où, Z , μ et ε représente l'impédance de la cellule MTM, la permittivité et la permittivité de la substance, respectivement, et $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$, $\mu = \mu_0 \mu_r$

II.3.2 CONCEPTION D'ABSORBANTS METAMATERIAUX

La plupart des modèles d'absorbants MTM sont composés de couches métalliques (résonateurs électriques conducteurs) et d'un substrat diélectrique incorporé. La couche métallique/résonateurs électriques conducteurs sont responsables de la résonance électrique par l'excitation du champ électrique, alors que les substrats diélectriques sont responsables de la réponse magnétique qui découle de l'excitation du courant antiparallèle sur le côté du substrat diélectrique. Un autre facteur important à prendre en considération, qui a un impact important sur les caractéristiques d'absorption de l'absorbant MTM est sa réponse aux ondes EM polarisées et sa capacité à absorber les radiations qui frappent la surface du résonateur à différents angles [57-58].

Actuellement, les structures MTM à bandes étroites, doubles et multiples avec un excellent taux d'absorption d'environ une unité (absorption parfaite) ont été réalisées numériquement et expérimentalement dans différentes bandes de fréquences du spectre des ondes électromagnétiques. Le mot parfait dans la recherche sur les absorbants de métamatériaux généralement utilisés pour tous les modèles de métamatériaux qui offrent un coefficient d'absorption supérieur à 99 %. La première AMP a été proposée par Landy et al. [28] en 2008. Ils ont conçu une seule AMP à bande étroite pour fonctionner à une fréquence allant de 9 GHz à 14 GHz et ils ont réussi à atteindre une bande étroite avec un taux d'absorption de 99 % à la fréquence

de résonance de 11,65 GHz qui a résulté du fort couplage des résonances électriques et magnétiques.

Les travaux de Landy et al. ont servi de plate-forme pour plusieurs documents de recherche qui ont suivi dans le domaine des AMP, où actuellement, beaucoup de travaux de recherche sur les AMP ont été menés dans presque toute la bande spectrale des ondes électromagnétiques.

II.4 ABSORBANTS METAMATERIAUX A BANDE ETROITE

Le premier absorbant à métamatériau a fait l'objet d'une étude théorique en 2006. De résonateurs à anneau fendu (SRR), soutenu par une plaque résistive [60]. L'onde incidente est parallèle au plan du SRR, le champ magnétique étant perpendiculaire au réseau SRR. Un tel réseau SRR est placé sur une plaque résistive ayant une résistance de 377Ω pour une adaptation d'impédance avec l'espace libre, similaire à un écran de Salisbury. La réflexion et la transmission sont toutes deux inférieures à -20 dB au voisinage de 2 GHz, comme on l'a trouvé numériquement.

Ceci est dû aux fortes résonances de cette structure, où une absorption presque parfaite a été obtenue à cette fréquence. Cependant, en raison de la disposition du réseau SRR, ce qui augmente également sa complexité de fabrication. Avec les structures planes, la bande passante d'absorption est également très limitée. Néanmoins, la conception de ce métamatériau d'absorption motive la poursuite des recherches sur ce type d'absorbants.

En 2008, Landy et al. [59] ont proposé une structure plane en sandwich composée de résonateurs électriques en anneau et de fils coupés séparés par un substrat FR-4, comme le montre la figure (II.5).

Il s'agit du premier absorbant à métamatériau rapporté avec une structure plane et sub-longueur d'onde. L'absorption observée est aussi élevée 96 % à 11,65 GHz en simulation et 88 % à 11,5 GHz en expérimentation.

La largeur de bande relative de la demi-largeur maximale (FWHM) est d'environ 4 %. Les résonateurs électriques annulaires avant se couplent fortement au champ électrique incident et contribuent à la réponse électrique, tandis que le flux circulant des courants de surface antiparallèles aux couches métalliques avant et arrière contribue à la réponse magnétique. L'intensité et la fréquence d'absorption peuvent être contrôlées en ajustant les paramètres géométriques des résonateurs électriques en anneau ou l'épaisseur du substrat. Inspirés par ce travail de pionnier, de nombreux efforts ont été consacrés à la réalisation d'absorbants à métamatériaux dans différents domaines spectraux [62 - 72].

Les absorbants à métamatériaux initiaux sont sensibles à la polarisation en raison des cellules unitaires anisotropes [59] [73]. Des absorbants à métamatériaux planaires avec des structures

CHAPITRE II LES ABSORBANTS METAMATERIAUX

hautement symétriques ont été développés plus tard, tels que les réseaux de patches annulaires et circulaires [74]. En 2009, nous avons développé un absorbant à métamatériau composé de cellules unitaires dendritiques [61].

Comme le montre la Figure (II.6.a) et la figure (II.6.b) montre que la simulation et l'expérience sont conformes l'une à l'autre montrent l'absorption de plus de 95% à la fréquence de 10,26 GHz. Un tel un absorbant à métamatériau a une excellence d'isotropie planaire, qui montre une absorption égale pour une onde incidente avec des polarisations arbitraires, lorsque l'on réduit la taille de l'absorbant à métamatériau à l'échelle nanométrique, il est capable d'atteindre une absorption parfaite dans le régime optique, ce qui a également été confirmé par une simulation numérique [61].

Les métamatériaux, y compris les absorbants à métamatériaux, sont généralement constitués par des cellules unitaires disposées périodiquement. Les imperfections de fabrication vont affecter, dans une certaine mesure. Ceci est particulièrement significatif dans un régime optique où les cellules unitaires des métamatériaux sont à l'échelle nanométrique. Pour étudier cet effet, l'impact du désordre dans l'arrangement des cellules unitaires du métamatériau a été évalué. Une cellule unitaire dans l'absorbant à métamatériau a été étudiée [75].

Il a été constaté que l'absorption diminue et la fréquence d'absorption se décale vers le rouge lorsque les cellules unitaires deviennent plus désordonnées. Cependant, l'absorbant à métamatériau avec des cellules unitaires aléatoires présentes encore plus de 95% d'absorption pour un niveau raisonnable de désordre.

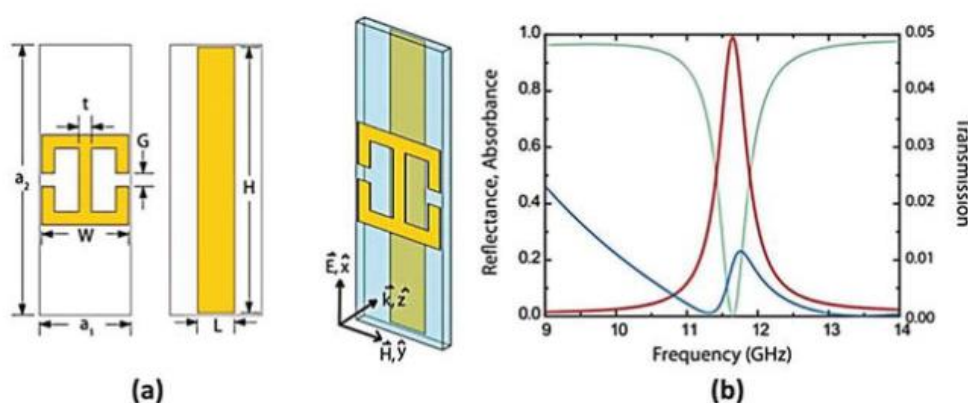


Figure II.5 : (a) Cellule unitaire du premier absorbant à métamatériau planaire, (b) réflexion, transmission et absorbance simulées à la fréquence micro-ondes [59]

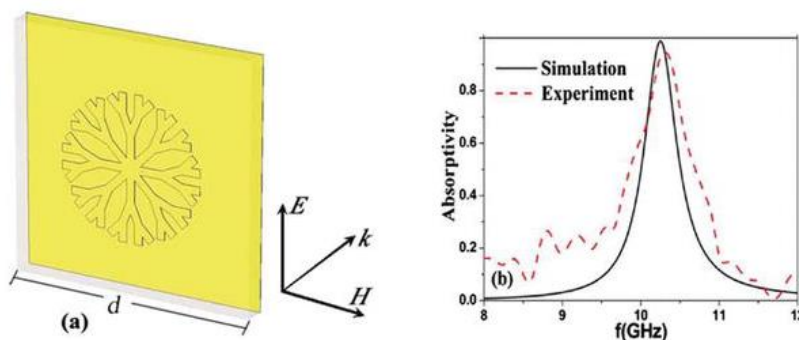


Figure II.6 : (a) Cellule unitaire d'un absorbant à métamatériau dendritique et (b) spectres d'absorption simulés et mesurés [61].

II.5 ABSORBANTS A METAMATERIAUX A LARGE BANDE

Diverses techniques ont été développées pour étendre la bande passante des absorbant à métamatériaux. Les principales techniques d'amélioration de la bande passante comprennent l'utilisation de structures empilées multicouches [71] [72], un adjacent coplanaire de plusieurs cellules résonantes [76] [77], ainsi que l'ajout d'éléments localisés [78]. Des diélectriques ou semi-conducteurs à forte perte ont également été largement utilisés pour concevoir des absorbant à métamatériaux à large bande [79] [80]. Dans cette section, quelques approches typiques pour la conception d'absorbant à bande passante améliorée sont présentées.

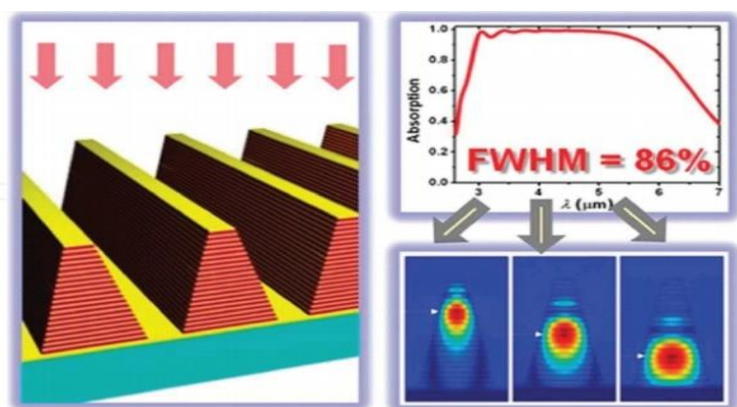


Figure II.7 : Vue schématique de l'absorbant à métamatériau en dents de scie et de son spectre d'absorption [71].

L'une des approches les plus efficaces pour concevoir un absorbant à métamatériau à large bande consiste à empiler des patches résonants de différentes tailles.

Cui et coll. ont proposé un absorbant à métamatériau anisotrope multicouche en dents de scie à des longueurs d'onde infrarouges [71], comme le montre la figure (II.7). Bien qu'un tel absorbant à métamatériau soit constitué de 21 couches de patches métalliques, son épaisseur totale est encore raisonnablement mince par rapport à la longueur d'onde de fonctionnement. En particulier, ils ont démontré que la largeur d'absorption totale relative à la moitié du maximum pouvait être atteinte

CHAPITRE II LES ABSORBANTS METAMATERIAUX

à un chiffre aussi élevé que 86%. La largeur de bande ultra-large dans un tel absorbant à métamatériau en couches est réalisée par le chevauchement de multiples résonances selon les patches métalliques à différentes couches. Les ondes électromagnétiques de fréquences plus élevées sont absorbées dans les parties supérieures, tandis que celles de fréquences inférieures sont piégées dans les parties inférieures

Une perte intrinsèque élevée dans les diélectriques ou les semi-conducteurs peut également être utilisée pour concevoir une absorption à large bande dans des structures simples [79] [80]. Par exemple, l'eau est un diélectrique à forte perte aux fréquences micro-ondes, dont la permittivité pourrait être bien décrite par la formule de Debye [81]. La figure (II.8) montre l'absorbant à métamatériau constitué d'une couche d'eau (avec des trous périodiques) placée dans un récipient en résin, qui est soutenu par un plan de masse métallique au fond. Avec une telle structure, Xie et al. [82] ont démontré expérimentalement une absorption ultra-large bande avec une absorption supérieure à 90% dans toute la bande de fréquences de 12 à 29,6 GHz. Pour déterminer si l'absorption à large bande dans un tel absorbant à métamatériau d'eau est principalement due à la perte intrinsèque élevée d'eau, ils ont également comparé les spectres d'absorption pour le cas où la couche d'eau pleine sans trous et le cas où le récipient en résin est vide de l'eau.

Comme le montre la figure (II.8.d), ils ont constaté que l'absorption d'une couche d'eau complète n'est que d'environ 35 à 40%, tandis que l'absorbant à métamatériaux diminue pour être seulement d'environ 20 à 40% lorsque l'eau est vidée. Ces résultats confirment que l'absorption ultra-large bande contribue principalement aux résonances localisées dans les résonateurs à eau structurés.

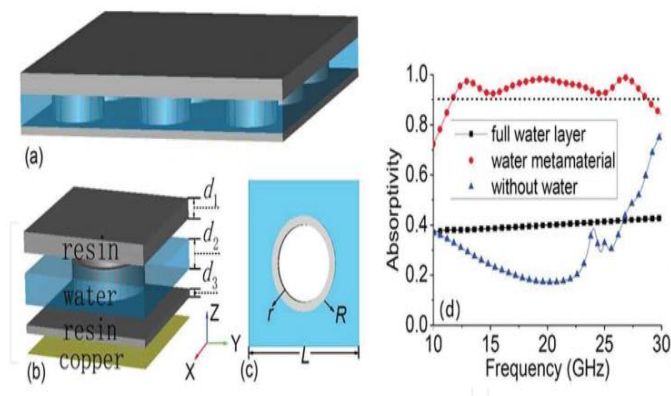


Figure II.8 : (a) Vue schématique de l'absorbant à métamatériau d'eau, (b) vue couche par couche de la cellule unitaire, et (c) vue en plan de coupe de la couche d'eau. (d) Spectres d'absorption de l'absorbant à métamatériau d'eau, de la couche d'eau complète soutenue par une masse métallique et du métamatériau sans eau [82].

Le silicium fortement dopé a une résistivité relativement faible et se comporte comme un diélectrique à perte aux fréquences térahertz, qui a été utilisé pour obtenir une absorption à large bande [79]. En utilisant un substrat de silicium à motif avec perte, Yin et al. [83] ont également démontré expérimentalement un absorbant à métamatériau avec une bande de fonctionnement de 0,9 à 2,5 THz. Un absorbant à métamatériau à base de silicium, comme le montre la figure (II.6.a), a été proposé pour une absorption élevée à large bande aux longueurs d'onde visibles [84]. Un tel absorbant à métamatériau comporte trois couches fonctionnelles: une couche de silicium de sous-longueur d'onde avec des trous coniques tronqués périodiquement, un espaceur de dioxyde de silicium de sous-longueur d'onde et un substrat en or épais. Comme le montrent les résultats numériques de la figure (II.9.c), l'absorbant à métamatériau en silicium avec des trous coniques tronqués à une capacité d'absorption plus élevée et une bande passante plus large dans la bande de fréquences d'intérêt

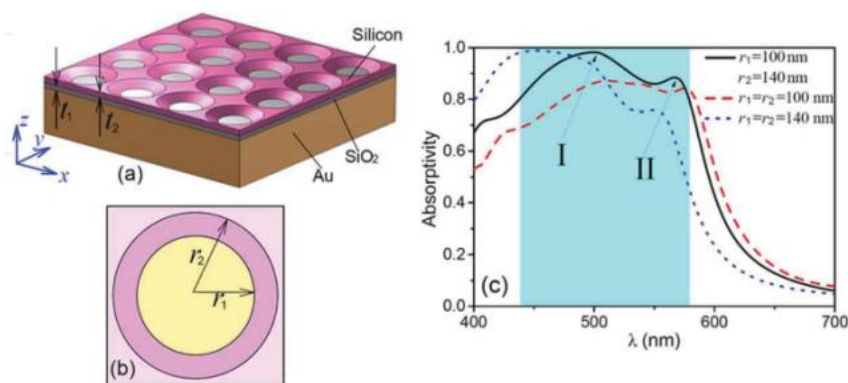


Figure II.9 : (a) Vue schématique de l'absorbant à métamatériau à base de silicium et (b) sa cellule unitaire. (c) Spectres d'absorption de métamatériaux à base de silicium avec des trous coniques et circulaires [84].

II.6 ABSORBANTS A METAMATERIAUX ACCORDABLES EN FREQUENCE

Bien que les métamatériaux puissent être conçus pour avoir des propriétés électromagnétiques arbitraires, ces propriétés sont généralement fixées après la conception des métamatériaux [85 - 88]. Ceci est également vrai pour les absorbants à base de métamatériaux, dont les fréquences de fonctionnement sont très fixes, limitant leurs applications pratiques. Par conséquent, des absorbants à métamatériaux avec des caractéristiques accordables en fréquence sont hautement souhaitables, ce qui permet des applications plus fructueuses. Pour permettre l'accordabilité dans un absorbant à métamatériau, on peut intégrer un milieu avec des propriétés de matériau réglables dans un absorbant à métamatériau passif traditionnel. Certaines des méthodes éprouvées

CHAPITRE II LES ABSORBANTS METAMATERIAUX

comprennent l'utilisation d'éléments, tels que des diodes varicap [89], ferroélectriques [90], ferrites [91], graphène [92 - 93], cristaux liquides anisotropes [94] et matériaux à transition de phase [95]. Le déplacement mécanique a également été étudié pour les absorbants à métamatériaux accordables [94-98]. Zhang et coll. [96] ont présenté expérimentalement un absorbant à métamatériau étirable mécaniquement, qui est composé de résonateurs diélectriques sur une couche mince de caoutchouc conducteur, comme le montre la figure (II.7). Une absorption de près de 100% a été trouvée, ainsi qu'une forte distribution du champ électrique localisé dû à la résonance de type Mie des résonateurs diélectriques. Lors de l'étirement de l'absorbant à métamatériau sous une contrainte uni-axiale, l'espace entre les substrats diélectriques augmente progressivement, et donc la fréquence de résonance subit un décalage vers l'infrarouge de 410 MHz dans la bande X Figure (II.10). Zhu et coll. [108] ont démontré expérimentalement que la fréquence de résonance d'un absorbant à métamatériau peut être déplacée par des moyens mécaniques.

Le décalage a été réalisé en ajoutant une couche diélectrique auxiliaire parallèle à l'absorbant à métamatériau et en faisant varier l'espace entre le métamatériau et la couche. Ils ont également démontré la possibilité de créer plusieurs bandes d'absorption en ajustant intelligemment la taille et la forme de la dalle diélectrique.

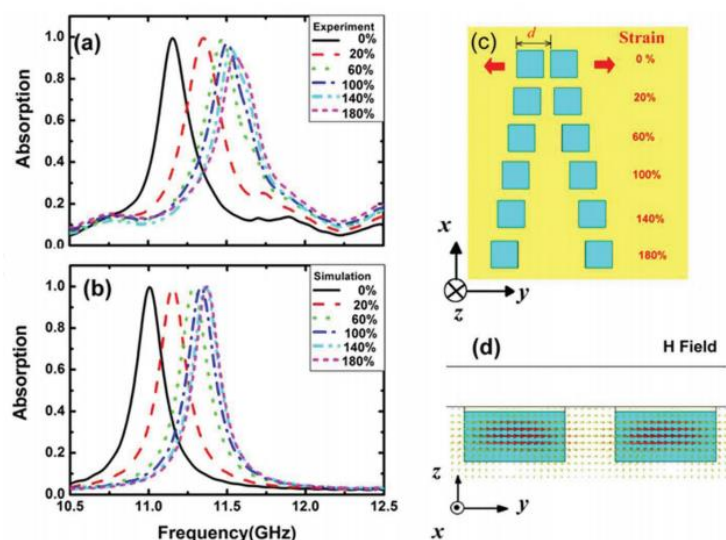


Figure II.10 : (a) Spectres d'absorption expérimentaux et (b) simulés du métamatériau diélectrique étirable mécaniquement. Mécaniquement étirable. (c) Schéma de l'étirement des résonateurs diélectriques sur une fine couche de caoutchouc conducteur. (d) Distribution du champ magnétique à la fréquence de résonance [96].

CHAPITRE II LES ABSORBANTS METAMATERIAUX

Le graphène a également été utilisé pour concevoir des absorbants à métamatériaux accordables en raison de son accordabilité de la conductivité de surface [100 - 101]. Zhang et coll. [99] ont combiné l'absorbant à métamatériau ayant des cellules unitaires métalliques en forme de croix avec des fils de graphène, comme le montrent les figures (II.11.a) et (II.11.b). Une telle structure a été réalisée pour une absorption insensible à la polarisation et le spectre d'absorption pouvait être réglé à des fréquences térahertz.

Comme le montre la figure (II.11.c), ils ont démontré que la fréquence de pic d'absorption peut être réglée dans une plage de fréquences de 15% avec une absorption pic presque uniforme, en contrôlant simplement le niveau de Fermi de graphène. Le niveau de Fermi dans le graphène peut être facilement contrôlé en ajustant la tension de polarisation sur les couches de graphène.

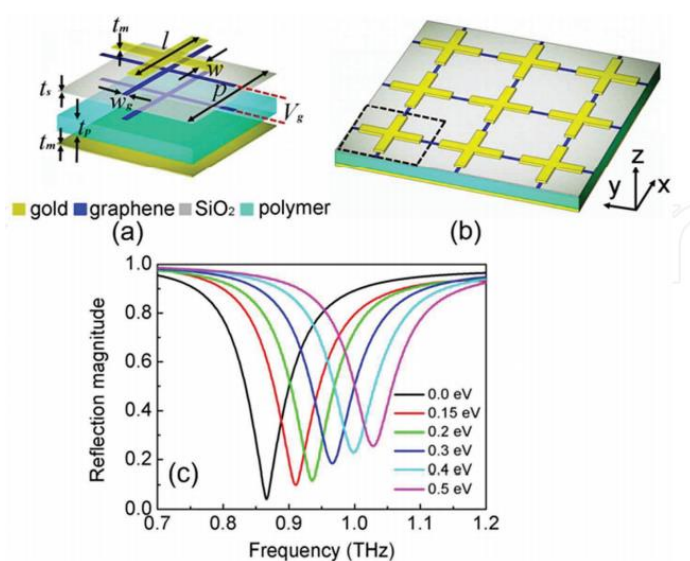


Figure II.11 : (a) Cellule unitaire en forme de croix avec des fils de graphène et (b) vue schématique de l'absorbant à métamatériau. (c) Absorption de l'absorbant à métamatériau sous différentes tensions de polarisation [99].

II.7 ABSORBANTS A METAMATERIAUX COHERENTS

Il est connu que l'un des inconvénients d'un absorbant à métamatériau typique est que l'absorptivité est généralement fixée après la conception initiale de l'absorbant à métamatériau. En conséquence, il n'est pas adapté aux environnements qui requièrent un réglage flexible de l'absorption. La présence de l'absorption parfaite cohérente (APC) est une solution à ce problème [102 - 103]. Mathématiquement, l'APC correspond à une valeur propre nulle de la matrice S à une fréquence spécifique, qui peut être considérée comme l'effet laser inversé dans le temps. L'absorption parfaite peut être obtenue en utilisant l'interférence destructive dans un système d'ondes stationnaires formé par deux faisceaux se propageant en sens inverse [104].

CHAPITRE II LES ABSORBANTS METAMATERIAUX

De plus, l'absorptivité dans un tel système peut être modulée de près de 0 à 100 % en ajustant uniquement la différence de phase entre les deux signaux contre-propagés. Près de 0 à 100% en ajustant uniquement la différence de phase entre les deux faisceaux incidents se propageant en sens inverse [105]. En raison de cette configurabilité dynamique de l'absorptivité, ces absorbants sont très intéressants pour des applications dans les capteurs, les systèmes d'alimentation en énergie, pour des applications dans les modulateurs et les commutateurs électromagnétiques.

Le concept de l'ACP a été présenté pour la première fois en théorie par Chong et al [102] et démontré expérimentalement par le même groupe [103]. Depuis lors, des phénomènes d'ACP ont été observés dans des métamatériaux epsilon-near-zéro [106], des guides d'ondes lumineuses lentes [107], un méta surface constituée d'antennes croisées métalliques [108], et un système plasmique à résonance de Fano [104].

La plupart des absorbants à métamatériaux cohérents sont basés sur des résonateurs métalliques sub-longueurs d'onde. Cependant, des recherches récentes ont révélé que l'ACP pouvait également être réalisé dans des métamatériaux ou des metasurfaces sans métal. Zhu et al. [109] ont conçu une structure en filet monocouche composée de céramique entièrement diélectrique, dont l'épaisseur est inférieure de deux niveaux à la longueur d'onde de fonctionnement.

Ils ont démontré que l'ACP pouvait être trouvé dans une telle structure et que l'absorptivité est contrôlable dans une large bande de 0,38 à 99,85% par modulation de phase. Une structure résille monocouche similaire faite d'eau pourrait également être utilisée pour obtenir une absorption cohérente élevée à plusieurs bandes de fréquences [110]. Absorption cohérente élevée à plusieurs bandes de fréquences [110]. De plus, en raison de la perte élevée intrinsèque de l'eau, APC pourrait être conçu avec des bandes passantes plus larges.

Contrairement aux absorbants à métamatériaux parfaits qui nécessitent de fortes résonances électriques et magnétiques résultant des résonateurs structurés artificiellement, quelques travaux récents ont rapporté que l'APC peut également se trouver dans des matériaux en couches existant naturellement avec une épaisseur inférieure à la longueur d'onde. [109] ont montré que des films conducteurs ultra-minces pouvaient être utilisés pour réaliser l'APC. Comme expérimentalement, une absorption cohérente à large bande, relative de 100 % à des fréquences micro-ondes a été observée dans un film conducteur, ayant une épaisseur de 1/1000 de la longueur d'onde de travail. Les phénomènes d'APC dans les couches minces de graphène et de MoS₂ ont également été étudiés [80] [111]. La conductivité accordable du graphène ou du MoS₂ permet à un tel un tel absorbant cohérent d'être plus flexible dans la fréquence de travail, qui pourrait être contrôlée en ajustant le taux de dopage chimique ou la tension de polarisation.

II.8 CONCLUSION

Le développement des métamatériaux a amélioré le coefficient d'absorption de nombreux appareils et a également mené à la découverte d'autres nouveaux dispositifs à haute absorption.

Dans ce chapitre, nous avons présenté en premier stade une revue des progrès récents sur les théories et les conceptions des absorbants à métamatériaux. Ensuite nous avons présenté un aperçu sur les différents types d'absorbants Electromagnétiques présentés dans l'industrie (diélectrique, structurel, pyramidaux, résonant et magnétique). Les réalisations d'absorbants à métamatériaux à large bande et accordables en fréquence ont également été discutées. , nous avons introduit le concept d'absorbants parfaits cohérents et le contrôle cohérent de l'absorptivité par modulation de phase dans ces absorbants à métamatériaux

CHAPITRE III
ABSORBANT METAMATERIAU
ULTRA-MINCE A LARGE BANDE
POUR LA TECHNOLOGIE
D'AVIATION

III.1 INTRODUCTION

La technologie de pointe des métamatériaux a révélé de nombreuses applications dans le domaine de radiofréquence (RF) et de micro-ondes, comme les antennes, les masques, les capteurs et les absorbants [112]-[120]. Les absorbants électromagnétiques sont l'une des applications les plus utilisées dans la technologie moderne pour atténuer les interférences électromagnétique par un radôme et de minimiser la section transversale du radar [121]-[124]. Pendant la Seconde Guerre mondiale, les absorbants Salisbury (monocouche) et Jaumann (multicouche) ont été introduits pour le camouflage radar. A cette époque, c'était la plus grande réussite de la recherche dans le domaine de l'électromagnétisme. Bien que les absorbants Dallenbach étaient utilisés pour l'absorption à large bande, ils ne sont pas populaires aujourd'hui à cause des matériaux magnétiques à pertes, car ils ont une grande densité de masse [125]. Avec la technologie récente, les hexa-ferrites sont également utilisées pour large bande en raison de leurs propriétés particulières telles que leur légèreté, leur finesse et leur faible réflectivité par rapport aux matériaux conventionnels [126] [127].

Dans ce chapitre nous présentons une structure unique et simple d'un absorbant à large bande, en utilisant un substrat monocouche sans aucun composant résistif. Le schéma de conception et les résultats des simulations sur les paramètres de conception de la structure proposée sont discutés dans la section "Conception de l'absorbant et résultats de simulation".

III.2 CONCEPTION D'ABSORBANT ET RESULTAT DE SIMULATION

On trouve dans la littérature plusieurs techniques de formation de couches métalliques sur des substrats, telles que le dépôt électrolytique, le revêtement par centrifugation et le laminé plaqué de cuivre. La combinaison de différents composés ayant d'excellentes propriétés magnétiques et électriques conduit à de nouveaux matériaux composites qui ont fait l'objet d'une attention technologique ces dernières années.[128]-[130].

L'absorbant proposé est constitué d'une seule couche de substrat diélectrique prise en sandwich entre un résonateur métallique à anneau fendu et un plan de masse fini, comme le montre la figure 1a, à l'aide d'un mécanisme de stratification plaqué de cuivre. Les dimensions de l'absorbant à cellule unitaire sont indiquées sur la figure 1b. Le substrat diélectrique FR-4 en verre époxy de 1,6 mm d'épaisseur est utilisé avec une permittivité relative $\epsilon_r = 4,3$ et une tangente de perte $\tan d = 0,025$. Les couches métalliques sont constituées de cuivre ayant une conductivité $\sigma = 5,89.10^{-7}$ S/m et une épaisseur $d = 0,035$ mm. La longueur de la cellule unitaire (A) est de 7 mm, la longueur du patch carré central (P) est de 2 mm, la longueur des patches diagonaux (S) est de 1 mm, la

Longueur du résonateur en anneau carré (B) est de 5,4 mm, et la largeur de la bande de l'anneau (W) est de 1 mm.

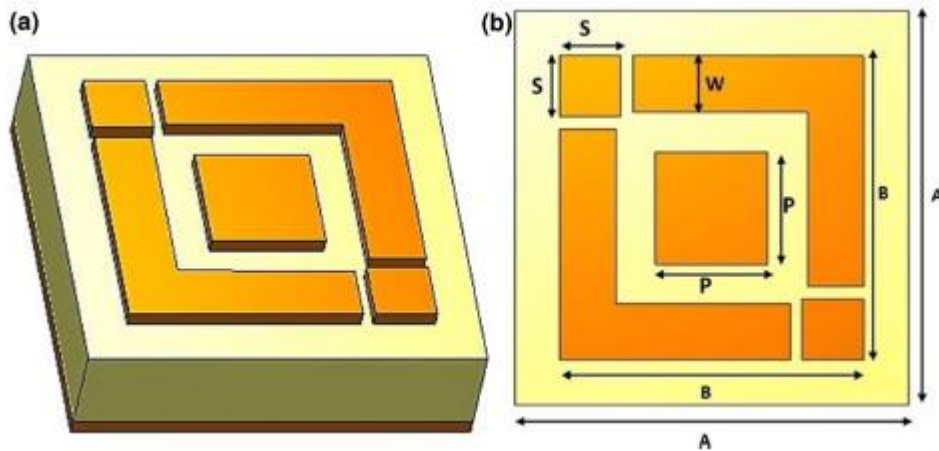


Figure III.1 : Structure de la cellule unitaire de l'absorbant : (a) indique la vue 3D d'une cellule unitaire de l'absorbant conçue en utilisant un matériau composite, c'est-à-dire la structure du résonateur en cuivre (en haut), le substrat FR4 (au milieu) et la masse

III.3 ETUDE PARAMETRIQUE DE LA CELLULE UNITAIRE MMA

III.3.1 INFLUENCE DE LA GEOMETRIE DE L'ABSORBANT SUR LE COEFFICIENT DE REFLEXION

La cellule unitaire proposée est simulée pour les paramètres S en utilisant les ports Floquet dans HFSS. Les paramètres S obtenus sont utilisés pour calculer l'absorption selon l'équation III.1 :

$$A(\omega) = 1 - S_{11}^2 - S_{21}^2 \quad (\text{III.1})$$

Où S_{21} et S_{22} sont le coefficient de réflexion et le coefficient de transmission, respectivement. Le plan de masse étant un miroir métallique, aucune transmission n'a eu lieu. Donc le coefficient de transmission (S_{21}) est nul. L'équation III.1 se réduit donc à l'équation III.2

$$A(\omega) = 1 - S_{11}^2 \quad (\text{III.2})$$

L'équation III.2 montre la relation entre l'absorption $A(x)$ et le coefficient de réflexion (S_{11}). Si la valeur du coefficient de réflexion (S_{11}) est inférieure à -10 dB, alors la magnitude de S_{11} est de 0,3 et le carré de la magnitude de S_{11} est de 0,09. Ainsi, l'absorption $A(x)$ est de 0,91 sur une échelle de 1. On en déduit que 10 dB indique une absorption de 91 %, valeur utilisée dans cette étude.

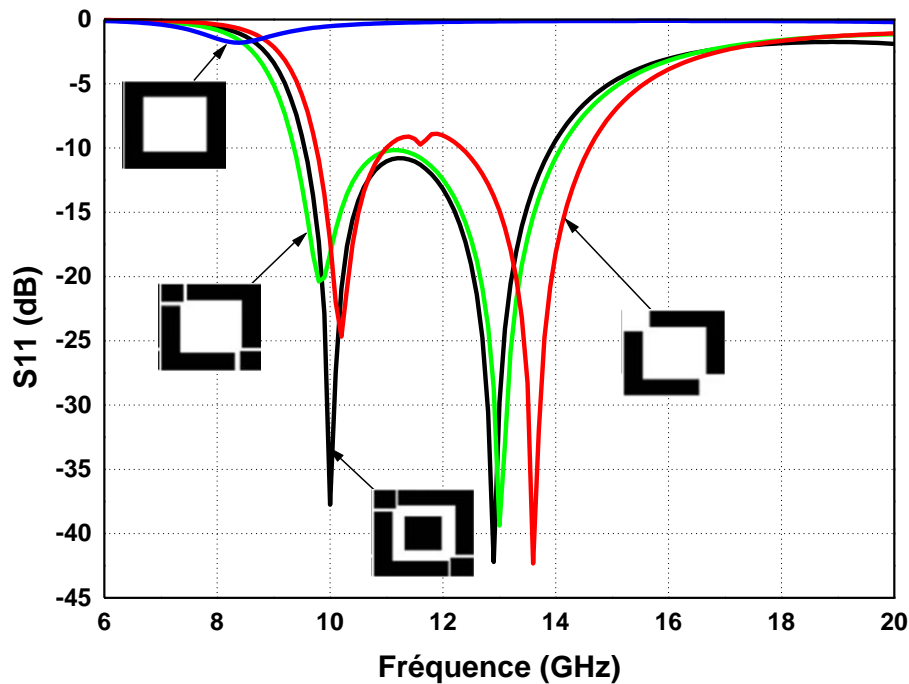


Figure III.2 : variation des coefficients de réflexion en fonction de la géométrie

Un balayage de fréquence de 6 GHz à 20 GHz est pris pour la simulation, comme le montre la Figure III.2.

Lorsque le SRR est simulé dans la largeur de bande prévue, le coefficient de réflexion est presque de 0 dB, ce qui signifie qu'il n'y a pas d'absorption. De plus, si le SRR est divisé en diagonale, la largeur de bande d'absorption correspondant à 10 dB n'est pas gardé dans toute la bande.

Enfin, le SRR divisé en diagonale est chargé d'un patch carré qui améliore la largeur de bande ainsi que le coefficient de réflexion qui reste inférieur à 10 dB figure(III.3)

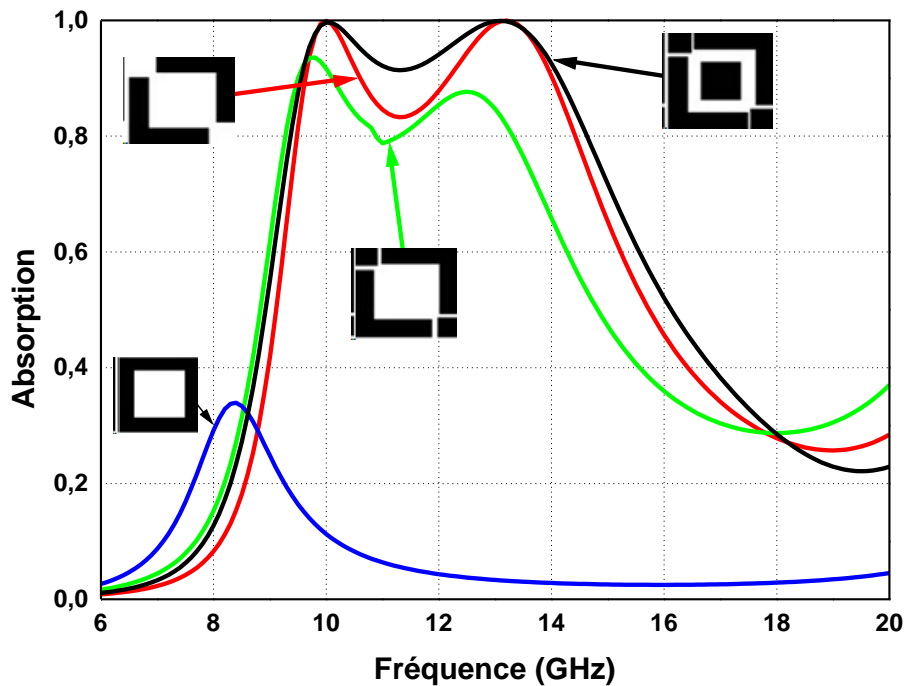


Figure III.3 : variation des coefficients d'absorption en fonction de la géométrie

III.3.2 INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DU SUBSTRAT SUR LE COEFFICIENT DE REFLEXION

Les caractéristiques d'absorption de l'absorbant sont également fortement affectées par l'épaisseur du dessous de l'épaisseur prévue, la structure proposée ne fonctionne pas comme un absorbant. Ainsi, l'épaisseur optimisée du substrat est de 1,6 mm selon l'analyse paramétrique substrat (h). Par conséquent, l'épaisseur du substrat varie de 0,8 mm à 2,4 mm avec un pas de 0,4 mm pour vérifier l'effet de l'épaisseur du substrat, comme le montre la figure III.3. Pendant le processus, tous les paramètres restent constants. Il est observé que la largeur de la bande de résonance de la structure conçue est fortement influencée par le changement de l'épaisseur du substrat en raison de la grande variation de la capacité de la plaque.

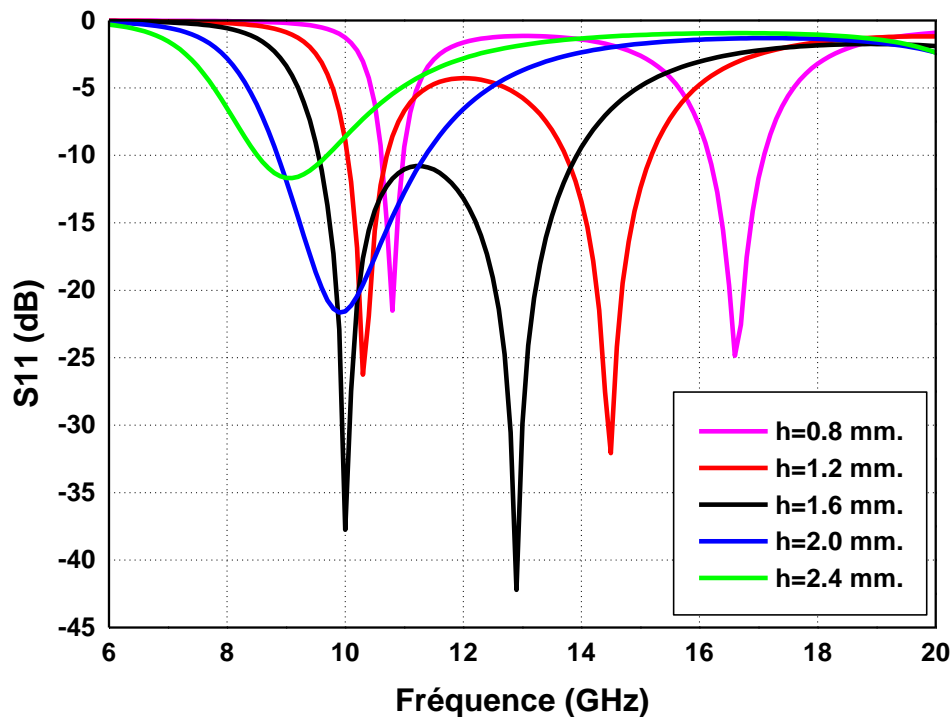


Figure III.4 : Variation du coefficient de réflexion en changeant l'épaisseur du substrat "h" de 0,8 mm à 2,4 mm.

D'après la figure III.4, on observe également que 1,6 mm est l'épaisseur de substrat appropriée pour laquelle une absorption suffisante a été obtenue pour la bande passante prévue. Au-delà de l'épaisseur prévue ($h = 1,6$ mm), la largeur de bande de l'absorbant est réduite dans un large mesuré.

III.3.3 INFLUENCE DE LA LONGUEUR DU PATCH CARRE CENTRE

La figure III.5 indique que si la longueur du patch carré centré (P) augmente au-delà de 2 mm, la bande passante diminue par rapport au niveau prévu. Par conséquent, pour une largeur de bande d'absorption supérieure à 90%, la longueur optimale d'un patch carré centré est de 2 mm.

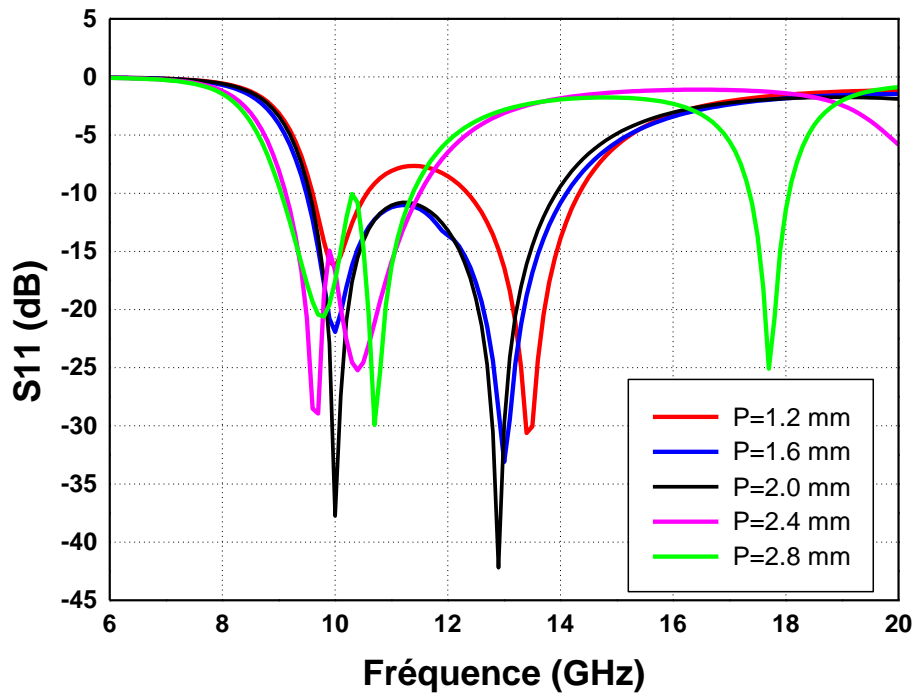


Figure III.5 : Influence de variation de la longueur du patch carré centré "P" (de 1,2 mm à 2.8 mm) sur le coefficient d'absorption.

III.4 MECANISME D'ABSORPTION ET PERFORMANCE DE L'ABSORBANT

L'absorption électromagnétique peut être réalisée par l'adaptation de l'impédance d'un milieu dans lequel se propage une onde et l'absorbant sur lequel l'onde. En raison de la désadaptation d'impédance, le coefficient de réflexion ($\Gamma_{(TE,TM)}$) de l'absorbant est calculé par la formule suivante

$$\Gamma_{(TE,TM)} = \frac{Z_e(TE,TM) - Z_0(TE,TM)}{Z_e(TE,TM) + Z_0(TE,TM)} \quad (III.3)$$

Où $Z_e(TE,TM)$ est l'impédance d'entrée de l'absorbant, et $Z_0(TE,TM)$ (377Ω) est l'impédance caractéristique de l'espace libre pour la polarisation transversale-électrique/transversale-magnétique (TE/TM).

En outre, le résonateur à anneau divisé carré est représenté par un circuit équivalent utilisant une résistance (R), l'inductance (L) et la capacité (C), comme illustré à la Figure III.6. L'impédance (Z_m) de la couche supérieure de l'absorbant métasurface proposé comprend les composantes série R, L, et C, comme indiqué dans l'équation 4 :

$$Z_m = R + j(X_L - X_C) = R + j\left(2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}\right) \quad (III.4)$$

Où X_L et X_C sont la réactance inductive et la réactance capacitive du circuit équivalent respectivement. L'impédance diélectrique (Z_t) de l'absorbant est estimée par l'équation (III.5) :

$$Z_t = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \tan\left(\frac{2\pi f \sqrt{\epsilon_r} d}{c}\right) \quad (\text{III.5})$$

L'impédance totale de l'absorbant Z_e est donnée par l'équation (III.6) :

$$\frac{1}{Z_e} = \frac{1}{Z_m} + \frac{1}{Z_t} \quad (\text{III.6})$$

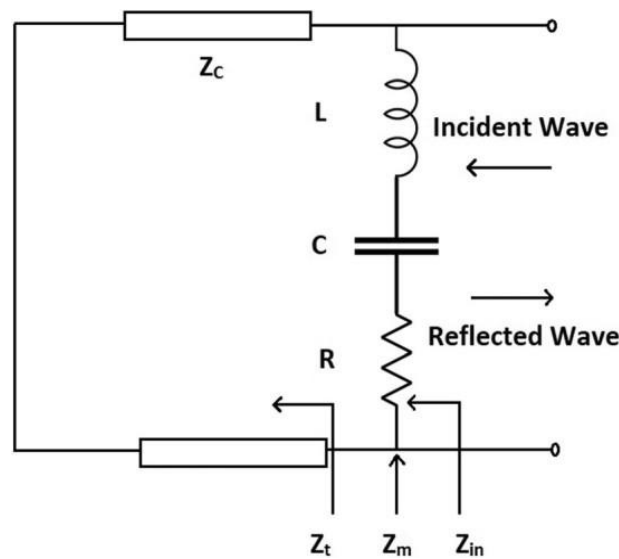


Figure III.6 : Modèle de circuit d'impédance équivalent du circuit de l'absorbant en termes de résistance en série (R), d'inductance (L) et de capacité (C).

Pour une condition d'absorption maximale, l'impédance d'un absorbant doit être égale à l'impédance caractéristique de l'espace libre, selon la théorie du transfert de puissance maximale, c'est-à-dire $Z_e = Z_0$. De plus, pour l'approximation des valeurs de R, L et C, les équations 4 à 6 sont résolues pour fournir un résultat intermédiaire donné dans l'équation (III.7).

$$Z_t = -j \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{Z_0} \cotan\left(\frac{2\pi f \sqrt{\epsilon_r} d}{c}\right) \quad (\text{III.7})$$

Maintenant, les termes réels et imaginaires sont extraits pour obtenir deux relations importantes données par les équations (III.8) et (III.9).

$$\frac{1}{Z_0} = \frac{R}{R^2 + (2\pi f L - 1/2\pi f C)^2} \quad (\text{III.8})$$

$$\frac{\sqrt{\epsilon_r}}{Z_0} \cotan\left(\frac{2\pi f \sqrt{\epsilon_r} d}{c}\right) = \frac{(2\pi f L - 1/2\pi f C)}{R^2 + (2\pi f L - 1/2\pi f C)^2} \quad (\text{III.9})$$

A partir des équations (III.8) et (III.9), la valeur de la résistance équivalente (R) est calculée et donnée par l'équation (III.10)

$$R = \frac{Z_0 \tan^2\left(\frac{2\pi f \sqrt{\epsilon_r} d}{c}\right)}{\epsilon_r + \tan^2\left(\frac{2\pi f \sqrt{\epsilon_r} d}{c}\right)} \quad (\text{III.10})$$

De même, une relation quantitative entre l'inductance (L) et la capacité (C) équivalentes est donnée par l'équation (III.11)

$$\left(2\pi f L - \frac{1}{2\pi f C}\right) = \frac{\sqrt{\epsilon_r} Z_0 \tan\left(\frac{2\pi f \sqrt{\epsilon_r} d}{c}\right)}{\epsilon_r + Z_0 \tan^2\left(\frac{2\pi f \sqrt{\epsilon_r} d}{c}\right)} \quad (\text{III.11})$$

L'inductance totale d'un anneau fendu carré est déterminée par l'équation (III.12)

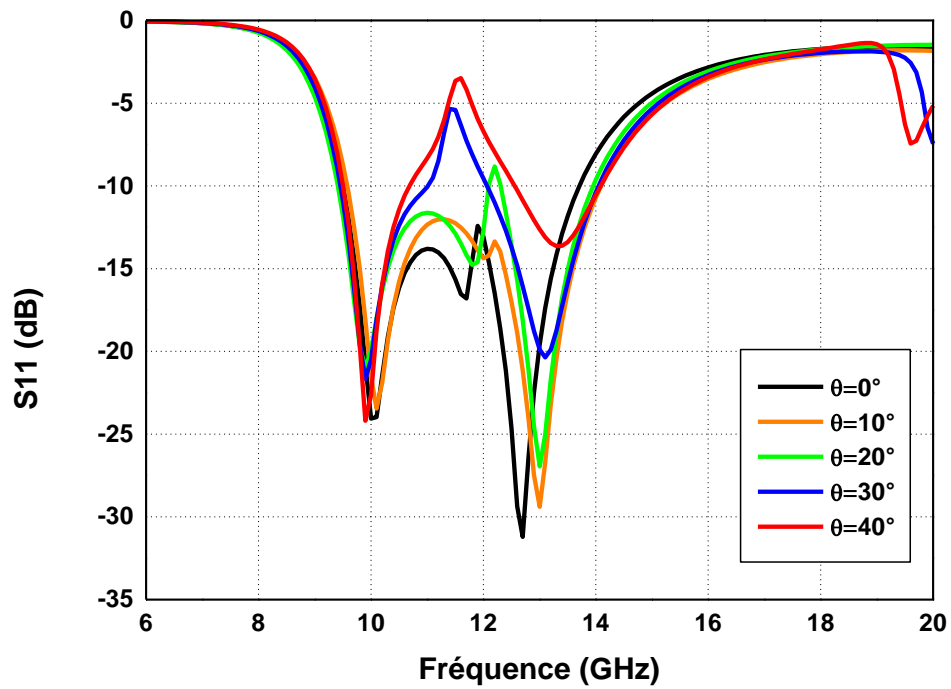
$$L = 0.0002 \times l \times \left(2.303 \times \log_{10}\left(\frac{4 \times l}{d}\right) - \alpha\right) \mu H \quad (\text{III.12})$$

Où le périmètre de l'anneau carré $l = 49$ (A 0,23), épaisseur du conducteur $d = 0,035$ mm, et pour la structure de l'anneau carré, la valeur de α est de 2,853. Sur la base des équations ci-dessus, les valeurs de paramètres du circuit équivalent sont extraites comme indiquées dans le tableau (III.1).

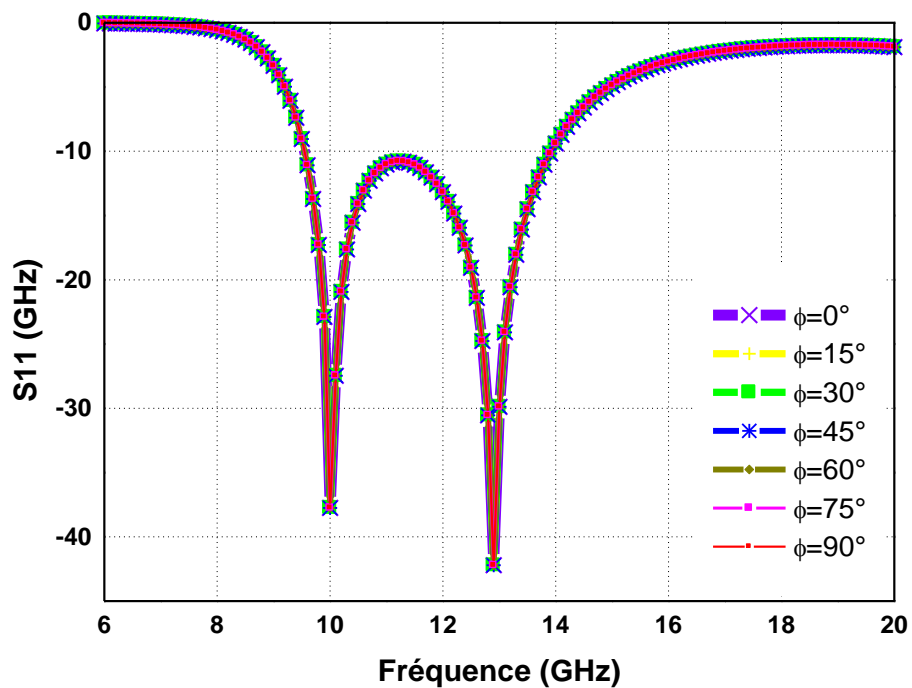
R (Ω)	L (nH)	C (pF)
322.88	608.08	47.1

Tableau III.1 : Valeurs estimées de R, L et C à 12,5 GHz

III.4.1 Influence des angles d'incidences et polarisation sur le coefficient d'absorption



(a)

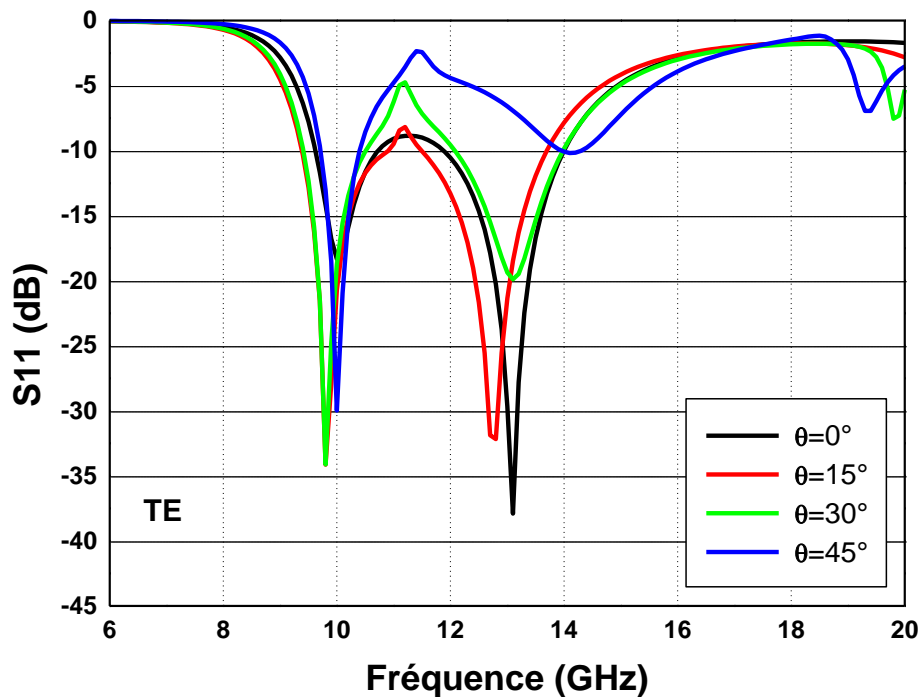


(b)

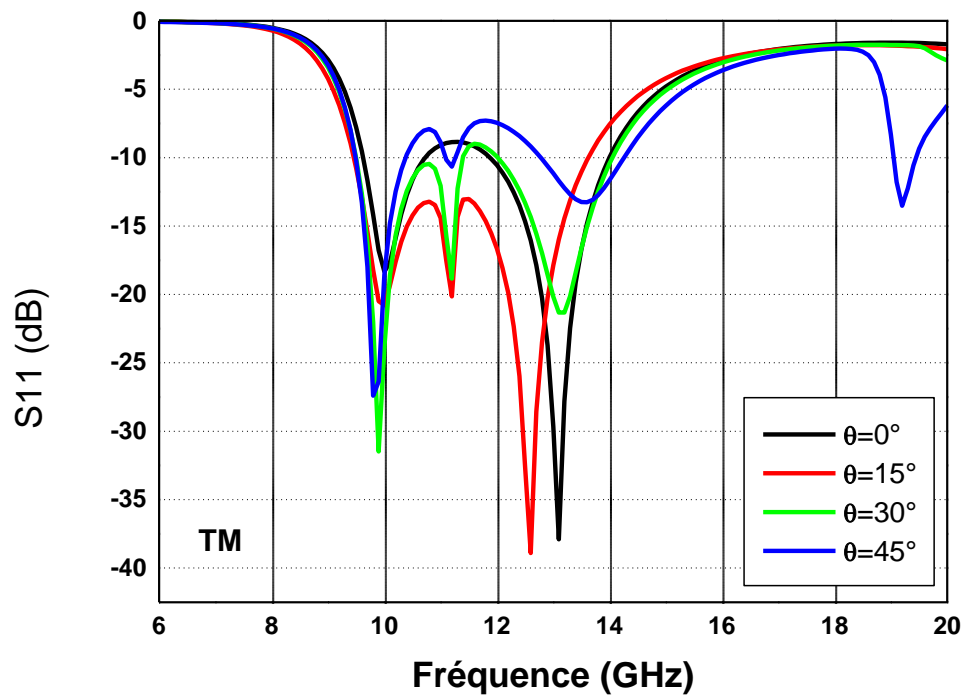
Figure III.7 : Coefficient de réflexion « S_{11} » pour différents angles d'incidence « θ » à « $\Phi = 0$ »

(b) angles de polarisation « Φ » à la incidence normale « $\theta = 0$ »

Après avoir analysé les résultats présentés sur les Figure III.6, III.7, il est possible d'obtenir des résultats plus précis. En changeant l'angle d'incidence (θ) et en gardant les angles de polarisation $\Phi = 0$, l'absorbant est partiellement insensible de 10 GHz à 12.3 GHz. Il est également observé à partir de la figure III.7 que l'absorbant proposé est insensible pour différentes valeurs d'angles de polarisation (Φ) de 0 à 90 en incidence normale ($\theta = 0$). De plus, les figures III.8(a), (b) ne montrent aucune différence en ce qui concerne les divers angles d'incidence pour les ondes TE et TM. Cela indique l'insensibilité de l'absorbeur avec des ondes TE ou TM également



(a)



(b)

Figure III.8 : influence des différents angles d'incidence sur le coefficient de réflexion S11 (a) : mode TE seulement, (b) mode TM seulement

III.5 CONCLUSION

Dans ce chapitre, un absorbant métamatériaux monocouche ultra-mince à large bande a été conçu avec une fraction de 40 % de bande passante sans utiliser de couche résistive ou composants. La simulation et les résultats mesurés ont montré une absorption de plus de 90 % dans bande requise. Le comportement d'absorption indique également l'insensibilité avec divers angles de polarisation et insensibilité partielle pour les angles d'incidence. Par conséquent, la proposition absorbant sera une solution alternative pour une large bande et peut être utilisé pour divers applications comme la technologie furtive, compatibilité électromagnétique (CEM), et interférences électromagnétiques (IEM)

CHAPITRE IV
ABSORBANT METAMATERIAU
POUR LES APPLICATIONS DE
LA COLLECTE D'ENERGIE
ELECTROMAGNETIQUE

IV.1 INTRODUCTION

Les métamatériaux sont des matériaux artificiels fabriqués pour produire des propriétés qui ne sont pas naturelles. Il est composé d'un ensemble de petits résonateurs dans un réseau périodique afin de fournir les propriétés électromagnétiques souhaitées. Les paramètres géométriques d'une unité métamatérielle sont importants pour une absorption parfaite, car la réponse en fréquence et les caractéristiques d'absorption d'une structure sont déterminées par ces paramètres. Par conséquent, en modifiant les dimensions géométriques du motif conducteur et de la constante diélectrique du substrat, un absorbant de métamatériau avec une bande de fréquence réglable allant des fréquences RF aux fréquences optiques peut être conçu [131–134]. Il y a beaucoup d'études données travaillant à la région de micro-onde en raison de sa fabrication facile. Grâce aux fonctionnalités mentionnées ci-dessus, les MMAs peuvent être largement utilisées dans de nombreuses applications telles que la collecte d'énergie [135], les capteurs de détection thermique [136], les cellules solaires et la technologie furtive. En outre, adaptateur basé sur le système d'absorbant MTM est également étudié pour convertir l'énergie électromagnétique en énergie électrique [137]. Dans ce chapitre, nous allons étudier en première partie un absorbant métamateriel à large bande composé de résonateurs multicouches. Dans la deuxième partie, nous allons concevoir un absorbant métamateriel pour les applications 5G. Le principe fondamental de conception de ces deux absorbants est la collecte d'énergie électromagnétique dans la bande de fréquences micro-ondes

IV.I ABSORBANT METAMATERIAU MULTICOUCHES A ANNEAUX FENDUS CARRES POUR LES COMMUNICATIONS SANS FIL

IV.I.1 CONCEPTION ET CONFIGURATION NUMERIQUE DE LA STRUCTURE UNITAIRE

Dans cette étude, nous avons réalisé une structure MTM multicouche avec une absorption multi bande et nous avons étudié sa capacité d'absorption. La cellule unitaire de la structure proposée est de trois couches de résonateurs ; chaque couche est composé d'un résonateur métallique placé sur un substrat diélectrique, à savoir que la couche contenant le plus grand résonateur est recouverte d'un métal pour bloquer la transmission. Comme les dimensions des résonateurs de chaque couche sont différentes en taille, ils résonnent à différentes fréquences proches les unes des autres. L'absorption globale de la structure peut alors être obtenue en en faisant la somme de toutes les réponses en fréquence superposées correspondant à chaque couche [136]. Les caractéristiques d'absorption de la structure dépendent à la fois du nombre de résonateurs et les dimensions géométriques des résonateurs sur chaque couche, ainsi que les largeurs et l'orientation des espaces dans les résonateurs [137]. Le schéma et la cellule unitaire de la structure MSSR proposée sont montrés dans la Figure (IV.1).

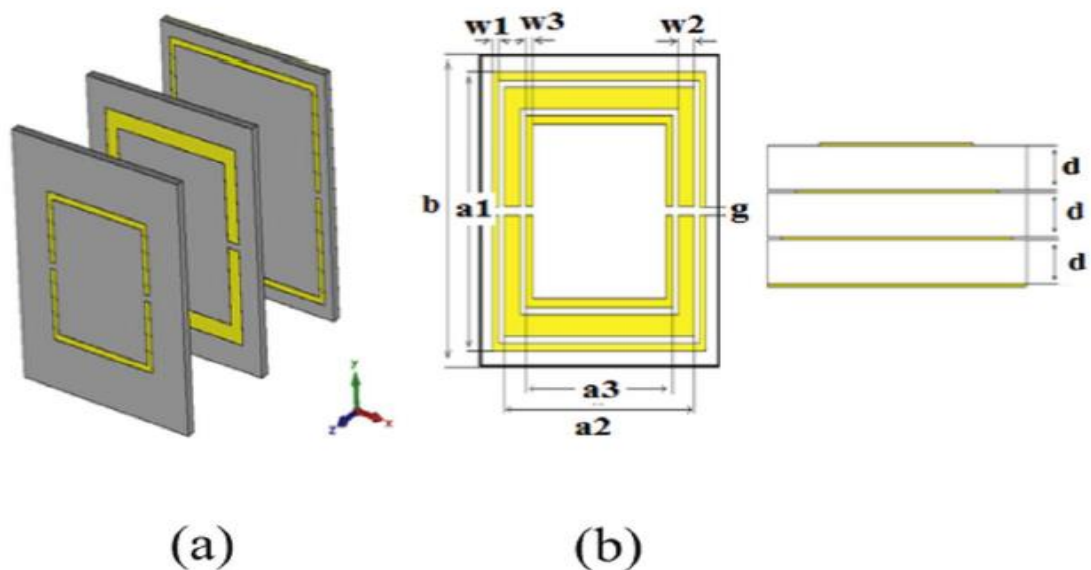


Figure IV.1 : (a) Structure multicouche proposée,(b) Dimensions des SSR et épaisseurs de couches

CHAPITRE IV ABSORBANT METAMATERIAU POUR APPLICATIONS DE LA COLLECTE D'ENERGIE ELECTROMAGNETIQUE

Respectivement. Le substrat diélectrique de chaque couche est le FR4 avec une permittivité relative de $\epsilon_r=4,3$ et une tangente de perte de $\tan \delta=0,025$. Le cuivre est utilisé comme résonateur sur le substrat diélectrique avec une conductivité électrique de $\sigma=5 \times 8 \text{ s/m}$. Les dimensions optimisées de la structure déterminées par l'étude paramétrique sont données dans le tableau IV.1.

SRR inferieur	a1=33 mm	w1=1 mm
SRR milieu	a2=29 mm	w2=2.5 mm
SRR haut	a3=22 mm	w3=1 mm
Autre	b=37mm	d=1.6 mm
	g=1	Epaisseur du cuivre 0.035mm

Tableau IV.2 : Les dimensions géométriques de la structure.

IV.1.2 RESULTATS DE LA SIMULATION :

Pour l'analyse numérique, on suppose que les composantes des champs électriques et magnétiques sont polarisées respectivement selon les directions x et y, et que la direction de propagation suivant z. L'absorption dépendante de la fréquence $A(\omega)$, peut être obtenue par l'équation :

$$A(\omega)=1-R(\omega)-T(\omega) \quad (\text{IV.1})$$

, où $R(\omega)$ et $T(\omega)$ définissent respectivement les coefficients de réflexion et de transmission de la structure globale. Afin de maximiser l'absorption de la structure, la réflexion $R(\omega)=|S_{11}|^2$ et la transmission $T(\omega)=|S_{21}|^2$ doivent être minimisées à la fréquence de fonctionnement. Par conséquent, l'absorption ne dépend que du coefficient de réflexion lié au paramètre S_{11} . Les simulations de la structure MSSR ont été analysés en utilisant l'équation d'absorption

$$A(\omega)=1-R(\omega) \quad (\text{IV.2})$$

où $|S_{21}|^2=0$.

Afin de mieux comprendre les effets séparés et combinés de chaque couche sur les caractéristiques d'absorption et la largeur de bande, chaque couche doit être étudié séparément. Les effets séparés et combinés de chaque couche sont étudiés dans la bande de fréquences de 2 GHz à 13 GHz dans la région des micro-ondes, les résultats de la simulation sont reportés sur le même graphe comme le montre la figure IV.2.

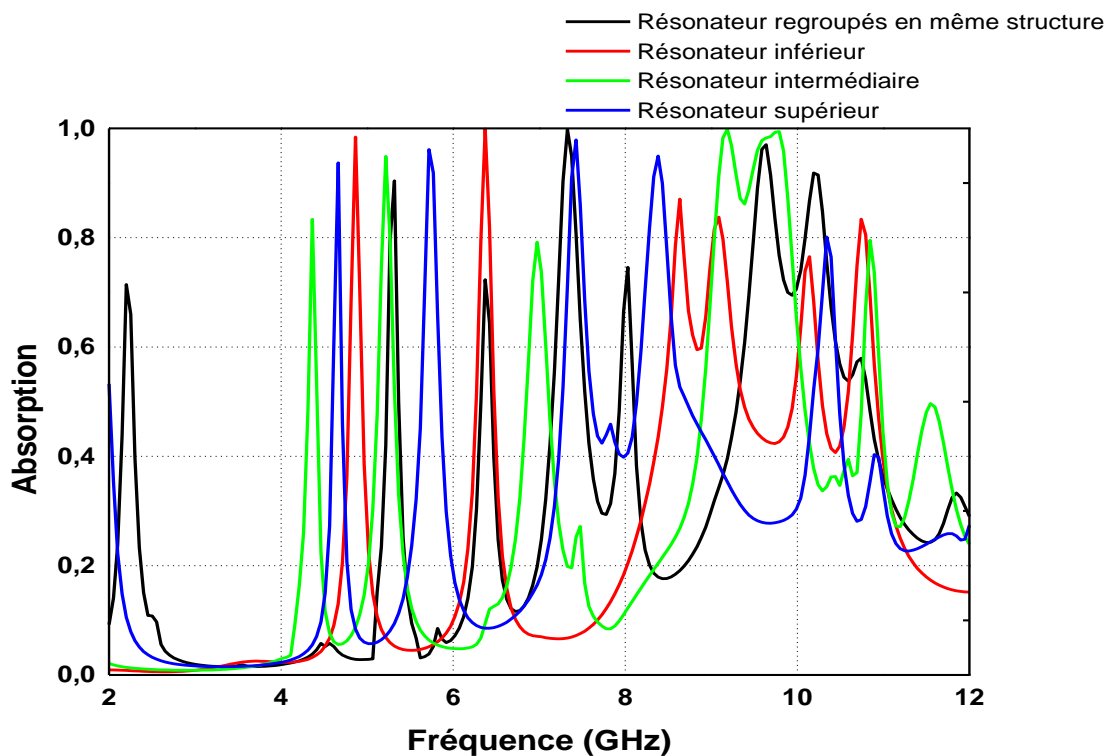


Figure IV.2 : coefficient d'absorption des résonateurs individuels et des résonateurs couplés

L'absorbant composé de trois couches a un potentiel pour l'application de la collecte d'énergie micro-ondes dans l'environnement dans lequel nous vivons. Comme on peut le voir sur la figure IV.2, chaque couche est responsable des fréquences de résonance différentes, par conséquent la structure combinée de trois résonateurs (tous dans une même structure) ayant les caractéristiques données ci-dessus est un candidat pour les applications de collecte d'énergie dans la bande des fréquences micro-ondes, y compris les bandes GSM, WIMAX et les bandes de communications par satellites.

IV.1.3 ETUDE PARAMETRIQUE DE LA CELLULE UNITAIRE

Les réponses d'absorption des combinaisons par paires de trois résonateurs sont analysées pour étudier leurs effets respectifs, comme le montre la figure 3.

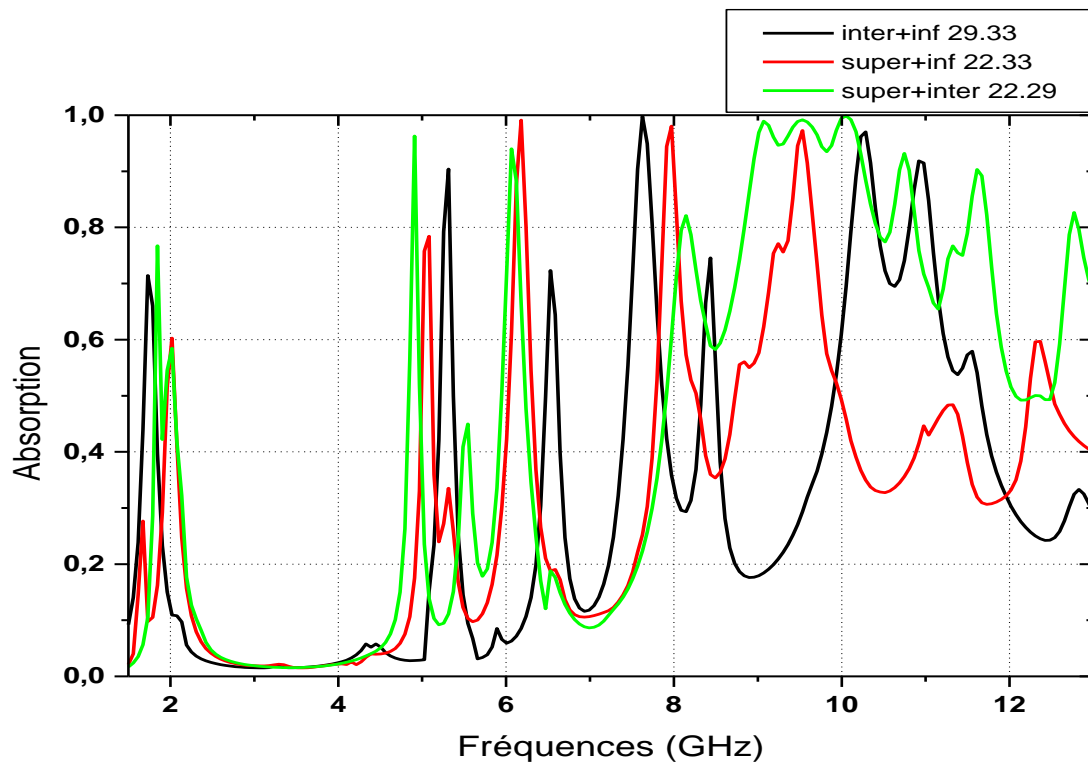


Figure IV.3 : coefficient d'absorption des combinaisons par paire de trois résonateurs.

La combinaison par paire des résonateurs des couches supérieure et inférieure crée six résonances dans la bande de fonctionnement. La première et la dernière fréquence de résonance se situent autour de 2,2 GHz et 12,4 GHz respectivement avec un même niveau d'absorption de 60%, les autres quatre fréquences de résonance (5, 6,2, 8 et 9,8) GHz ont respectivement des niveaux d'absorption de 78%, 98%, 99% et 95%. Chaque combinaison par paire de trois résonateurs provoque une résonance à différentes bandes de fréquences micro-ondes, comme les fréquences de communication GSM et satellite. Par ailleurs, la combinaison des résonateurs intermédiaire et de l'inférieure présente six fréquences de résonance. La valeur d'absorption correspondant à la première résonance est de 70 % à 1,8 GHz. Pour la même combinaison de paires, les valeurs d'absorption de 97 % et 96% se produisent à 10,2 GHz et 11 GHz pour la communication par satellite. D'autre part, la combinaison des résonateurs du supérieur et de l'intermédiaire donne dix résonances ayant un niveau d'absorption de 78 % ou plus dans les plages de fréquences 2-13 GHz.

Par conséquent, il peut être utilisé comme un absorbant pour toutes les fréquences de communication couramment utilisées.

IV.I.3.1 INFLUENCE DU SUBSTRAT

Nous supposons une cellule unitaire composée de trois résonateurs couplés placés sur un substrat diélectrique unique dont la face arrière est recouverte de métal. Comme dans la structure en couches. Les résultats de simulation correspondant à la structure comprenant des résonateurs couplés sont donnés à la figure IV.4. Puisqu'il est prévu de concevoir un absorbant triple bande ou multi bande fonctionnant dans la région des fréquences micro-ondes.

Les dimensions géométriques formant la cellule unitaire doivent être choisies correctement. Une comparaison entre le résultat de la structure multicouche et celui de la structure imbriquée est présentée à la figure IV.4.

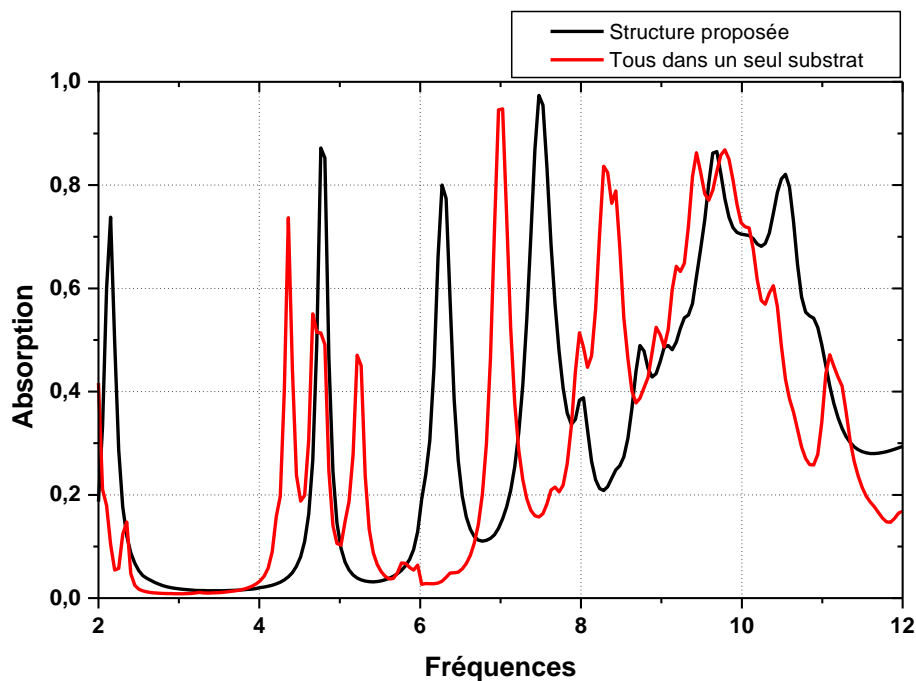


Figure IV.4 : coefficient d'absorption de la structure proposée et structure a un seul substrat

Comme on peut le voir sur la figure IV.4, la structure proposée incluant des résonateurs multicouches présente des niveaux d'absorption et une bande passante bien meilleurs que ceux d'une structure à résonateurs couplés. Les résultats sont donc conformes à l'objectif de la collecte d'énergie par micro-ondes. Par conséquent, la structure proposée est un candidat potentiel pour la

CHAPITRE IV ABSORBANT METAMATERIAU POUR APPLICATIONS DE LA COLLECTE D'ENERGIE ELECTROMAGNETIQUE

collecte de l'énergie EM dans la bande de fréquence de WIMAX avec des niveaux d'absorption de 75% à 2,2 GHz. Dans la bande de fréquences Wi-Fi, le niveau d'absorption de la structure proposée est de 90 % à 5,4 GHz. De plus, le niveau d'absorption est plus de 80 % proche de 10 GHz, où fonctionnent les services de diffusion directe par satellite.

Le nombre de couches influe également sur le nombre de résonances d'absorption et la bande passante. La réponse d'absorption de la structure proposée avec trois couches est comparée à celle de la structure à quatre couches (Figure IV.5).

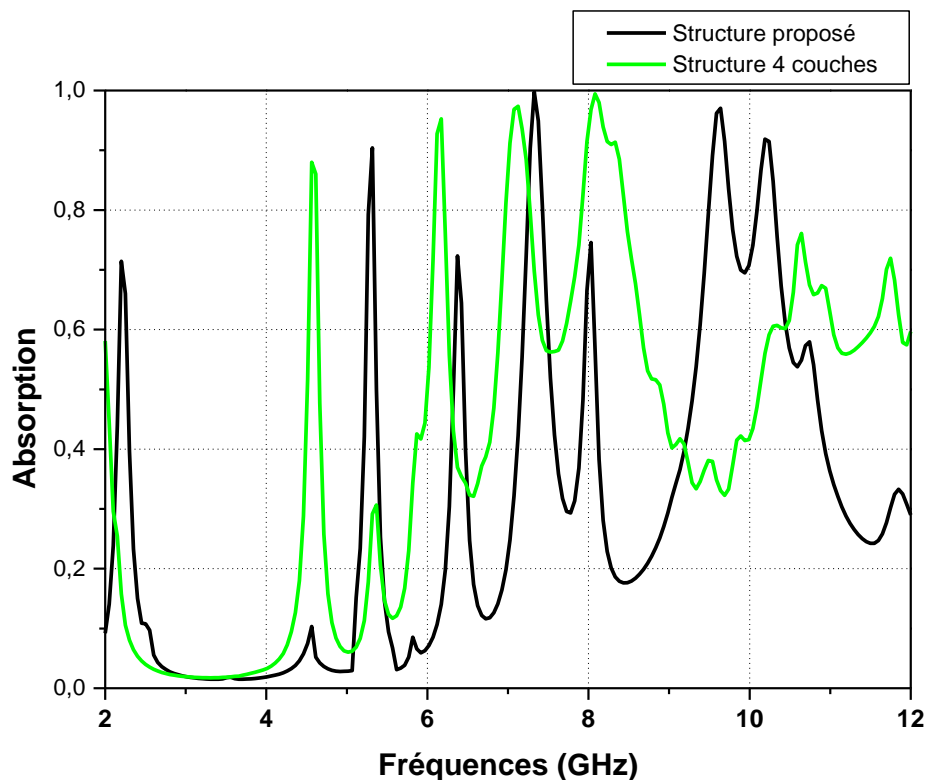


Figure IV.5 : Coefficient d'absorption pour la structure proposée et la structure à quatre couches.

Alors que la structure proposée présente un pic d'absorption de résonance supérieure à 95%, la structure à quatre couches présente trois pics d'absorption de résonance avec une largeur de bande supérieure dans la même bande de fréquences. Par conséquent, On peut donc conclure que le nombre de pics de résonance et la largeur de bande des résonances sont directement liés à la structure proposée.

IV.I.3.2 INFLUENCE D'ANGLE D'INCIDENCE SUR L'ABSORPTION

Afin de voir l'effet de la variation de l'angle d'incidence sur l'absorption, des simulations numériques sont effectuées avec différents angles d'incidence, allant de 0 à 45 degrés par un pas de 15 degrés.

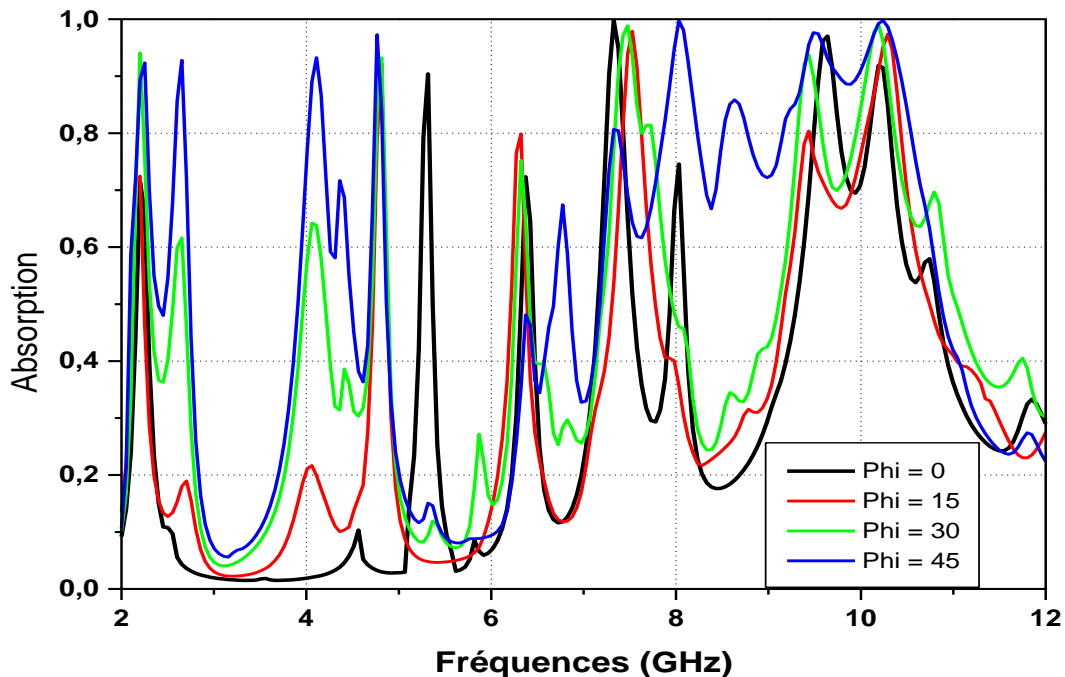


Figure IV.6 : Influence de l'angle d'incidence sur le coefficient d'absorption de la structure à trois couches.

Comme on peut le voir sur la Figure IV.6, la structure proposée a fourni une réponse en fréquence qui est presque insensible à l'angle d'incidence inférieur à 30° . Par contre, en angle d'incidence de 30° ou plus, le niveau d'absorption s'augmente et l'apparition d'autres pics de fréquences que nous n'avons pas besoin

IV.I.3.3 INFLUENCE DE LA LARGEUR DES LIGNES SRR

L'effet de la largeur de ligne des SSR liés à différentes couches sur le coefficient d'absorption de la structure est étudié et représenté sur la figure IV.7, les simulations sont effectuées avec des largeurs de ligne des résonateurs dans les couches supérieure et inférieure (w_1 et w_3) allant de 1 mm à 1,3 mm par pas de 0,1 mm.

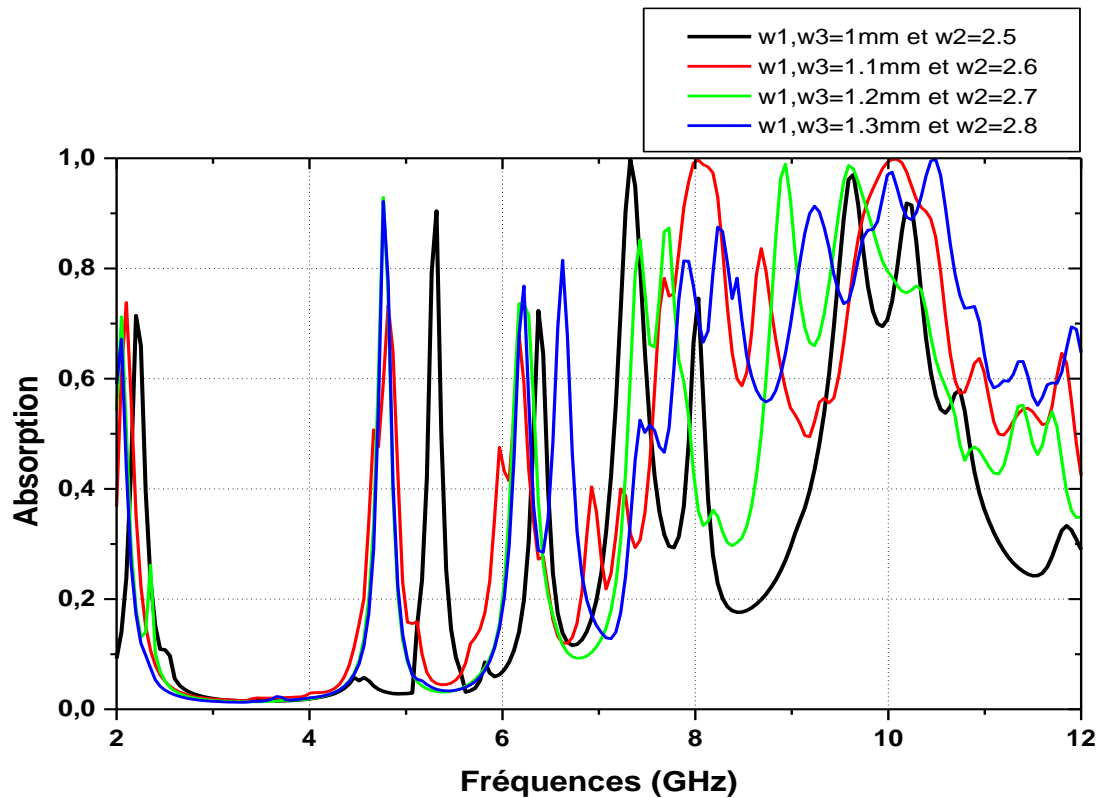


Figure IV.7 : Coefficients d'absorption pour différentes valeurs de w .

Les largeurs de ligne des résonateurs dans la couche intermédiaire (w_2) varient de 2,5 à 2,8 mm par pas de 0,1 mm. La figure IV.7 montre qu'avec l'augmentation de la largeur des lignes, la bande de fréquences de fonctionnement moins de 7 GHz se déplace légèrement vers le bas avec une légère diminution du niveau d'absorption, de 7.5 GHz à 11 GHz en voit l'apparence de plusieurs pics inutiles. Cependant, l'effet de la modification de la largeur de ligne des SSR n'est pas assez significatif pour être pris en compte. Ce léger décalage d'absorption est le résultat du faible effet de la largeur de ligne sur les caractéristiques capacitatives et inductives des résonateurs. Même si la largeur de ligne modifie la capacité, elle ne montre pas de changements notables comme dans les variations de la largeur de l'espace.

II. ABSORBANT METAMATERIAU LARGE BANDE POUR LES APPLICATIONS DE COLLECTE D'ENERGIE POUR LA 5G

IV.II.1 INTRODUCTION :

Sur l'objectif de réaliser une absorption sur une large bande passante pour les applications de collecte d'énergie RF, différentes techniques ont été proposées dans la littérature [138], l'un est la combinaison de nombreuses résonances différentes générées par géométries [139]. Différentes MTMs ont été développées à différents bandes de fréquences allant de MHz à THz pour différentes applications comme la collecte d'énergie, le transfert d'énergie sans fil (Wireless Power Transfer), énergie solaire spatiale (Space Solar Power)...

En outre, les besoins énergétiques sont considérés comme l'un des principes de base pour les développements actuels et futurs. Dans l'écosystème de l'IOT, de nombreux dispositifs autonomes, capteurs, véhicules, maisons et villes intelligentes seront de plus en plus connectés à internet. Pour répondre à la demande d'énergie, les systèmes d'énergie deviennent de plus en plus populaires dans les domaines de l'aviation et de l'IOT. Le principe de la 5G est une grande infrastructure avec une quantité énorme de dispositifs connectés et cette grande infrastructure créera également de nombreux bruits et champs électromagnétiques indésirables [140]. Dans le système de collecte d'énergie RF, il est possible de collecter les énergies électromagnétiques indésirables ambiantes et les utiliser pour charger les batteries des drones ou alimenter de petits dispositifs IOT [141].

Dans cette partie nous allons étudier un absorbant à base de MTMs, la conception et résultat de simulation sont présentée, une étude paramétrique avec une concentration sur les propriétés des effets des différents paramètres.

IV.II.2 CONCEPTION DE L'ABSORBANT ET RESULTAT DE SIMULATION

La bande de fonctionnement développée est obtenue par la superposition des deux résonances générées par les deux lettres. Les simulations sont basées sur le Rogers RT5880 (épaisseur de 1.575 mm, constante diélectrique de $\epsilon_r=2.2$, tangente de perte de $\tan\delta=0.009$)

Les résultats obtenus montrent une large bande d'absorption de 10 dB dans la bande de fréquences entre 18 GHz et 30 GHz, avec une absorption proche de 99% pour une incidence normale et oblique jusqu'à à 30°.

CHAPITRE IV ABSORBANT METAMATERIAU POUR APPLICATIONS DE LA COLLECTE D'ENERGIE ELECTROMAGNETIQUE

La conception de l'absorbant est constituée de trois couches, la couche inférieure ou la masse, la couche intermédiaire ou le matériau diélectrique et la couche supérieure du patch, comme le montre la figure 8. Les valeurs des paramètres de conception sont indiquées dans le tableau IV.2.

Paramètres	Valeurs (mm)
W	0.2585
L1	0.943
L2	1.2
L3	3.438
L4	0.629
L5	0.427
L6	0.629017
L7	1.40
L8	0.943
L9	1.146
L10	0.4265
L11	0.4265
L12	0.4265

Tableau IV.2: Les valeurs des paramètres de la structure.

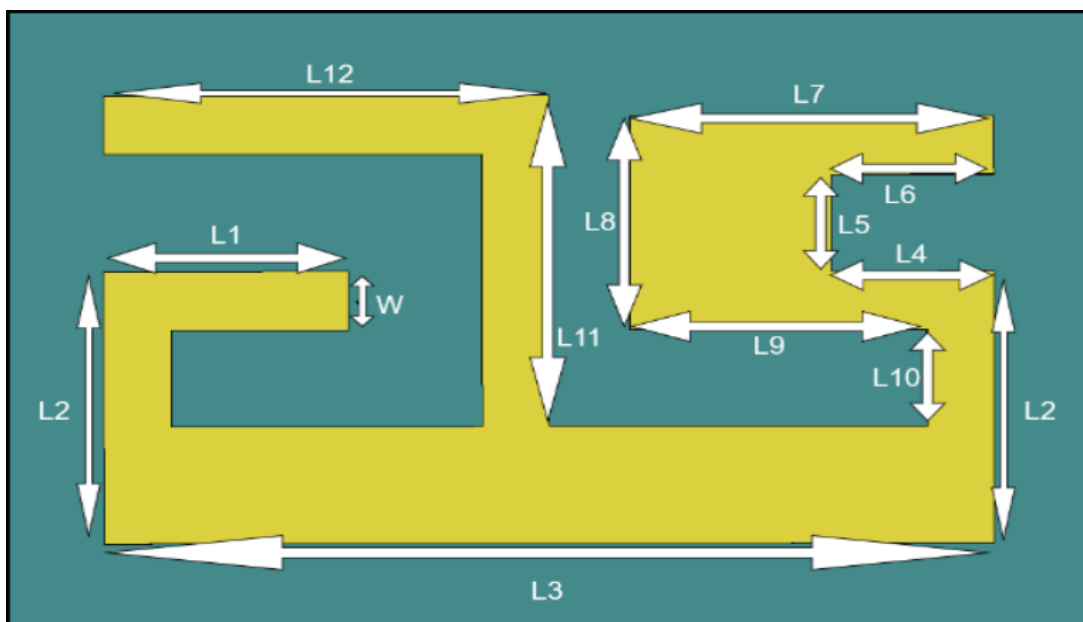


Figure IV.8 : Absorbant proposés avec les paramètres de conception.

La taille globale de la cellule unitaire de l'absorbant est de 4,540 mm x 2,771 mm, ce qui est très compact. Les couches inférieure et supérieure sont composées de cuivre d'une épaisseur de 0,035

CHAPITRE IV ABSORBANT METAMATERIAU POUR APPLICATIONS DE LA COLLECTE D'ENERGIE ELECTROMAGNETIQUE

mm et une conductivité de $5,96 \times 10^7$ S/m. La hauteur du substrat Rogers RT5880 est de 1.575 mm, une constante diélectrique $\epsilon_r=2.2$ et une tangente de perte $\tan \delta=0.009$.

Pour une structure périodique de la cellule unitaire. Les valeurs de coefficient de réflexion S_{11} de la valeur optimale de W est représentée sur la figure IV.9. Il est clair que l'absorbant a une propriété large bande dans les fréquences 22 GHz à 28 GHz dans. La bande couvre les applications 5G spécifiées. De même, le taux d'absorption est bien supérieur à (99%) comme le montre la figure IV.10.

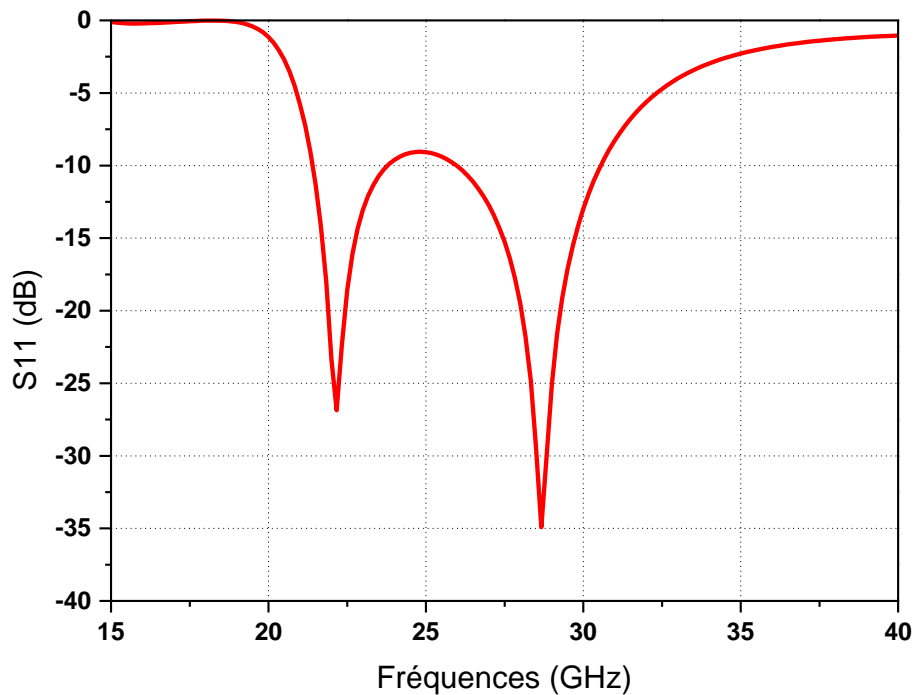


Figure IV.9 : Coefficient de réflexion

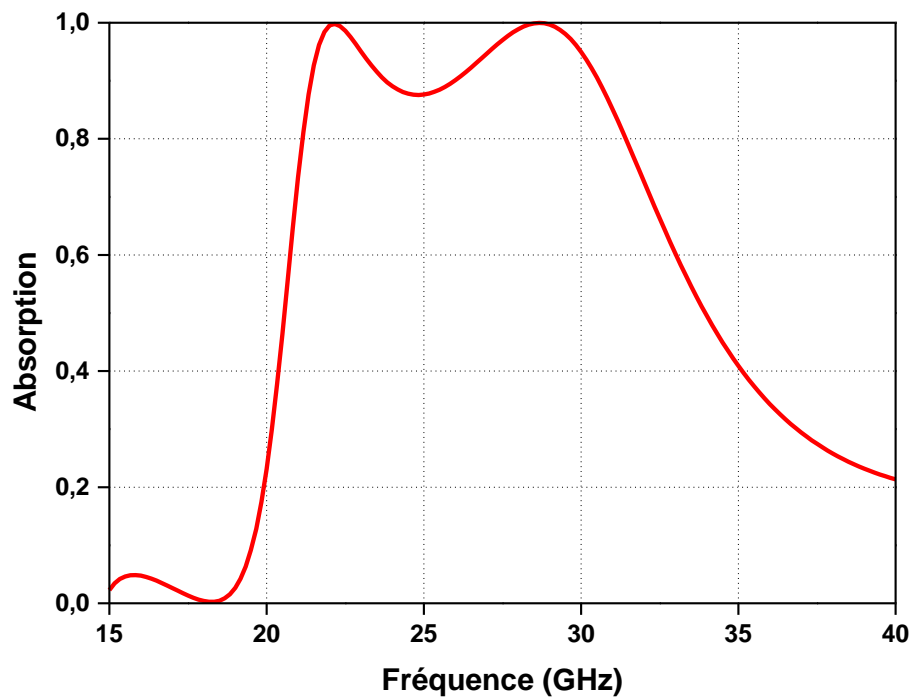


Figure IV.10 : Coefficient d'absorption

IV.II.3 ETUDE PARAMÉTRIQUE DE LA CELLULE UNITAIRE

IV.II.3.1 INFLUENCE DU PARAMETRE W SUR LE COEFFICIENT DE REFLEXION

Afin d'obtenir une bonne absorption sur une large bande, une étude paramétrique est réalisée sur les différents paramètres décrits dans le tableau IV.2. Le paramètre le plus important est W. La figure IV.11 illustre le coefficient de réflexion pour différentes valeurs de W de 0.17 mm à 0.25 mm pour les absorbants implémentés sur Rogers RT5880. Il convient de souligner que le coefficient d'absorption et la largeur de bande sont modifiés pour certaines valeurs de W. On peut observer que la valeur optimale de W est de 0,2285.

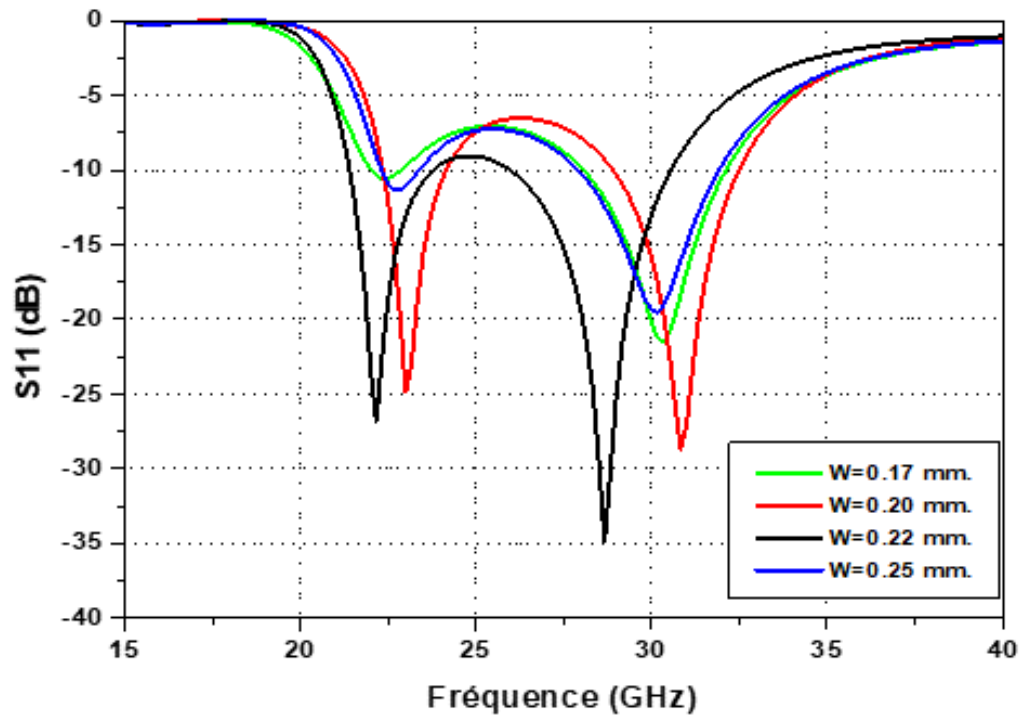


Figure IV.11 : Coefficient de réflexion pour différentes valeurs du paramètre (W)

IV.II.3.2 INFLUENCE DES ANGLES D'INCIDENCE SUR LE COEFFICIENT L'ABSORPTION

Il est nécessaire d'avoir une absorption stable pour les absorbants métamatériaux parfaits subjectifs à l'incident oblique à différents angles. La Figure IV.11, montre les variations de l'absorption en fonction de l'angle d'incidence θ de 0° à 30° (mode TE/TM). L'absorption de la structure proposée reste supérieure à 99%, pour des angles incidents plus élevés, l'absorption commence à diminuer.

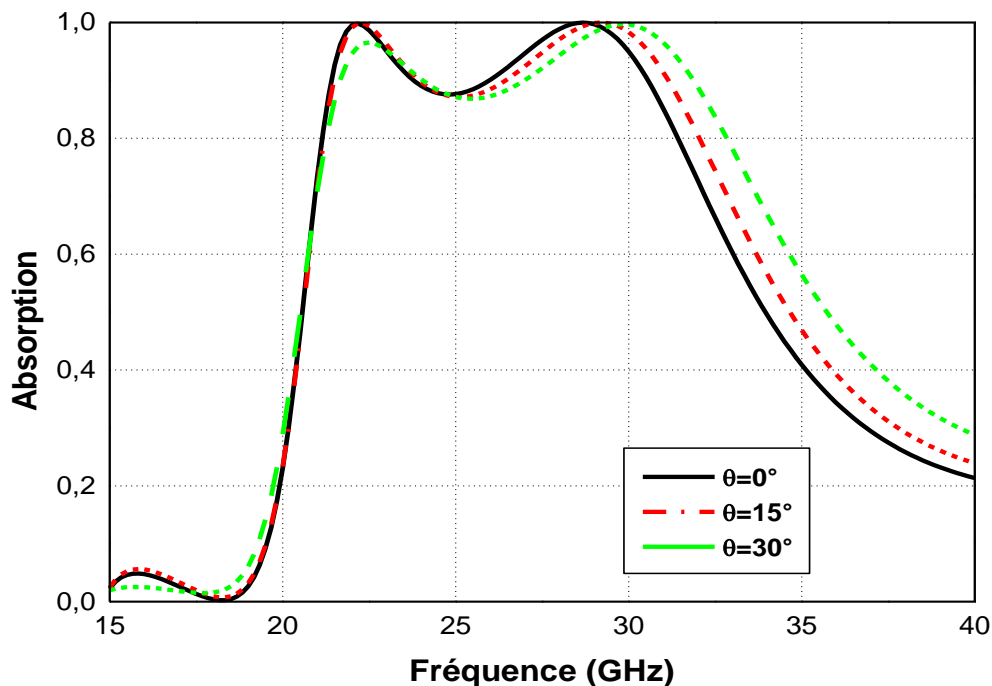


Figure IV.12 : Influence des angles d'incidence sur le coefficient d'absorption

IV.II.4 CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a étudié deux structures d'absorbants fonctionnant dans deux plages de fréquences différents, les caractéristiques d'absorption du premier absorbant multi-bandes et multicouche à base de métamatériaux sont simulé. Les effets séparés et combinés de chaque résonateur individuel sur l'absorption sont étudiés. La réponse combinée est obtenue en prenant en compte les effets de couplage et en combinant les réponses en fréquence superposées de chaque résonateur individuel. La structure multi bandes proposée présente des largeurs de bande d'absorption plus larges ainsi que de meilleurs niveaux d'absorption dans la bande des micro-ondes, y compris les GSM, WIMAX et de communication par satellite.

Les impacts des paramètres importants, la largeur de ligne et l'angle d'incidence sur le niveau d'absorption et la réponse en fréquence de la structure proposée ont également été examinés. Il est observé que la largeur de bande et la réponse en fréquence sont presque indépendantes des angles d'incidence. Par conséquent, l'absorbant métamatériau proposé ayant un niveau d'absorption élevé et une large bande passante avec une nature indépendante de l'angle d'incidence peut être un bon

CHAPITRE IV ABSORBANT METAMATERIAU POUR APPLICATIONS DE LA COLLECTE D'ENERGIE ELECTROMAGNETIQUE

candidat pour l'absorption et les futurs instruments de collecte d'énergie dans les bandes de communication sans fil couramment utilisées en particulier le rayonnement de l'énergie électromagnétique.

Le deuxième absorbant conçu est compact et mince. Le travail s'est concentré sur une nouvelle structure d'MPA à large bande avec différents angles d'incidence compris entre 0° et 30° . Cette structure offre un taux d'absorption élevé (supérieur à 99%). Dans le cadre de travaux futurs, cette étude pourrait être validée par la fabrication et les mesures et son application pourrait être étendue aux petits dispositifs (drones, capteurs, caméras, etc.) avec des systèmes basés sur la collecte d'énergie micro-ondes.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Les métamatériaux ont des phénomènes physiques qui fournissent un aperçu intéressant sur la théorie électromagnétique. Leur capacité à manipuler les ondes électromagnétiques a véritablement donné la vie pour nombreuses applications qui ont révolutionné plusieurs domaines.

Le premier chapitre présente le contexte général de ce mémoire, nous avons défini la notion des métamatériaux, en passant par l'historique de réalisation de ces matériaux surnaturels.

En suite nous avons dressé un rappel sur la théorie et les propriétés de la propagation des ondes électromagnétiques dans ce type de structures. Nous avons terminé ce chapitre avec des exemples d'application.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté une revue des progrès récents sur les théories et les conceptions des absorbants à métamatériaux. Nous avons ensuite présenté un aperçu sur les différents types d'absorbants Electromagnétiques. Les réalisations d'absorbants à métamatériaux à large bande et accordables en fréquence ont également été discutées.

Le troisième chapitre a concerné la conception et simulation d'un absorbant métamateriaux à large bande. Les résultats des simulations ont montré que l'absorbant sera une solution alternative pour une large bande et peut être utilisé pour divers application.

Le quatrième et dernier chapitre est dédié également à des conceptions et simulations de deux types d'absorbant fonctionnant dans des bandes de fréquence différents, ayant comme application la collecte d'énergie électromagnétique dans la bande des micro-ondes.

Dans ce projet de fin d'étude, on réaliser et développer des absorbants à métamatériaux avec des performances extrêmes. Ces absorbants sont des solutions efficaces pour absorber le bruit et champs électromagnétiques indésirables et les transformer pour répondre aux besoins énergétiques de nombreux dispositifs autonomes, capteurs, véhicules, drones, etc...

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] V. G. Vaselago, «“The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ , and μ ”,» pp. 509-514, jan-fev 1968.
- [2] A. H. D. R. W. S. J.P. Pendry, «Trans. Microwave Theory Technol. 47,» p. 2075, 1999.
- [3] A. H. D. R. W. S. J.P. Pendry, «“Low Frequency Plasmons for Thin-Wire Structure”,» *phys. condens. matter*, vol. 10, pp. 4785-4809, 20 mars 1998.
- [4] D. J. R. a. W. J. S. J. Holden, «“Magnetism from conductors and enhanced non-linear phenomena”,» *IEEE Trans. Microwave Theory Technol.*, vol. 47, pp. 2075-2084, 1999.
- [5] A. H. D. R. a. W. S. J. Pendry, «Journal of Physics: Condensed Matter,» “*Low frequency plasmons in thinwire structures*,”, vol. 10, p. 4785–4809, 1998.
- [6] D. V. N. K. a. S. S. D. Smith, «“Direct calculation of permeability and permittivity for a left-handed metamaterial”,» *Applied Physics Letters*, vol. 77, pp. 2246, 2000.
- [7] D. R. S. a. N. Kroll, «“Negative refractive index in left-handed materials”,» *Physical Review Letters*, vol. 85, n° % 114, p. 2933–2936, 2000.
- [8] C. Caloz and T. Itoh, «“Application of the transmission line theory of left-handed (LH) materials to the realization of a microstrip LH line”,» *in Antennas and Propagation Society International Symposium*, vol. 2, p. 412–415, 2002.
- [9] C. Caloz and T. Itoh, «“Left-Handed Transmission Lines and Equivalent Metamaterials for Microwave and Millimeter-Wave Applications”,» *chez 32nd European Microwave Conference*, 2002.
- [10] K. I. , P. C. K. G. V. Eleftheriades, «“Planar negative refractive index media using periodically L-C loaded transmission lines”,» *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 50, n° % 112, p. 2702–2712, dec 2002.
- [11] A. G. a. G. V. Eleftheriades, «“Experimental verification of backward-wave radiation from a negative refractive index metamaterial”,» *Journal of Applied Physics*, vol. 92, n° % 110, p. 5930–5935, 2002.
- [12] A. G. a. G. V. Eleftheriades, «“A backward-wave antenna based on negative refractive index LC networks”,» *chez Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2002.
- [13] D. S. a. D. R. S. J. B. Pendry, «Controlling Electromagnetic Fields,» *Science*, p. 1780–1782, 2006.
- [14] J. R. B. M. A. G. W. L. A. Nicolet, «Transformation methods in computational electromagnetism,» *Journal of Applied Physics*, p. 6036–6038, 1994.
- [15] A. W. a. J. Pendry, «Refraction and geometry in Maxwell’s equations,» *Journal of modern optics*, p. 773–793, 1996.
- [16] J. J. M. B. J. J. S. A. C. J. B. P. A. F. S. D. R. S. D. Schurig, «Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies,» *Science*, n° % 1314(5801), p. 977–980, 2006.
- [17] J. Pendry, «Taking the wraps off cloaking,» *Physics*, n° % 12(95), 2009.

- [18] H. M. a. K. S. Kevin Buell, «A Substrate for Small Patch Antennas Providing Tunable Miniaturization Factors,» *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, n° %154(1) , p. 135.
- [19] S. M. M. P. R. S. P. B.-. I. a. Y. K. Alexander Krasnok, «Towards all-dielectric metamaterials and nanophotonics,» chez *International Society for Optics and Photonics*, 2015.
- [20] J. W. X. L. W. J. P. L. Z. M. Q. Jiaming Hao, «High performance optical absorber based on a plasmonic metamaterial,» *Applied Physics Letters*, n° %196(25) : 251104, 2010.
- [21] T. V. T. a. A. d. L. Alexandre Sellier, «Resonant circuit model for efficient metamaterial absorber,» *Optics express*, n° %121(106) , p. A997–A1006, 2013.
- [22] T. W. M. M. L. L. U. E. M. H. C. S. a. H. G. Na Liu, «Planar metamaterial analogue of electromagnetically induced transparency for plasmonic sensing,» *Nano letters*, n° %110, p. 1103–1107, 2009.
- [23] A. Lustrac, «Les superlentilles permettront d'accéder à une nouvelle optique,» n° %1388, p. 24, juillet 2005.
- [24] T. lucas, «la « superlentille » s'affranchir de la limite de la diffraction,» n° %12964, 19 mai 2005.
- [25] J. B. Pendry, «Negative Refraction Makes a Perfect Lens,» *Phys. Rev. Lett*, p. 3966– 3969, oct 2000.
- [26] J. B. P. a. M. C. K. W. D. R. Smith, «Metamaterials and Negative Refractive Index,» *Science*, n° %1305(5685), p. 788–792, 2004.
- [27] D. R. S. a. S. Schultz, «Physical Review B,» “*Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients*,” vol. 65, n° %119, pp. 1-5, avril 2002.
- [28] Landy, N. I., et al., "Perfect metamaterial absorber," *Physical Review Letters* 100, 207402 (2008).
- [29]. Watts, C. M., X. Liu, and W. J. Padilla, "Metamaterial electromagnetic wave absorbers," *Advanced Materials* 24, OP98 – OP120 (2012).
- [30] Shen, Xiaopeng, et al. "Triple-band terahertz metamaterial absorber: Design, experiment, and physical interpretation." *Applied Physics Letters* 101.15 (2012): 154102.
- [31] Ding, Fei, et al. "Ultra-broadband microwave metamaterial absorber." *Applied physics letters* 100.10 (2012): 103506.
- [32] Sun, Jingbo, et al. "An extremely broad band metamaterial absorber based on destructive interference." *Optics Express* 19.22 (2011): 21155-21162.
- [33] Zhu, Bo, et al. "Switchable metamaterial reflector/absorber for different polarized electromagnetic waves." *Applied Physics Letters* 97.5 (2010): 051906.
- [34] Cheng, Hua, et al. "A polarization insensitive and wide-angle dual-band nearly perfect absorber in the infrared regime." *Journal of Optics* 14.8 (2012): 085102.
- [35] Wei, Xingzhan, et al. "Artificial metal with effective plasma frequency in near-infrared region." *Optics express* 18.4 (2010): 3370-3378.
- [36] Munday, Jeremy N., and Harry A. Atwater. "Large integrated absorption enhancement in plasmonic solar cells by combining metallic gratings and antireflection coatings." *Nano letters* 11.6 (2010): 2195-2201.
- [37] Seo, Byoung-Joon, et al. "Isotropic left handed material at optical frequency with dielectric

- spheres embedded in negative permittivity medium." *Applied physics letters* 88.16 (2006): 161122.
- [38] Rennings, A., C. Caloz, and I. Wolff. "A novel clustered dielectric cubes metamaterial (CDCMTM)." 2006 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. IEEE, 2006.
- [39] Shumpert, John D., William J. Chappell, and Linda PB Katehi. "Parallel-plate mode reduction in conductor-backed slots using electromagnetic bandgap substrates." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 47.11 (1999): 2099-2104.
- [40] Pendry, J. B., L. Martin-Moreno, and F. J. Garcia-Vidal. "Mimicking surface plasmons with structured surfaces." *science* 305.5685 (2004): 847-848.
- [41] Caloz, Christophe, and Tatsuo Itoh. "Transmission line approach of left-handed (LH) materials and microstrip implementation of an artificial LH transmission line." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 52.5 (2004): 1159-1166.
- [42] Eleftheriades, George V., Ashwin K. Iyer, and Peter C. Kremer. "Planar negative refractive index media using periodically LC loaded transmission lines." *IEEE transactions on Microwave Theory and Techniques* 50.12 (2002): 2702-2712.
- [43] Grbic, Anthony, and George V. Eleftheriades. "Periodic analysis of a 2-D negative refractive index transmission line structure." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 51.10 (2003): 2604-2611.
- [44] Caloz, Christophe. "Dual composite right/left-handed (D-CRLH) transmission line metamaterial." *IEEE microwave and wireless components letters* 16.11 (2006): 585-587.
- [45] Vandembem, Cédric, and Jean Pol Vigneron. "Mie resonances of dielectric spheres in facecentered cubic photonic crystals." *JOSA A* 22.6 (2005): 1042-1047
- [46] Sellier, Alexandre. *Absorbants à métamatériaux: étude théorique et expérimentale*. Diss. Université Paris Sud-Paris XI, 2014
- [47] Tanner, Howard A. "Fibrous microwave absorber." U.S. Patent No. 2,977,591. 28 Mar. 1961.
- [48] Dallenbach, W., and W. Kleinstueber. "Reflection and absorption of decimeter-waves by plane dielectric layers." *Hochfreq. u Elektroak* 51 (1938): 152-156.
- [49] Salisbury, W. W. "US Patent, Absorbent body for electromagnetic waves." (1952).
- [50] Naishadham, Krishna, and Prasad K. Kadaba. "Measurement of the microwave conductivity of a polymeric material with potential applications in absorbers and shielding." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 39.7 (1991): 1158-1164.
- [51] Pitman, K. C., Lindley, M.W., Simkin, D., Cooper, J.F. *Radar and Signal Processing*, IEEE Proceedings F 1991, 138, 223 .
- [52] Sugimoto, S., Kondo, S., Okayama, K., Nakamura, H., Book, D., Kagotani, T., Homma, M., Ota, H., Kimura, M., Sato, R. *IEEE Transactions on Magnetics* 1999, 35, 3154
- [53] Mayer, F., US Patent 5872534. 1999.

- [54] B. Wang, T. Koschny, and C. M. Soukoulis .Wide-angle and polarization-independent chiral metamaterial absorber. *Phys. Rev. B*, 80(2009)033108-4
- [55]S. Kawata and V. M. ShalaeV. Tip enhancement. *Advances in nano-optics and nano-photonics*. Elsevier: New York; 2007.
- [56] S. Jahani and Z. Jacob. Photonic skin-depth engineering. *J. Opt. Soc. Am. B*, 32(2015)1346-1353.
- [57] L. Huang and H. Chen. Multiple band and polarization insensitive metamaterial absorber. *Prog. Electromagn. Res.*, 113(2011)103-110.
- [58] B. Zhu, Z. Wang, C. Huang, Y. Feng, J. Zhao, and T. Jiang. Polarization insensitive metamaterial absorber with wide incident angle. *Prog. Electromagn. Res.*, 101(2010)231-239.
- [59] N. I. Landy, S .S. Sajuyigbe, J. J Mock, D. R. Smith and W. J. Padilla. A perfect metamaterial absorber. *Phys. Rev. Lett.*, 100(2008)207402.
- [60] Bilotti F, Nucci L, Vegni L. An SRR based microwave absorber. *Microwave and Optical Technology Letters*. 2006;48:2171-2175.
- [61] Zhu W, Zhao X. Metamaterial absorber with dendritic cells at infrared frequencies. *Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics*. 2009;26:2382-2385.
- [62] Watts CM, Liu X, Padilla WJ. Metamaterial electromagnetic wave absorbers. *Advanced Materials*. 2012;24:OP98-OP120 .
- [63] Zhu W, Zhao X, Gong B, Liu L, Su B. Optical metamaterial absorber based on leaf-shaped cells. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*. 2011;102:147-151 .
- [64] Huang Y, Wen G, Li J, Zhong J, Wang P, Sun Y, Gordona O, Zhu W. Metamaterial absorbers realized in X-band rectangular waveguide. *Chinese Physics B*. 2012;21:117801.
- [65] Zhu W, Rukhlenko ID, Premaratne M. Graphene metamaterial for optical reflection modulation. *Applied Physics Letters*. 2013;102:241914.
- [66] Ra'di Y, Simovski CR, Tretyakov SA. Thin perfect absorbers for electromagnetic waves: Theory, design, and realizations. *Physical Review Applied*. 2015;3:037001.
- [67] Liu X, Starr T, Starr AF, Padilla WJ. Infrared spatial and frequency selective metamaterial with near-unity absorbance. *Physical Review Letters*. 2014;104:207403.
- [68] Park JW, Tuong PV, Rhee JY, Kim KW, Jang WH, Choi EH, Chen LY, Lee YP. Multiband metamaterial absorber based on the arrangement of donut-type resonators. *Optics Express*. 2014;104:207403.
- [69] Zhou W, Wang P, Wang N, Jiang W, Dong X, Hu S. Microwave metamaterial absorber based on multiple square ring structures. *AIP Advances*. 2015;5:117109.
- [70] Gu S, Su B, Zhao X. Planar isotropic broadband metamaterial absorber. *Journal of Applied Physics*. 2013;104:163702.
- [71] Cui Y, Fung KH, Xu J, Ma H, Jin Y, He S, Fang NX. Ultrabroadband light absorption by a sawtooth anisotropic metamaterial slab. *Nano Letters*. 2012;12:1443-1447 .
- [72] Kim YJ, Yoo YJ, Kim KW, Rhee JY, Kim YH, Lee YP. Dual broadband metamaterial absorber. *Optics Express*. 2015;23:3861-3868
- [73] Diem M, Koschny T, Soukoulis CM. Wide-angle perfect absorber/thermal emitter in the terahertz regime. *Physical Review B*. 2009;79:033101.
- [74] Zhu W, Zhao X, Bao S, Zhang Y. Highly symmetric planar metamaterial absorbers based on annular and circular patches. *Chinese Physics Letters*. 2010;27:014204.
- [75] Zhu W, Zhao X. Metamaterial absorber with random dendritic cells. *European Physical Journal Applied Physics*. 2010;50:21101.

- [76] Bouchon P, Koechlin C, Pardo F, Haïdar R, Pelouard J-L. Wideband omnidirectional infrared absorber with a patchwork of plasmonic nanoantennas. *Optics Letters*. 2012;37: 1038-1040 .
- [77] Liu Y, Gu S, Luo C, Zhao X. Ultra-thin broadband metamaterial absorber. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*. 2012;108:19-24.
- [78] Cheng YZ, Wang Y, Nie Y, Gong RZ, Xiong X, Wang X. Design, fabrication and measurement of a broadband polarization-insensitive metamaterial absorber based on lumped elements. *Journal of Applied Physics*. 2012;111:044902.
- [79] Pu M, Wang M, Hu C, Huang C, Zhao Z, Wang Y, Luo X. Engineering heavily doped silicon for broadband absorber in the terahertz regime. *Optics Express*. 2012;20:25513-25519
- [80] Zhu W, Xiao F, Kang M, Sikdar D, Liang X, Geng J, Premaratne M, Jin R. MoS₂ broadband coherent perfect absorber for terahertz waves. *IEEE Photonics Journal*. 2016;8:5502207.
- [81] Ellison W. Permittivity of pure water, at standard atmospheric pressure, over the frequency range 0-25 THz and the temperature range 0-100°C. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*. 2007;36:1-18.
- [82] Xie J, Zhu W, Rukhlenko ID, Xiao F, He C, Geng J, Liang X, Jin R, Premaratne M. Water metamaterial for ultra-broadband and wide-angle absorption. *Optics Express*. 2018;26: 5052-5059
- [83] Yin S, Zhu J, Xu W, Jiang W, Yuan J, Yin G, Xie L, Ying Y, Ma Y. High-performance terahertz wave absorbers made of silicon-based metamaterials. *Applied Physics Letters*. 2015;107:073903.
- [84] Zhu W, Xiao F, Rukhlenko ID, Geng J, Liang X, Premaratne M, Jin R. Wideband visiblelight absorption in an ultrathin silicon nanostructure. *Optics Express*. 2017;25:5781-5786
- [85] Smith DR, Padilla WJ, Vier DC, Nemat-Nasser SC, Schultz S. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. *Physical Review Letters*. 2000;84:4184-4187 .
- [86] Plum E, Fedotov VA, Zheludev NI. Optical activity in extrinsically chiral metamaterial. *Applied Physics Letters*. 2008;93:191911.
- [87] Zhong J, Huang Y, Wen G, Sun H, Gordon O, Zhu W. Dual-band negative permittivity metamaterial based on cross circular loop resonator with shorting stubs. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2012;11:803-806 .
- [88] Fan J, Sun G, Zhu W. Electric and magnetic dipole couplings in split ring resonator metamaterials. *Chinese Physics B*. 2011;20:114101.
- [89] Wen Q-Y, Zhang H-W, Yang Q-H, Chen Z, Long Y, Jing Y-L, Lin Y, Zhang P-X. A tunable hybrid metamaterial absorber based on vanadium oxide films. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2012;45:235106.
- [90] Hand TH, Cummer SA. Frequency tunable electromagnetic metamaterial using ferroelectric loaded split rings. *Journal of Applied Physics*. 2008;103:066105.
- [91] Huang Y, Wen G, Zhu W, Li J, Si L, Premaratne M. Electrically tunable metasurface perfect absorbers for ultrathin mid-infrared optical modulators. *Optics Express*. 2014;22: 16408-16417 .
- [92] Linder J, Halterman K. Graphene-based extremely wide-angle tunable metamaterial absorber. *Scientific Reports*. 2016;6:31225.

- [93] Yao Y, Shankar R, Kats MA, Song Y, Kong J, Loncar M, Capasso F. Electrically tunable metasurface perfect absorbers for ultrathin mid-infrared optical modulators. *Nano Letters*. 2014;14:6526-6532 .
- [94] Shrekenhamer D, Chen W-C, Padilla WJ. Liquid crystal tunable metamaterial absorber. *Physical Review Letters*. 2013;110:177403.
- [95] Mkhitarian VK, Ghosh DS, Rude M, Canet-Ferrer J, Maniyara RA, Gopalan KK, Pruneri V. Tunable complete optical absorption in multilayer structures including Ge₂ Sb₂ Te₅ without lithographic patterns. *Advanced Optical Materials*. 2017;5:1600452 148 *Metamaterials and Metasurfaces*.
- [96] Zhang F, Feng S, Qiu K, Liu Z, Fan Y, Zhang W, Zhao Q, Zhou J. Mechanically stretchable and tunable metamaterial absorber. *Applied Physics Letters*. 2015;106:091907.
- [97] Pitchappa P, Ho CP, Kropelnicki P, Singh N, Kwong D-L, Lee C. Micro-electromechanically switchable near infrared complementary metamaterial absorber. *Applied Physics Letters*. 2014;104:201114.
- [98] Zhu W, Huang Y, Rukhlenko ID, Wen G, Premaratne M. Configurable metamaterial absorber with pseudo wideband spectrum. *Optics Express*. 2012;20:6616-6621.
- [99] Zhang Y, Feng Y, Zhu B, Zhao J, Jiang T. Graphene based tunable metamaterial absorber and polarization modulation in terahertz frequency. *Optics Express*. 2014;24:22743-22734.
- [100] Zhu W, Xiao F, Kang M, Sikdar D, Premaratne M. Tunable terahertz left-handed metamaterial based on multi-layer graphene-dielectric composite. *Applied Physics Letters*. 2014;104:051902.
- [101] Zhu W, Rukhlenko ID, Si L, Premaratne M. Graphene-enabled tunability of optical fishnet metamaterial. *Applied Physics Letters*. 2013;102:121911.
- [102] Chong YD, Ge L, Cao H, Stone AD. Coherent perfect absorbers: Time-reversed lasers. *Physical Review Letters*. 2010;105:053901.
- [103] Wan W, Chong YD, Ge L, Noh H, Stone AD, Cao H. Time-reversed lasing and interferometric control of absorption. *Science*. 2011;331:889-892.
- [104] Kang M, Chong YD, Wang H-T, Zhu W, Premaratne M. Critical route for coherent perfect absorption in a fano resonance plasmonic system. *Applied Physics Letters*. 2014;105:131103.
- [105] Pu M, Feng Q, Wang M, Hu C, Huang C, Ma X, Zhao Z, Wang C, Luo X. Ultrathin broadband nearly perfect absorber with symmetrical coherent illumination. *Optics Express*. 2012;20:2246-2254.
- [106] Feng S, Halterman K. Coherent perfect absorption in epsilon-near-zero metamaterials. *Physical Review B*. 2012;86:165103.
- [107] Gutman N, Sukhorukov AA, Chong YD, de Sterke CM. Coherent perfect absorption and reflection in slow-light waveguides. *Optics Letters*. 2013;38:4970-4973 .
- [108] Kang M, Liu F, Li T-F, Guo Q-H, Li J, Chen J. Polarization-independent coherent perfect absorption by a dipole-like metasurface. *Optics Letters*. 2013;38:3086-3088 .
- [109] Zhu W, Xiao F, Kang M, Premaratne M. Coherent perfect absorption in an all-dielectric metasurface. *Applied Physics Letters*. 2016;108:121901.
- [110] Zhu W, Rukhlenko ID, Xiao F, He C, Geng J, Liang X, Premaratne M, Jin R. Multiband coherent perfect absorption in a water-based metasurface. *Optics Express*. 2017;25:15737-15745.
- [111] Fan Y, Zhang F, Zhao Q, Wei Z, Li H. Tunable terahertz coherent perfect absorption in a monolayer graphene. *Optics Letters*. 2014;39:6269-6272.

- [112]. E. Erfani, M. Niroom-Jazi, and S. Tatu, *IEEE Trans. Antennas Propag.* 64, 1968 (2016).
- [113]. M.R. Hashemi, S. Cakmakyapan, and M. Jarrahi, *Rep. Prog. Phys.* 80, 1 (2017).
- [114]. P. Vura, A. Rajput, and K.V. Srivastava, *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 15, 282 (2015).
- [115]. A. Rajput and K.V. Srivastava, *J. Appl. Phys.* 116, 1 (2014).
- [116]. A.P. Saghati, J.S. Batra, J. Kameoka, and K. Entesari, *IEEE Trans. Microw. Theory Technol.* 65, 2558 (2017).
- [117]. K. Song and P. Mazumder, *IEEE Sens. J.* 13, 3377 (2013).
- [118]. M. Agarwal and M.K. Meshram, *AIP Adv.* 8, 1 (2018).
- [119]. A. Sakurai, B. Zhaoa, and Z. M. Zhang, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* 149, 33 (2014).
- [120]. Y. Khanna and Y.K. Awasthi, *J. Electron. Mater.* 49, 385 (2020).
- [121]. T. Beeharry, R. Yahiaoui, K. Selemani, and H.H. Ouslimani, *Sci. Rep.* 8, 1 (2018).
- [122]. W. Li, L. Lin, C. Li, Y. Wang, and J. Zhang, *Resul. Phys.* 12, 278 (2019).
- [123]. K. Iwaszczuk, A. C. Strikwerda, K. Fan, X. Zhang, R. D. Averitt, and P.U. Jepsen, *Opt. Expr.* 20, 635 (2012).
- [124]. F. Costa, A. Monorchio, and G. Manara, *IEEE Electromagn. Compat. Mag.* 5, 67 (2016).
- [125]. S. Ghosh, S. Bhattacharyya, D. Chaurasiya, and K.V. Srivastava, *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 14, 1172 (2015).
- [126]. A.V. Trukhanov, M.A. Almessiere, A. Baykal, S.V. Trukhanov, Y. Slimani, D.A. Vinnik, V.E. Zhivulin, A.Y. Starikov, D.S. Klygach, M.G. Vakhitov, T.I. Zubar, D.I. Tishkevich, E.L. Trukhanova, and M. Zdorovets, *J. Alloy. Compd.* 788, 1193 (2019).
- [127]. A.V. Trukhanov, K.A. Astapovich, M.A. Almessiere, V.A. Turchenko, E.L. Trukhanova, V.V. Korovushkin, A.A. Amirov, M.A. Darwish, D.V. Karpinsky, D.A. Vinnik, D.S. Klygach, M.G. Vakhitov, M.V. Zdorovets, A.L. Kozlovskiy, and S.V. Trukhanov, *J. Alloy. Compd.* 822, 1 (2020).
- [128]. A. Khoshniat and R. Abhari, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* 61, 1314 (2019).
- [129]. Y. Peng, L.V. Besteiro, Y. Huang, W. Jiang, F. Lan, H.H. Tan, C. Jagadish, G.P. Wiederrecht, A.O. Govorov, and Z. Wang, *Adv. Opt. Mater.* 7, 1 (2018).
- [130]. Z. Liao, R. Gong, Y. Nie, T. Wang, and X. Wang, *Photon. Nanostruct.* 9, 287 (2011)
- [131] M.C.K. Wiltshire, J.B. Pendry, I.R. Young, D.J. Larkman, D.J. Gilderdale, J.V. Hajnal, Micro structured magnetic materials for RF flux guides in magnetic resonance imaging, *Science* 291 (5505) (2001) 849–851.
- [132] H.J. Lezec, J.A. Dionne, H.A. Atwater, Negative refraction at visible frequencies, *Science* 316 (5823) (2007) 430–432.
- [133] J.H. Lv, B.R. Yan, M.H. Liu, X.W. Hu, Simultaneous normal and parallel incidence planar left-handed metamaterial, *Phys. Rev. E* 80 (2) (2009) 026605.
- [134] H.O. Moser, B.D.F. Casse, O. Wilhelmi, B.T. Saw, Terahertz response of a micro fabricated rod–split-ring-resonator electromagnetic metamaterial, *Phys. Rev. Lett.* 94 (6) (2005) 063901.
- [135] E. Unal, F. Dincer, E. Tetik, M. Karaaslan, M. Bakir, C. Sabah, Tunable perfect metamaterial absorber design using the golden ratio and energy harvesting and sensor applications, *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* 26 (2015) 9735–9740.

-
- [136] M. Karaaslan, M. Bakir, Chiral metamaterial based multifunctional sensor applications, *Prog. Electromagn. Res.* 149 (2014) 55–67.
- [137] Y. Xie, X. Fan, J.D. Wilson, R.N. Simons, Y. Chen, J.Q. Xiao, A universal electromagnetic energy conversion adapter based on a metamaterial absorber, *Sci. Rep.* 4 (2014).
- [138] A. A. G. Amer, S. Z. Sapuan, N. Nasimuddin, A. Alphones and N. B. Zinal, "A Comprehensive Review of Metasurface Structures Suitable for RF Energy Harvesting," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 76433-76452, 2020.
- [139] Swett, D.W. Near Zero Index Perfect Metasurface Absorber using Inverted Conformal Mapping. *Sci Rep* 10, 9731 (2020).
- [140] M. Agiwal, A. Roy and N. Saxena, "Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 3, pp. 1617-1655, thirdquarter 2016, doi: 10.1109/COMST.2016.2532458.
- [141] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim and Z. Han, "Wireless Networks with RF Energy Harvesting: A Contemporary Survey," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 2, pp. 757-789, Secondquarter 2015.