

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

en Télécommunication

Spécialité : Réseaux & Télécommunications

Présenté par

Senhadji Mohamed Aymen

Conception et optimisation d'un absorbant électromagnétique large bande à base de métamatériaux

Proposé et encadré par : Dr. Zoubiri Bachir & Dr. Hebib Sami

Année Universitaire 2021 – 2022

Remerciements

Au premier lieu, je tiens à remercier DIEU qui m'a donné la volonté, la patience, le courage et la santé pour terminer ce travail.

*Je remercie particulièrement mon encadreur **Dr. Zoubiri Bachir** et mon Co-promoteur **Dr. Hebib Sami** pour leurs aides et leurs orientations précieuses, tout le long de ce projet.*

*Mes remerciements sincères vont au **Centre de Développement des Technologies Avancées**, pour m'avoir permis d'effectuer mon projet de fin d'étude et de m'avoir confié des responsabilités pour cette étude qui m'a permis d'enrichir ma formation.*

Mes remerciements les plus vifs s'adressent aussi à Monsieur le président et les membres de jury d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer mon travail.

J'exprime également ma gratitude à tous les enseignants qui ont collaboré à ma formation universitaire, sans omettre bien sûr de remercier profondément tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation du présent travail.

Et enfin, je remercie aussi mes chers parents et familles qui m'ont donné leurs aides, patience et leurs soutiens et leurs sacrifices qui m'ont poussé à y aller jusqu' au bout de cette tâche.

Je dédie ce modeste travail :

*À ma chère et tendre mère, qui a autant sacrifié pour me voir atteindre ce
jour.*

*À mon père, pour tout l'effort et le soutien incessant qui m'a toujours
apporté.*

*À toutes mes sœurs qui n'ont pas cessées de me conseiller, encouragées et
soutenir tout au long de mes études, que dieu les protèges et leur offre le
bonheur.*

A Houari pour m'avoir aidé dans mes études.

*À mon meilleur ami Youcef qui était toujours là pour moi et qui m'a
toujours encouragé.*

ملخص:

جذبت ماصات المواد الخارقة الاهتمام بسبب حقيقة أنها يمكن أن تحقق امتصاصًا كاملاً للموجات الكهرومغناطيسية. يعالج مشروع التخرج هذا هذه الحاجة من خلال التركيز على التصميم، ومحاكاة الماصات ذات المواد الخارقة ذات النطاق العريض. تم تحديد أبعاد المواد الخارقة ومحاكاتها. تظهر نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها الأداء السليم لهذه الماصات.

المصطلحات: ماصات؛ المواد الخارقة؛ الموجات الكهرومغناطيسية؛ عريضة النطاق.

Résumé :

Les absorbants à métamatériaux ont suscité un grand intérêt en raison du fait qu'ils peuvent réaliser une absorption complète des ondes électromagnétiques. Ce travail de projet de fin d'études répond à ce besoin en s'intéressant à la conception, simulation d'absorbants à métamatériaux large bande. Dans ce contexte, deux absorbants larges bandes à métamatériaux ont été dimensionnées et simulées. Les résultats de simulations obtenues montrent le bon fonctionnement de ces absorbants.

Mots clés : absorbants ; métamatériaux ; électromagnétiques ; large bande.

Abstract :

Metamaterial absorbers have attracted interest due to the fact that they can achieve complete absorption of electromagnetic waves. This end-of-studies project work responds to this need by focusing on the design and simulation of broadband metamaterial absorbers. In this context, two broadband metamaterial absorbers were sized and simulated. The simulation results obtained show the good performance of these absorbers.

Keywords: Metamaterial; absorbers; electromagnetic; broadband.

- Table des matières -

Introduction générale	01
Chapitre 1 : Généralités et état de l'art sur les métamatériaux.	
1.1 Introduction	02
1.2 La théorie des métamatériaux.....	02
1.2.1 Aspects théoriques.....	02
1.3 Classification et propriétés.....	03
1.3.1 L'effet sur la loi de Snell.....	04
1.4 Structure de la cellule unitaire.....	05
1.4.1 Réalisation des métamatériaux.....	05
a. ϵ négatif	05
b. μ négatif	06
1.5 Applications.....	06
1.5.1 Les métamatériaux comme antennes	06
1.5.2 Les métamatériaux comme absorbants	07
1.5.3 Les métamatériaux comme superlentilles.....	08
1.5.4 Camouflage métamatériau.....	09
1.5.5 Les métamatériaux comme capteurs.....	09
1.5.6 Les métamatériaux comme compensateur de phase.....	10
1.6 Conclusion.....	10
Chapitre 2 : Les absorbants à métamatériaux.	
2.1 Introduction.....	11
2.1.1 Absorbants à métamatériaux	11
2.2 Mécanisme d'absorption.....	12
2.2.1 Résonances magnétiques et électriques.....	13
2.2.2 Adaptation de l'impédance.....	14
2.2.3 Réduction de la fréquence du plasma.....	14
2.3 Conception d'absorbants à métamatériaux.....	15
2.3.1 Fréquences des micro-ondes.....	16
2.3.2 Fréquences TéraHertz.....	20
2.3.3 Fréquences optiques.....	22
2.4 Conclusion.....	24

Chapitre 3 : Simulations des absorbants à métamatériaux.

3.1	Introduction.....	25
3.2	Un absorbant à métamatériau ultra-fin et à large bande.....	25
3.2.1	Description de l'absorbant à métamatériau.....	25
3.2.2	Résultats de simulation.....	26
a.	Coefficient de réflexion.....	26
b.	Coefficient d'absorption.....	27
c.	Champs électriques et magnétiques.....	28
3.2.3	Etudes paramétriques.....	29
a.	Paramètre W	29
b.	Paramètre L	29
3.3	Absorbant de micro-ondes à large bande avec une structure en anneau à double fente	30
3.3.1	Description de l'absorbant à métamatériau.....	30
3.3.2	Résultats de simulation.....	31
a.	Coefficient de réflexion.....	31
b.	Coefficient d'absorption.....	32
c.	Champs électriques et magnétiques.....	32
3.3.3	Etudes paramétriques.....	33
a.	Paramètre r_{inner}	34
b.	Paramètre r_{outer}	34
3.4	Conclusion.....	35
	Conclusion générale	36
	Bibliographie	37
	Annexe	41

- *Liste des figures* -

Figure 1.1	Classification des matériaux sur la base de μ et ϵ	03
Figure 1.2	Premier réseau de structures d'essai à gauche réalisé par le Groupe de San Diego (D R Smith).....	04
Figure 1.3	Comparaison de la loi de Snell dans des milieux différents.....	05
Figure 1.4	(a) Combinaison de fil et de SRR comme cellule unitaire ,(b) SRR circulaire de Pendry (1999), (c) Circuit équivalent du SRR circulaire.....	05
Figure 1.5	Combinaison de fils fins et de SRR (Aos Al-waidh 2009).....	06
Figure 1.6	(a) Image 3D de l'alimentation CPW d'une antenne (b) Résultat d'une antenne patch simple (c) Résultat de l'antenne à métamatériau.....	07
Figure 1.7	(a)La cellule unitaire est montrée avec ses composants (b) Résultats après la fabrication (d) Résultats après simulation.....	08
Figure 1.8	(a) Récupération des ondes propagées (b) Amplification de l'onde évanescence.....	09
Figure 1.9	Occultation.....	09
Figure 1.10	Cellules unitaires à métamatériaux utilisées pour le capteur (a) SRR multiple (b)SRR de Sierpinsky (c) Résonateur en spirale.....	10
Figure 2.1	Applications des absorbants à métamatériaux en fonction des différentes fréquences.....	12
Figure 2.2	Résonateur à anneau fendu.....	13
Figure 2.3	Adaptation d'impédance dans un absorbant à métamatériau.....	14
Figure 2.4	Absorbants parfaits à métamatériaux (a) Anneau et (b) Patch.....	15
Figure 2.5	Spectre électromagnétique.....	16
Figure 2.6	(a) Structure schématique d'un absorbant, (b) Fil coupé, (c) Cellule unitaire montrant la direction de propagation des ondes. (d) Spectres d'absorption en fonction de la fréquence et de l'angle d'incidence. (e) $A(\omega)$ simulé avec des couches MM croissantes ; les encarts montrent les pertes simulées à la résonance : La perte ohmique (surface) est représentée dans le panneau d'encart de gauche, et la perte diélectrique (volume) est à droite (2008).....	17
Figure 2.7	Schéma de l'absorbant à métamatériau.....	18

Figure 2.8	Schéma d'un double SRR.....	21
Figure 2.9	(a) Schéma de l'absorbant à large bande à cellule unitaire, (b) Image nano fabriquée de l'absorbant à métamatériau.....	23
Figure 2.10	(a) Absorptivité simulée et (b) La mesure de l'absorptivité de la conception..	24
Figure 3.1	Schéma de principe de l'unité de base proposée.....	25
Figure 3.2	Le coefficient de réflexion S11 de l'absorbant.....	26
Figure 3.3	Performances d'absorption et de réflectance simulées.....	27
Figure 3.4	Champs électriques a (a) 19.54GHz.(b) 21.43GHz.....	28
Figure 3.5	Champs magnétiques a (a) 19.54GHz.(b) 21.43GHz.....	28
Figure 3.6	Coefficient d'absorption pour différentes valeurs de w.	29
Figure 3.7	Coefficient d'absorption pour différentes valeurs de L.	30
Figure 3.8	Schéma de principe de l'unité de base proposée.....	30
Figure 3.9	Le coefficient de réflexion S11 de l'absorbant.....	31
Figure 3.10	Performances d'absorption et de réflectance simulées.....	32
Figure 3.11	Champs électriques a (a) 5.74GHz.(b) 12.57GHz.....	33
Figure 3.12	Champs magnétiques a (a) 5.74GHz.(b) 12.57GHz.....	33
Figure 3.13	Coefficient d'absorption pour différentes valeurs de r_{inner}	34
Figure 3.14	Coefficient d'absorption pour différentes valeurs de r_{outer}	34

- Liste des tableaux -

Tableau 3.1	Les dimensions géométriques de l'unité	26
Tableau 3.2	Les dimensions géométriques de l'unité	31

- Listes des acronymes et abréviations -

CPW : Coplanar Waveguide.

dB : Décibel.

DNG : Double Negative Material.

DPS : Double Positive.

DSRR : Double-Split Ring Resonator.

EBG : Electromagnetic BandGap.

EM : Electromagnétique.

ENG : Epsilon Negative Material.

FR-4 : Flame Resistant 4.

IR : Infrarouge.

Mid-IR : Infrarouge Moyen.

MMA : Metamaterial-Based Absorber

NIM : Negative Index Material.

RF : Radiofréquence.

RHM : Right Handed Material.

SER : Surface équivalente Radar.

SRR : Split-Ring Resonator.

Introduction générale

L'essor récent des métamatériaux ouvre de nouvelles opportunités pour les absorbants permettant la création de matériaux avec des valeurs efficaces de permittivité et de perméabilité qui ne sont pas disponibles dans les matériaux naturels.

Les absorbants large bande sont indispensables dans le champ militaire, avec le développement de la technologie de détection, l'utilisation de matériaux absorbants pour atteindre l'objectif d'améliorer la viabilité des systèmes d'armes furtives a une signification importante. Bien qu'il soit facile à obtenir des absorbants à métamatériaux avec bande unique ou multi bande atteignant le haut débit, obtenir un absorbant à métamatériaux large bande reste un défi.

L'objectif de ce projet de fin d'études est la conception des absorbants électromagnétiques large bandes à base de métamatériaux. Deux absorbants ont été ainsi proposés et simulés.

- Ce mémoire est organisé comme suit :

Le premier chapitre présente l'état de l'art sur les métamatériaux ainsi que leurs applications potentielles.

Dans le deuxième chapitre, les absorbants à métamatériaux sont décrits en détaillant leur principe de fonctionnement, leurs mécanisme d'absorptions ainsi que leurs bandes de fréquences de fonctionnement.

Le dernier chapitre est consacré à la simulation des deux absorbants à métamatériaux large bande. Les résultats de simulations des deux absorbants sont présentés et discutés. Des études paramétriques ont été également effectuées pour ces deux absorbants.

Chapitre 1 Généralités et état de l'art sur les métamatériaux

1.1 Introduction

Les métamatériaux sont définis par R. M. Walser en 2001 comme des composites macroscopiques ayant une architecture cellulaire périodique, tridimensionnelle et artificielle conçu pour produire une combinaison optimisée non disponible dans la nature, de deux ou plusieurs réponses à une excitation spécifique, il s'agit de structures périodiques artificielles dont les constantes de réseau sont beaucoup plus petites que la longueur d'onde du rayonnement incident. Ainsi, elles offrent des caractéristiques d'indice de réfraction négatif [1].

1.2 La théorie des métamatériaux

Ce mot est une combinaison de "méta" et de "matériau", Méta est un mot grec qui signifie quelque chose au-delà, altéré, changé ou quelque chose d'avancé (Sihvola 2007) [2]. De manière précise, les métamatériaux peuvent voir leurs propriétés électromagnétiques modifiées au-delà de ce que l'on peut trouver dans la nature. Ils sont généralement des matériaux fabriqués par l'homme.

1.2.1 Aspects théoriques

Le métamatériau peut être caractérisé en utilisant les équations de Maxwell (Davi Bibiano Brito 2010) [3]. La transformation des équations de Maxwell joue un rôle important dans la description des métamatériaux qui est donné ci-dessous Equation de Maxwell dans le domaine temporel :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (1.1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (1.2)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \quad (1.3)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + j\omega\epsilon\vec{E} \quad (1.4)$$

\vec{E} Représente le champ électrique, \vec{H} le champ magnétique, \vec{B} l'induction magnétique et \vec{D} l'induction électrique, μ la perméabilité magnétique, ϵ la permittivité électrique, ω la pulsation, ρ la densité (volumique) de charge électrique.

Pour l'onde plane, ces équations peuvent être réduites à :

$$\vec{k} \times \vec{E} = \omega\mu\vec{H} \quad (1.5)$$

$$\vec{k} \times \vec{H} = -\omega\epsilon\vec{E} \quad (1.6)$$

Par conséquent, pour ϵ et μ positifs, \vec{E} , \vec{H} et \vec{k} forment un système orthogonal à droite.

Quand ϵ et μ sont négatifs les équations (1.5) et (1.6) deviennent :

$$\vec{k} \times \vec{E} = -\omega\mu\vec{H} \quad (1.7)$$

$$k \times \vec{H} = \omega\epsilon\vec{E} \quad (1.8)$$

Le cas ci-dessus montre des matériaux gauches et leur direction opposée et le triplet gauche triplet de \vec{E} , \vec{H} et \vec{k} .

1.3 Classification et propriétés

Les matériaux peuvent être classés sur la base de ϵ et μ en quatre quadrants comme le montre la figure 1.

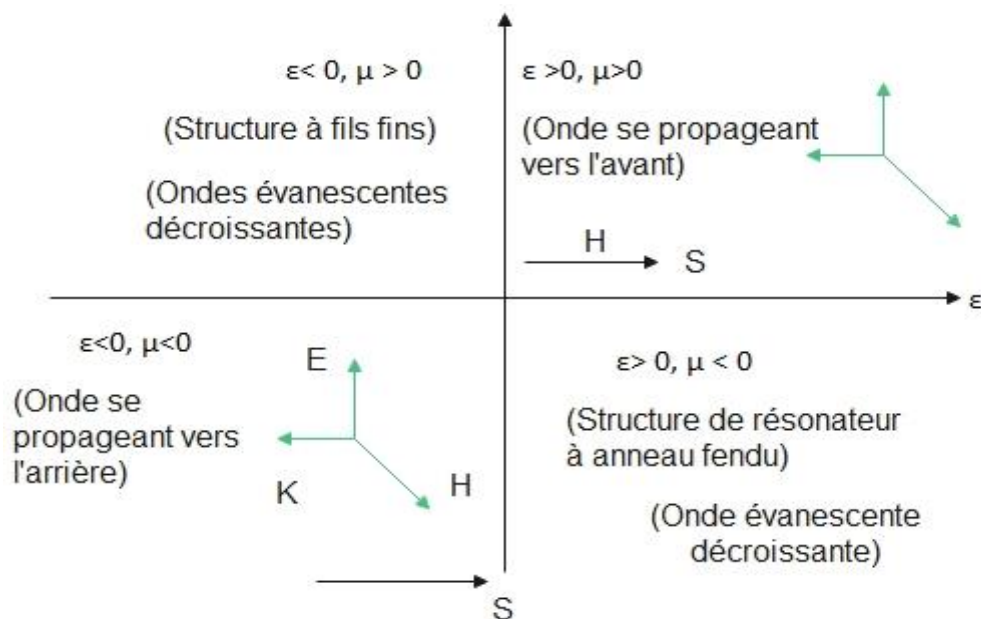


Figure 1.1 Classification des matériaux sur la base de μ et ϵ .

Le premier quadrant ($\epsilon > 0, \mu > 0$) représente le matériau droitier (RHM). La propagation vers l'avant de l'onde a lieu dans le premier quadrant. Il s'agit d'un matériau couramment utilisé. Il suit la règle du pouce droit pour la direction de la propagation de l'onde (S.Anantha Ramakrishna 2005)[4].

Le deuxième quadrant ($\epsilon < 0$ et $\mu > 0$) décrit les plasmas électriques qui supportent des ondes évanescentes. Il est également appelé matériau ENG (epsilon négatif). Le quatrième quadrant ($\epsilon > 0$ et $\mu < 0$) supporte également des ondes évanescentes, correspondant au matériau MNG (mu negative material) μ .

Le troisième quadrant ($\epsilon < 0, \mu < 0$) représente le métamatériau, également appelé matériau gaucher ou matériau doublement négatif (DNG). Il suit la règle du gaucher car la propagation des ondes s'y fait dans le sens inverse. En raison de la valeur négative de μ et ϵ , l'indice de réfraction du milieu est calculé comme étant négatif. Et est également appelé NIM (negative index material). Le vecteur électrique E, le vecteur électromagnétique H et le vecteur d'onde k forment le triplet de gauche comme le montre la figure 1.1. En utilisant la propriété du troisième quadrant, la première structure de test gaucher utilisée est la combinaison d'un matériau à permittivité négative (fil fin) et une perméabilité négative (SRR).



Figure 1.2 Premier réseau de structures d'essai à gauche réalisé par le Groupe de San Diego (D R Smith) [5].

1.3.1 L'effet sur la loi de Snell

Dans le troisième quadrant, l'indice de réfraction de la loi de Snell est négatif. N. Engheta (2006) [6] décrit qu'une onde incidente fait face à une réfraction négative à l'interface vers l'intérieur après s'être réfractée dans le milieu, ce qui est contraire à l'indice positif. Comme le montre la figure 1.3. La lumière est réfractée d'une manière contraire par rapport au matériau normal à angle droit.



Figure 1.3 Comparaison de la loi de Snell dans des milieux différents.

1.4 Structure de la cellule unitaire

Les métamatériaux sont généralement mis en œuvre dans une structure périodique. C'est une option souple pour les concevoir et les fabriquer par une structure récurrente de cellules unitaires. Une cellule unitaire est une combinaison d'un SRR et d'une structure filaire, comme le montre la figure 1.4 [7]. Un réseau de cellules unitaires peut être utilisé pour obtenir cette structure.

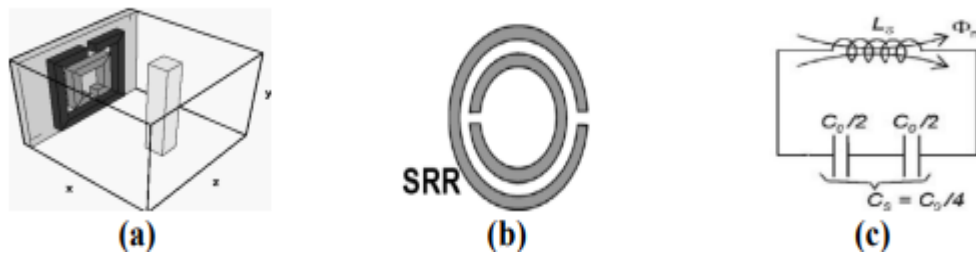


Figure 1.4 (a) Combinaison de fil et de SRR comme cellule unitaire (b) SRR circulaire de Pendry (1999) [7] (c) Circuit équivalent du SRR circulaire.

1.4.1 Réalisation des métamatériaux

a. ϵ négatif

Le métamatériau utilisé comme un maillage métallique de fils fins pour obtenir une valeur négative de ϵ . La permittivité effective peut être exprimée comme suit :

$$\epsilon_{eff} = 1 - \omega_p^2 / \omega^2 \quad (1.9)$$

Où ω_p est la fréquence du plasma et ω est la fréquence de la propagation de l'onde électromagnétique. D'après cette équation, la permittivité effective est négative lorsque la fréquence est inférieure à la fréquence du plasma. Lorsque l'on travaille à la fréquence du plasma, la permittivité effective est nulle, ce qui donne un indice de réfraction nul. Des fils métalliques minces d'aluminium, d'argent et d'or sont disposés périodiquement comme le montre la figure 1.5 [8].

b. μ négatif

Un réseau de résonateurs à anneau fendu (SRR) est disposé périodiquement. Un résonateur à anneau fendu est construit en ayant deux anneaux métalliques concentriques, avec un espace dans chaque anneau et les espaces sont séparés de 180° . L'écart entre l'anneau intérieur et l'anneau extérieur agit comme un condensateur, tandis que les anneaux eux-mêmes agissent comme une inductance, ce qui donne un résonant.



Figure 1.5 Combinaison de fils fins et de SRR (Aos Al-waidh 2009) [8].

1.5 Applications

1.5.1 Les métamatériaux comme antennes

Les revêtements métamatériaux ont été utilisés pour améliorer les propriétés de rayonnement et d'adaptation d'antennes dipôles électriques et magnétiques de petite taille. Le métamatériau augmente la puissance rayonnée. Les plus récentes antennes à métamatériaux rayonnent 95% du signal radio d'entrée à 350 MHz. Les antennes métamatériaux expérimentales sont aussi petites qu'un cinquième de longueur d'onde. Les antennes patch avec un revêtement en métamatériaux ont une directivité accrue. L'antenne cornet plat avec ouverture plate construite en métamatériau à indice zéro a l'avantage d'une directivité améliorée. Les métamatériaux à indice zéro peuvent être utilisés pour réaliser des antennes à haute directivité. Parce qu'un signal se propageant

dans un métamatériau d'indice zéro stimulera une structure de champ spatialement statique qui varie dans le temps, la phase en tout point. Un métamatériau d'indice zéro aura la même valeur constante une fois l'état d'équilibre atteint. Le métamatériau peut améliorer le gain et réduire la perte de retour d'une antenne patch. Une comparaison d'antennes inspirées par les métamatériaux est donnée ci-dessous et est réalisée par M.A. Wan Nordin et al (2012) [9].

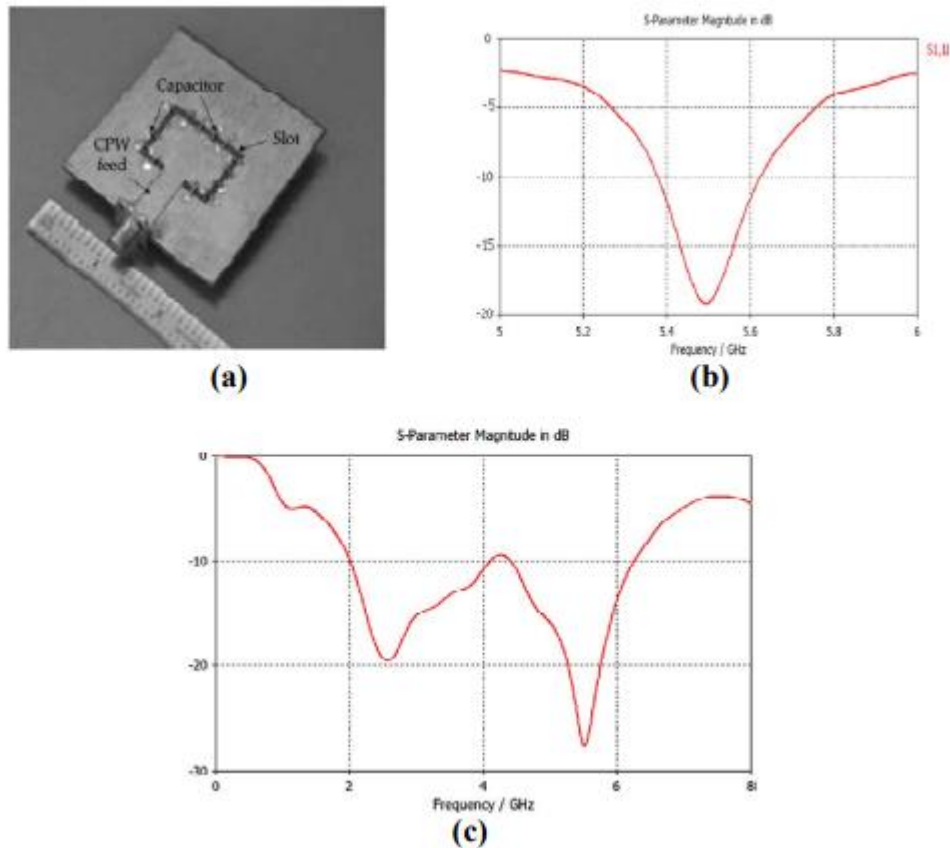


Figure 1.6 (a) Image 3D de l'alimentation CPW d'une antenne (b) Résultat d'une antenne patch simple (c) Résultat de l'antenne à métamatériau [9].

1.5.2 Les métamatériaux comme absorbants

Le premier absorbant à base de métamatériaux de Landy (2008) [10] utilise trois couches, deux résonateurs conducteurs et un substrat diélectrique et montre une absorptivité simulée de 96% à 11.48 GHz comme le montre la figure 1.7[10]. Expérimentalement, Landy a été capable d'atteindre une absorptivité de 88%.

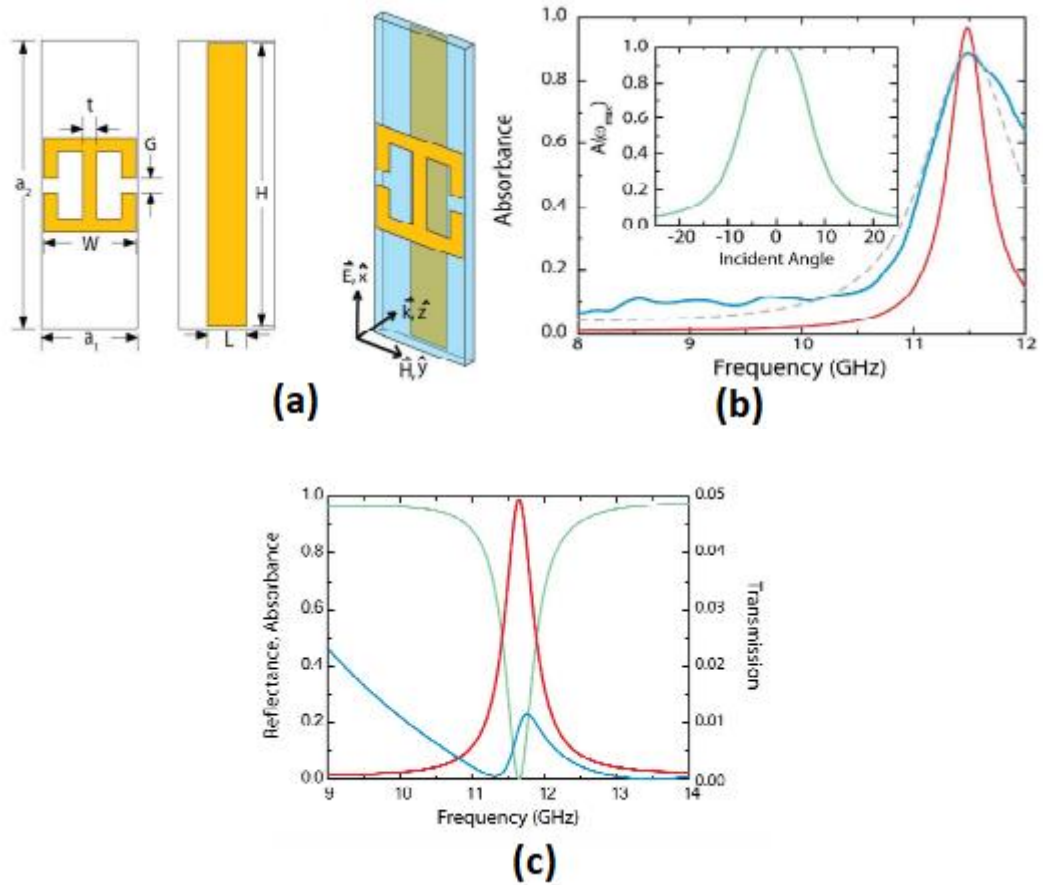


Figure 1.7 (a) La cellule unitaire est montrée avec ses composants (b) Résultats après la fabrication (c) Résultats après simulation [10].

1.5.3 Les métamatériaux comme superlentilles

Les superlentilles utilisent des métamatériaux pour dépasser la limite de diffraction. Ramakrishna (2005) [4] a montré qu'elles possèdent des capacités de résolution qui vont au-delà des microscopes ordinaires. Les matériaux optiques conventionnels souffrent d'une limite de diffraction parce que seules les composantes qui se propagent sont transmises à partir d'une source lumineuse. Les composantes non propagées, les ondes évanescentes, ne sont pas transmises. Une façon d'améliorer la résolution est d'augmenter l'indice de réfraction, mais elle est limitée par la disponibilité de matériaux à indice élevé. La voie de la superlentille est son aptitude à améliorer et récupérer de manière significative les ondes évanescentes qui transportent l'information à de très petites échelles. Aucune lentille n'est encore capable de reconstituer complètement toutes les ondes évanescentes émises par un objet. Le défi futur est donc de concevoir une superlentille capable de constituer toutes les ondes évanescentes pour obtenir une image parfaite [11].

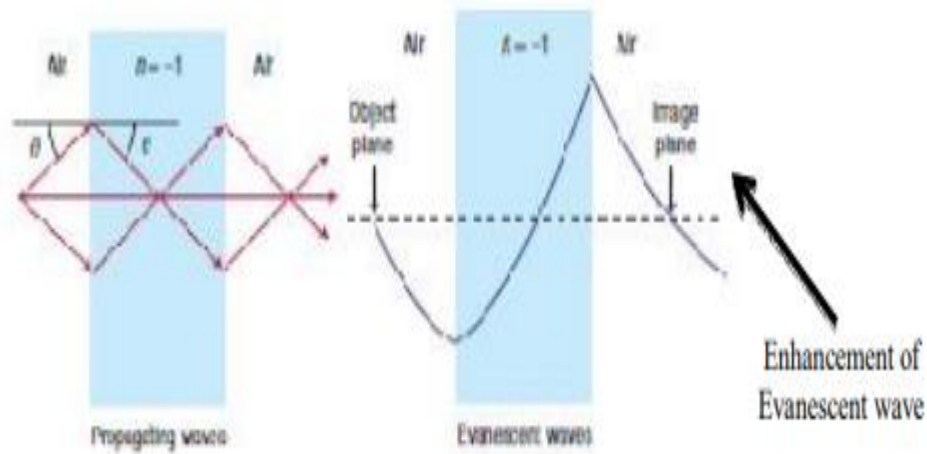


Figure 1.8 (a) Récupération des ondes propagées (b) Amplification de l'onde évanescente [11].

1.5.4 Camouflage métamatériau

L'occultation peut être réalisée par l'annulation du champ électrique et magnétique générés par un objet ou en guidant l'onde électromagnétique autour de l'objet. Guider l'onde signifie transformer le système de coordonnées de telle sorte que le champ électromagnétique à l'intérieur de l'écran creux soit nul, ce qui fait disparaître la région à l'intérieur de la coquille. L'écran métamatériau basé sur le concept de la transformation des coordonnées est décrit par Adnan Noor (2010) [12].

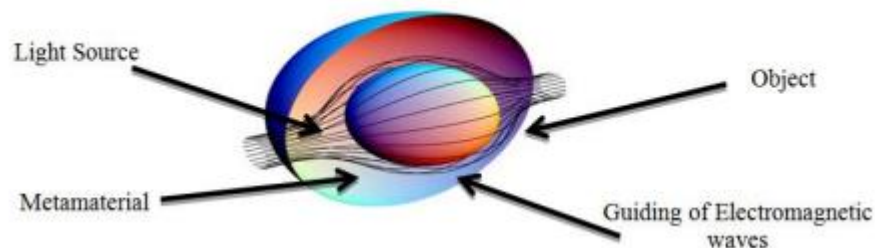


Figure 1.9 Occultation [11].

1.5.5 Les métamatériaux comme capteurs

Les métamatériaux ouvrent une porte pour la conception de capteurs à sensibilité spécifique. Les métamatériaux fournissent des outils pour améliorer de manière significative la sensibilité et la résolution des capteurs. Les capteurs métamatériaux sont

utilisés dans l'agriculture, le biomédical, etc. Dans le domaine de l'agriculture, les capteurs sont basés sur des matériaux résonnants et utilisent le SRR pour obtenir une meilleure sensibilité, dans le biomédical, les capteurs de déformation sans fil sont largement utilisés, des capteurs de déformation imbriqués basés sur le SRR ont été développés pour améliorer la sensibilité et sont décrits par Goran Kiti et al. (2012) [13].

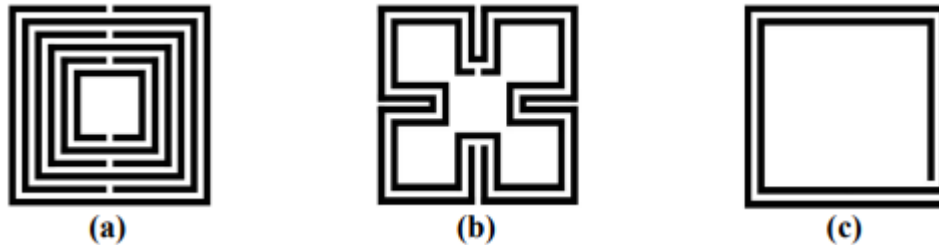


Figure 1.10 Cellules unitaires a métamatériaux utilisées pour le capteur (a) SRR multiple (b)SRR de Sierpinski (c) Résonateur en spirale [11].

1.5.6 Les métamatériaux comme compensateur de phase

Les métamatériaux agissent comme un compensateur de phase, lorsque l'onde passe à travers une dalle DPS (double positive) ayant un déphasage positif tandis que la dalle DNG a un déphasage opposé. Ainsi, lorsque l'onde sort d'une dalle DNG, la différence de phase totale est égale à zéro. Le concept est décrit par Adnan Noor (2010) [12].

1.6 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons vu la définition des métamatériaux puis nous avons exposé leur théorie en partant des formules de Maxwell ensuite on a vu que les matériaux peuvent être classés sur la base de ϵ et μ en quatre quadrants et que le troisième quadrant où ϵ et μ sont négatifs représente les métamatériaux.

Dans la suite de ce chapitre nous avons parlé de la structure de la cellule unitaire et de la réalisation des métamatériaux.

Dans la dernière partie nous avons cité quelques exemples d'applications des métamatériaux.

2.1 Introduction

Un absorbant est un bloc de matériau utilisé pour absorber une partie de l'énergie d'une particule incidente. Parmi ses nombreuses applications intéressantes, la plus courante est celle à des fins militaires ou la technologie furtive. L'objectif de la technologie furtive est de dissimuler un avion aux radars en le recouvrant de matériaux qui absorbent les signaux radar. L'absorbant utilisé dans cette technologie peut abaisser ou bloquer les signaux radar qui se reflètent sur la surface d'un avion. Néanmoins, les inconvénients de ces absorbants classiques sont dus à leur taille importante et à la complexité de leur conception, ce qui les rend inadaptés à de nombreuses applications pratiques [14-15]. Par conséquent, la recherche s'est orientée vers les absorbants à base de métamatériaux (MMA) afin de répondre au besoin d'absorbants compacts et simples. Les absorbants à base de métamatériaux (MMA) ont une absorption élevée, des couches minces et une faible densité. Les MMA peuvent piéger ou absorber une onde EM incidente en certains points spécifiques du dispositif, puis convertir l'EM en chaleur.

2.1.1 Absorbants à métamatériaux

Le MMA est un bloc de matériau utilisé pour absorber une partie de l'énergie d'une particule incidente et se compose généralement de trois couches. Les MMA sont aussi appelés absorbants parfaits avec une absorption quasi-unitaire, présentant des coefficients de réflexion et de transmission nuls pour les ondes planes qui sont typiquement incidentes. Cependant, les absorbants multicouches sont également conçus pour offrir des caractéristiques à large bande. Le motif métallique constitue la première couche, qui est disposée périodiquement. La deuxième couche est constituée d'un substrat ou d'une couche diélectrique. Enfin, la troisième couche est un autre motif métallique périodique.

La manipulation active de la propagation des ondes électromagnétiques permet d'obtenir l'une des caractéristiques intéressantes des métamatériaux, à savoir l'absorption. Ce phénomène se produit lorsque le rayonnement électromagnétique ou la

lumière est absorbé après avoir rencontré un tel matériau. La raison de cette manipulation est la génération de la propriété d'absorption en ajustant les valeurs de ϵ et μ . Les absorbants à métamatériaux sont conçus pour des applications de fréquence RF, s'étendant des micro-ondes à la fréquence optique, comme les capteurs, les photodétecteurs, les cellules solaires et les émetteurs [16]. Les MMA sont classés en trois fréquences différentes et les applications basées sur cela est démontré dans la Figure 2.1

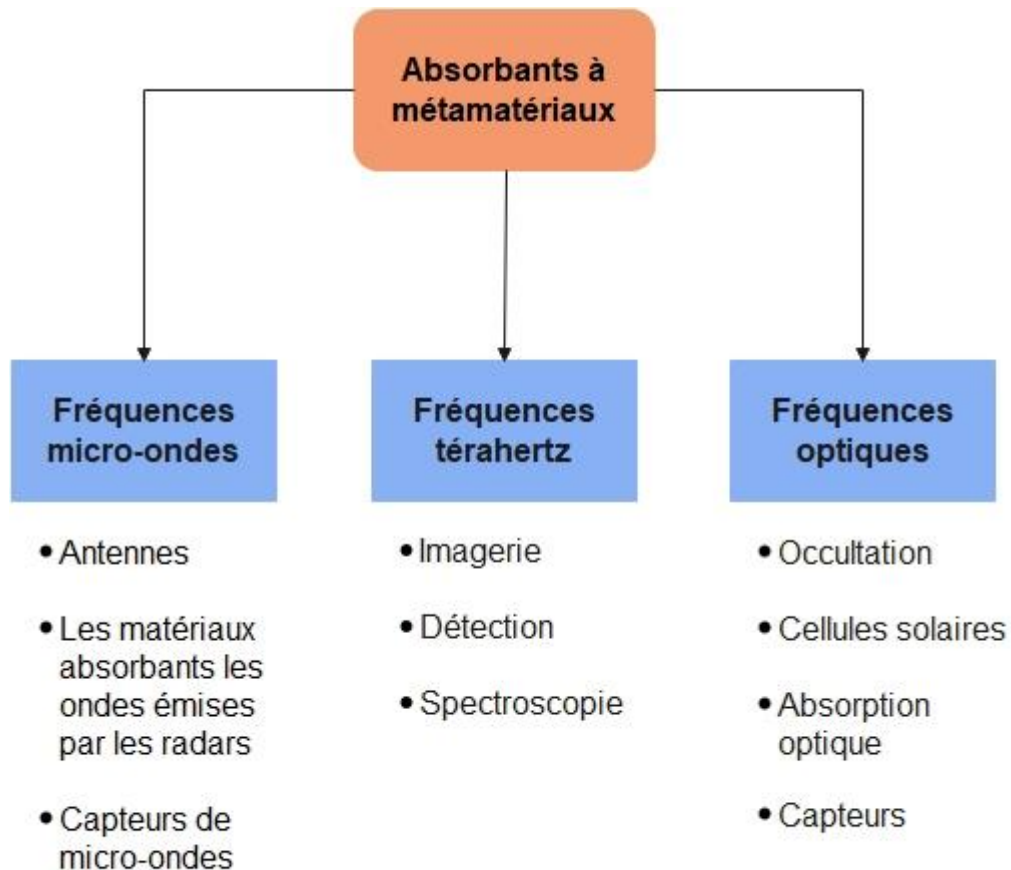


Figure 2.1 Applications des absorbants à métamatériaux en fonction des différentes fréquences.

2.2 Mécanisme d'absorption

Les caractéristiques d'absorption affichées par ces structures sont attribuées aux valeurs négatives de ϵ et μ , à l'adaptation d'impédance, à la réduction de la fréquence du plasma des métaux, aux fortes résonances électriques et magnétiques, etc. Ces facteurs sont manipulés par le choix approprié de la configuration géométrique de l'absorbant [17]. Une discussion détaillée de trois mécanismes d'absorption est donnée dans les sous-sections suivantes.

2.2.1 Résonances magnétiques et électriques

Le mécanisme d'absorption des absorbants parfaits repose sur des résonances électriques et magnétiques. Les résonances magnétiques peuvent être obtenues en utilisant des structures en boucle fermée, tandis que les résonances électriques peuvent être obtenues en créant des espaces dans les structures. Une conception structurale appropriée peut être utilisée pour régler les caractéristiques électriques et magnétiques. L'un des types de résonateurs les plus courants est le résonateur à anneau fendu (SRR) qui est un modèle d'absorbant largement adopté qui utilise le principe des résonances magnétiques et électriques pour obtenir des caractéristiques d'absorption, comme le montre la figure 2.2[17]. Les SRR concentriques sont généralement adoptés pour obtenir des caractéristiques d'absorption multi bandes. Le couplage mutuel entre ces absorbants produit des bandes d'absorption supplémentaires, et les SRR concentriques étroitement espacés permettent d'obtenir des caractéristiques d'absorption à large bande.

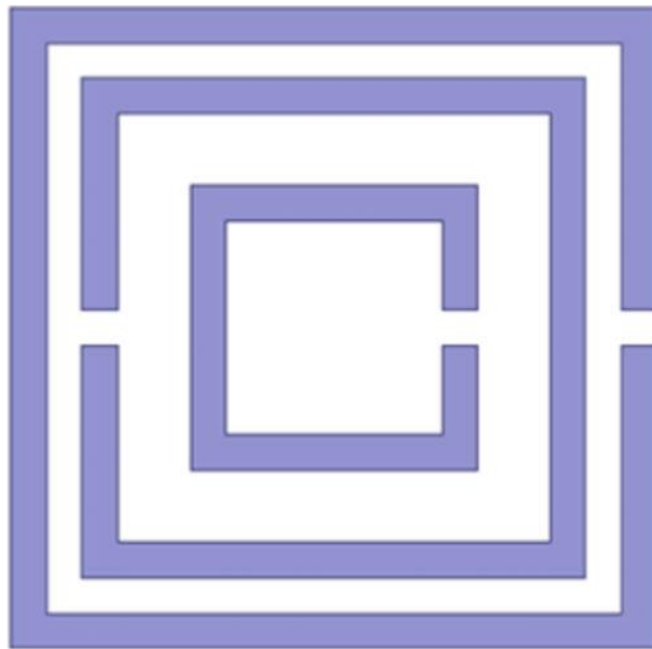


Figure 2.2 Résonateur à anneau fendu [17].

2.2.2 Adaptation de l'impédance

Le principe suivant qui peut être responsable de l'absorption EM est l'adaptation d'impédance. Il s'agit d'un phénomène bien connu qui se produit lorsque des ondes électromagnétiques se déplacent d'un milieu à un autre, une partie de l'énergie EM étant réfléchi et le reste étant transmis. La réflexion est minimisée lorsque l'impédance caractéristique du milieu réfléchi correspond à celle du milieu incident, comme le montre la figure 2.3[17]. Pour obtenir des performances optimales dans la conception d'un absorbant, l'adaptation de l'impédance est une tâche difficile. Comme dans la plupart des cas, le premier milieu est l'air avec une impédance caractéristique d'environ 377Ω ; par conséquent, l'impédance de l'absorbant doit être proche de cette valeur à la fréquence désirée afin d'obtenir une absorption quasi unitaire [18-21].

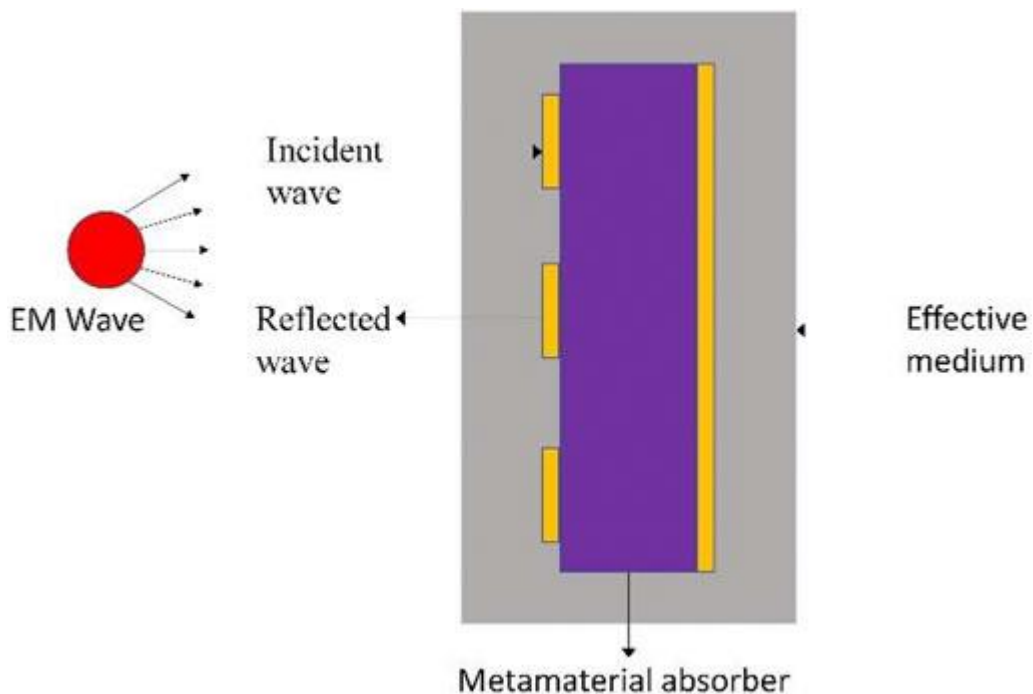


Figure 2.3 Adaptation d'impédance dans un absorbant à métamatériau [17].

2.2.3 Réduction de la fréquence du plasma

La fréquence du plasma d'un matériau est la fréquence à laquelle la densité du gaz d'électrons oscille et est donnée par :

$$\omega_p = \sqrt{\frac{Ne^2}{m\epsilon_0}} \omega_p \quad (2.1)$$

ω_p Fréquence du plasma

N Densité du gaz d'électrons libres

m Masse effective

e Charge d'un électron

D'après l'équation (2.1), il est clair que la fréquence du plasma ω_p dépend totalement de la densité des porteurs d'électrons libres du métal. Dans le cas des semi-conducteurs, la fréquence du plasma peut être augmentée ou diminuée en dopant le milieu. Les matériaux à permittivité négative peuvent être formés en réduisant la fréquence du plasma, qui est basée sur la fréquence de fonctionnement de l'absorbant à métamatériau. La raison principale de la réduction de la fréquence du plasma est de fabriquer des absorbants à Métamatériaux qui peuvent fonctionner dans différents régimes de fréquence. Par conséquent, il est très pertinent de régler la fréquence en fonction du régime de fréquence visé [22-24].

2.3 Conception d'absorbants à métamatériaux

Comme mentionné, les absorbants à métamatériaux sont des structures à trois couches contenant un plan métallique supérieur, une couche diélectrique intermédiaire et un plan de masse inférieur. Les conceptions largement adoptées de ces absorbants parfaits sont présentées à la figure 2.4[17].

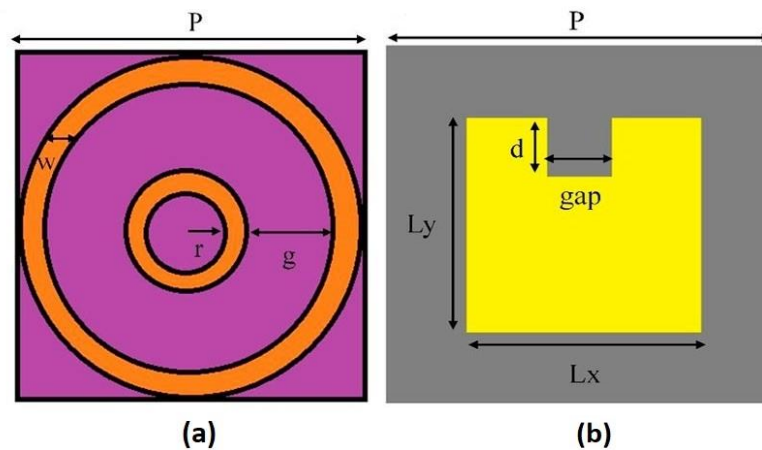


Figure 2.4. Absorbants parfaits à métamatériaux (a) Anneau et (b) Patch [17].

Les absorbants à métamatériaux sont principalement utilisés dans les spectres de fréquences micro-ondes, térahertz et optiques en raison de leurs exigences dans diverses applications. Le spectre électromagnétique est de 100 MHz à 1 PHz et est représenté sur la figure 2.5.

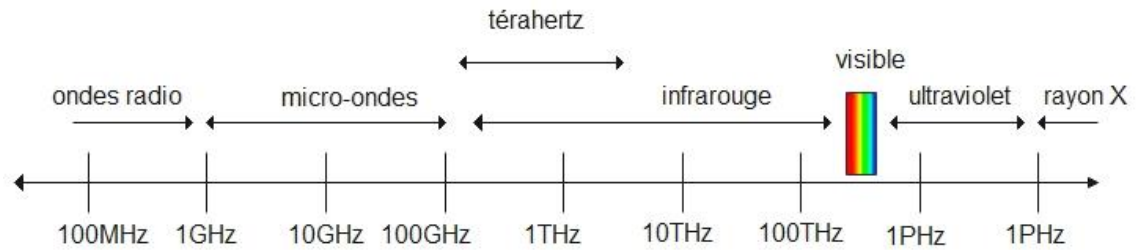


Figure 2.5 Spectre électromagnétique.

2.3.1 Fréquences des micro-ondes

Les absorbants à métamatériaux pour les fréquences micro-ondes sont principalement conçus pour les applications en bande X, notamment les radars et autres applications de surveillance où le blindage électromagnétique a une utilité pratique. En 2008, Landy et al. [10] ont conçu l'absorbant à métamatériau à bande étroite le plus important et le plus ancien en utilisant un résonateur à anneau fendu (SRR) et un fil coupé. Comme l'illustre la figure 2.6[10], la conception comprend trois couches : deux résonateurs conducteurs et un substrat diélectrique.

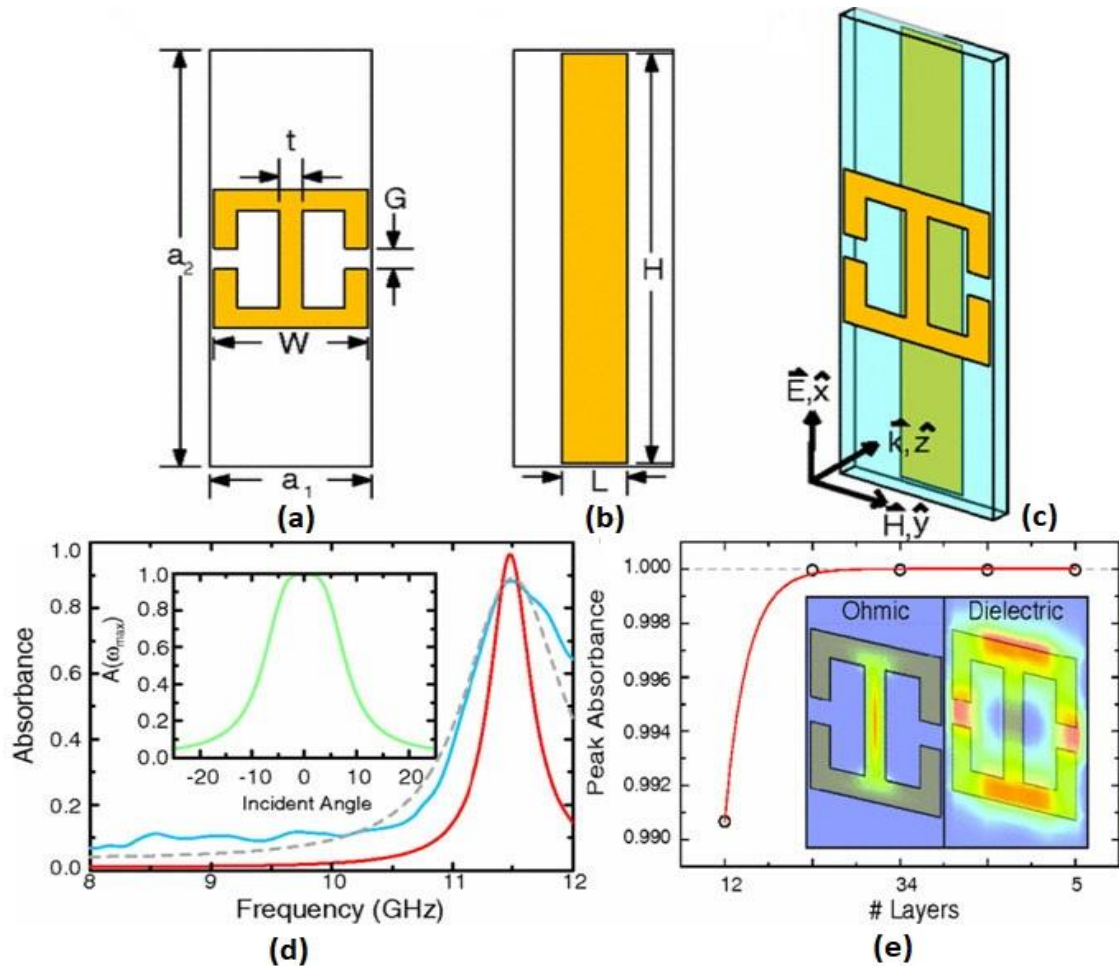


Figure 2.6 (a) Structure schématique d'un absorbant, (b) Fil coupé, (c) Cellule unitaire montrant la direction de propagation des ondes. (d) Spectres d'absorption en fonction de la fréquence et de l'angle d'incidence. (e) $A(\omega)$ simulé avec des couches MM croissantes ; les encarts montrent les pertes simulées à la résonance : La perte ohmique (surface) est représentée dans le panneau d'encart de gauche, et la perte diélectrique (volume) est à droite (2008) [10].

Sur la figure 2.6[10], le métamatériau conçu [10] a atteint un spectre d'absorption à bande étroite de 96 % à 11,48 GHz par simulation et un spectre de 88 % à 11,5 GHz par expérimentation. Le premier absorbant à métamatériau rapporté offrait une absorption à bande étroite en raison du couplage magnétique entre l'anneau fendu et le fil coupé dans le plan parallèle. La réponse magnétique a été obtenue par les courants antiparallèles dus au fil coupé et au fil central des résonateurs. Le mécanisme d'absorption a été expliqué théoriquement par les pertes ohmiques et diélectriques, comme le montre la figure 2.6e[10].

Des efforts ultérieurs ont été faits pour augmenter la largeur de bande d'absorption de l'absorbant à métamatériau. Plus précisément, les chercheurs se sont

concentrés sur la conception d'absorbants à métamatériaux multi bandes, à large bande et accordables en fréquence. Au départ, les absorbants à métamatériaux présentant des caractéristiques d'absorption multi bande ont été développés en utilisant plusieurs cellules unitaires résonnantes, puis en fusionnant les cellules par une disposition coplanaire [25-26].

Park et al. [25] ont mis en œuvre un absorbant multi bande à structure en beignet à des fréquences micro-ondes et ont validé ses performances par simulation et expérience. Comme le montre la figure 2.7[25], la cellule unitaire de cette conception était constituée d'une couche métallique avec quatre motifs différents sur le dessus et d'un plan de masse sur le dessous. Les bandes d'absorption multiples générées par les courants de surface antiparallèles entre les plaques avant et arrière ont été causées par la résonance magnétique dans la couche métallique supérieure. La conception d'absorbant a métamatériau présentait également une insensibilité à la polarisation, le spectre d'absorption multi bande n'étant pas affecté par le changement des angles de polarisation et des angles d'incidence. Cet effet est dû à la structure symétrique de l'absorbant. L'absorbant parfait à métamatériau a atteint une absorption de 97 %, 97 %, 98 % et 98 % à 6,5, 7,4, 9,2 et 11,0 GHz, respectivement, en utilisant le FR-4 comme substrat diélectrique.

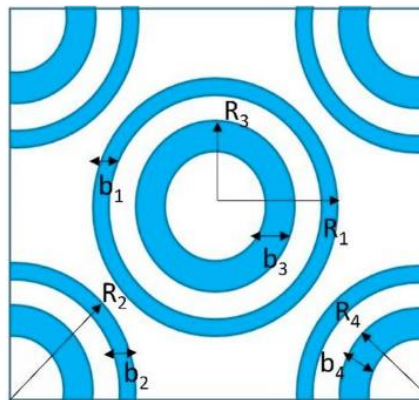


Figure 2.7. Schéma de l'absorbant à métamatériau [25].

De même, Zheng et al. [26] ont proposé un absorbant parfait à double bande en combinant la résonance de la cavité Fabry-Perot et l'effet de transmission optique. Deux structures distinctes, constituées d'une couche de cuivre et d'un substrat diélectrique FR-4, ont été préparées pour la conception de la cellule unitaire. Les modifications de la distance entre ces deux structures ont permis d'obtenir les spectres d'absorption de ce absorbant à métamatériau. En particulier, les bandes d'absorption diminuent lorsque la

distance diminue, et les spectres d'absorption passent d'une double bande à une bande unique.

En modifiant les dimensions d'un absorbant à métamatériau et la forme du patch métallique, par exemple une structure symétrique, on peut obtenir de nombreuses bandes d'absorption. Outre la conception des absorbants à métamatériaux multi bandes, les chercheurs ont commencé à travailler sur les absorbants à métamatériaux à large bande. Une réponse à large bande signifie qu'un dispositif est capable d'absorber toutes les fréquences électromagnétiques éclairées par la surface de l'absorbant à métamatériau. Afin d'élargir la bande passante, des structures empilées multicouches et des structures métamatériau métalliques multiples ont été proposées dans la littérature [22-25]. Les approches d'arrangement planaire et vertical sont d'autres noms pour ces idées de conception. De nombreux motifs métalliques sur la couche supérieure de l'arrangement planaire améliorent la fréquence proche des résonances multiples, permettant une absorption à large bande avec une excellente absorptivité. Les couches supérieures multiples sont empilées verticalement dans l'arrangement vertical, ce qui permet une absorption à large bande. L'accordabilité est une autre caractéristique importante des absorbants à métamatériaux. Les absorbants accordables sont ceux qui peuvent être accordés en faisant varier certains paramètres, tels que la fréquence, les angles de polarisation, les angles d'incidence, la dimension de la couche absorbante, etc. En mettant en œuvre une structure de patch asymétrique, une absorptivité quasi-parfaite peut également être obtenue par des absorbants à métamatériaux accordables.

En 2012, Lee et al. [27] ont conçu un absorbant en forme de I quasi parfait à base de métamatériaux à large bande dans les fréquences micro-ondes qui donnait une absorption à bande étroite et à large bande. Le pic à bande étroite était dû au modèle multicouche avec une absorption supérieure à 99,5 % à 13,5 GHz, tandis que l'absorption à large bande, qui dépendait de la fréquence de résonance, était créée par la longueur de la barre de fils coupés. Sur la base des spectres d'absorption simulés et mesurés. Il a été découvert que lorsque la longueur du fil coupé est réduite, la fréquence de résonance électrique augmente. Cet absorbant parfait peut être appliqué efficacement dans les dispositifs radar militaires.

Dans de nombreuses applications militaires, telles que la réduction de la Surface Équivalente Radar (SER), les dispositifs d'occultation et les détecteurs de capteurs, des absorbants parfaits sont hautement souhaitables. Cependant, la plupart des techniques (comme les absorbants cunéiformes et pyramidaux, les absorbants multi-résonnants) ont

des problèmes de taille, de bande passante et de taux d'absorption à basse fréquence. Wang et al. [28] ont donc résolu ces problèmes en fusionnant la méta surface de Huygens et la méta surface d'impédance de dalle à trois couches. La première répond à la théorie innovante de l'adaptation d'impédance, tandis que la seconde présente des qualités multi-résonantes et des conductivités optimisées, ce qui permet une absorption à haut rendement à des fréquences plus basses (1-3 GHz) et plus élevées (3-18 GHz). Les auteurs ont conçu, démontré et fabriqué un absorbant micro-ondes réaliste à méta surface et ont mené des expériences pour montrer qu'il peut atteindre des performances ultra large bande (118 GHz) avec un taux d'absorption supérieur à 75 %. Les calculs numériques correspondent bien aux résultats, montrant qu'en affinant les conceptions, il est possible de porter l'efficacité d'absorption à 92 % sur toute la bande de travail. Leurs découvertes pourraient accélérer le développement de méta-dispositifs à bande ultra large, notamment les technologies d'occultation basées sur une absorption à haute efficacité.

2.3.2 Fréquences TéraHertz

Le domaine des fréquences térahertz, qui s'étend de 1 à 10 THz, se situe entre les micro-ondes et les fréquences infrarouges (IR). Les MMA THz ont récemment suscité l'intérêt des chercheurs en raison de leurs applications potentielles en imagerie et en spectroscopie, de la nature non ionisante des rayons THz et de leur capacité à imprégner des matériaux tels que les plastiques, le papier et les tissus. Bien que ces absorbants aient été initialement conçus pour la gamme de fréquences des micro-ondes en raison de leur simplicité de fabrication, ils ont fini par devenir plus populaires pour leur réalisation sur une large gamme de spectre. Désormais, ces absorbants peuvent être conçus en faisant varier les dimensions géométriques et fonctionner dans un spectre allant de THz aux fréquences visibles. La flexibilité de la conception structurelle est une caractéristique prometteuse qui permet aux chercheurs de combler le vide THz.

Yen et al. [29] ont développé expérimentalement le premier absorbant de fréquence térahertz en 2004. La structure a été créée à l'aide d'une couche planaire de double réseau SRR adaptée aux dispositifs térahertz. Le mécanisme de l'absorbant était basé sur la construction d'un résonateur de base. La réponse magnétique était d'environ 1 THz en raison de l'interaction entre les deux anneaux fendus. Compte tenu du comportement magnétique résonnant à la fréquence THz, les dimensions des SRR ont été réduites par des méthodes analytiques et des simulations numériques.

Par la suite, Tao et al. [30] ont démontré expérimentalement une conception métamatériaux à des fréquences térahertz illustrée à la figure 2.8[30]. La structure était constituée d'un réseau de SRR, la couche métallique supérieure étant composée de SRR et la couche métallique inférieure étant conçue pour conduire les courants qui circulent entre les deux couches. Ce courant circulant était généré par un champ magnétique incident. Les pics d'absorption ont été attribués à la résonance LC et à la résonance dipolaire d'ordre élevé dans cette étude, l'inductance étant fournie par les deux boucles de part et d'autre du condensateur central. Expérimentalement, une absorption de 0,96 à 1,6 THz a été obtenue à partir de la structure absorbante.

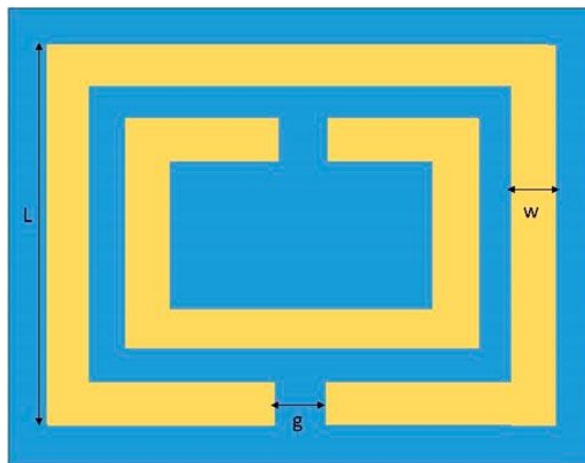


Figure 2.8 Schéma d'un double SRR [30].

Les chercheurs ont continué à explorer les MMA THz multi bandes. Par exemple, Wang et al. [31] ont démontré une conception d'absorbant à métamatériau avec une propriété d'absorption à double bande, consistant en un patch métallique en forme de U. L'or a été choisi comme matériau pour le patch métallique supérieur et le plan de masse. L'absorbant a montré des caractéristiques d'absorption à double bande avec des pics à 1,80 et 2,97 THz, et l'absorption de plus de 98 % était due au chevauchement de la résonance LC et à la réponse dipolaire du cadre métallique.

Shan et al. [32] ont présenté un absorbant ultra-fin flexible à double bande qui peut être utilisé dans les micro-bolomètres et les avions furtifs. La structure de l'absorbant est constituée de résonateurs en anneau fendu avec des espaces inégaux. Les anneaux métalliques et le plan de masse étaient en aluminium, et la couche diélectrique était préparée avec du polyimide. Le tracé d'absorption simulé révèle des absorptions de 99,7 et 99,6 % à la fréquence de 0,41 et 0,75 THz, respectivement, qui sont attribuées aux résonances dipolaires normales et à la résonance dipolaire d'ordre élevé.

Wang et al. [33] ont mis en œuvre un absorbant térahertz à croix métallique asymétrique pour une application de détection. La structure à 3 couches est composée d'une croix métallique en or et d'un plan de masse séparés par un espaceur diélectrique. La conception a atteint des pics d'absorption de 99,07 % à 1,23 THz, 99,84 % à 2,39 THz et 99,01 % à 3,19 THz. Les auteurs ont également constaté que le mécanisme d'absorption dépendait totalement des résonances fondamentales, les résonances magnétiques fortes donnant lieu à des pics d'absorption triples avec une absorption quasi unitaire.

2.3.3 Fréquences optiques

Les MMA optiques sont un type d'absorbants parfaits fonctionnant dans la fréquence optique ou dans l'infrarouge moyen (mid-IR), plus précisément entre 300 et 430 THz. La principale contrainte pour la conception d'absorbants parfaits dans la région optique est la taille de la cellule unitaire. La dimension de la cellule unitaire doit être en nanomètres, ce qui peut être réalisé de manière pratique en utilisant des techniques de nano fabrication.

Avitzour et al. [34] ont fait la première tentative de conception d'un absorbant parfait à base de métamatériaux fonctionnant dans la région IR. Bien que la structure soit complexe, elle offre tout de même plus de 90 % d'absorption avec une réflectivité quasi nulle. Les auteurs affirment que l'utilisation d'une double couche contribue à un niveau d'absorption de près de 99 %.

En 2010, Hao et al. [35] ont réalisé un absorbant à métamatériau ultra-fin à grand angle pour le régime de fréquence optique. Les nanostructures métalliques simples étaient composées d'un film d'or comme couche métallique et d' Al_2O_3 comme espaceur diélectrique, ce qui a permis d'obtenir une absorption presque parfaite. En vérifiant les performances de cet absorbant, on a constaté que la structure était insensible à l'angle et également accordable. Cette caractéristique d'accordabilité et d'insensibilité à l'angle a été obtenue en ajustant les dimensions de la nanostructure. Dans la configuration expérimentale, le substrat de quartz a été choisi pour la fabrication de l'absorbant à métamatériau multicouche. Une absorption maximale de 88% à la longueur d'onde de 1,58 μm a été obtenue expérimentalement et 97% par simulation. La différence entre les pics d'absorption est due aux tolérances de fabrication.

Bossard et al. [36] ont présenté un absorbant optique à métamatériau à large bande insensible à la polarisation avec une largeur de bande de super octave. Les auteurs ont indiqué que l'absorbant offrait une absorption quasi-unitaire. L'algorithme générique a été appliqué pour l'identification de la géométrie d'un écran métallique unique supportant des superpositions multiples. Comme l'illustre la figure 2.9[36], une couche de superstrat a été employée dans la conception pour l'adaptation d'impédance, ce qui a permis une absorption maximale de la lumière. Dans ce cas, le palladium (Pd) a été utilisé comme métal pour aider à élargir la bande passante et améliorer la reproductibilité de la fabrication.

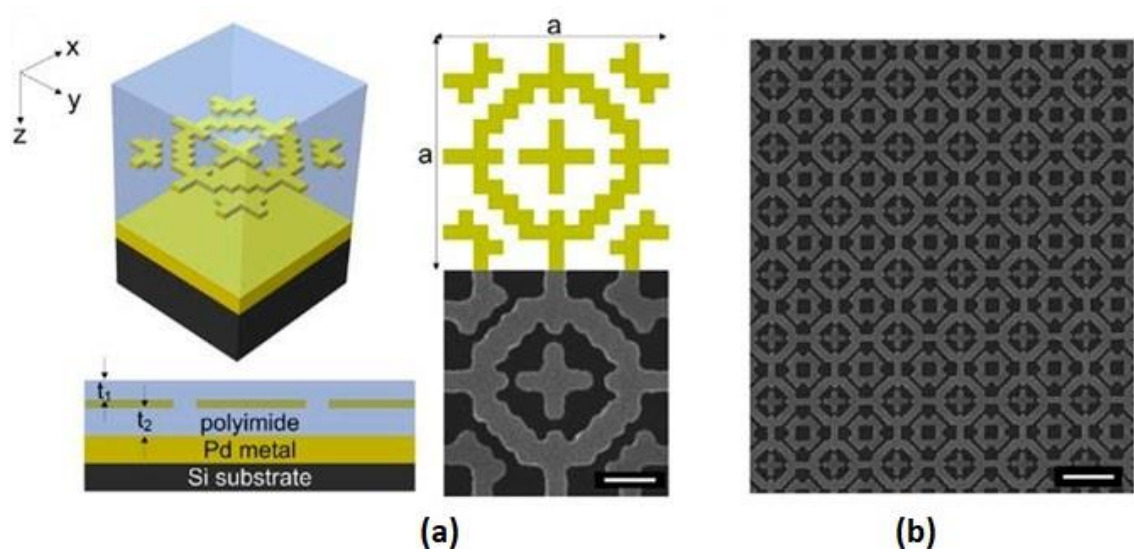


Figure 2.9 (a) Schéma de l'absorbant à large bande à cellule unitaire, (b) Image nano fabriquée de l'absorbant à métamatériau [36].

Dans la plage de longueur d'onde de 1,77 à 4,81 μm et dans la plage angulaire de 45°, l'absorbant à métamatériau à base de bande interdite électromagnétique (EBG) a obtenu une absorption moyenne grand angle de 98 %, comme le montre la figure 2.10 [36].

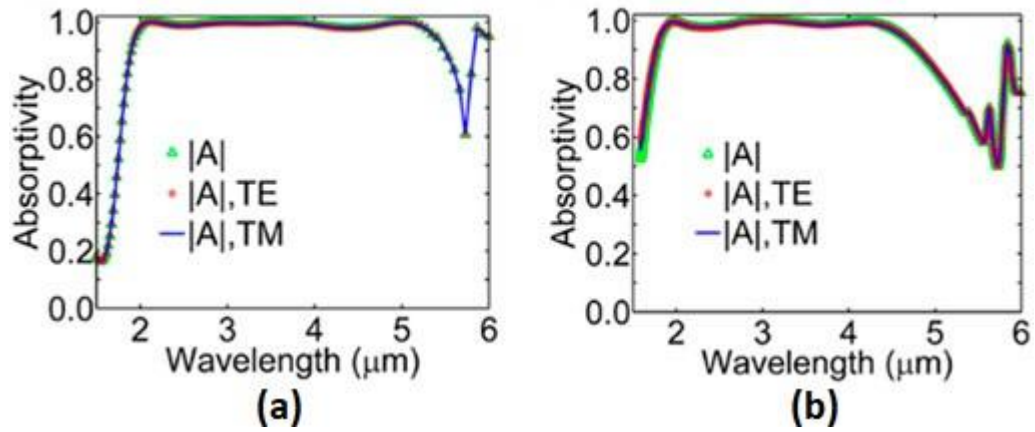


Figure 2.10 (a) Absorptivité simulée et (b) La mesure de l'absorptivité de la conception [36].

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu la définition des absorbants puis nous avons parlé de ses inconvénients et pourquoi les recherches ont été orientées vers les absorbants à métamatériaux, ensuite nous avons vu les spectres de fréquences ou sont utilisé Les absorbants à métamatériaux.

Dans la suite de ce chapitre nous avons donné une discussion détaillée des trois mécanismes d'absorption et nous avons vu la conception des absorbants a métamatériaux.

A la fin de ce chapitre nous avons parlé de quelques progrès récents sur les conceptions des absorbants à métamatériaux dont les spectres de fréquences ont été illustrées précédemment ainsi que leurs applications.

3.1 Introduction

La conception des absorbants à métamatériaux, à l'aide d'un logiciel adapté, est une étape essentielle afin de gagner du temps et d'optimiser la structure aux paramètres souhaités. Pour cela, nous avons utilisé le logiciel commercial CST MICROWAVE Studio .Plus de détails sur ce logiciel sont donnés en Annexe.

Dans ce chapitre, deux absorbants à métamatériaux ont été dimensionnées et simulées. Les résultats de simulations obtenues montrent le bon fonctionnement de ces absorbants. Ce chapitre est organisé comme suit : Après la présentation des absorbants, les performances en termes de simulation des deux absorbants à métamatériaux proposées seront présentées et discutées. Ensuite, des études paramétriques pour chaque absorbant seront présentées afin de comprendre le fonctionnement de ces absorbants.

3.2 Un absorbant à métamatériau ultra-fin et à large bande

3.2.1 Description de l'absorbant à métamatériau

Le schéma de principe de la structure MMA est présenté dans Figure 3.1.

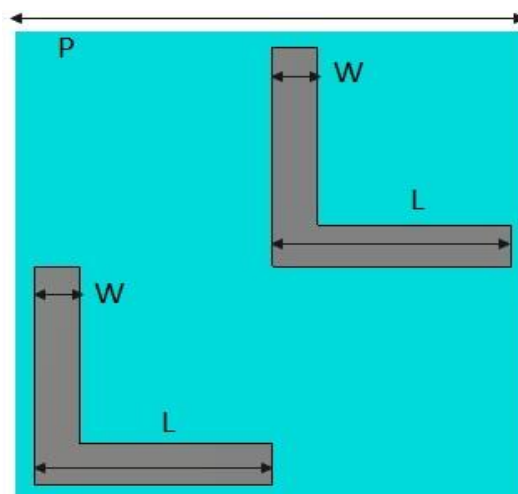


Figure 3.1 Schéma de principe de l'unité de base proposée.

L'unité de la structure se compose de deux structures en forme de L de même taille imprimées sur un diélectrique FR4 de 2 mm d'épaisseur avec $\epsilon_r = 4,3$. Les deux structures en forme de L sont disposées en diagonale dans le coin inférieur gauche et le coin supérieur droit de l'unité. L'épaisseur de la métallisation est de 0,018mm. Les dimensions géométriques de l'unité sont indiquées dans le tableau suivant :

Paramètres	Dimensions (mm)
P	8
L	3.7
W	0.7

Tableau 3.1 Les dimensions géométriques de l'unité.

3.2.2 Résultats de simulation

Les résultats de simulation obtenus sont discutés en termes de coefficient de réflexion, le coefficient d'absorption et les champs électriques et magnétiques.

a. Coefficient de réflexion

Nous allons représenter pour cet absorbant à métamatériau le coefficient de réflexion, la figure 3.2 représente l'évolution du module du coefficient de réflexion simulé (en dB) en fonction de la fréquence de l'absorbant de la figure 3.1.

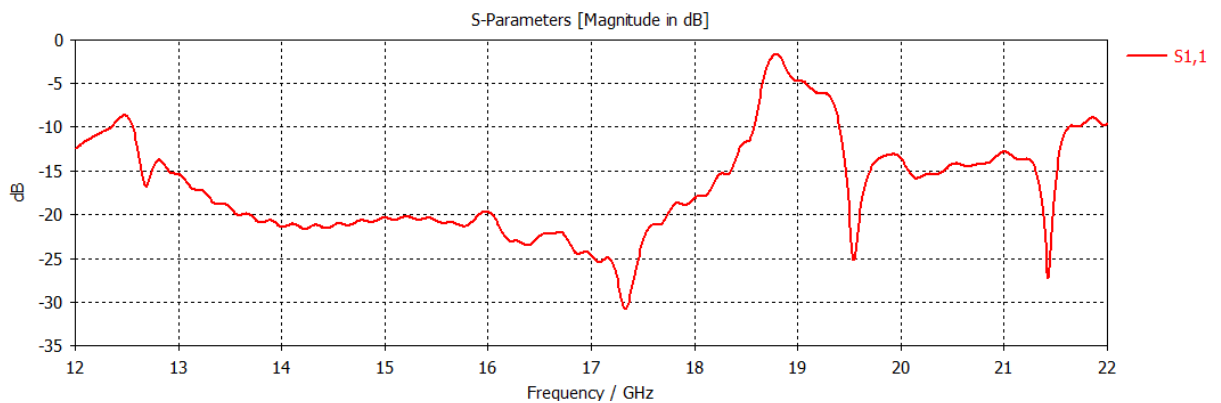


Figure 3.2 Le coefficient de réflexion S11 de l'absorbant.

D'après la figure 3.2, l'évolution du module du coefficient de réflexion S11 en fonction de la fréquence, montre que la réponse en fréquence à -10 dB peut couvrir deux bandes, une large bande qui varie de 12.56GHz à 18.579 GHz et une bande qui varie de 19.41 GHz à 21.616 GHz.

b. Coefficient d'absorption

L'absorption (A) est calculée en utilisant la formule suivante :

$$A = 1 - R - T = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 \quad (3.1)$$

Où R est la réflectance, T est La transmittance et S11 est le coefficient de réflexion et S21 est le coefficient de transmission.

Lorsque la transmittance T est nulle pour toutes les fréquences l'absorption A est déterminée uniquement par l'amplitude de la réflectance R comme suit :

$$A = 1 - R = 1 - |S_{11}|^2 \quad (3.2)$$

Les résultats simulés des performances d'absorption et de la réflectance est représenté sur la figure 3.3 .Le coefficient d'absorption de plus de 86% est observé de 12 à 18,58 GHz et de plus de 94% est observé de 19.54GHz a 21.43GHz pour une incidence normale avec une largeur de bande d'absorption de 43,03% ,9.23% respectivement. Il y a deux pics d'absorption à $f_1 = 19,54$ GHz, $f_2 = 21.43$ GHz avec un taux d'absorption de 99,8 %.

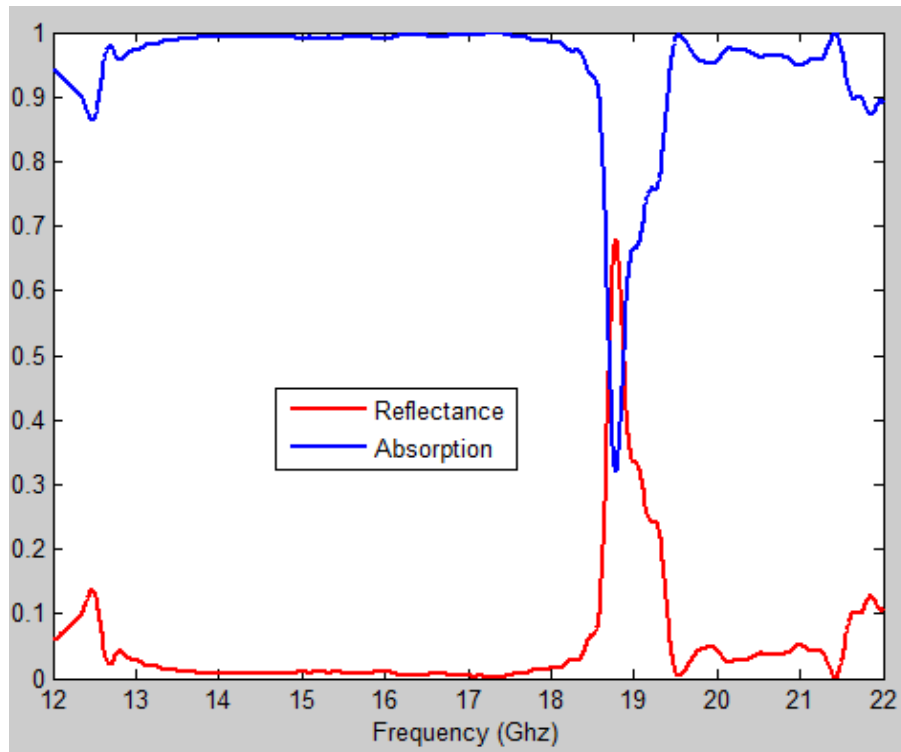


Figure3.3 Performances d'absorption et de réflectance simulées.

c. Champs électriques et magnétiques

La distribution des champs électriques et magnétiques aux pics d'absorption est étudiée afin de comprendre le mécanisme intrinsèque de l'absorption dans notre structure proposée, comme le montre les Figures 3.4 et 3.5. A la fréquence de 19,54 GHz (voir Figure 3.4(a)), on peut observer que la concentration de la distribution du champ électrique est forte au niveau du bord de la structure en forme de L en bas à gauche. À 21,43 GHz (voir Figure 3.4(b)), la distribution du champ électrique se concentre au bord de la structure en « L » dans le coin supérieur droit.

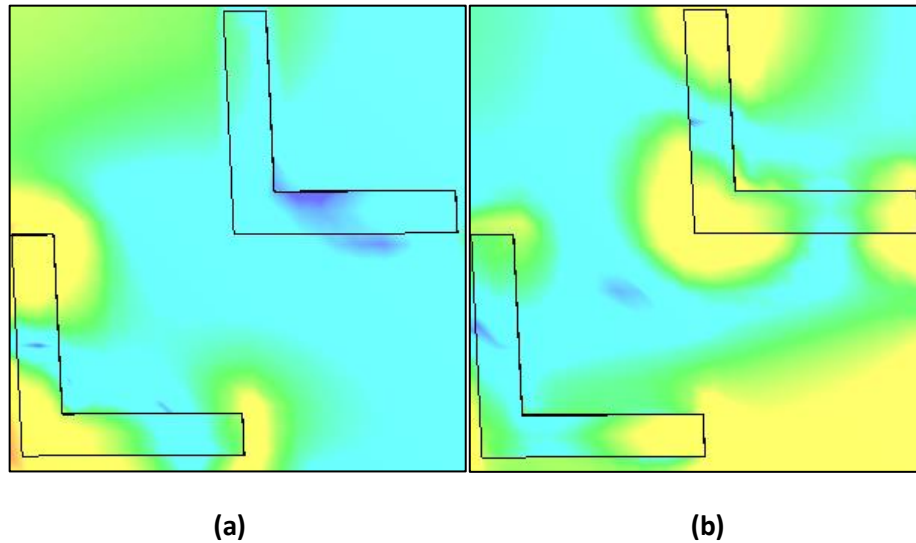


Figure 3.4 Champs électriques a (a) 19.54GHz. (b) 21.43GHz.

On peut voir sur la figure 3.5 que la distribution du champ magnétique présente une excellente cohérence avec la distribution du champ électrique à chaque fréquence de résonance.

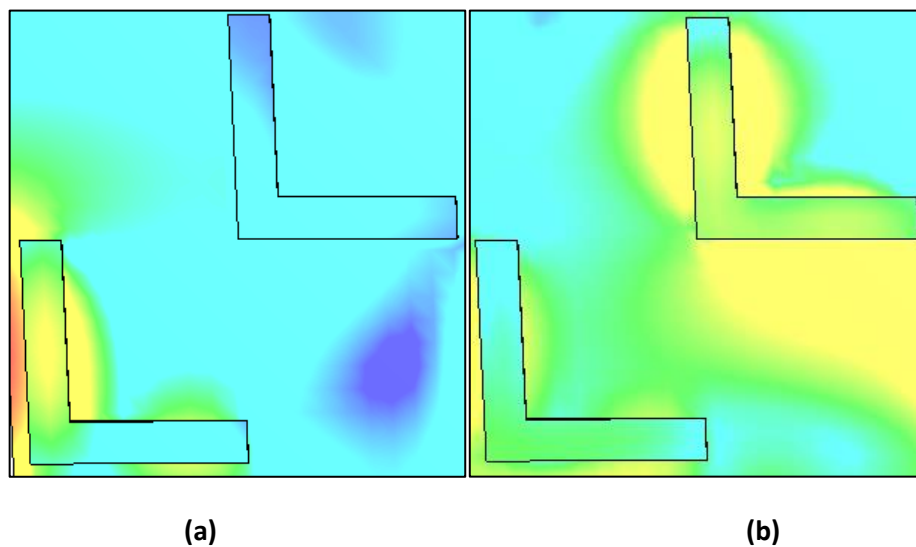


Figure 3.5 Champs magnétiques a (a) 19.54GHz. (b) 21.43GHz.

3.2.3 Etudes paramétriques

Dans le but d'étudier l'influence des paramètres sur les performances de la structure. Une étude est réalisée en variant à chaque fois un paramètre et en gardant les autres paramètres constants, les paramètres sont :

- W (largeur de la structure en forme de L).
- L (longueur de la structure en forme de L).

a. Paramètre W

Les résultats de simulation du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence pour les différentes valeurs de la largeur de la structure en forme de L ($W=0.7, 0.8, 1$ mm) sont donnés dans la figure 3.6.

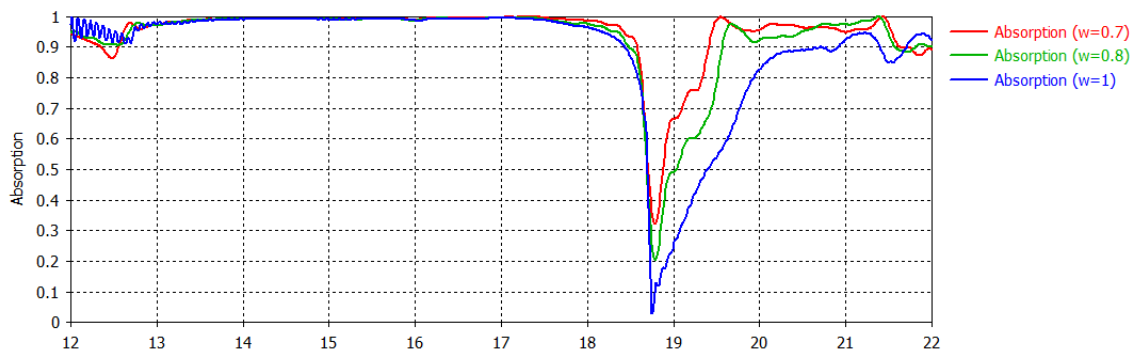


Figure 3.6. Coefficient d'absorption pour différentes valeurs de w .

On peut voir d'après la figure 3.6 que le coefficient d'absorption pour les trois valeurs de la largeur de la structure en forme de L ($w=0.7, 0.8$ et 1 mm) sont approximativement équivalents dans toutes les fréquences sauf entre 18GHz et 19GHz ou $W=0.7$ a la meilleure absorption.

b. Paramètre L

Les résultats de simulation du coefficient d'absorption en fonction de la fréquence pour les différentes valeurs de la longueur de la structure en forme de L ($L=3.6, 3.7, 3.8$ mm) sont donnés dans la figure 3.7.

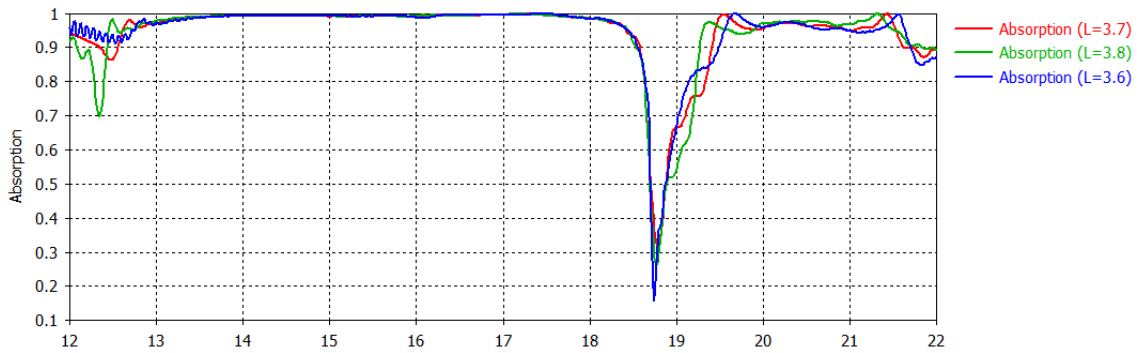


Figure 3.7. Coefficient d'absorption pour différentes valeurs de L.

D'après les résultats de la figure 3.7, la meilleure longueur de la structure en forme de L est 3.7 mm car l'absorption est la plus grande entre les fréquences 18GHz et 19 GHz alors que les autres fréquences ont des absorptions presque équivalentes pour toutes les valeurs de L.

3.3 Absorbant de micro-ondes à large bande avec une structure en anneau à double fente

3.3.1 Description de l'absorbant à métamatériau

Une vue générale abrégée de la cellule unitaire de l'absorbant est montrée dans la figure (3.8).

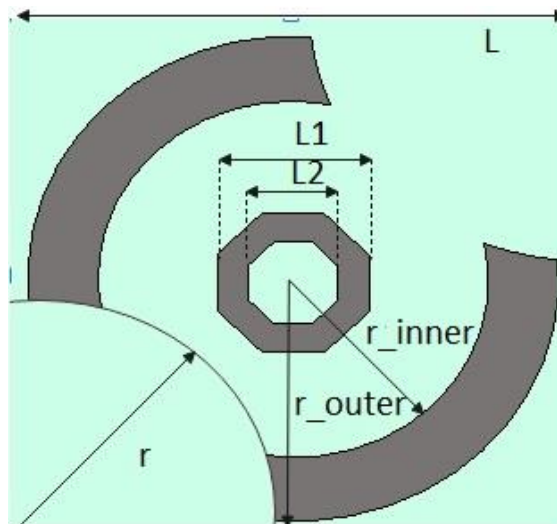


Figure3.8 Schéma de principe de l'unité de base proposée.

Nous proposons un absorbant constitué d'une surface métallique séparée par un intermédiaire d'une couche diélectrique Fr-4 de 3,75mm d'épaisseur avec une permittivité de 4,3. La couche supérieure de métal comprend un nouveau résonateur en anneau à double séparation (DSRR) séparé du motif central par un cercle de 7 mm de

rayon centré au sommet diagonal de la plaque de base. Le métal de mise à la terre inférieur à une épaisseur de 0,12mm. Les dimensions géométriques de l'unité sont indiquées dans le tableau suivant :

Paramètres	Dimensions (mm)
r_outer	6.8
r_inner	5
r	7
L2	2.5
L1	4.2
L	15

Tableau 3.2 Les dimensions géométriques de l'unité.

3.3.2 Résultats de simulation

Les résultats de simulation obtenus sont discutés en termes de coefficient de réflexion, le coefficient d'absorption et les champs électriques et magnétiques.

a. Coefficient de réflexion

Nous allons représenter pour cet absorbant à métamatériau le coefficient de réflexion, la figure 3.9 représente l'évolution du module du coefficient de réflexion simulé (en dB) en fonction de la fréquence de l'absorbant de la figure 3.8.

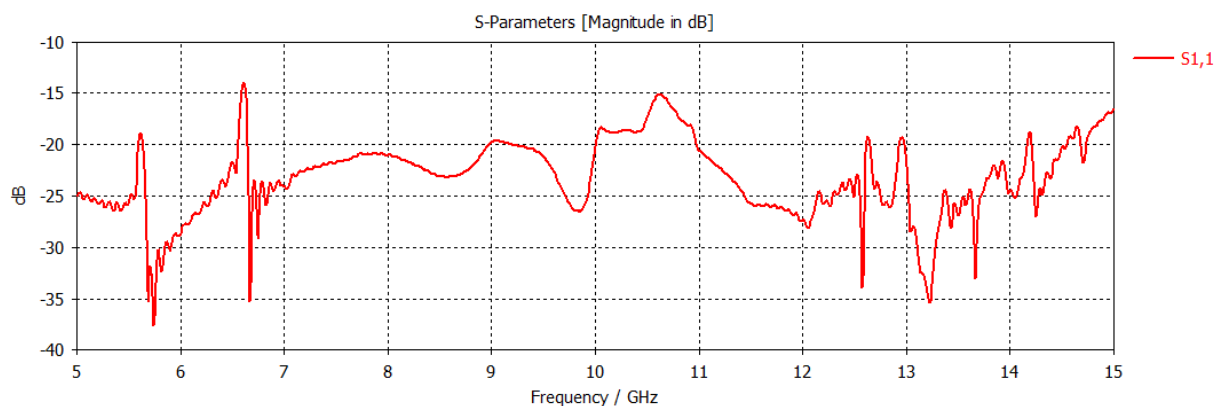


Figure 3.9. Le coefficient de réflexion S₁₁ de l'absorbant.

D'après la figure 3.9, l'évolution du module du coefficient de réflexion S₁₁ en fonction de la fréquence, montre que la réponse en fréquence à -10 dB peut couvrir une bande large qui varie de 5GHz à 15GHz.

b. Coefficient d'absorption

L'absorption (A) est calculée en utilisant la formule (3.1).

Lorsque la transmittance T est nulle pour toutes les fréquences L'absorption A est déterminée par l'amplitude de la réflectance R uniquement qui est dans l'équation (3.2).

Les résultats simulés des performances d'absorption et de la réflectance est représenté sur la figure 3.10. Le coefficient d'absorption de plus de 96% est observé de 5 à 15GHz pour une incidence normale avec une largeur de bande d'absorption de 100%. Il y a deux pics d'absorption à $f_1 = 5,74$ GHz, $f_2 = 12,57$ GHz avec un taux d'absorption de 99,9%.

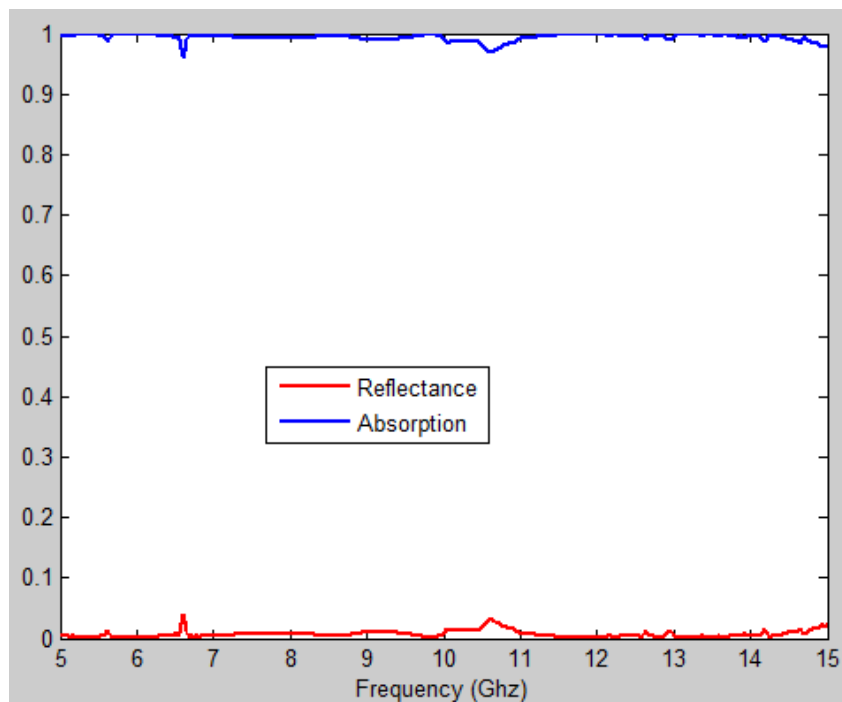
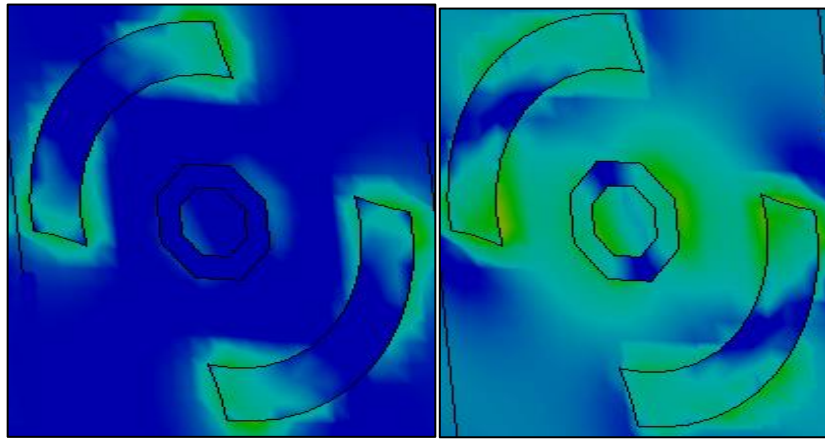


Figure 3.10 Performances d'absorption et de réflectance simulées.

c. Champs électriques et magnétiques

La distribution des champs électriques et magnétiques aux pics d'absorption est étudiée afin de comprendre le mécanisme intrinsèque de l'absorption dans notre structure proposée. Comme le montre les Figures 3.11 et 3.12 dans le champ électrique a fréquence 5.74GHz (voir Figure 3.11(a)), il y a un phénomène de résonance évident dans les bords inférieures et supérieures de l'anneau à double fente. A la fréquence de 12.57GHz (voir Figure 3.11(b)), il y a une résonance au milieu de la structure en anneau octogonal et dans l'anneau a double fente.

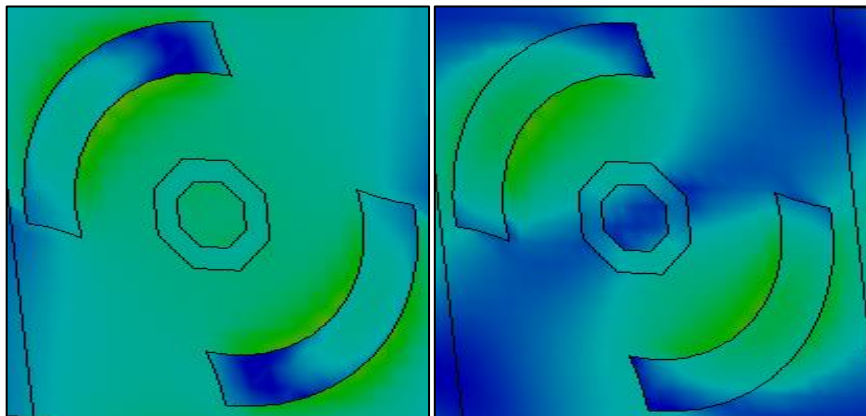


(a)

(b)

Figure 3.11 champs électriques a (a) 5.74GHz. (b) 12.57GHz.

Dans les champs magnétiques, au niveau des fréquences 5.74GHz (voir Figure 3.12(a)) et 12.57GHz (voir Figure 3.12(b)), il y a un phénomène de résonance évident dans l'anneau à double fente.



(a)

(b)

Figure 3.12 champs magnétiques a (a) 5.74GHz. (b) 12.57GHz.

3.3.3 Etudes paramétriques

Dans le but d'étudier l'influence des paramètres sur les performances de la structure. Une étude est réalisée en variant à chaque fois un paramètre et en gardant les autres paramètres constants, les paramètres sont :

- r_{inner} (*Rayon intérieure*).
- r_{outer} (*Rayon extérieure*).

a. Paramètre r_{inner}

Les résultats de simulation du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence pour les différentes valeurs du Rayon intérieure ($r_{\text{inner}}= 4, 4.5, 5$ mm) sont donnés dans la figure 3.13.

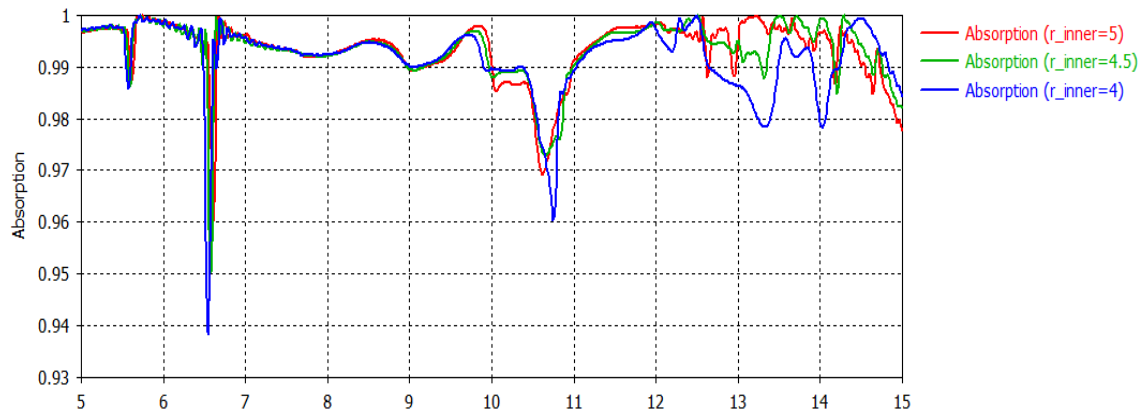


Figure 3.13. Coefficient d'absorption pour différentes valeurs de r_{inner} .

D'après les résultats de la figure 3.13, on constate que le coefficient d'absorption pour les trois valeurs du ($r_{\text{inner}}= 4, 4.5, 5$ mm) sont approximativement équivalents.

Il est à noter que l'absorption en fonction de la fréquence est relativement insensible au paramètre r_{inner} .

b. Paramètre r_{outer}

Les résultats de simulation du coefficient d'absorption en fonction de la fréquence pour les différentes valeurs du Rayon extérieure ($r_{\text{outer}}=6.8, 6.5, 6$ mm) sont donnés dans la figure 3.14.

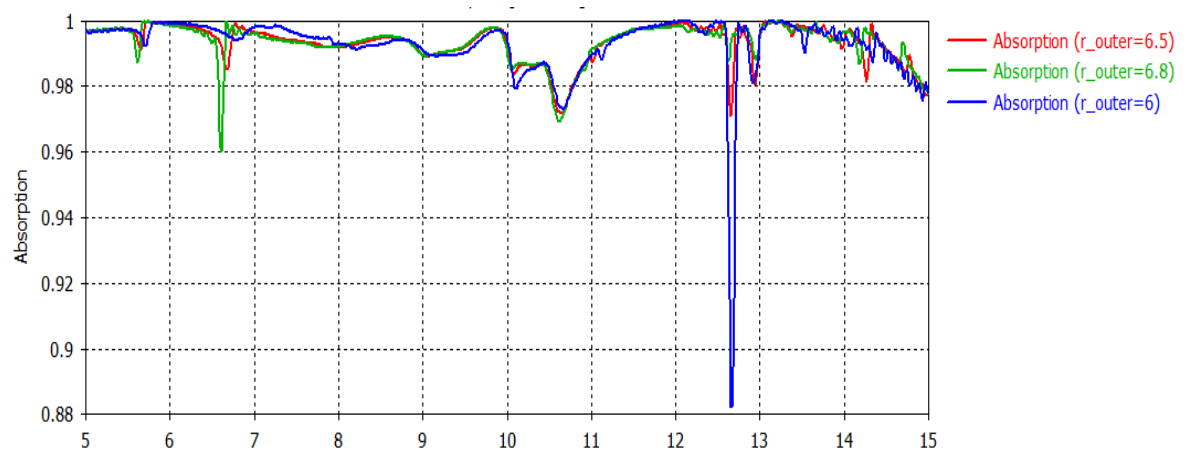


Figure 3.14. Coefficient d'absorption pour différentes valeurs de r_{outer} .

D'après les résultats de la figure 3.14, on constate que le coefficient d'absorption pour les trois valeurs du Rayon extérieure ($r_{\text{outer}} = 6, 6.5, 6.8$ mm) sont approximativement équivalents.

Il est à noter que l'absorption en fonction de la fréquence est relativement insensible au paramètre r_{outer} .

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la simulation de deux absorbants à métamatériaux large bande. En effet, après la présentation des deux absorbants, ils ont été dimensionnés et simulés. Les résultats de simulations obtenues montrent le bon fonctionnement de ces absorbants. Des études paramétriques ont été également effectuées pour ces deux absorbants.

Nous nous sommes intéressés aux absorbants à métamatériaux étant donné qu'ils sont une nouvelle piste pour la réalisation d'absorbants innovants. Vu qu'ils présentent de nombreux avantages, tout au long de ce mémoire nous avons cherché à développer des absorbants larges bandes à base des métamatériaux.

On a commencé par définir le concept des métamatériaux, leurs principes fondamentaux et leurs applications, ensuite on a vu ce que sont les absorbants et ses mécanismes d'absorption. On a vu aussi les spectres de fréquences ou sont utilisé Les absorbants à métamatériaux et on a parlé de quelques progrès récents sur les conceptions des absorbants à métamatériaux dans les spectres de fréquences mentionnées précédemment et leurs applications.

Enfin, deux absorbants larges bandes à métamatériaux ont été dimensionnées et simulées. Les résultats de simulations obtenues montrent le bon fonctionnement de ces absorbants. Des études paramétriques pour chaque absorbant ont été aussi présentées afin de comprendre le fonctionnement de ces absorbants.

- [1] Rodger M. Walser, Electromagnetic metamaterials, Proc. SPIE 4467, Complex Mediums II : Beyond Linear Isotropic Dielectrics, 2001 ; <https://doi.org/10.1117/12.432921>.
- [2] Ari Sihvola, Metamaterials in electromagnetics, Metamaterials, Volume 1, Issue 1, Pages 2-11, ISSN 1873-1988, 2007, <https://doi.org/10.1016/j.metmat.2007.02.003>.
- [3] Davi Bibiano Brito. Metamaterial inspired improved antennas and circuits. Electromagnetism. Télécom ParisTech, English. (pastel-00749642), 2010.
- [4] S Anantha Ramakrishna Physics of negative refractive index materials. Reports on Progress in Physics, 68, 449-521, 2005 doi :10.1088/0034-4885/68/2/R06
- [5] Shelby RA, Smith DR, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction. Science ;292(5514) :77-79, 2001. doi :10.1126/science.1058847
- [6] Engheta, Nader, and Richard W. Ziolkowski, eds. Metamaterials: physics and engineering explorations. John Wiley & Sons, 2006.
- [7] Pendry, J.B., Holden, A.J., Robbins, D.J. and Stewart, W.J. Magnetism from Conductors and Enhanced Nonlinear Phenomena. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 47, 2075-2084. 1999. <http://dx.doi.org/10.1109/22.798002>
- [8] AOs Al-waidh, metamaterials, General Engineering Research Institute, John Moores University, 2009.
- [9] Wan Nordin, M. A., Islam, M. T., and Misran, N., A compact wideband coplanar waveguide fed metamaterial-inspired patch antenna for wireless application, Applied Physics A: Materials Science & Processing, vol. 109, no. 4, pp.961–965, 2012. doi:10.1007/s00339-012-7381-9.
- [10] Landy, N. I., Sajuyigbe, S., Mock, J. J., Smith, D. R., & Padilla, W. J. Perfect metamaterial absorber. Physical review letters, 100(20), 207402, 2008.
- [11] Gangwar, Kaushal & Paras & Gangwar, R. (2014). Metamaterials: Characteristics, Process and Applications. Advance in Electronic and Electric Engineering. ISSN 2231-1297, Volume 4, Number 1, pp. 97-106, 2014.

- [12] Adnan, Noor. Metamaterial electromagnetic absorbers and plasmonic structures. The University of Manchester (United Kingdom), pp. 42-43, 2010.
- [13] Kitic, G., V. Radonic, and V. Crnojevic-Bengin. Soil moisture sensors based on metamaterials. *Songklanakarin Journal of Science and Technology* 34.6 pp. 689-693, 2012.
- [14] N. Engheta, Metamaterials in microwaves and optics: a review, *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, pp. 387-389, 2006. doi: 10.1109/APS.2006.1710539.
- [15] E. Shamonina, L. Solymar, Metamaterials: How the subject started, *Metamaterials*, Volume1, Issue1, Pages12-18, ISSN1873-1988, 2007.
- [16] J.Y. Rhee, Y.J. Yoo, K.W. Kim, Y.J. Kim & Y.P. Lee Metamaterial-based perfect absorbers, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 28:13, 1541-1580, 2014. DOI: 10.1080/09205071.2014.944273
- [17] Yadgar I. Abdulkarim, Ayesha Mohanty, Om Prakash Acharya, Bhargav Appasani, Mohammad S. Khan, S. K. Mohapatra, Fahmi F. Muhammadsharif and Jian Dong. A Review on Metamaterial Absorbers: Microwave to Optical 2022.
- [18] Matthaei GL, Young L, Jones EMT, and others, *Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures*, vol. 5. McGraw-Hill New York, 1964.
- [19] Bahl IJ. *Lumped Elements for RF and Microwave Circuits*. Norwood, MA: Artech house 2003.
- [20] E. Gilbert, Impedance matching with lossy components, in *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. 22, no. 2, pp. 96-100, 1975, doi: 10.1109/TCS.1975.1084016.
- [21] S. Sharma, C. C. Tripathi, and R. Rishi, Impedance Matching Techniques for Microstrip Patch Antenna, *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 10, no. 28, pp. 1-16, 2017.
- [22] Engheta N. Thin Absorbing Screens Using Metamaterial Surfaces. In: *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (IEEE Cat. No. 02CH37313)*, 2. IEEE. p. 392–5, 2002.

- [23] Gang Q, Jia-Fu W, Ming-Bao Y, Wei C, Hong-Ya C, Yong-Feng L. Lowering Plasma Frequency by Enhancing the Effective Mass of Electrons: A Route to Deep Sub-wavelength Metamaterials. *Chin Phys B* 22(8):87302, 2013.
- [24] Hao J, Zhou L, Qiu M. Nearly Total Absorption of Light and Heat Generation by Plasmonic Metamaterials. *Phys Rev B* 83(16):165107, 2011.
- [25] Park JW, Van Tuong P, Rhee JY, Kim KW, Jang WH, Choi EH, et al. Multi-band Metamaterial Absorber Based on the Arrangement of Donut-type Resonators. *Opt Express* 21(8):9691–702, 2013.
- [26] Zheng HY, Jin XR, Park JW, Lu YH, Rhee JY, Jang WH, et al. Tunable Dual-Band Perfect Absorbers Based on Extraordinary Optical Transmission and Fabry-Perot Cavity Resonance. *Opt Express* 20(21):24002–9, 2012.
- [27] Lee YP, Tuong PV, Zheng HY, Rhee JY, Jang WH. An Application of Metamaterials: Perfect Absorbers. *J Korean Phys Soc* 60(8):1203–6, 2012.
- [28] Ji W, Zhang Q, Zhang C. High-Performance and Ultra-broadband Metamaterial Absorber Based on Mixed Absorption Mechanisms. *IEEE Access* 7:57259–66, 2019.
- [29] Yen T, Padilla W, Fang N, Zhang X, Beijing T, Terahertz Magnetic Response from Artificial Materials Terahertz Magnetic Response from Artificial Materials, *Science* no. 303(5663):1494–6. 2004.
- [30] Tao H, Landy NI, Bingham CM, Zhang X, Averitt RD, Padilla WJ. A Metamaterial Absorber for the Terahertz Regime: Design, Fabrication and Characterization. *Opt Express* 16(10):7181–8, 2008.
- [31] Wang B-X, Wang G-Z, Wang L-L. Design of a Novel Dual-Band Terahertz Metamaterial Absorber. *Plasmonics* 11(2):523–30, 2016.
- [32] Shan Y, Chen L, Shi C, Cheng Z, Zang X, Xu B, et al. Ultrathin Flexible Dual Band Terahertz Absorber. *Opt Commun* 350:63–70, 2015.
- [33] Wang B, Wang G, Sang T. Simple Design of Novel Triple-Band Terahertz Metamaterial Absorber for Sensing Application. *J Phys D: Appl Phys* 165307(49):1–7, 2016.
- [34] Avitzour Y, Urzhumov YA, Shvets G. Wide-angle Infrared Absorber Based on a Negative-index Plasmonic Metamaterial. *Phys Rev B* 79(4):45131, 2009.

[35] Hao J, Wang J, Liu X, Padilla WJ, Zhou L, Qiu M. High Performance Optical Absorber Based on a Plasmonic Metamaterial. Appl Phys Lett 96(25):2010.

[36] Bossard JA, Lin L, Yun S, Liu L, Werner DH, Mayer TS. Near-Ideal Optical Metamaterial Absorbers with Super-octave Bandwidth. ACS Nano 8(2):1517–24, 2014. doi:10.1021/nn4057148

[37]URL:

https://www.mathworks.com/products/connections/product_detail/cstmicrowave-studio.html, 1 juillet 2022.

[38] N. Nobilet : Simulations d’antennes avec CST-MWS, Rapport de stage de Master 2, Université Rennes 1, 2006.

[39] URL: <https://www.dps-fr.com/cst-studio-suite>, 1 juillet 2022.

Annexe A : CST MICROWAVE STUDIO

Fondé en 1992, le logiciel de simulation électromagnétique CST MICROWAVE STUDIO (CST MWS) est l'aboutissement de nombreuses années de recherche et développement dans les solutions de calcul les plus efficaces et les plus précises pour les conceptions électromagnétiques 3D. CST MWS est spécialisé dans la fourniture de simulation électromagnétique 3D rapide et précise des problèmes de haute fréquence [37].

Le logiciel utilise la théorie de l'intégration finie la FIT (Finite Integration Technique) qui a été développée par Thomas Weiland lors de sa thèse universitaire à Darmstadt en 1977. Il s'agit de la reformulation des équations intégrales de Maxwell sous une forme discrète afin de les rendre compatibles avec l'informatique pour résoudre des problèmes à géométrie complexe [38].

Afin de pouvoir répondre à toutes les demandes de simulation concernant le domaine de l'électromagnétisme, CST possède plus d'une dizaine de solveurs numériques. Ces solveurs sont tous adaptés à un domaine en particulier : on retrouve notamment des solveurs temporels et fréquentiels pour ce qui concerne les hautes et basses fréquences, un solveur intégral et asymptotique pour tout ce qui traite des larges structures. On retrouve enfin d'autres solveurs comme des solveurs multi physiques (thermique et fluide) ainsi qu'un solveur statique [39].

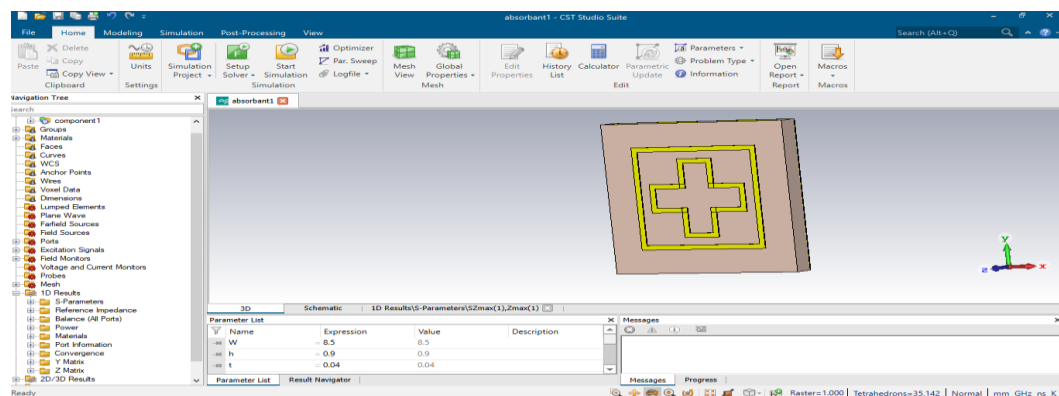


Figure A.1 L'interface principale de CST MICROWAVE Studio.