

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 أبو بكر بلقايد – تلمسان

Université ABOUBEKR BELKAID – TLEMSEN

Faculté de TECHNOLOGIE



MÉMOIRE

Présenté par

SAIDI SOUFIANE

En vue de l'obtention du

Diplôme de MASTER

En système des télécommunications

Thème

**Absorbant à métamatériau hyperfréquence pour
des applications de détection**

Soutenu le 30/06/2021 devant le jury composé de :

Président	Mr. FEHAM Mohammed	Professeur	Université de Tlemcen
Encadrant	Mme. BENMOSTEFA Naima	MCA	Université de Tlemcen
Examinatrice	Mme. ABRI BADAOUI Hadjira	Professeur	Université de Tlemcen

Année universitaire 2020/2021

A

Mes parents

Ma famille et mes amis

*Ceux qui m'ont aidé de près et de
loin*

Tous ceux que j'aime

REMERCIEMENTS

Avant tout, je remercie **ALLAH** le tout puissant .Ses bienfaits nous guide toujours vers la bonne voie.

Je tiens à remercier infiniment Madame **BENMOSTEFA Naima** maitre de conférences (A) à l'université de Tlemcen, mon encadrant pour m'avoir soutenu et guidé tout au long de ce mémoire, sa patience, sa gentillesse, sa disponibilité et ses directives m'ont été très bénéfiques. Cela a été pour moi un grand plaisir de la consulter afin de peaufiner mon manuscrit.

Mes remerciements les plus respectueux s'adressent à Monsieur **FEHAM Mohammed** professeur à l'université de Tlemcen, qui ma fait l'honneur et le plaisir de présider le jury de ma soutenance.

Je tiens à remercier aussi Madame **ABRI BADAoui Hadjira** professeur à l'université de Tlemcen, qui ma fait l'honneur et le plaisir d'examiner mon manuscrit.

Je voudrais également exprimer ma gratitude à tous mes professeurs de la faculté de technologie Aboubekr Belkaid de Chetouane qui ont su m'inculquer des notions tout en étant pédagogues. Je leur exprime ma profonde reconnaissance.

Tous mes remerciements à mes amis qui me sont chers, enfin j'exprime mes profonds remerciements à mes parents qui ont toujours été là pour moi ainsi que mes deux frères.

Résumé

Le sujet des métamatériaux reste d'actualité, bien des applications promises tardent à voir le jour. Les métamatériaux sont des matériaux artificiels présentant des propriétés que l'on ne trouve pas dans les matériaux naturels. Il s'agit en général de matériaux composites constitués de résonateurs. Une des limites de ce type de matériaux est que la taille des résonateurs doit être très petite devant la longueur d'onde utilisée.

Les métamatériaux tirant leurs propriétés des résonateurs sont sujet à des pertes importantes, c'est d'ailleurs la raison pour la quête de matériaux super-absorbants.

Un absorbant électromagnétique ne réfléchit ni ne transmet le rayonnement incident, par conséquent la puissance de l'onde incidente est principalement absorbée dans les matériaux de l'absorbant.

Les performances d'un absorbant dépendent de son épaisseur et de sa morphologie, ainsi que des matériaux utilisés pour le fabriquer. Les propriétés d'absorbant à métamatériau nous laissent envisager la conception de structures innovantes pour des applications de détection.

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

Mots-Clés : Absorbant, Métamatériau, Détection, Onde Electromagnétique, HFSS.

ABSTRACT

the subject of metamaterials remains topical, many promised applications are yet to be seen. Metamaterials are artificial materials with properties not found in natural materials. They are generally composite materials made of resonators. One of the limitations of this type of material is that the size of the resonators must be very small compared to the wavelength used.

Metamaterials drawing their properties from resonators are subject to significant losses, which is the reason for the search for super-absorbent materials.

An electromagnetic absorber neither reflects nor transmits incident radiation, therefore the power of the incident wave is mainly absorbed in the absorber materials.

The performance of an absorber depends on its thickness and morphology, as well as the materials used to make it. The properties of metamaterial absorbers allow us to consider the design of innovative structures for detection applications.

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, Detection, Electromagnetic wave, HFSS.

ملخص

موضوع المواد الخارقة ذا صلة، فإن العديد من التطبيقات الموعودة تكون بطيئة في الرؤية. المواد الخارقة هي مواد من صنع الإنسان لها خصائص لا توجد في المواد الطبيعية. هذه بشكل عام مواد مركبة تتكون من الرنانات.

أحد قيود هذا النوع من المواد هو أن حجم الرنانات يجب أن يكون صغيراً جداً مقارنة بطول الموجة المستخدم.

تتعرض المواد الخارقة التي تستمد خصائصها من الرنانات لخسائر كبيرة، وهذا هو سبب البحث عن مواد فائقة الامتصاص. لا يعكس جهاز الامتصاص الكهرومغناطيسي أو ينقل الإشعاع الساقط، وبالتالي يتم امتصاص قوة الموجة الساقطة بشكل أساسي في المواد الماصة. يعتمد أداء المادة الماصة على شكلها وشكلها، بالإضافة إلى المواد المستخدمة في صنعها. تسمح لنا الخصائص الماصة للمواد الفوقية بالنظر في تصميم الهياكل المبتكرة لتطبيقات الاستشعار. أهداف هذه الأطروحة هي الدراسة النظرية للظروف اللازمة لإنتاج هياكل ماصة رقيقة تعتمد على SRR.

تتم معالجة عمليات المحاكاة تحت برنامج HFSS

كلمات مفتاحية : ماصة، مادة فوق العادة، كشف، موجة كهرومغناطيسية، HFSS

DEDICACE.....	i
REMERCIEMENTS.....	ii
RESUME	iii
LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES TABLEAUX	xii
LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS	xiii
INTRODUCTION GENERALE.....	1
Introduction générale.....	2
CHAPITRE I: L'ÉTAT DE L'ART DES METAMATERIAUX.....	3
I.1 Introduction.....	4
I.2 DEFINITION DES METAMATERIAUX.....	4
I.3 HISTORIQUE DES METAMATERIAUX.....	5
I.4 PROPAGATION ELECTROMAGNETIQUE DANS UN MILIEU HOMOGENE	5
I.5 CAS D'UN MILIEU DOUBLEMENT NEGATIF (METAMATERIAUX)	6
I.6 SYNTHESE DES METAMATERIAUX	8
I.6.1 Approche résonante	8
I.6.1.1 Milieu a permittivité négative	9
I.6.1.2 Milieu a perméabilité négative	10
I.6.1.3 Milieu doublement négatif	12
I.6.2 Composite right left handed CRLH (composition main droite et gauche).....	13
I.7 DOMAINES D'APPLICATION	16
I.7.1 Propagation en espace libre	16
I.7.2 Propagation guidée	19
I.7.3 Matériaux reconfigurables	21
I.8 LA CONCEPTION DE MATERIAUX INNOVANTS	23
I.8.1 Les super lentilles	23
I.8.2 Cape d'invisibilité.....	24

I.9	TYPES DE METAMATERIAUX.....	25
I.10	CONCLUSION	26
CHAPITRE II: LES ABSORBANTS A METAMATERIAUX.....		27
II.1	INTRODUCTION	28
II.2	ABSORBANTS A METAMATERIAUX.....	28
II.3	SCHEMA THEORIQUE DES ABSORBANTS A METAMATERIAUX.....	28
II.3.1	Théorie de l'adaptation d'impédance	29
II.3.2	Théorie de l'interférence.....	30
II.4	ABSORBANTS A METAMATERIAUX A BANDE ETROITE.....	31
II.5	ABSORBANTS A METAMATERIAUX A LARGE BANDE	33
II.6	ABSORBANTS A METAMATERIAUX ACCORDABLES EN FREQUENCE.....	35
II.7	ABSORBANTS A METAMATERIAUX COHERENTS	37
II.8	LES TYPES D'ABSORBANTS ELECTROMAGNETIQUES.....	38
II.8.1	Absorbants diélectriques.....	38
II.8.2	Absorbants structuraux a adaptation d'impédance	39
II.8.2.1	Absorbants pyramidaux.....	39
II.8.2.2	Absorbants chargés progressivement	40
II.8.2.3	Absorbants a couches d'adaptation d'impédance	40
II.8.3	Absorbants résonants	41
II.8.4	Absorbants comportant des circuits analogiques.....	42
II.8.5	Absorbants adaptatifs.....	44
II.8.6	Absorbants magnétiques.....	44
II.9	CONCLUSION.....	46
CHAPITRE III: ABSORBANT A METAMATERIAU ELECTROMAGNETIQUE A LARGE BANDE ET QUADRI BANDE.....		47
III.1	INTRODUCTION	48
III.2	ABSORBANT A METAMATERIAU ELECTROMAGNETIQUE A QUADRI BANDE UTILISANT LA CELLULE (MMA).....	48
III.2.1	Etude parametrique de la cellule unitaire MMA	54
III.2.1.1	Influence de L'écart entre les Anneaux	54

III.2.1.2	Influence de l'épaisseur du substrat	55
III.3	Absorbant à métamatériau électromagnétique a large bande.....	55
III.3.1	Résultats.....	57
III.3.2	Etude paramétrique de la cellule unitaire	58
III.3.2.1	Influence de largeur de l'anneau métallique	58
III.3.2.2	Influence de la constante diélectrique du substrat.....	58
III.4	CONCLUSION.....	59
Chapitre IV: ABSORBANT A METAMATERIAU MICRO-ONDE POUR LES APPLICATIONS DE DETECTION.....		60
IV.1	INTRODUCTION	61
IV.2	CAPTEURS A BASE DE METAMATERIAUX	61
IV.3	PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES CAPTEURS METAMATERIAUX	62
IV.4	LES RESONATEUR A ANNEAU FENDU (SPLIT RING RESONATEUR.....	63
IV.4.1	Le complémentaire du résonateur en anneau fendu CSRR (Complementary Split Ring Resonator).....	64
IV.4.2	Type des SRR	65
IV.5	DETAILS DE CONCEPTION	66
IV.5.1	Influence de la constante diélectrique sur l'absorption	67
IV.5.2	Extraction par la méthode de Nicolson-Ross-Weir	67
IV.6	ABSORBANT ET CAPTEUR A METAMATERIAU	70
IV.6.1	Application de l'absorbant à métamatériau.....	70
IV.6.1.1	Conception 1 « Etude de l'influence de l'épaisseur du substrat sur l'absorption ».....	71
IV.6.2	Application du capteur de pression.....	75
IV.6.3	Application du capteur de densité.....	76
IV.7	CONCLUSION.....	79
CONCLUSION GENERALE		81
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		83

LISTE DES FIGURES DU CHAPITRE I :

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.4

Figure I.2 : (a) Trièdre direct (matériaux main droite) et (b) Trièdre indirect (matériaux main gauche)7

Figure I.3 : Propagation d'une onde plane à travers un milieu selon le signe de ces paramètres constitutifs (permittivité et perméabilité).7

Figure I.4 : Loi de Snell-Decartes 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).8

Figure I.5 : Structure du réseau de fils métalliques minces proposé par Pendry pour avoir un milieu à permittivité négative [5].10

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].10

Figure I.7 : Les SRR proposés par Pendry pour avoir un milieu à perméabilité négative [7].11

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].12

Figure I.9 : La structure proposée par D. Smith qui combine les fils minces et les SRR pour avoir un milieu doublement négatif (métamatériaux) [2].12

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].
.....13

Figure I.11 : Modèle de tronçon de ligne classique (main droite) avec pertes.13

Figure I.12 : Modèles de tronçons de ligne duale (main gauche) avec pertes. $L_L C_L$14

Figure I.13 : Diagrammes de dispersion correspondant aux deux cas idéaux de lignes main gauche et de ligne main droite.15

Figure I.14 : Modèles de tronçons de ligne CRLH : (a) Sans pertes. (b) Avec pertes.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.	16
Figure I.16 : Prototype du métamatériau 2D, les résonateurs en cuivre sont gravés sur un substrat en fibre de verre, les rubans sont gravés sur la face opposée [15].	17
Figure I.17 : (a) Schéma du dispositif expérimental, la flèche noire représente le faisceau μ onde qui est réfracté en traversant le prisme, un détecteur permet de calculer l'angle de réfraction. (b) Résultat de l'expérience, puissance transmise en fonction de l'angle pour un échantillon en Téflon (courbe pointillée) et un échantillon en métamatériaux (courbe pleine), l'angle de réfraction est positif pour le Téflon et négatif pour les métamatériaux [15].	17
Figure I.18 : Cas de la lentille classique : (a) Elle doit être convexe pour focaliser les ondes. (b) Les ondes évanescentes décroissent, la résolution de l'image est mauvaise. Cas de la superlentille : (c) L'objet est focalisé avec une lentille plane. (d) Les ondes évanescentes s'amplifient dans la lentille, la résolution de l'image est meilleure.	18
Figure I.19 : Principe du Cloaking, les rayons contournent la sphère (objet) et se reconstruisent en aval, un observateur en aval ne voit pas l'objet. (a) Vue 2D, (b) Vue 3D [19].	18
Figure I.20 : (a) Structure coplanaire de l'antenne à retro-propagation. (b) Diagramme de rayonnement de l'antenne à 15 GHz [14].	19
Figure I.21 : Image du prototype de ligne CRLH fabriquée en technologie micro-ruban et composée de 7 cellules unitaires [11].	19
Figure I.22 : Résultats des mesures de la structure de la Figure 1.21. (a) Magnitude des paramètres S. (b) β en fonction de la fréquence [11].	20
Figure I.23 : (a) Prototype d'un coupleur -3dB composé de 3 cellules CRLH [22].	20
Figure I.24 : (a) Layout de la structure main gauche basé sur des SRR gravés sur la face arrière d'une ligne coplanaire chargée par des fils minces. (b) Paramètres S simulés (trait fin) et mesurés (trait gras) de la structure [23].	21
Figure I.25 : (a) Topologie du SRR carré chargé avec une diode varactor. (b) Prototype du filtre réalisé à partir de 2 cellules. (c) Coefficients de transmission mesurés en fonction de la tension appliquée sur les diodes.	22
Figure I.26 : (a) Cellule unitaire CRLH variable à l'aide d'un MEMS [28].	22

Figure I.27 : (a) Topologie du déphaseur CRLH utilisant les ferroélectriques comme moyen d'accordabilité [32].....22

Figure I.28 : (a) Focalisation avec une lentille ordinaire (b) Focalisation avec une superlentille.....23

Figure I.29 : (a) Image produite avec une superlentille (b) Image produite avec une lentille ordinaire [42].....24

Figure I.30 : Premiers pas vers la cape d'invisibilité.....24

Figure I.31 : Invisibilité des métamatériaux opérant dans l'infrarouge.....25

LISTE DES FIGURES DU CHAPITRE II :

Figure II.1 : Modèle de réflexions multiples et d'interférences d'un absorbant à métamatériau. La ligne pointillée jaune désigne le réseau de résonateurs [22].....31

Figure II.2 : (a) Cellule unitaire du premier absorbant à métamatériau planaire, (b) Réflexion, transmission et absorbance simulées à la fréquence micro-ondes [21]33

Figure II.3 : (a) Cellule unitaire d'un absorbant à métamatériau dendritique et (b) Spectres d'absorption simulés et mesurés [25].33

Figure II.4: Vue schématique de l'absorbant à métamatériau en dents de scie et de son spectre d'absorption [35].....33

Figure II.5 : (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 [48].34

Figure II.6 : (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 [50].....35

Figure II.7 : (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 [62].....36

Figure II.8 : (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 [65].....37

Figure II.9: (a) Illustration de la disposition d'un absorbant pyramidal, et (b) Exemple d'absorbant pyramidal	39
Figure II.10: (a) Courbe d'impédance idéale et courbe d'impédance typique, et (b) Exemple de matériau absorbant chargé progressivement.....	40
Figure II.11 : Illustration de la disposition des couches constitutives de l'absorbant à couches d'adaptation d'impédance	41
Figure II.12 : Illustration des différents types de matériaux structuraux.....	41
Figure II.13 : Illustration de la disposition d'un absorbant comportant des circuits analogiques comparé à son circuit équivalent.....	42
Figure II.14 : Liste non exhaustive de formes de FSS.....	43
Figure II.15 : Illustration de courbes typiques de progression de la permittivité et de la perméabilité d'un matériau magnétique en fréquence.	45

LISTE DES FIGURES DU CHAPITRE III :

Figure III.1 : La cellule unitaire.....	49
Figure III.2 : La cellule unitaire sous HFSS.	49
Figure III.3 : Coefficient de réflexion et d'absorption de la cellule unitaire.	51
Figure III.4 : (a) Cellule unitaire (modèle1) ;(b) L'absorption en fonction de la fréquence.	51
Figure III.5 : (a) Cellule unitaire (modèle2) ;(b) L'absorption en fonction de la fréquence.	52
Figure III.6 : (a) Cellule unitaire (modèle3) ;(b) L'absorption en fonction de la fréquence.	52
Figure III.7 : (a) Cellule unitaire (modèle4) ;(b) L'absorption en fonction de la fréquence.	53
Figure III.8 : Influence de changement de l'écart entre les anneaux sur l'absorption.....	54
Figure III.9 : Influence de changement de L'épaisseur du substrat sur l'absorption	55
Figure III.10 : Cellule unitaire proposée.....	56
Figure III.11 : Cellule unitaire sous HFSS.	57
Figure III.12 : Coefficients de réflexion et la magnitude d'absorption.....	57
Figure III.13 : Influence de changement de largeur de l'anneau sur l'absorption.....	58
Figure III.14 : Influence de changement de la constante diélectrique du substrat sur l'absorption.	59

LISTE DES FIGURES DU CHAPITRE IV :

Figure IV.1 : Un exemple de résonateur à anneau fendu constitué d'un carré intérieur avec une fente64

Figure IV.2 : Géométries du SRR et du CSRR.64

Figure IV.3 : Structure proposée.66

Figure IV.4 : (a) La structure proposée pour la configuration de détection montrant les couches ; (b) La structure proposée détaillée.....66

Figure IV.5 : Absorption en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de la constante diélectrique.67

Figure IV.6 : Le processus de la méthode NRW.68

Figure IV.7 : Introduction des expressions de "NRW" dans HFSS.....69

Figure IV.8 : (a) Paramètres de matériau effectifs extraits, (b) Modèle de circuit équivalent de la structure proposée.70

Figure IV.9 : (a) Structure comportant un résonateur carré, (b) Structure comportant un résonateur à anneau fendu, (c) Structure proposée qui a un anneau carré et un résonateur en anneau fendu.73

Figure IV.10 : (a) Structure comportant un résonateur carré, (b) Structure comportant un résonateur à anneau fendu, (c) Structure proposée qui a un anneau carré et un résonateur en anneau fendu avec épaisseur =3.2mm.75

Figure IV.11 : Résultats de comparaison pour la configuration du capteur de pression entre 1 et 2 mm...76

Figure IV.12 : Comparaison des résultats de simulation pour les matériaux Arlon type (a)AD300, (b)AD 350 et(c) AD450.77

Figure IV.13 : Résultats de la simulation du capteur de densité basé sur le MA pour l'écorce de pin, les algues et la paille entre 7,5 et 8,5 GHz.78

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Classification des métamatériaux [45] [46].....25

Tableau III.1 : Les différentes dimensions de la cellule.50

Tableau III.2 : Absorption pour diverses étapes de conception vers la cellule unitaire.53

Tableau III.3 : Les valeurs des paramètres de la cellule proposée.56

Tableau IV.1 : Les avantages et les inconvénients de chaque principe.....63

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

SRR: split-Ring-Resonator

CSRR: Complementary Split Ring Resonator

HFSS: High Frequency Structure Simulator

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Les métamatériaux sont une avancée dans la science des matériaux, une révolution responsable de la connaissance et de la maîtrise des phénomènes électromagnétiques. Les métamatériaux sont des matériaux composites artificiels dont la structure interne est périodique et surtout sub-longueur d'onde.

Ils sont assimilables à des matériaux homogènes et peuvent être décrits par des paramètres dits « effectifs » comme la permittivité et la perméabilité si ces deux grandeurs sont négatives simultanément, nous sommes en présence d'un matériau à indice négatif, appelés parfois matériaux « main gauche » capable donc de réfraction négative, cela paraît difficile à réaliser en pratique. Ne serait-ce que parce que les matériaux usuels (métaux, verre, plastique) ne présentent pas de magnétisme. Par le contrôle de certaines propriétés de la matière les métamatériaux offrent ainsi des comportements inexistant dans la nature.

Ceci ouvre ainsi la voie à de nouvelles applications et à la réalisation de dispositifs tels que les lentilles à indice négatifs, des mécanismes de camouflage ...ect. Les matériaux absorbants électromagnétiques ou radar absorbing materials (RAM) ont été créés à la fois aux U.S.A, et Allemagne lors de la seconde guerre mondiale mais l'intérêt pour le sujet s'est ravivé au cours des dix dernières années.

Un absorbant à métamatériau est un type de métamatériau destiné à absorber efficacement les rayonnements électromagnétiques tels que la lumière. Par conséquent, ils offrent des avantages par rapport aux absorbants conventionnels tels qu'une miniaturisation plus poussée, une grande adaptabilité et une efficacité accrue.

Le but de ce mémoire est d'étudier un absorbant d'onde électromagnétique à base de métamatériau fonctionnant dans les bandes de fréquence différentes. Par la suite nous analyserons cette structure absorbante sous logiciel HFSS (High Frequency Structure Simulator) le choix de ce logiciel pour notre application est très éclairée, en effet c'est un logiciel dédié à la simulation haute fréquence des circuits micro-ondes. En outre, il nous permettra de visualiser les détails de tous les paramètres.

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

Le second chapitre traite les différentes théories des métamatériaux et ses récentes percées ainsi que l'étude de divers absorbants à métamatériaux.

Le troisième chapitre est consacré à des simulations que nous avons réalisées. Nous avons notamment démontré une absorption presque totale avec nos structures.

Le dernier chapitre de ce manuscrit est dédié aux propriétés de détection. Le taux d'absorption et les résultats obtenus sont mis en évidence dans les simulations proposées. Enfin dans la conclusion générale de ce mémoire nous récapitulerons l'ensemble de nos recherches.

CHAPITRE I
L'ÉTAT DE L'ART DES
METAMATERIAUX

I.1 Introduction

La technologie et la science innovent constamment. La performance des matériaux poussent les limites du possible la découverte assez récente dans le domaine de l'optique (Science qui a pour objet l'étude de la lumière et ses applications) illustre notamment le métamatériau une révolution en elle-même, une sorte de structure artificielle qui possède des propriétés n'existant dans aucun matériau naturel. Egalement appelés « matériau main gauche », les métamatériaux n'ont cessé d'attiser l'intérêt des chercheurs. C'est aujourd'hui un domaine très actif.

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, deux approches théoriques sont exposées l'une sur les réseaux de fils et résonateurs et l'autre sur les lignes de transmission des exemples d'applications sont également dressés.

I.2 DEFINITION DES METAMATERIAUX

Les métamatériaux sont des architectures périodiques diélectriques (qui ne conduit pas ou peu l'électricité mais sous influence électrostatique) ou métalliques qui se comportent comme un matériau homogène conçu par l'homme en vue d'obtenir une combinaison optimisée de deux ou plusieurs réponses à une excitation spécifique. La première théorie concernant leurs propriétés électromagnétiques a été introduite par le chercheur russe Victor Veselago en 1964 [1]. Les spécialistes des champs et ondes électromagnétiques emploient souvent le terme « métamatériaux » pour désigner spécifiquement des matériaux qui présentent un indice de réfraction négative (permittivité et perméabilité négative). Ces structures ont ainsi des propriétés que l'on ne retrouve pas à l'état naturel ceci explique le préfixe méta qui signifie au delà de. La figure (I.1) permet de résumer la situation. Ces architectures présentent une structuration (cellule de base constituant le matériau) particulièrement petite pour créer des réseaux à petites périodes. Les métamatériaux peuvent être ainsi décrits comme des milieux moyens en raison de leurs dimensions propres, très inférieurs à la longueur d'onde de travail λ_g . Les métamatériaux ont un indice de réfraction inférieur à 1, voir même négative ($n < 0$).

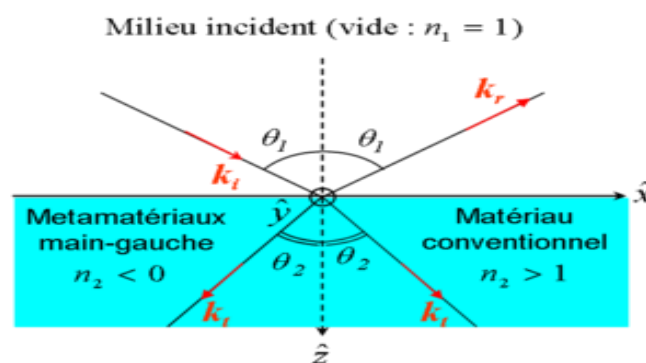


Figure I.1 : Schéma de la réflexion-transmission d'une onde plane lors d'un saut d'indice : réfraction normale à droite, et réfraction négative à gauche.

I.3 HISTORIQUE DES METAMATERIAUX

Historiquement les métamatériaux ne sont pas de conception récente en particulier les métamatériaux en optique. Parmi les exemples les plus connus, on trouve les vitraux en verre coloré des cathédrales ou les alliages utilisés en métallurgie.

Par contre en électromagnétisme, ils sont nettement plus récents on peut citer :

- Un réflecteur métallique formé d'une grille périodique de fils déposé par Marconi et Franklin en 1919 [36].
- L'antenne de télévision inventée en 1926 à l'université de Sendai au Japon par H.yugi [37]
- L'invention du radar pendant et après la seconde guerre mondiale.

Mais la première théorie régissant le fonctionnement du métamatériau fut élaborée en 1967 par le physicien russe Victor Veselago [1], cependant l'absence de matériau à perméabilité négative rendait à cette époque, impossible la démonstration expérimentale de ses résultats.

Il fallut attendre la fin des années 1990, avec John Pendry et son équipe qui réalisent des travaux sur les réseaux des fils métalliques (wire medium) [4]. Et sur résonateurs en forme d'anneaux coupés (Split Ring Résonateur ('SRR')), ils obtiennent respectivement une permittivité et perméabilité négatives sous certaines conditions qu'on verra dans la suite de ce chapitre.

I.4 PROPAGATION ELECTROMAGNETIQUE DANS UN MILIEU HOMOGENE

Pour une onde électromagnétique monochromatique qui se propage dans un milieu homogène, on peut réécrire les équations de Maxwell sous cette forme [1] :

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

Avec :

$$B = \mu H \quad \text{et} \quad D = \varepsilon E \quad (\text{I.2})$$

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

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad \text{et} \quad \varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0 \quad (\text{I.3})$$

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 :

$$E = E_0 e^{j\omega t} e^{-\gamma z} \quad \text{et} \quad H = H_0 e^{j\omega t} e^{-\gamma z} \quad (\text{I.4})$$

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 :

$$\omega = 2 \pi f \quad (\text{I.5})$$

Avec f la fréquence.

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

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (\text{I.6})$$

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) :

$$E = E_0 e^{j\omega t} e^{-jkz} \quad \text{et} \quad H = H_0 e^{j\omega t} e^{-jkz} \quad (\text{I.7})$$

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

$$\beta = k \quad (\text{I.8})$$

A partir des équations (I.1), (I.2) et (I.7), on peut réécrire les équations de Maxwell sous cette forme :

$$k \times E = \omega \mu H \quad \text{et} \quad k \times H = -\omega \varepsilon E \quad (\text{I.9})$$

I.5 CAS D'UN MILIEU DOUBLEMENT NEGATIF (METAMATERIAUX)

A partir de l'équation (I.9), 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 :

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (\text{I.10})$$

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.

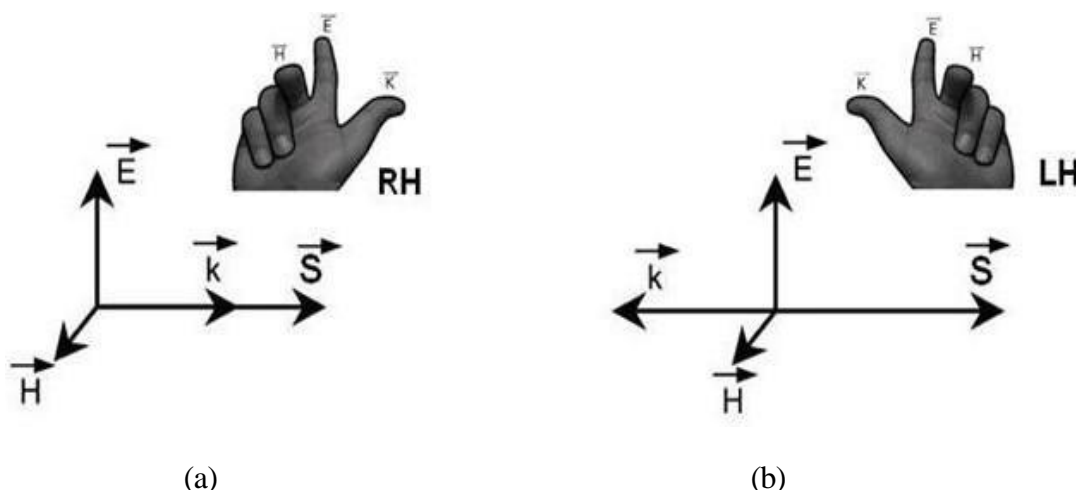


Figure I.2 : (a) Trièdre direct (matériaux main droite) et (b) Trièdre indirect (matériaux main gauche)
 En général, la réponse électromagnétique d'un matériau quelconque face à une onde électromagnétique incidente est déterminée par ses deux paramètres intrinsèques ϵ_r et μ_r . Donc, selon les signes de ϵ_r et μ_r , quatre combinaisons sont possibles. La Figure (I.3) représente les différents types de matériaux selon ces combinaisons.

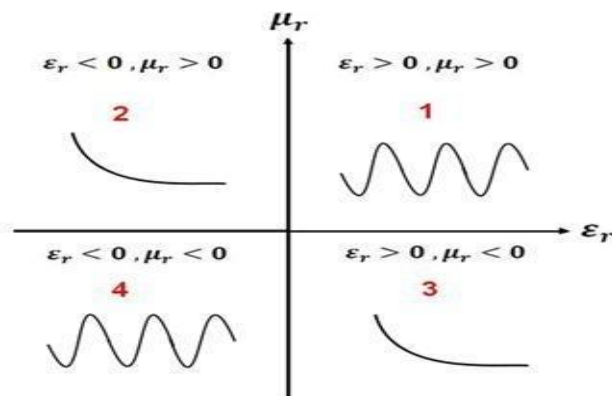


Figure I.3 : Propagation d'une onde plane à travers un milieu selon le signe de ces paramètres constitutifs (permittivité et perméabilité).

Les cadrans 1 et 4 sont les zones qui satisfont l'équation de propagation (I.9), 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 où $\epsilon_r < 0$ 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 évanescence). 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).

$$v_{\varphi} = \frac{\omega}{k} \quad (I.11)$$

$$v_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} \quad (I.12)$$

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 :

Milieu main droite : $v_{\varphi} > 0$ ($k > 0$) et $v_g > 0$ (I.13)

Milieu main gauche : $v_{\varphi} < 0$ ($k < 0$) et $v_g > 0$ (I.14)

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 :

$$n = \pm \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (I.15)$$

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 [1] Figure (I.4).

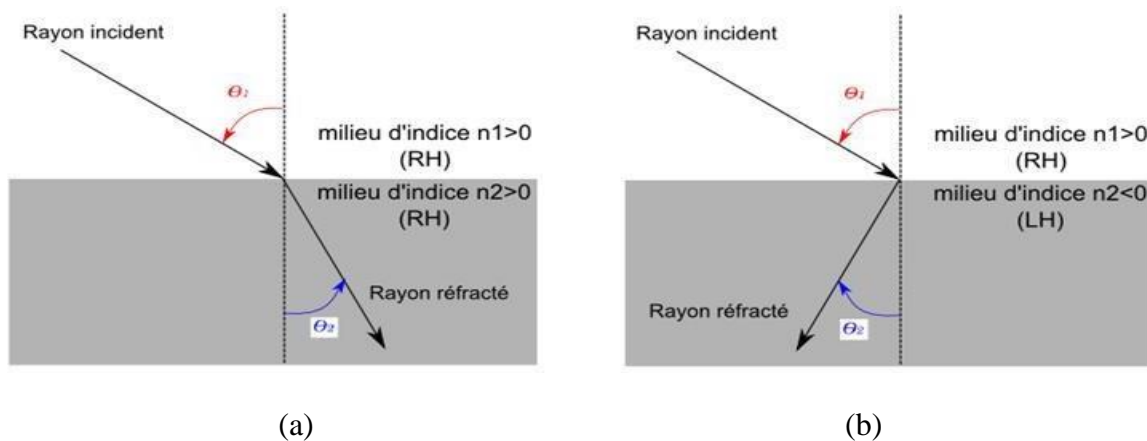


Figure I.4 : Loi de Snell-Descartes lors du passage d'une onde d'un milieu main droite (a) Vers un milieu main droite (angle positif), (b) Vers un milieu main gauche (angle négatif).

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 [1].

I.6 SYNTHÈSE DES METAMATERIAUX

I.6.1 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.6.1.1 Milieu a permittivité négative

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

$$\varepsilon_r(f) = 1 - \frac{f_{pe}^2}{f^2 + j f_c f} \quad (I.16)$$

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).

$$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{n e^2}{\varepsilon_0 m_e}} \quad (I.17)$$

$$\omega_c = \frac{1}{\tau} \quad (I.18)$$

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.16), 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.17), 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.17) 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.20).

$$n_{eff} = \frac{n \pi r^2}{a^2} \quad (I.19)$$

$$m_{eff} = \frac{\mu_0 e^2 \pi r^2 n}{2\pi} \ln\left(\frac{a}{r}\right) \quad (I.20)$$

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).

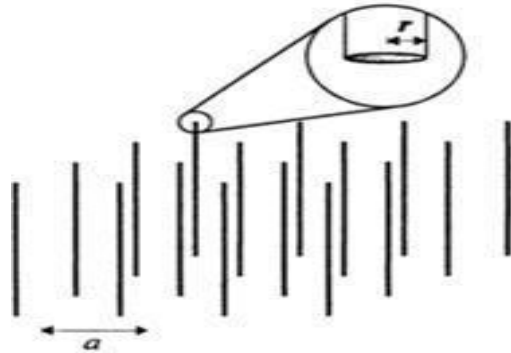


Figure I.5 : Structure du réseau de fils métalliques minces proposé par Pendry pour avoir un milieu à permittivité négative [5].

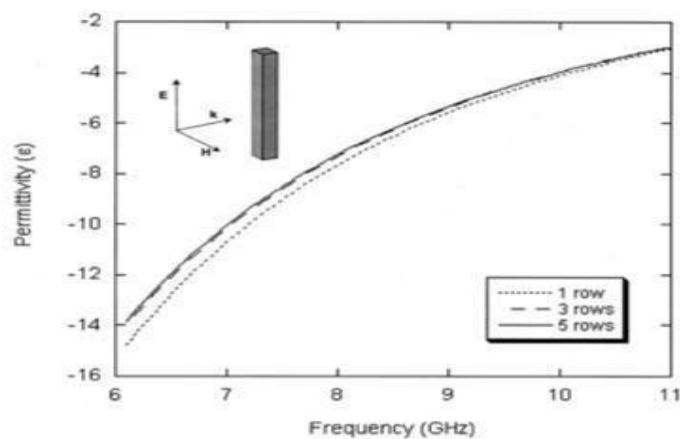


Figure I.6 : Exemple de la permittivité (partie réelle) d'un réseau de fils, la permittivité est négative, elle reprend une valeur positive à la fréquence plasma électrique (environ 22.3 GHz), le champ électrique est orienté en parallèle avec les fils [6].

I.6.1.2 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) [7]. Il s'agit de deux cercles métalliques ouverts imbriqués. Ils sont excités par un champ électromagnétique dont le champ magnétique est dirigé selon l'axe des cercles Figure (I.7).

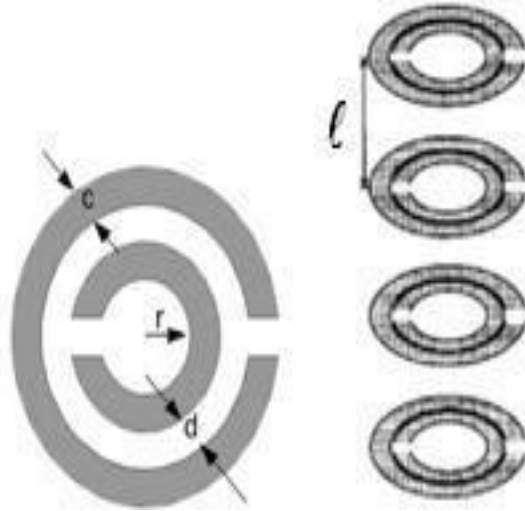


Figure I.7 : Les SRR proposés par Pendry pour avoir un milieu à perméabilité négative [7].

La dépendance fréquentielle de la perméabilité suit un modèle de Lorentz donné par l'équation (I.21).

$$\mu_{eff}(\omega) = 1 - \frac{\omega_{pm}^2 - \omega_m^2}{\omega(\omega + j\Gamma) - \omega_m^2} \quad (I.21)$$

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 :

$$\omega_m = \sqrt{\frac{3 l c_0^2}{\pi \ln(\frac{2c}{d}) r^3}} \quad (I.22)$$

$$\omega_{pm} = \frac{\omega_m}{\sqrt{1 - \frac{\pi r^2}{a^2}}} \quad (I.23)$$

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.

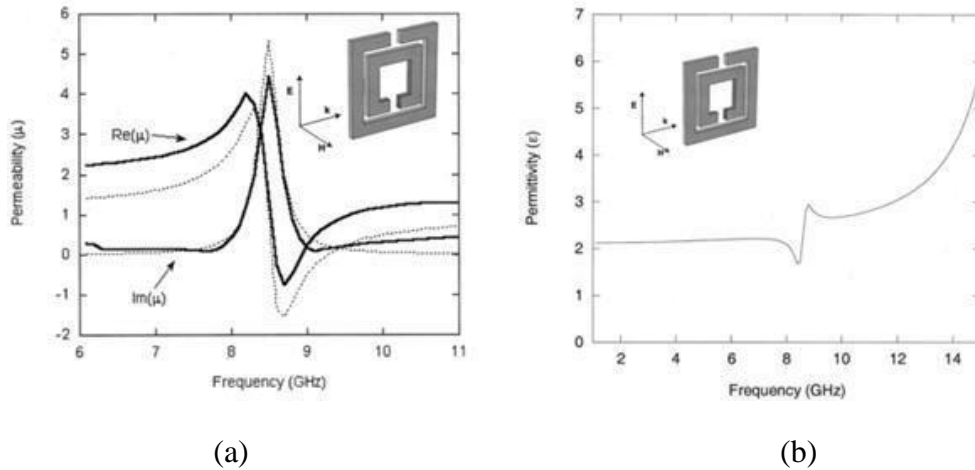


Figure I.8 : (a) Exemple de la perméabilité d'un réseau de SRR, la perméabilité (partie réelle) devient négative à environ 8.5 GHz. (b) La permittivité (partie réelle) reste toujours positive. Le champ magnétique est orienté selon l'axe du SRR [6].

I.6.1.3 Milieu doublement négatif

La première démonstration expérimentale d'un milieu composite doublement négatif a été présentée par D. Smith en 2000 [7], [8], [9]. 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) [2].

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.

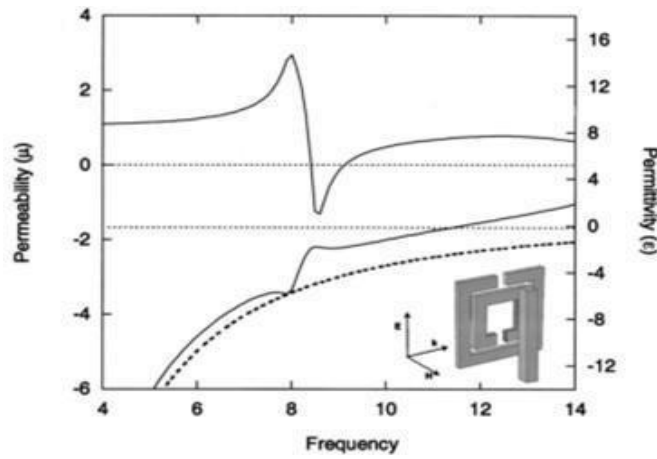


Figure I.10 : Exemple de la permittivité et de la perméabilité d'un réseau constitué de fils minces et de SRR, on observe l'existence d'une bande de fréquences entre 8.5 et 9 GHz où les deux sont négatives [6].

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 :

$$Z_n = \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \quad (I.24)$$

I.6.2 Composite right left handed CRLH (composition main droite et gauche)

En 2002, les deux groupes de recherche de C. Caloz, T. Itoh [10] [11] et G. Eleftheriades [12] [13] [14] 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).

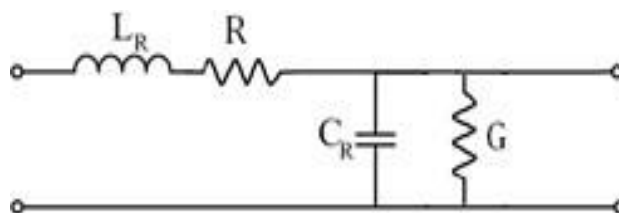


Figure I.11 : Modèle de tronçon de ligne classique (main droite) avec pertes.

La constante de propagation dans la ligne s'écrit :

$$\gamma = \alpha + j\beta = \pm\sqrt{ZY} \quad (I.25)$$

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

$$\beta = \omega\sqrt{L_R C_R} \quad (I.26)$$

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

$$\frac{\partial V(z)}{\partial z} = -I(z)Z \quad \text{et} \quad \frac{\partial I(z)}{\partial z} = -V(z)Y \quad (I.27)$$

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

$$\frac{\partial E(z)}{\partial z} = j\omega\mu H \quad \text{et} \quad \frac{\partial H(z)}{\partial z} = j\omega\varepsilon E \quad (I.28)$$

Il est possible d'identifier les équations des télégraphistes (I.27) aux équations de Maxwell (I.28) en faisant correspondre la tension au champ électrique et le courant au champ magnétique, la permittivité et la perméabilité peuvent s'écrire alors :

$$\varepsilon = \frac{Y}{j\omega} \quad \text{et} \quad \mu = \frac{Z}{j\omega} \quad (I.29)$$

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).

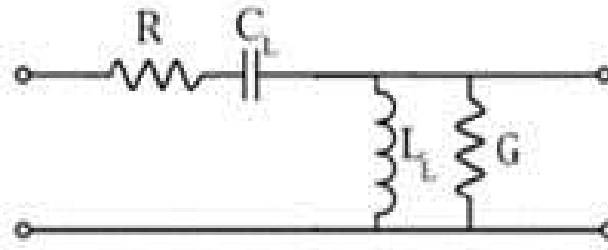


Figure I.12 : Modèles de tronçons de ligne duale (main gauche) avec pertes. L_L C_L .

Dans ce cas on a :

$$\beta = -\frac{1}{\omega\sqrt{L_L C_L}} \quad (I.30)$$

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.11) et (I.12) 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.30), 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).

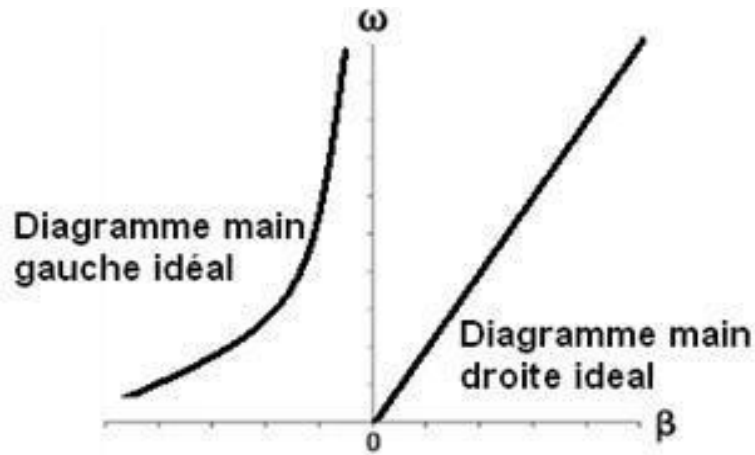


Figure I.13 : Diagrammes de dispersion correspondant aux deux cas idéaux de lignes main gauche et de ligne main droite.

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.

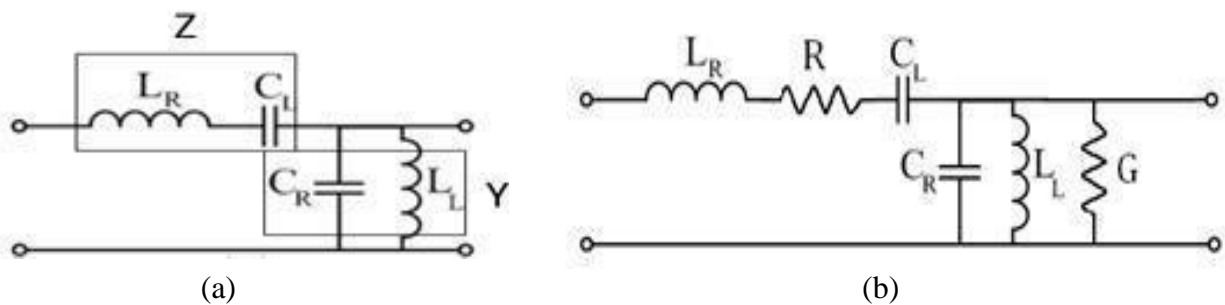


Figure I.14 : Modèles de tronçons de ligne CRLH : (a) Sans pertes. (b) Avec pertes.

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

$$\beta = \pm \sqrt{\omega^2 L_R C_L + \frac{1}{\omega^2 L_L C_L} - \left(\frac{L_R}{L_L} + \frac{C_R}{C_L} \right)} \quad (I.31)$$

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).

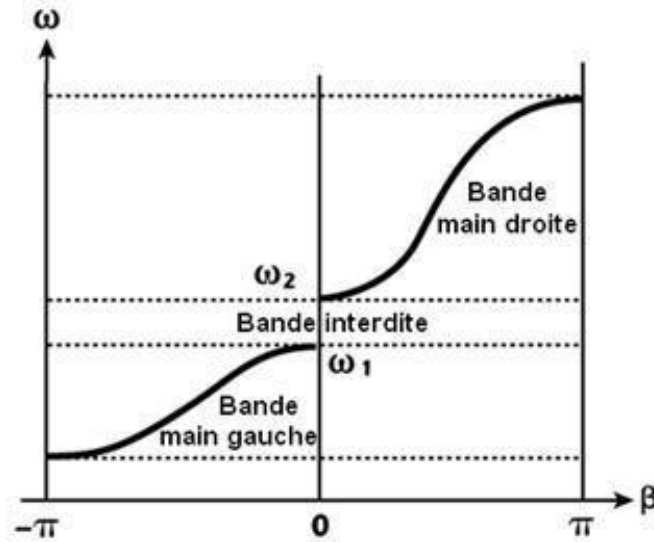


Figure I.15 : Diagramme de dispersion correspondant à une ligne CRLH, si $\omega_1 \neq \omega_2$ nous avons un cas non équilibré (présence d'une bande interdite), si $\omega_1 = \omega_2$ nous avons un cas équilibré.

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

$$\omega_1 = \min \left(\frac{1}{\sqrt{L_R C_L}}, \frac{1}{\sqrt{L_L C_R}} \right) \quad \text{et} \quad \omega_2 = \max \left(\frac{1}{\sqrt{L_R C_L}}, \frac{1}{\sqrt{L_L C_R}} \right) \quad (\text{I.32})$$

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 résonnances du circuit sont égales :

$$\sqrt{L_R C_L} = \sqrt{L_L C_R} \quad (\text{I.33})$$

I.7 DOMAINES D'APPLICATION

I.7.1 Propagation en espace libre

La structure de la première démonstration d'un métamatériau proposée par Smith Figure (1.9) était un réseau unidimensionnel ayant une permittivité et une perméabilité négatives. En 2001, R.A Shelby [15] a proposé une version bidimensionnelle de ce milieu Figure (I.16). La structure est basée sur des SRR carrés en cuivre, imprimés sur l'une des faces d'un substrat en fibre de verre, des rubans fins en cuivre ont été gravés sur la face opposée. Les cellules ont été assemblées pour avoir une structure périodique sur deux dimensions. Un prisme a été fabriqué à l'aide de ces cellules Figure (I.17.a), la propagation d'une onde électromagnétique à travers ce prisme produit un rayon réfracté d'un angle négatif ce qui a mis en évidence la réfraction négative de cette structure Figure (I.17.b). Cette expérience a été reproduite par d'autres groupes de recherche [16] [17].

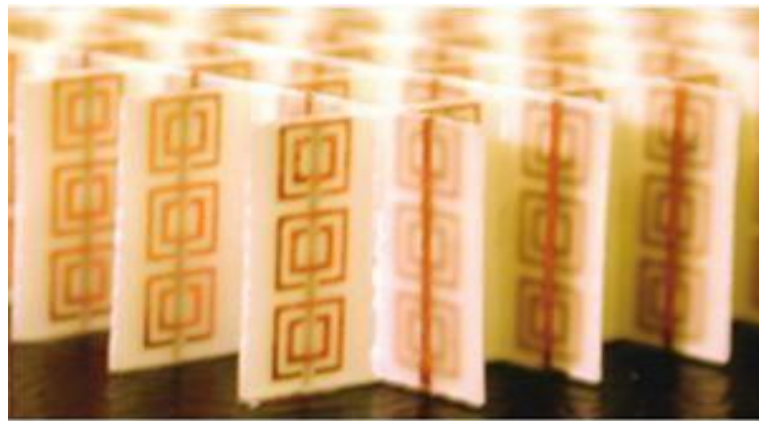


Figure I.16 : Prototype du métamatériau 2D, les résonateurs en cuivre sont gravés sur un substrat en fibre de verre, les rubans sont gravés sur la face opposée [15].

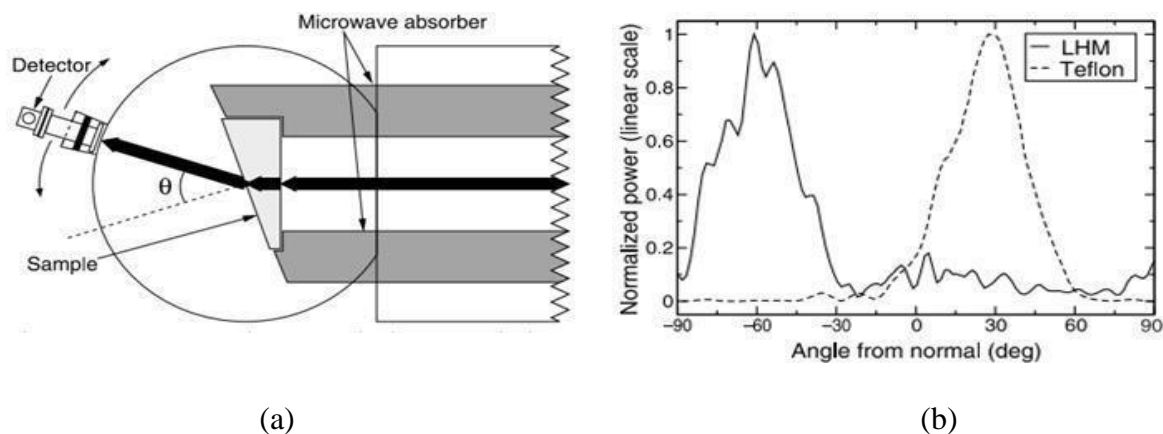


Figure I.17 : (a) Schéma du dispositif expérimental, la flèche noire représente le faisceau μ onde qui est réfracté en traversant le prisme, un détecteur permet de calculer l'angle de réfraction. (b) Résultat de l'expérience, puissance transmise en fonction de l'angle pour un échantillon en Téflon (courbe pointillée) et un échantillon en métamatériaux (courbe pleine), l'angle de réfraction est positif pour le Téflon et négatif pour les métamatériaux [15].

Dans le même sens, la réfraction négative donne la possibilité de focaliser une onde en utilisant une lentille plane. En effet, les métamatériaux font en sorte que les ondes électromagnétiques focalisent sur un point au lieu de dévier vers l'extérieur. Une lentille classique doit normalement être convexe pour focaliser la lumière, ce qui n'est pas le cas d'une lentille à base de métamatériaux. D'un autre côté, les lentilles classiques ne peuvent pas voir des détails plus petits que la longueur d'onde électromagnétique. Par exemple, les atomes sont plus petits que les longueurs d'ondes de la lumière visible et ne peuvent donc pas être vus à l'aide d'un microscope optique. Cependant, comme les métamatériaux font que la lumière subit une diffraction inversée, ils permettent une « super-résolution » : ces lentilles main gauche plates sont capables de focaliser les ondes évanescentes, qui transportent des détails plus petit que les longueurs d'ondes d'un objet, d'où l'appellation « lentilles parfaites » ou « super lentilles » Figure (I.18) [18].

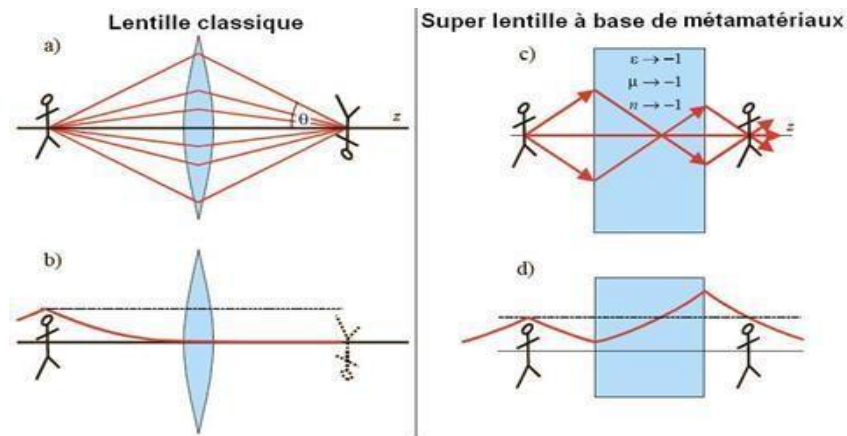


Figure I.18 : Cas de la lentille classique : (a) Elle doit être convexe pour focaliser les ondes. (b) Les ondes évanescentes décroissent, la résolution de l'image est mauvaise. Cas de la super lentille : (c) L'objet est focalisé avec une lentille plane. (d) Les ondes évanescentes s'amplifient dans la lentille, la résolution de l'image est meilleure.

Une autre application potentielle qui a suscité un grand intérêt de la part des chercheurs est la cape d'invisibilité ou « Cloaking » [19], cette structure vise à rendre un objet invisible en l'entourant d'un réseau de métamatériaux qui va détourner la lumière (où les ondes électromagnétiques en général) et permettre la reconstruction des fronts d'onde en aval de cet objet Figure (I.19). Cette approche présente beaucoup d'intérêt notamment dans le domaine de la défense pour les applications de furtivité.

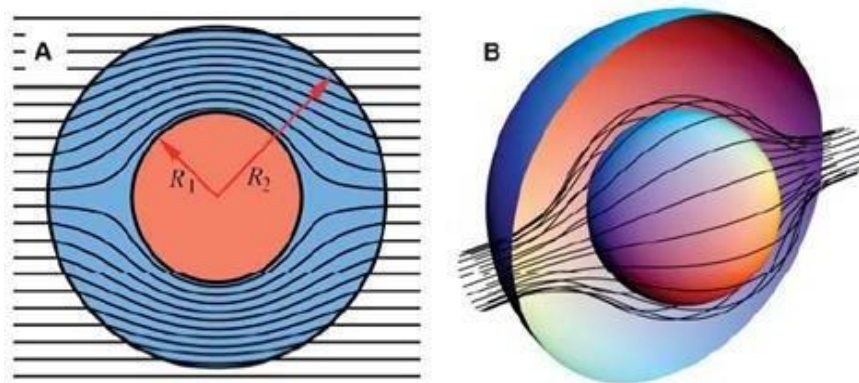


Figure I.19 : Principe du Cloaking, les rayons contournent la sphère (objet) et se reconstruisent en aval, un observateur en aval ne voit pas l'objet. (a) Vue 2D, (b) Vue 3D [19].

La caractéristique main gauche a été aussi utilisée dans le domaine des antennes, une structure fabriquée en technologie coplanaire basée sur l'approche CRLH a été présentée en tant qu'antenne. La cellule est composée d'un court-circuit (inductance parallèle) et de gap dans le signal (capacité série), cette cellule supporte la rétro-propagation [14] [13]. Un autre exemple de réfraction négative avec la possibilité de contrôler le diagramme de rayonnement d'une antenne en faisant varier l'indice de réfraction a été présenté [20].

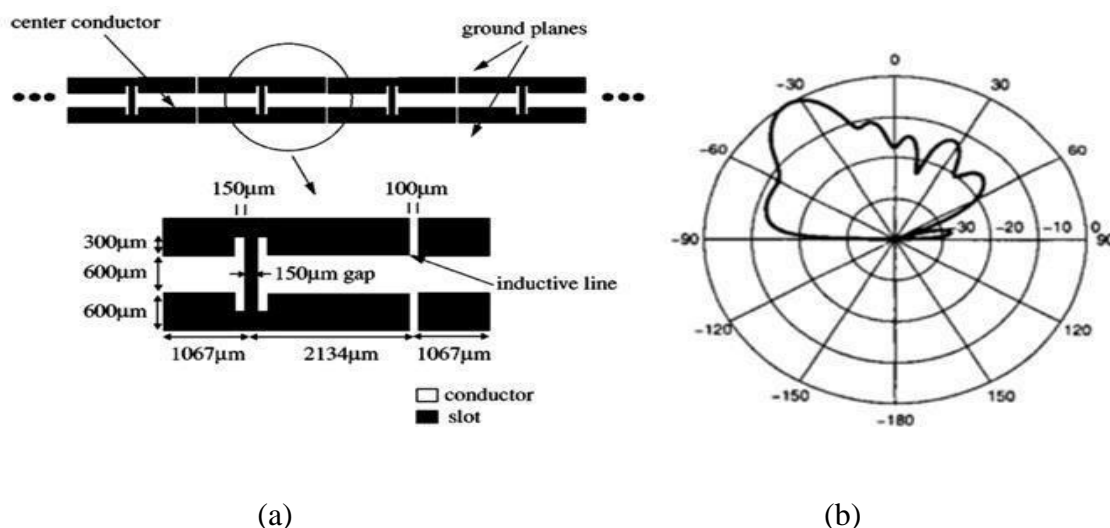


Figure I.20 : (a) Structure coplanaire de l'antenne à retro-propagation. (b) Diagramme de rayonnement de l'antenne à 15 GHz [14].

I.7.2 Propagation Guidée

Pour les structures micro-ondes guidées, plusieurs types d'applications ont été mises en œuvre. Pour les lignes de transmission, des prototypes de lignes CRLH ont été fabriqués. L'exemple de la Figure (I.20) montre une ligne constituée d'une mise en cascade de 7 cellules CRLH unitaires suffisamment petites devant la longueur d'onde. Les cellules sont implémentées en technologie micro-ruban sous forme d'éléments distribués (capacité IDC et stub court-circuité), le caractère main gauche ($\beta < 0$) a été mis en évidence expérimentalement, la partie main gauche s'étend sur une large bande allant de 1 à 3 GHz Figure (I.22).

Ce type de ligne peut être utilisé dans le cas des déphaseurs pour ajouter une différence de phase négative, positive ou nulle selon la branche considérée et cela à l'aide de petites variations dans les éléments constitutifs sans changer la longueur globale du circuit. Ce type de circuit a aussi comme avantage la compacité par rapport aux déphaseurs classiques [21]. Pour les coupleurs, l'utilisation des lignes main gauche a pour avantage d'avoir un niveau de couplage plus élevé à distance égale par rapport à des lignes classiques. Un prototype a été réalisé en technologie micro-ruban Figure (I.23) [22].

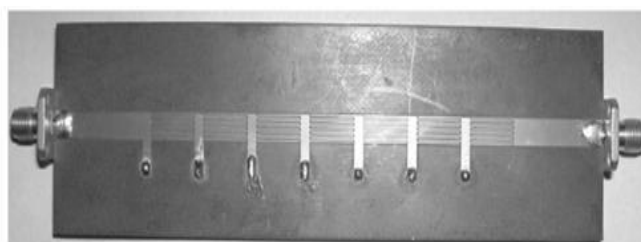


Figure I.21 : Image du prototype de ligne CRLH fabriquée en technologie micro-ruban et composée de 7 cellules unitaires [11].

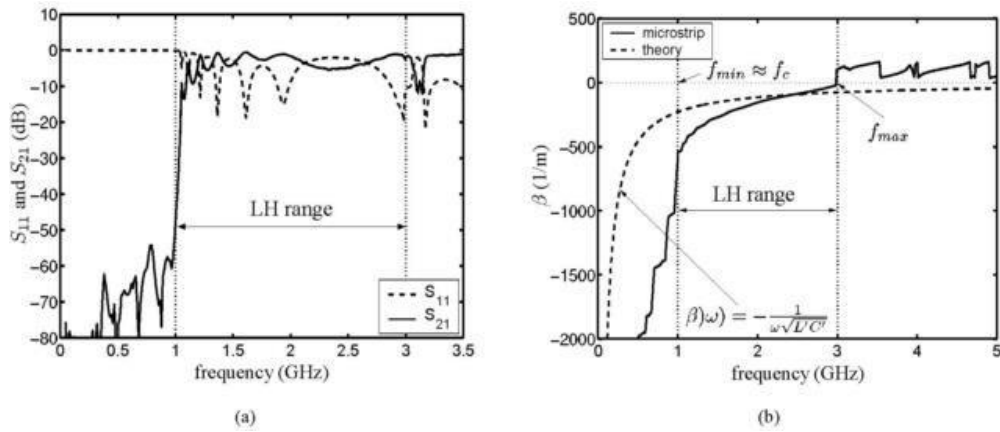


Figure I.22 : Résultats des mesures de la structure de la Figure I.21. (a) Magnitude des paramètres S. (b) β en fonction de la fréquence [11].

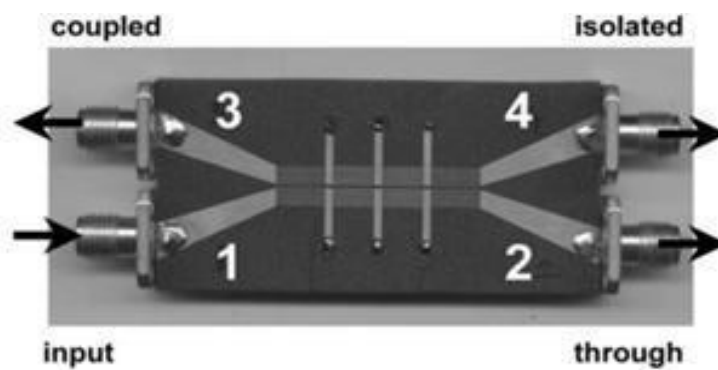


Figure I.23 : (a) Prototype d'un coupleur -3dB composé de 3 cellules CRLH [22].

Dans le domaine des filtres, l'utilisation de l'approche CRLH dans son cas non équilibré permet d'envisager la conception de filtres dual-bande. Avec une même structure, on a une première bande de transmission main gauche et une seconde bande de transmission main droite. D'un autre côté, si le cas de la ligne CRLH est équilibré, des filtres passe bande à bande unique sont envisageables.

L'utilisation de l'approche basée sur les résonateurs présente également un grand avantage pour la conception des circuits micro-ondes planaires car celles-ci présentent de forts coefficients de qualité ce qui est très avantageux en terme de sélectivité et de compacité. Par contre cela s'avère handicapant au niveau de la largeur de bande et des pertes.

Le principe des SRR qui était utilisé pour la propagation en espace libre ou à l'intérieur de guides d'onde a été adapté aux circuits planaires [23]. Une structure composée d'une ligne coplanaire et de SRR gravés sur la face arrière du substrat a été proposée Figure (I.24). Les résonateurs SRR produisent la perméabilité négative au voisinage de leur fréquence de résonance tandis que la ligne coplanaire est chargée par des fils métalliques étroits qui se comportent comme un plasma micro-onde et créent alors la permittivité négative. Cette structure a permis d'avoir une propagation négative dans une bande étroite de fréquence

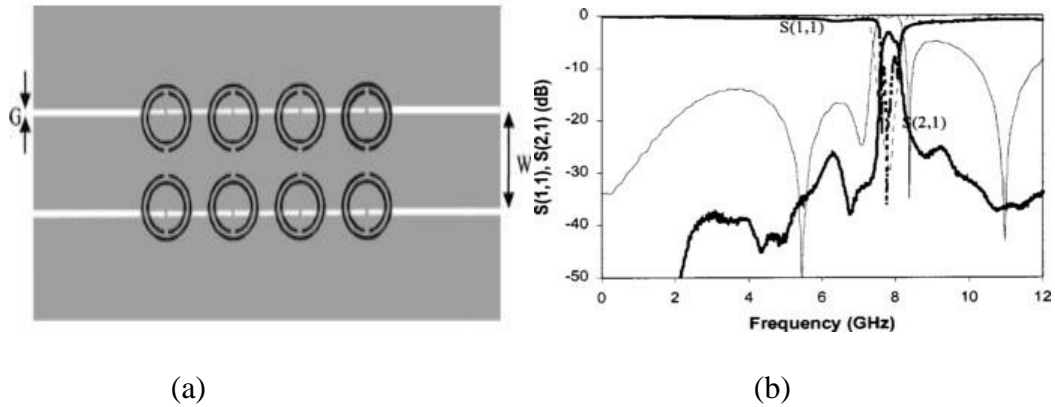
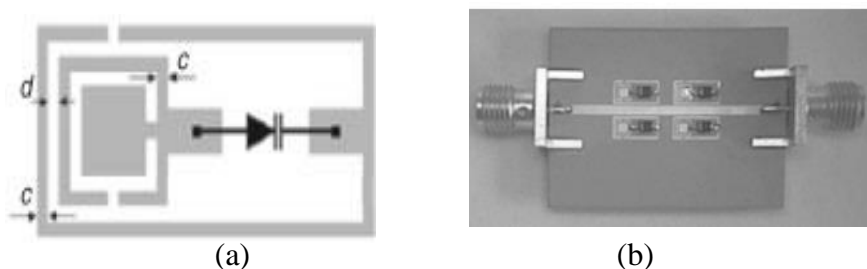


Figure I.24 : (a) Layout de la structure main gauche basé sur des SRR gravés sur la face arrière d'une ligne coplanaire chargée par des fils minces. (b) Paramètres S simulés (trait fin) et mesurés (trait gras) de la structure [23].

Basée sur le même principe, un filtre coupe bande miniature a été présenté dans [24]. Les résonateurs sont gravés sur la face arrière du substrat, mais la ligne coplanaire sur la face avant ne subit pas de discontinuités (pas de fils minces). La structure présente dans ce cas une perméabilité négative associée à une permittivité positive, ce qui crée une bande de rejection étroite au voisinage de la fréquence de résonance des SRR. Le fait de cascader des SRR de dimensions différentes qui résonnent à des fréquences espacées proches permet d'élargir la bande de rejection du filtre. Une version passe bande de ce filtre a été présentée par la même équipe de recherche dans [25]. Ces filtres ont l'avantage d'être extrêmement compacts et d'utiliser une technologie de fabrication facile.

I.7.3 Métamatériaux reconfigurables

Plusieurs équipes ont essayé de combiner l'approche des métamatériaux avec les techniques d'accordabilité connues pour concevoir des circuits micro-ondes accordables. Dans [26], les auteurs démontrent la possibilité de varier la fréquence de résonance d'un SRR en utilisant des diodes varactor. Cette structure a été utilisée pour la conception d'un filtre en technologie micro-ruban, les SRR variables ont été déposés de part et d'autre d'une ligne de signal. En raison de la proximité de la ligne, les SRR sont excités ce qui provoque une bande de réjection, le filtre composé de deux cellules présente sur plusieurs points de polarisation des réjections supérieures à 20 dB Figure (I.25). Suivant le même principe d'utilisation de diode pour l'accordabilité, d'autres structures ont été proposées comme les déphaseurs [27].



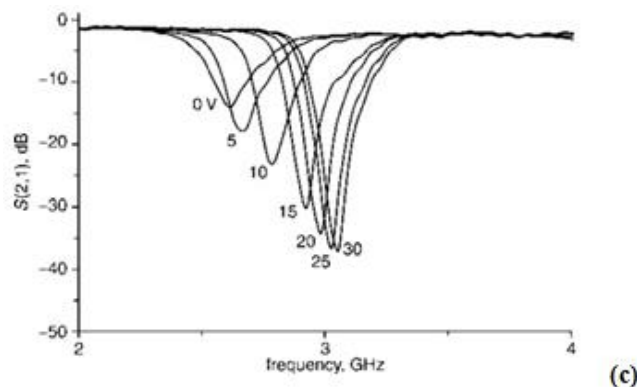


Figure I.25 : (a) Topologie du SRR carré chargé avec une diode varactor. (b) Prototype du filtre réalisé à partir de 2 cellules. (c) Coefficients de transmission mesurés en fonction de la tension appliquée sur les diodes.

L'utilisation des MEMS (Micro-ElectroMechanical Systems) afin de réaliser la fonction de reconfigurabilité a permis également de proposer plusieurs conceptions en métamatériaux. Une ligne CRLH en technologie coplanaire a été contrôlée à l'aide d'un MEMS série [28], le même auteur a proposé une autre structure fabriquée en technologie monolithique sur substrat en verre. Cette structure fournit simultanément un fonctionnement hautes fréquences, de faibles pertes et une bonne compacité, elle pourra servir pour la réalisation de plusieurs dispositifs : déphaseurs, antennes, diviseurs [29]. Un autre auteur a proposé une étude et un design d'un déphaseur à 3 états à base de cellules CRLH [30].

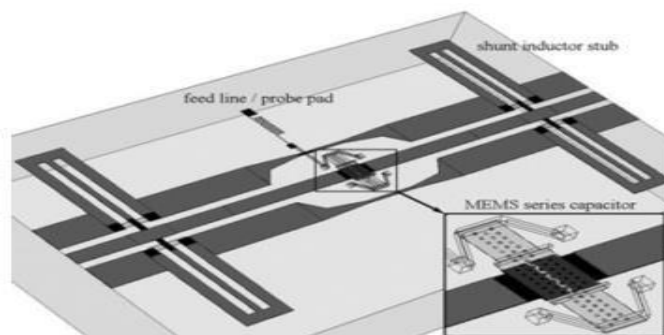


Figure I.26 : (a) Cellule unitaire CRLH variable à l'aide d'un MEMS [28].

D'autres groupes se sont intéressés à l'accordabilité des circuits main gauche à l'aide des matériaux ferroélectriques, des déphaseurs ont ainsi été proposés [31], [32], [33].

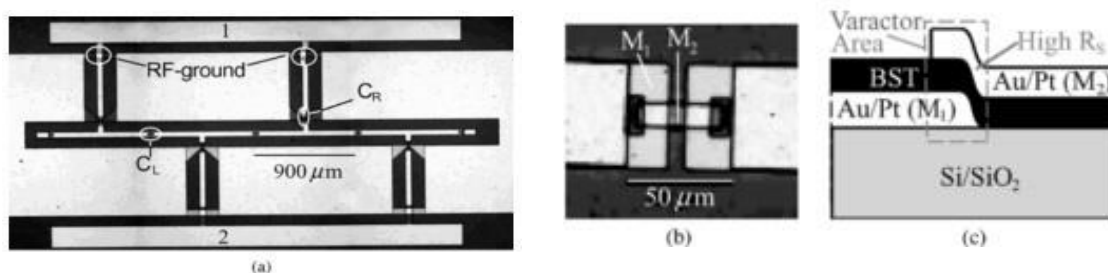


Figure I.27 : (a) Topologie du déphaseur CRLH utilisant les ferroélectriques comme moyen d'accordabilité [32].

D'autres groupes ont étudié les métamatériaux accordables à l'aide du BST dans les fréquences centimétriques et millimétriques [34] [35]. Dans [34], les auteurs ont présenté une structure CRLH équilibrée composée de ligne chargée par des capacités interdigitales en série et des inductances en parallèle. Cette structure présente une bande main gauche entre 8 GHz et 18 GHz suivie d'une bande main droite. La polarisation du BST a permis de varier les valeurs de la constante de propagation complexe de la structure.

I.8 LA CONCEPTION DE MATERIAUX INNOVANTS

I.8.1 Les super lentilles

Une des applications les plus spectaculaire du métamatériau est la super lentille, une lentille optique élaborée des métamatériaux et permettant de distinguer des détails jusqu'à vingt fois inférieurs à la longueur d'onde d'utilisation. 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 [38].

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 [39].

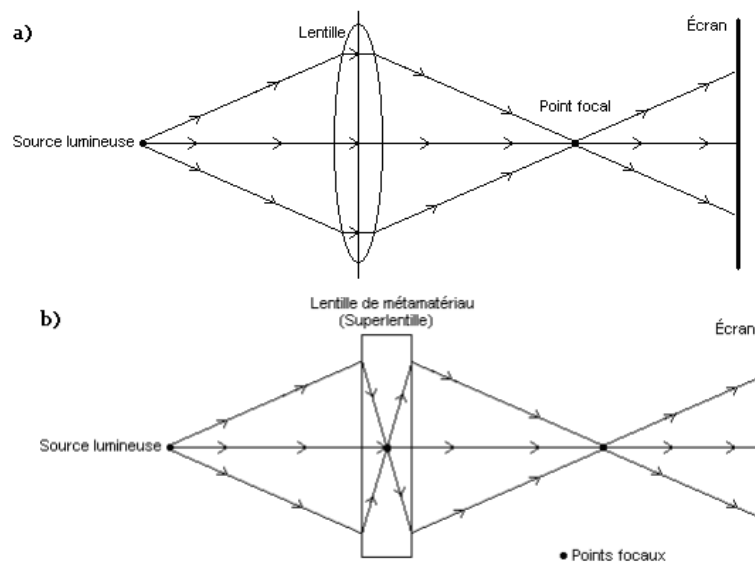


Figure I.28 : (a) Focalisation avec une lentille ordinaire (b) Focalisation avec une super lentille.

Le site figure (I.29) montre un exemple frappant de cette différence entre une lentille classique et une super lentille, produite par l'Université de Berkeley [40] [41]. Les chercheurs ont été en mesure de visualiser le mot "NANO" écrit avec une épaisseur de trait environ dix fois plus petite que la longueur d'onde de la lumière utilisée. Nous voyons qu'avec la lentille conventionnelle, nous obtenons une image plus floue qu'avec la super lentille.



Figure I.29 : (a) Image produite avec une super lentille (b) Image produite lentille ordinaire [42].

I.8.2 Cape d'invisibilité

L'idée est de modifier la direction de rayons lumineux, « ce concept est proposé par J.B.Pendry en 2006 [43] » afin qu'ils se diffusent autour d'une zone particulière, qui sera l'endroit invisible et caché sans changer sa propagation dans le reste de l'espace cela fera en mimant une déformation d'une portion de l'espace avec des calculs de transformations optiques c'est-à-dire qu'il faut modifier les propriétés électromagnétiques d'un espace donné pour transformer la façon dont les ondes se propagent à l'intérieur les rayons lumineux contourneront ce point ou se trouvera l'objet que l'on veut cacher.une démonstration expérimental à la fréquence de 8.5 GHz par l'équipe de D.R.Smith [44] a été réaliser. C'est la ou les métamatériaux interviennent avec leurs propriétés électromagnétiques étonnantes.

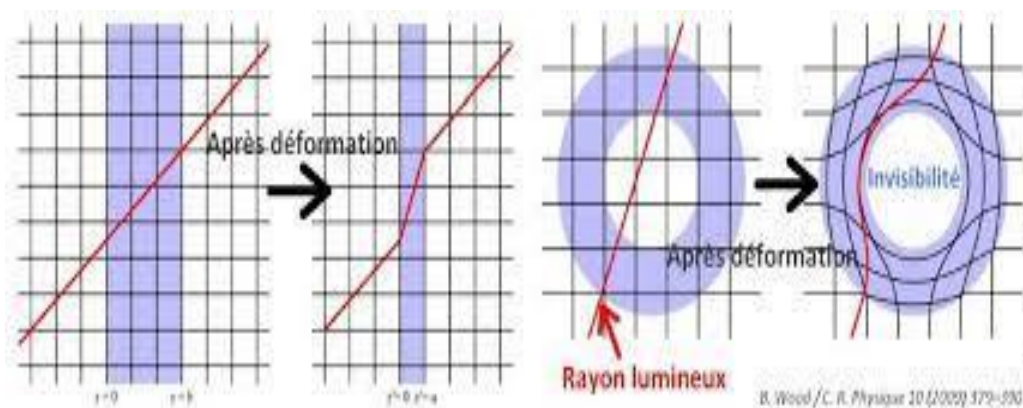


Figure I.30 : Premiers pas vers la cape d'invisibilité.

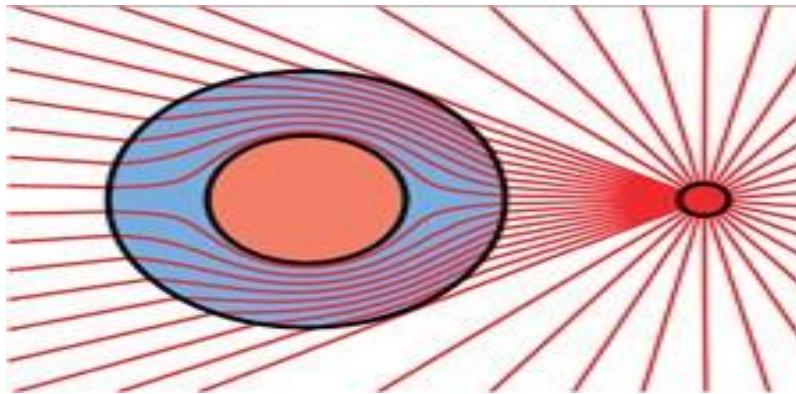


Figure I.31 : Invisibilité des métamatériaux opérant dans l'infrarouge.

I.9 TYPES DE METAMATERIAUX

En fonction des propriétés des métamatériaux, il existe plusieurs types de métamatériaux tels que les matériaux à double négatif (DNG), les matériaux à simple négatif (SNG), les conducteurs magnétiques artificiels (AMC) et les surfaces à fréquence sélective (FSS). Le tableau suivant représente les types de métamatériaux, leurs caractéristiques et leurs applications [45].

Métamatériaux	Caractéristiques	Applications
Métamatériaux double négatif (DNG)(également connu sous le nom de métamatériaux gauchers (LHM), index négatif matériaux (NIM) ou supports à ondes arrière).	<ul style="list-style-type: none"> • Valeur négative de la permittivité et de la perméabilité Simultanément • Indice de réfraction négatif • Propagation inverse 	Absorbeurs, Antenne, Guides d'onde.
Matériaux négatifs (SNG) uniques (ou plus spécifiquement appelés matériaux ϵ négatif (ENG) matériaux λ -négatifs (MNG).	<ul style="list-style-type: none"> • Valeur négative de la permittivité et de la perméabilité 	Antenne.
Conducteurs magnétiques artificiels (AMC) (aussi appelés surface à haute impédance (HIS)).	<ul style="list-style-type: none"> • Se comporter comme un conducteur magnétique parfait, bien que composé de matériaux non magnétique. • Fournir des phases de réflexion à zéro degré à la fréquence résonnante. 	Antenne, Guide d'onde.
Surfaces à sélection de fréquence (FSS)	<ul style="list-style-type: none"> • Choix de fréquence sur mesure. 	Filtre, Antenne, Fours à micro ondes

Tableau I.1 : Classification des métamatériaux [45] [46]

I.10 CONCLUSION

Dans ce premier 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'applications des métamatériaux en propagation guidée et en espace libre ainsi que d'autres aperçus d'applications de reconfigurables (cape d'invisibilité, super lentille).

CHAPITRE II
LES ABSORBANTS A
METAMATERIAUX

II.1 INTRODUCTION

Le domaine des absorbants à base de métamatériaux est assez récent. Ce nouveau type d'absorbant a été étudié à partir de 2002 avec une publication de N. Engheta, [47] puis plus intensément à partir de 2008 sur de nombreuses plages de fréquences comme en Teraherz [48 - 51], en infrarouge proche [52- 55], en infrarouge moyen [56 - 59] et dans le domaine du visible [60 - 63].

Pour le domaine des micro-ondes c'est un article [64] de 2008 qui sera le point de départ de nombreux développements sur ce nouveau type d'absorbant. Les premières applications des absorbants leur utilisations sont limitées mais ce sont développés à d'autres applications notamment en compatibilité électromagnétique (CEM).

Les absorbants parfaits en métamatériau ont reçu une attention significative en raison de leur capacité à obtenir une absorption complète des ondes électromagnétiques sous longueur d'onde.

Dans ce chapitre, nous présenterons une étude générale des progrès récents sur la théorie, les conceptions et les caractérisations des absorbants à métamatériaux, puis nous parlerons des absorbants électromagnétiques.

II.2 ABSORBANTS A METAMATERIAUX

Les matériaux absorbants électromagnétiques, ou « Radar Absorbing Materials » (RAM), ont été créés à la fois aux USA et en Allemagne lors de la seconde guerre mondiale. Un tel matériau n'existe pas en réalité et il semble difficile d'avoir un prototype répondant parfaitement à cette définition.

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 télécommunications terrestres et/ou spatiaux.

En 2002, le groupe de N.Engheta [47] a montré dans un article théorique que si une surface métamatériaux est étroitement placée au dessus d'une plaque parfaitement conductrice, dans une certaine bande de fréquences, cette structure peut posséder une impédance de surface élevée sur sa partie supérieure. Ainsi, si une plaque résistive est placée sur un plan de forte impédance, on peut obtenir une structure fine équivalente à un absorbant d'onde électromagnétiques qui a des dimensions réduites.

II.3 SCHEMA THEORIQUE DES ABSORBANTS A METAMATERIAUX

Nous commençons un passage bref des théories générales qui expliquent comment obtenir une absorption parfaite dans les métamatériaux. La première théorie consiste à concevoir des résonances électriques et magnétiques dans un métamatériau, de telles sortes que la permittivité et la perméabilité effectives du métamatériau puissent être adaptées pour obtenir une correspondance d'impédance avec l'espace libre [65][66].

Dans un tel cas, aucune réflexion ne se produit à l'interface et toute l'énergie incidente à une chance d'être absorbée à l'intérieur de l'absorbant à métamatériau. L'autre théorie est basée sur l'interférence destructive des réflexions d'ordre multiple due aux multiples réflexions internes à l'intérieur du substrat diélectrique.

II.3.1 Théorie de l'adaptation d'impédance

Un absorbant à métamatériau est généralement une structure en sandwich, constituée d'un réseau de certains motifs métalliques sur une face d'un substrat et posée à un métal hautement conducteur. La permittivité électrique et la perméabilité magnétique du métamatériau sont respectivement $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r(\omega)$ et $\mu = \mu_0 \mu_r(\omega)$. Ici, ϵ_0 et μ_0 sont la permittivité et la perméabilité de l'espace libre. $\epsilon_r(\omega)$ et $\mu_r(\omega)$ sont la permittivité et la perméabilité relatives du milieu en fonction de la fréquence, qui sont sans unité et normalisées par rapport aux valeurs de l'espace libre.

En raison de la présence du plan de masse, aucune transmittance n'a pu être trouvée de l'autre côté du métamatériau. Cela nous permet de nous concentrer uniquement sur la réflexion du métamatériau.

Selon la formule de réflexion de Fresnel, la réflectivité (R) du métamatériau est [67] :

$$R_{TE} = |r_{TE}|^2 = \left| \frac{\mu_r \cos(\theta) - \sqrt{n^2 - \sin^2(\theta)}}{\mu_r \cos(\theta) + \sqrt{n^2 - \sin^2(\theta)}} \right|^2 \quad (\text{II.1})$$

$$R_{TM} = |r_{TM}|^2 = \left| \frac{\epsilon_r \cos(\theta) - \sqrt{n^2 - \sin^2(\theta)}}{\epsilon_r \cos(\theta) + \sqrt{n^2 - \sin^2(\theta)}} \right|^2 \quad (\text{II.2})$$

Où les indices TE et TM désignent les ondes polarisées électriquement (TE) et magnétiquement (TM) transversales, θ est l'angle d'incidence, et $n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$ est l'indice de réfraction effectif du métamatériau.

Pour le cas d'un incident normal, nous avons $\theta = 0^\circ$ de sorte que ces équations se réduisent à :

$$R = \left| \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \right|^2 = \left| \frac{\sqrt{\mu_r} - \sqrt{\epsilon_r}}{\sqrt{\mu_r} + \sqrt{\epsilon_r}} \right|^2 \quad (\text{II.3})$$

Avec $Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$ étant l'impédance du métamatériau et $Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$ étant l'impédance de l'espace libre. Le plan de masse conduisant à une transmissivité nulle, l'absorptivité arrive :

$$A = 1 - R = 1 - \left| \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \right|^2 = 1 - \left| \frac{\sqrt{\mu_r} - \sqrt{\epsilon_r}}{\sqrt{\mu_r} + \sqrt{\epsilon_r}} \right|^2 \quad (\text{II.4})$$

L'équation ci-dessus indique que l'adaptation de l'impédance, $Z = Z_0$ ou alors $\mu_r = \epsilon_r$ est une condition essentielle pour obtenir une absorption parfaite. Il convient de noter que, pour réaliser l'adaptation d'impédance dans un absorbant à métamatériau, il faut des résonances électriques et magnétiques simultanées. Pour un métamatériau à résonance unique, soit électrique soit magnétique, son impédance sera fortement déséquilibrée par rapport à celle de l'espace libre. Par conséquent, il n'y aura pas d'absorption parfait.

II.3.2 Théorie de l'interférence

Un absorbant à métamatériau peut être considéré comme un système couplé et, en particulier, sa résonance magnétique est induite par des courants antiparallèles entre les couches métalliques. Cependant, on peut aussi considérer indépendamment ses fonctionnalités de la [68]. La couche résonante avec certains motifs métalliques fonctionne comme une surface de réflexion partielle, qui peut être utilisée pour modifier les coefficients de réflexion et de transmission complexes. D'autre part, le plan de masse hautement conducteur fonctionne comme un réflecteur parfait, offrant un retard de phase de 180° à l'onde électromagnétique qui s'y réfléchit.

Comme le montre la figure (II.1), la méta-couche avant se trouve à l'interface entre l'air et le substrat diélectrique. L'onde électromagnétique incidente est partiellement réfléchiée vers l'air avec un coefficient de réflexion $\tilde{r}_{12}(\omega) = r_{12}(\omega)e^{i\varphi_{12}(\omega)}$ et partiellement transmise dans le substrat avec un coefficient de transmission $\tilde{t}_{12}(\omega) = t_{12}(\omega)e^{i\theta_{12}(\omega)}$. L'onde transmise va se propager jusqu'à atteindre le plan de masse métallique.

La constante de propagation complexe à l'intérieur du substrat diélectrique est $\tilde{\beta} = \beta_1 + i\beta_2 = \sqrt{\epsilon_d} k_0 d$, où k_0 est le nombre d'onde de l'espace libre, d est l'épaisseur du substrat, β_1 représente la phase de propagation, β_2 fait référence à l'absorption dans le substrat diélectrique. Au niveau du plan de masse, une réflexion totale se produit avec un coefficient de réflexion de -1. Après une réflexion directe en miroir et un retard de phase de propagation supplémentaire $\tilde{\beta}$, une réflexion et une transmission partielle se produisent à nouveau de l'interface avant. Les coefficients de réflexion et de transmission correspondants sont $\tilde{r}_{21}(\omega) = r_{21}(\omega)e^{i\varphi_{21}(\omega)}$, et $\tilde{t}_{21}(\omega) = t_{21}(\omega)e^{i\theta_{21}(\omega)}$ respectivement. Il convient de noter que de multiples réflexions et transmissions existent à l'intérieur du substrat diélectrique, et que l'énergie de sortie totale sur le côté gauche du métamatériau est la superposition des réflexions de tous les conditions :

$$\tilde{r}(\omega) = \tilde{r}_{12}(\omega) - \frac{\tilde{t}_{12}(\omega)\tilde{t}_{21}(\omega)e^{2i\tilde{\beta}}}{1 + \tilde{r}_{21}(\omega)e^{2i\tilde{\beta}}} \quad (\text{II.5})$$

Où le premier terme à droite est la réflexion directe de la méta-couche, et le second terme est la contribution de la superposition des multiples réflexions d'ordre supérieur. Tant que nous connaissons la réflexion totale \tilde{r} , le spectre d'absorption de l'absorbant à métamatériau peut être obtenu par :

$$A(\omega) = 1 - |\tilde{r}(\omega)|^2.$$

La théorie de l'interférence peut bien expliquer les caractéristiques observées dans ces absorbants à métamatériaux avec des masses métalliques et fournit également une compréhension alternative de l'origine et de la physique sous-jacente des absorbants à métamatériaux. Il convient de noter que l'analyse ci-dessus est entièrement basée sur l'hypothèse que l'onde incidente est normale au métamatériau. Pour le cas où une onde électromagnétique incidente est oblique avec un angle θ , la longueur de propagation à l'intérieur du substrat diélectrique devient plus longue. Par conséquent, le retard de phase de propagation doit être modifié comme suit : $\tilde{\beta} = \sqrt{\epsilon_0} k_0 d'$ est $d' = \frac{d}{\cos(\theta')}$ la longueur de propagation modifiée à l'intérieur du substrat et l'angle de réfraction θ' peut être obtenu en suivant la loi de Snells $\sqrt{\epsilon_d} \sin(\theta') = \sin(\theta)$ [69].

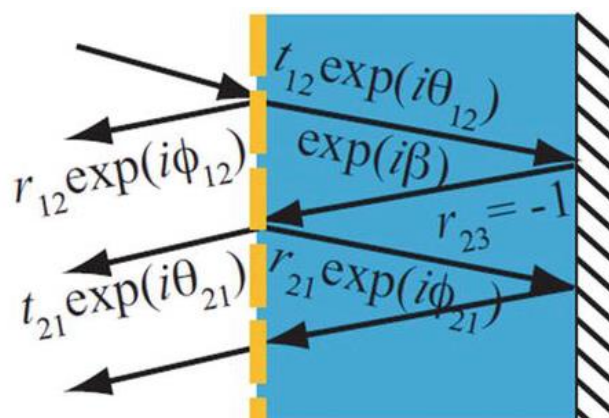


Figure II.1 : Modèle de réflexions multiples et d'interférences d'un absorbant à métamatériau. La ligne pointillée jaune désigne le réseau de résonateurs [68].

II.4 ABSORBANTS A 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 [70]. 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. [67] ont proposé une structure planaire en sandwich composée de résonateurs électriques en anneau et de fils coupés séparés par un substrat FR-4, comme le montre la figure (II.2).

Il s'agit du premier absorbant à métamatériau rapporté avec une structure planaire 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 [72 - 82].

Les absorbants à métamatériaux initiaux sont sensibles à la polarisation en raison des cellules unitaires anisotropes [67] [83]. Des absorbants à métamatériaux planaires avec des structures hautement symétriques ont été développés plus tard, tels que les réseaux de patches annulaires et circulaires [84]. En 2009, nous avons développé un absorbant à métamatériau composé de cellules unitaires dendritiques [71].

Comme le montre la Figure (II.3.a) et la figure (II.3.b) montre que la simulation et l'expérience sont conformes l'une à l'autre montrant 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 [71].

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 [85].

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.

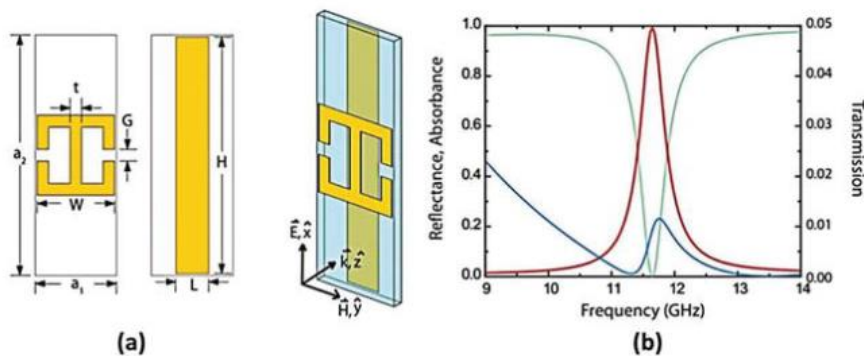


Figure II.2 : (a) Cellule unitaire du premier absorbant à métamatériau planaire, (b) Réflexion, transmission et absorbance simulées à la fréquence micro-ondes [67]

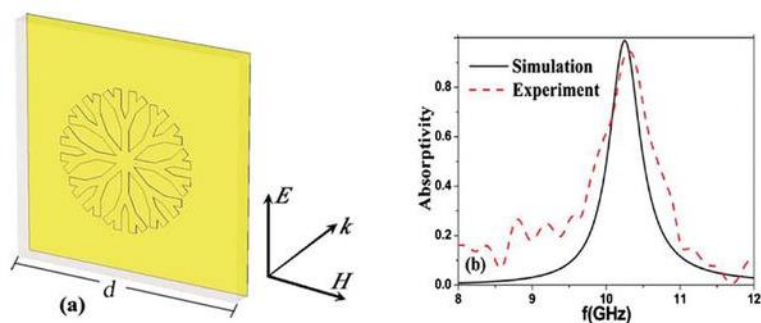


Figure II.3 : (a) Cellule unitaire d'un absorbant à métamatériau dendritique et (b) Spectres d'absorption simulés et mesurés [71].

II.5 ABSORBANTS A METAMATERIAUX A LARGE BANDE

Diverses techniques ont été développées pour étendre la bande passante des absorbants à métamatériaux. Les principales techniques d'amélioration de la bande passante comprennent l'utilisation de structures empilées multicouches [81] [82], un adjacent coplanaire de plusieurs cellules résonantes [86] [87], ainsi que l'ajout d'éléments localisés [88]. Des diélectriques ou semi-conducteurs à forte perte ont également été largement utilisés pour concevoir des absorbants à métamatériaux à large bande [89] [90]. Dans cette section, quelques approches typiques pour la conception d'absorbants à bande passante améliorée sont présentées.

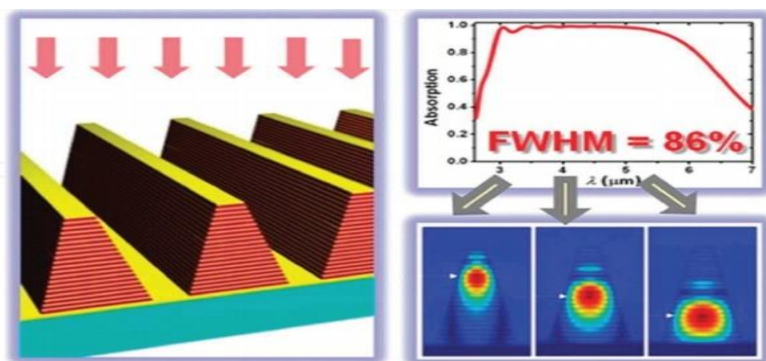


Figure II.4: Vue schématique de l'absorbant à métamatériau en dents de scie et de son spectre d'absorption [81].

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

Cui et coll. [81] ont proposé un absorbant à métamatériau anisotrope multicouche en dents de scie à des longueurs d'onde infrarouges, comme le montre la figure (II.4). Bien qu'un tel absorbant à métamatériau soit constitué de 21 couches de patchs 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 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 patchs 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 [89] [90]. 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 [91]. La figure (II.5) montre l'absorbant à métamatériau constitué d'une couche d'eau (avec des trous périodiques) placée dans un récipient en résine, qui est soutenu par un plan de masse métallique au fond. Avec une telle structure, Xie et al. [92] 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 résine est vide de l'eau.

Comme le montre la figure (II.5.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.

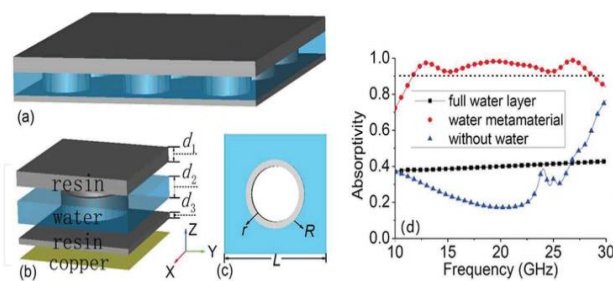


Figure II.5 : (a) Vue schématique de l'absorbant à métamatériau d'eau, (b) Vue couche par couche de la cellule unitaire, et (c) Vue en plan de coupe de la couche d'eau. (d) Spectres d'absorption de l'absorbant à métamatériau d'eau, de la couche d'eau complète soutenue par une masse métallique et du métamatériau sans eau [92].

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 [89]. En utilisant un substrat de silicium à motif avec perte, Yin et al. [93] 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 [94]. 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.6.c), l'absorbant à métamatériau en silicium avec des trous coniques tronqués a une capacité d'absorption plus élevée et une bande passante plus large dans la bande de fréquences d'intérêt

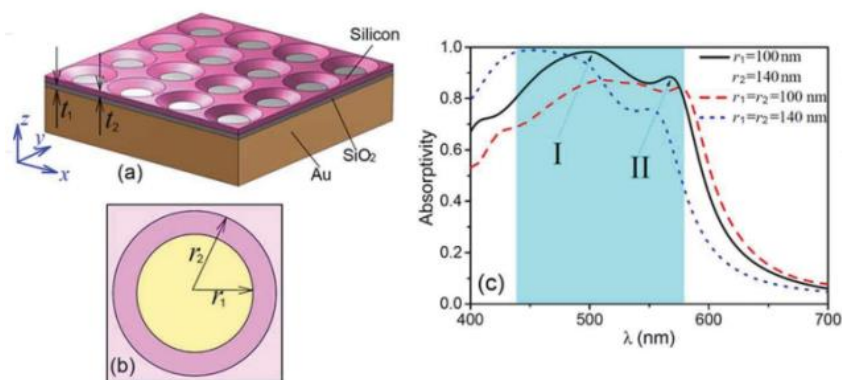


Figure II.6 : (a) Vue schématique de l'absorbant à métamatériau à base de silicium et (b) Sa cellule unitaire. (c) Spectres d'absorption de métamatériaux à base de silicium avec des trous coniques et circulaires [94].

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 [95 -98]. 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 comprennent l'utilisation d'éléments, tels que des diodes varicap [99], ferroélectriques [100], ferrites [101], graphène [102 - 103], cristaux liquides anisotropes [104] et matériaux à transition de phase [105].

Le déplacement mécanique a également été étudié pour les absorbants à métamatériaux accordables [104-108]. Zhang et coll. [106] 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.7). 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.

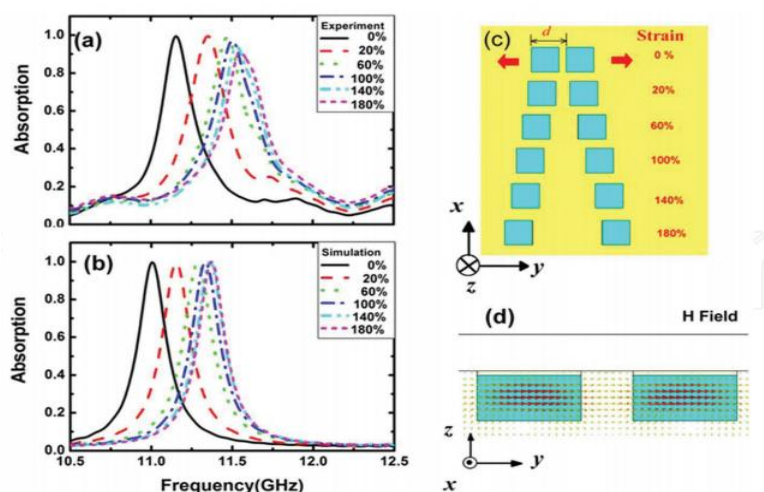


Figure II.7 : (a) Spectres d'absorption expérimentaux et (b) Simulés du métamatériau diélectrique étirable mécaniquement. Mécaniquement étirable. (c) Schéma de l'étirement des résonateurs diélectriques sur une fine couche de caoutchouc conducteur. (d) Distribution du champ magnétique à la fréquence de résonance [106].

Le graphène a également été utilisé pour concevoir des absorbants à métamatériaux accordables en raison de son accordabilité de la conductivité de surface [110 - 111]. Zhang et coll. [109] 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.8.a) et (II.8.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.8.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.

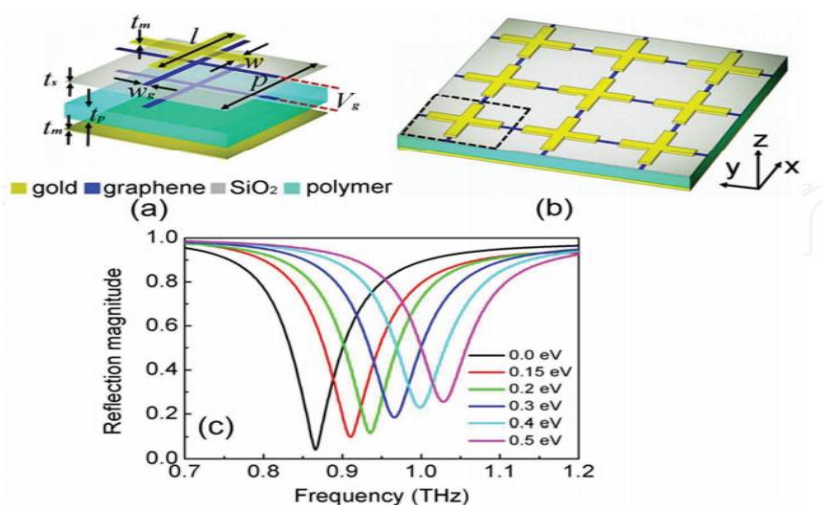


Figure II.8 : (a) Cellule unitaire en forme de croix avec des fils de graphène et (b) Vue schématique de l'absorbant à métamatériau. (c) Absorption de l'absorbant à métamatériau sous différentes tensions de polarisation [109].

II.7 ABSORBANTS A METAMATERIAUX COHERENTS

Il est connu que l'un des inconvénients d'un absorbant à métamatériau typique est que l'absorption 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 [112 - 113].

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 [114].

De plus, l'absorption 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 [115].

En raison de cette configurabilité dynamique de l'absorption, 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 [112] et démontré expérimentalement par le même groupe [113]. Depuis lors, des phénomènes d'ACP ont été observés dans

des métamatériaux epsilon-near-zéro [116], des guides d'ondes lumineuses lentes [117], un méta surface constituée d'antennes croisées métalliques [118], et un système plasmonique à résonance de Fano [114].

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 métras surfaces sans métal. Zhu et al. [119] 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'absorption est contrôlable dans une large gamme 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 [120]. Absorption cohérente élevée à plusieurs bandes de fréquences [120]. 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. [119] 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 [90] [121]. 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 LES TYPES D'ABSORBANTS ELECTROMAGNETIQUES

II.8.1 Absorbants diélectriques

Ce type d'absorbant est la base pour la création d'autres absorbants. Il s'agit de mousses, de polymères ou de structures nids d'abeilles chargées à l'aide de particules de carbone ou de métal (fer, aluminium, cuivre, ...). Ces matériaux sont réalisés pour avoir la plus forte constante de perte diélectrique possible et ainsi transformer en chaleur le maximum de l'onde qui les traverse. L'impédance de ce type de matériau n'est pas forcément adaptée à l'impédance de l'espace libre et ainsi ils peuvent présenter une forte réflexion à leur interface.

Les récentes recherches sur les absorbants diélectriques s'orientent plus sur les matériaux polymères conducteurs.

Ces matériaux ont la particularité d'avoir une permittivité relative peu élevée et une tangente de perte diélectrique très forte. La fabrication de ce type de matériau est assez complexe. Plusieurs polymères conducteurs qui ont été étudiés sont prometteur notamment les PolyPyrroles (PPy) qui nécessite d'être polymérisé à la surface par des matériaux tel que du PVA ou du PVC [122]. Les PolyAnilines (PAni) sont mélangées à des thermoplastiques à l'aide de solvants pour pouvoir être utilisés. Ce type de matériaux est en général déposé sur du textile afin d'avoir une certaine solidité.

II.8.2 Absorbants structuraux a adaptation d'impédance

On sait qu'une onde se réfléchit à l'interface d'un matériau proportionnellement à l'impédance de ce dernier. A partir de cette constatation, trois catégories d'absorbants (pyramidaux, chargés progressivement et à couches d'adaptation d'impédance) ont été développés pour améliorer la diffusion de l'onde dans une couche absorbante diélectrique. Pour une bonne atténuation sur une large bande, ce type de matériau nécessite des épaisseurs importantes avec un poids conséquent.

II.8.2.1 Absorbants pyramidaux

Les absorbants pyramidaux [123] (pyramidal absorber en anglais) sont typiquement des matériaux épais avec des structures régulièrement espacées de forme pyramidale ou conique disposées perpendiculairement à la surface de l'objet à cacher. Les absorbants pyramidaux ont été mis au point de telle sorte que l'interface présente 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 de l'ordre d'une longueur d'onde. Pour des structures plus courtes, ou des longueurs d'onde plus grandes, les ondes rencontrent un changement plus brutal de l'impédance conduisant à de moins bonnes performances. Les absorbants pyramidaux ont donc une fréquence de fonctionnement minimum à partir de laquelle ils peuvent fournir une atténuation élevée sur une large bande de fréquences et une grande gamme d'angles. Ces absorbants fournissent de très bonnes performances. L'inconvénient des absorbants pyramidaux est leur épaisseur et leur tendance à être fragile. Ils sont généralement utilisés pour des chambres anéchoïques (application CEM).

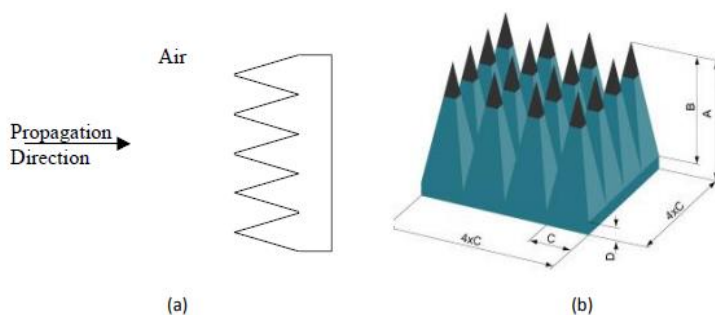


Figure II.9: (a) Illustration de la disposition d'un absorbant pyramidal, et (b) Exemple d'absorbant pyramidal

II.8.2.2 Absorbants chargés progressivement

Ce type de matériau (taped loading absorber en anglais) est généralement constitué d'une plaque d'un matériau à faibles pertes associée à une plaque d'un matériau à fortes pertes. On peut définir deux types de structures distinctes. Pour le premier qui est idéal, le composant à perte est dispersé de façon homogène parallèlement à la surface de l'objet à protéger, avec un gradient perpendiculaire à la surface et progressif dans le matériau. Il est difficile et couteux de fabriquer de manière reproductible un gradient de cette manière.

Le second type de structure, plus courant, est constitué de couches homogènes dont le chargement augmente dans la direction de propagation (c'est à dire le gradient est créé comme une fonction en escalier). L'avantage de ces matériaux est qu'ils sont plus minces que les absorbants pyramidaux. L'inconvénient, c'est qu'ils sont moins performants.

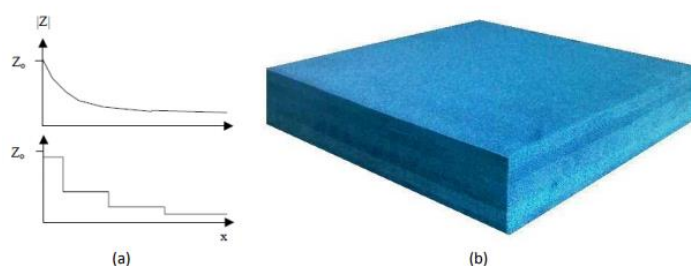


Figure II.10: (a) Courbe d'impédance idéale et courbe d'impédance typique, et (b) Exemple de matériau absorbant chargé progressivement.

II.8.2.3 Absorbants a couches d'adaptation d'impédance

Les absorbants à couches d'adaptation d'impédance (matched layer absorber en anglais) tentent de réduire l'épaisseur nécessaire pour les matériaux chargés progressivement. Ce type d'absorbant met une couche de transition absorbante entre l'onde incidente et les matériaux absorbants. La couche de transition a une valeur d'impédance située entre les impédances des deux milieux. L'idée est d'avoir une transition d'impédance entre les différents milieux. 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.11) et avec :

$$Z_2 = \sqrt{Z_1 Z_3} \quad (II.6)$$

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

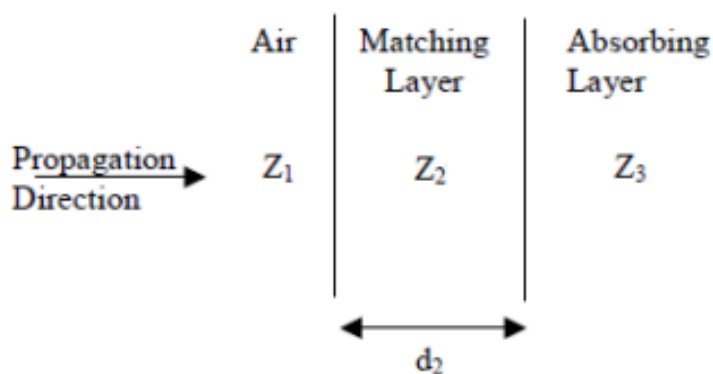


Figure II.11 : Illustration de la disposition des couches constitutives de l'absorbant à couches d'adaptation d'impédance

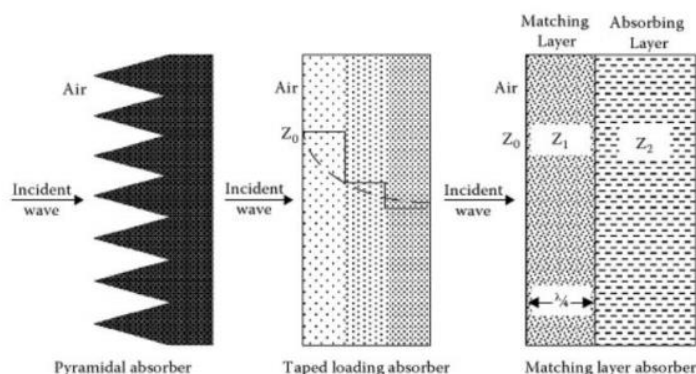


Figure II.12 : Illustration des différents types de matériaux structuraux

II.8.3 Absorbants résonants

Les matériaux absorbants résonants sont aussi appelés absorbants accordés (tuned en anglais) ou quart d'onde. Ils comprennent notamment les couches de Dällenbach, les écrans de Salisbury et les couches de Jaumann. Dans cette classe de matériaux, l'impédance n'est pas forcément adaptée entre le milieu de l'onde incidente et le milieu absorbant. Ces matériaux sont minces et n'absorbe pas l'intégralité de l'énergie à laquelle ils sont soumis. Le mécanisme employé utilise la réflexion et la transmission à la première interface. L'onde réfléchi subit une inversion de phase de l'ordre de π . L'onde transmise se déplace à travers le milieu absorbant est réfléchi sur un plan métallique. Cette seconde réflexion subit également une inversion de phase de π avant que l'onde se propage vers le milieu de l'onde incidente. Si la distance optique parcourue par l'onde émise est un multiple de la moitié de longueurs d'onde alors les deux ondes réfléchies seront en opposition de phase, ce qui provoquera une interférence destructive. Si l'amplitude de deux ondes réfléchies est égale alors l'intensité totale réfléchi est nulle.

II.8.4 Absorbants comportant des circuits analogiques

Il est possible d'améliorer la bande passante des absorbants résonants en utilisant des matériaux tirant partie d'autres mécanismes de dispersion. Les écrans de Salisbury et les couches de Jaumann utilisent des couches purement résistives dans leur fonctionnement. Hors, il est également possible d'employer des couches comportant des éléments capacitifs et/ou inductifs afin d'augmenter les possibilités d'optimisations.

Les matériaux résistifs/capacitifs se présentent sous la forme de polymère conducteur entourés de fibres [124] et les matériaux résistifs/inductifs sont généralement des bobines métalliques hélicoïdales noyées dans une couche diélectrique [125]. Le domaine des absorbants comportant des circuits analogiques se réfère le plus souvent à des matériaux où la feuille résistive des écrans de Salisbury et des couches de Jaumann a été remplacée par une couche mince sans pertes sur laquelle des motifs géométriques en matériaux à perte ont été déposés. L'épaisseur du matériau à perte détermine la résistance effective de l'ensemble de la couche. La géométrie et la périodicité du circuit créé déterminent l'inductance et la capacité effective. Ce type de matériau est généralement mince avec de bonnes performances d'absorption sur une bande passante assez large.

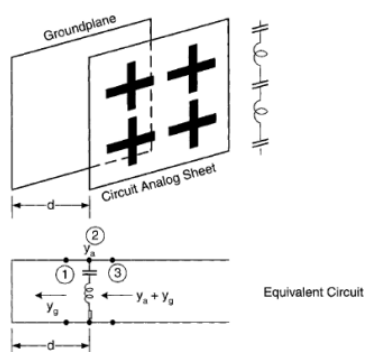


Figure II.13 : Illustration de la disposition d'un absorbant comportant des circuits analogiques comparé à son circuit équivalent.

Assez simplement, les absorbants comportant des circuits analogiques sont illustrés dans la figure (II.13).

La résistivité provient du matériau employé pour réaliser les motifs, l'espacement entre les différents éléments créé une capacité et la longueur des pistes créée une inductance [126].

La partie circuit analogique est équivalente à un écran de Salisbury, à la différence qu'il est possible de modifier simplement par la géométrie les propriétés de l'écran. Ce qui ouvre la voie à plus de flexibilité dans la conception d'absorbants. Ainsi il est possible de définir les propriétés de cet écran par la méthode des lignes de transmissions. Le circuit analogique est modélisé comme un circuit avec une résistance, une capacité C_s et une inductance en série. L'impédance d'entrée de l'ensemble de l'absorbant peut alors être optimisée afin de se rapprocher de l'impédance de l'air pour limiter au maximum la réflexion à la surface du dispositif.

$$Z_s = R_s + j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} \quad (\text{II.7})$$

La bande passante d'un simple écran réalisé avec ce type de matériau s'élève à près de 44 % a -10 dB en réflexion [127]. L'ajout d'un diélectrique dans la cavité entre le plan de masse et l'écran permet d'améliorer les performances de ce type de matériau. Les premiers matériaux absorbants comportant des circuits analogiques historiques sont constitués de bobines disposées sur un absorbant magnétique, qui est plus fins comparativement qu'un absorbant diélectrique. La disposition des bobines couplée à l'absorption permet d'obtenir après optimisation une impédance proche de celle de l'air à la fréquence de fonctionnement des antennes [128].

Le problème de ces premiers matériaux est une forte dépendance à la polarisation du champ magnétique en fonction du positionnement des bobines et donc un fonctionnement trop restreint pour certaines applications. Les matériaux développés par la suite se présentent sous la forme d'absorbants pyramidaux comportant des circuits analogiques perpendiculairement au plan de masse. Les récentes recherches s'orientent plus autour des surfaces sélectives en fréquence.

Les surfaces sélectives en fréquences (FSS) sont un type de circuits analogiques et peuvent permettre de réaliser des absorbants [128 – 132]. Les FSS sont typiquement utilisées comme filtres passe bande pour les radômes, les FSS sont purement métalliques à la différence des circuits analogiques précédents.

Les FSS permettent ainsi de régler les deux composantes inductives et capacitives et sont disposés sur un diélectrique fortement absorbant qui permet d'ajuster la composante résistive. Le circuit purement LC réalisé par les FSS détermine la fréquence de fonctionnement du dispositif. Le niveau d'absorption du diélectrique est intrinsèquement lié au niveau d'absorption de l'ensemble de la structure. Selon le type de FSS choisie pour réaliser un absorbant comportant un circuit analogique, différents paramètres interviendront.

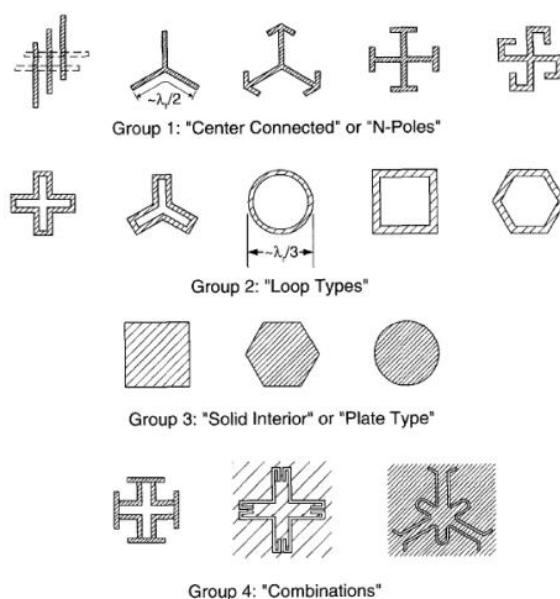


Figure II.14 : Liste non exhaustive de formes de FSS

Il est assez complexe d'optimiser les absorbants comportant des circuits analogiques car les modèles développés sont fait pour des structures très simples. Ce qui est le plus souvent utilisé est le modèle de lignes de transmission [133]. L'un des premiers brevets sur les absorbants utilisant des FSS en micro-ondes décrit un empilement de grilles résistives [134]. Un autre brevet des débuts de l'utilisation de FSS exploite un multicouche de patchs carrés et circulaires [135].

La diversité de formes employées pour réaliser les FSS montre bien la difficulté que l'on peut avoir à prédire exactement leur fonctionnement. Il n'en reste pas moins que ce type d'absorbant est très intéressant par ses nombreuses possibilités, les bandes de fréquences importantes qui peuvent être couvertes (jusqu'à 60 %) et la finesse qu'il est possible d'obtenir, égale à $\lambda/(4.n)$ [136] (avec n indice de réfraction du substrat).

Parmi les recherches réalisées sur l'optimisation de ce type de structure, les recherches autour de l'optimisation par algorithmes génétiques [137] sont très intéressantes.

II.8.5 Absorbants adaptatifs

Dérivés de l'idée de l'utilisation d'absorbants résonants et d'absorbants comportant des circuits analogiques, les absorbants adaptatifs exploitent des Surfaces Electromagnétiques Reconfigurables (RES).

Différentes recherches ont été réalisées sur ce type d'absorbant sans aboutir à une exploitation commerciale. Un exemple bien connu est l'utilisation de liquide à haute permittivité dans une couche constituée d'une matrice poreuse à permittivité faible, ainsi en contrôlant le niveau de liquide, il est possible d'ajuster les paramètres de l'absorbant [138]. Le temps de réponse d'un tel absorbant est malheureusement très long. Il est également possible de modifier la permittivité dans des couches de Dällenbach en appliquant un champ magnétique contrôlable [139], cette technique est assez difficile à appliquer sur des grandes surfaces. D'autres articles décrivent l'utilisation d'effets photo-diélectrique avec de l'AgCl [140], du silicium [141 – 142], ainsi qu'à l'aide de semi-conducteurs n-i-p-i [143]. L'intégration de dispositifs actifs a également été étudiée notamment les diodes Varicap [144].

II.8.6 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 [145 – 146]. 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 :

$$Z = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} Z_0 \quad (\text{II.8})$$

$$n = \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \quad (\text{II.9})$$

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 gammes.

Des couches de Dällenbach ont été brevetées à base de matériaux magnétiques comportant de la ferrite [147]. Ce procédé permet en empilant deux couches ou plus d'augmenter la bande d'absorption.

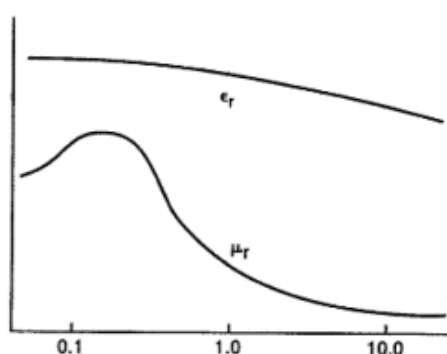


Figure II.15 : Illustration de courbes typiques de progression de la permittivité et de la perméabilité d'un matériau magnétique en fréquence.

II.9 CONCLUSION

Depuis leur première conception en 2008, les absorbants parfaits à métamatériaux avec des profils profondément sub-longueur d'onde ont fait l'objet d'une attention particulière au cours de la dernière décennie.

Dans ce chapitre, nous avons présenté une revue complète des progrès récents sur les théories et les conceptions des absorbants à métamatériaux planaires.

Nous avons passé en revue les théories fondamentales et les directives de conception permettant d'obtenir une absorption parfaite dans les métamatériaux sub-longueur d'onde. Différentes structures de cellules unitaires ont été étudiées pour réaliser des absorptions presque complètes.

Les réalisations d'absorbants à métamatériaux à large bande et accordables en fréquence ont également été discutées.

De plus, 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 A
METAMATERIAU
ELECTROMAGNETIQUE
A LARGE BANDE ET QUADRI
BANDE**

III.1 INTRODUCTION

Les progrès récents des métamatériaux nous permettent de créer des matériaux optiques sans précédent, et à titre d'exemple de tels matériaux, des surfaces de matériaux parfaitement absorbantes dans une certaine plage de fréquences ont été démontrées. Etant donné que l'absorbant en métamatériau offre un état de surface unique avec des propriétés d'absorption adaptées. Notamment une absorption proche de l'unité [148] [149] [150], une large bande passante [150], et une insensibilité à la polarisation [151].

Ces absorbants micro-ondes à métamatériaux parfaits sont très prometteurs dans de nombreuses applications telles que les capteurs [149] [150], la récolte d'énergie [151] [152], la modulation [149] et la transparence induite par l'électromagnétisme [153]. La collecte d'énergie à partir d'ondes électromagnétiques pour alimenter les réseaux de capteurs a démontré son importance et sa stratégie, mais ces études sont recalées pour des raisons de cout ou de difficultés de fabrication. Etant donné que l'absorption élevée de la MMA avec une seule bande est inappropriée dans plusieurs domaines [154], l'exploration de MMA large bande ou haute performance avec multi-bandes dans des dimensions compactes est devenue nécessaire.

Cependant, atteindre l'absorption à large bande en particulier dans la région THz (les fréquences plus élevées), reste une tâche difficile en raison de la bande passante intrinsèquement étroite des polaritons de plasmon de surface (spp) ou des résonances de plasmon sur les surfaces métalliques à l'échelle nanométrique, qui sont exploités comme mécanisme pour obtenir une absorption parfaite [155]. Ainsi l'amélioration de la conception des MMAs multi bandes continue de stimuler la recherche, y compris la notre.

Le but de ce chapitre est de présenter dans un premier temps un MMA quadri-bande conçu pour des applications possibles dans un système radar utilisant plusieurs bandes de fréquences, dans une électronique complexe pour sa compatibilité électromagnétique [156]. Puis nous exposerons par simulation les résultats d'absorption obtenus.

Puis en second lieu nous exposerons un absorbant à métamatériau de structure très simple avec un seul anneau en spirale pour récolter l'énergie micro-onde.

III.2 ABSORBANT A METAMATERIAU ELECTROMAGNETIQUE A QUADRI BANDE UTILISANT LA CELLULE (MMA)

Le schéma structurel de la cellule unitaire est présenté sur la figure (III.1) avec les dimensions nécessaires. La conception est initiée sur un substrat FR4 ayant une épaisseur de 1,5 mm, une constante diélectrique, $\epsilon_r = 4,4$, et une tangente de perte de 0,02. Le substrat contenait des couches de cuivre d'une épaisseur de 0,035 mm sur les deux faces. Trois résonateurs en anneau circulaire de différents rayons ont été conçus sur le substrat. Ou dessus, la couche de cuivre existante est conservée pour arrêter la transmission des ondes électromagnétiques incidentes.

CHAPITRE III : ABSORBANT A METAMATERIAU ELECTROMAGNETIQUE A LARGE BANDE ET QUADRI BANDE

Chaque anneau circulaire est divisé, et les anneaux sont couplés par des bandes métalliques, de telle sorte que les bandes de couplage des anneaux du milieu et de l'intérieur s'étendent vers le centre figure (III.1).

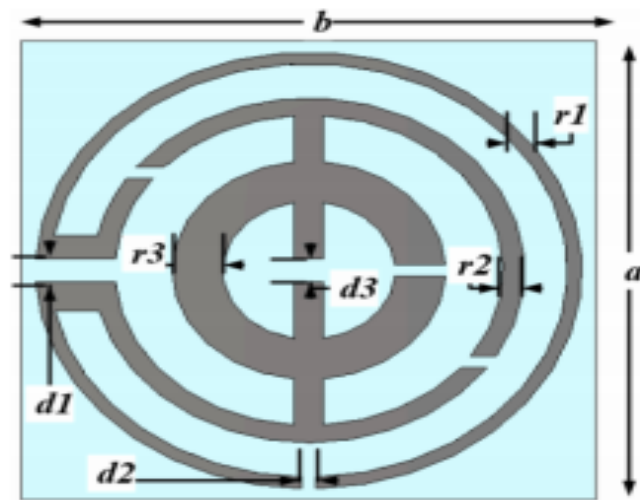


Figure III.1 : La cellule unitaire.

Les tailles des différents segments de la MMA proposée figurent dans le tableau (III.1). Le dispositif de simulation de la cellule unitaire est organisé comme indiqué sur la figure (III.2), de sorte que l'onde électromagnétique incidente normale est employée dans l'axe z , tandis que la condition limite parfaitement magnétique dans l'axe x , et dans l'axe y . La simulation est effectuée sous le logiciel HFSS.

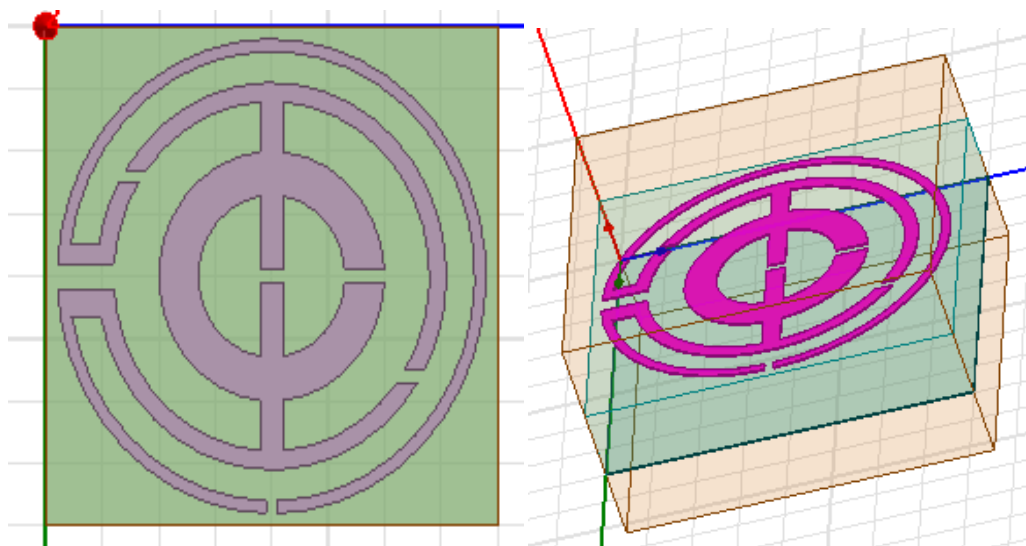


Figure III.2 : La cellule unitaire sous HFSS

Paramètres	Dimensions (mm)
A	8
B	8
r1	0.2
r2	0.3
r3	0.7
d1	0.4
d2	0.2
d3	0.2

Tableau III.1 : Les différentes dimensions de la cellule(MMA).

A partir de la simulation, le coefficient de réflexion S_{11} et le coefficient de transmission S_{21} sont atteints dans la gamme de fréquence de 3 à 16 GHz et le coefficient d'absorption (A) est calculer en utilisant la formule mathématique suivant :

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

La cellule dispose un plan de masse complet en cuivre est utilisé avec une conductivité de $\sigma = 5,8 \times 10^7$ S/m, la perméabilité de $\mu = 1$, la résistivité de $\rho = 1,72 \Omega$ -mètre.

L'épaisseur du plan de masse en cuivre est de 0,035 mm, ce qui est suffisant pour limiter la transmission de l'onde incidente. Ainsi, que ce plan crée un obstacle à la propagation de l'onde incidente de sorte que la transmission devient nulle ($S_{21}=0$). L'équation (III.1) devient :

$$A = 1 - |S_{11}|^2 \quad (\text{III.3})$$

Le coefficient de réflexion et de l'absorption sont présentés sur la figure (III.3) :

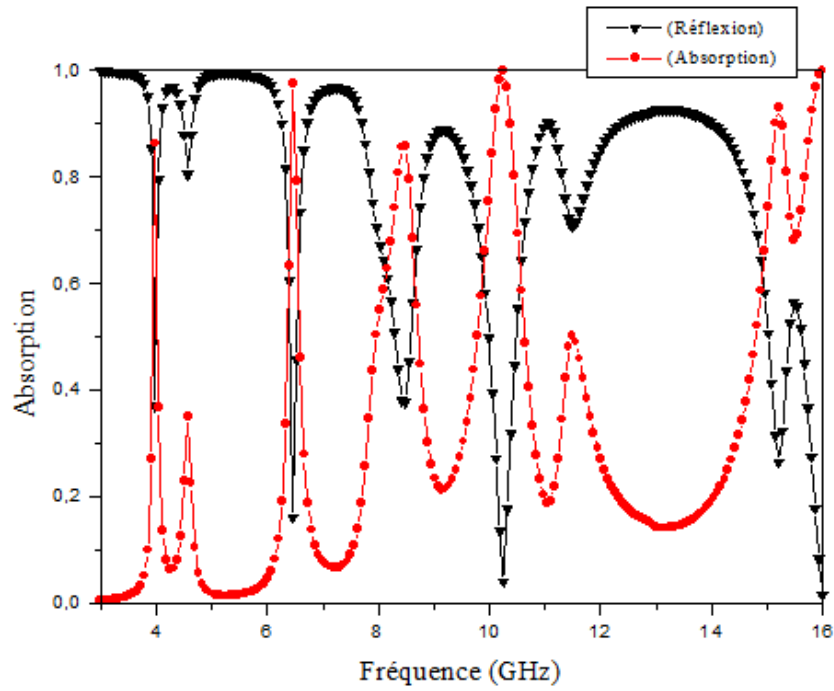


Figure III.3 : Coefficient de réflexion et d'absorption de la cellule unitaire.

Nous remarquons la production des principaux pics d'absorption à 3.98, 6.46, 8.48, 10.25 et 15.21 GHz avec des absorptions suivants de 86.2%, 97.4%, 85.7%, 99.8% et 93.03% respectivement. Le pic d'absorption moyen de 92.4% de ces cinq fréquences de résonances indique que l'absorption quasi parfaite de l'onde électromagnétique incidente dans ses fréquences.

La conception de la cellule unitaire MMA proposée, suit différentes étapes, comme l'illustre la figure (III.4), qui montre que lorsque la cellule unitaire est constituée d'un anneau circulaire de 0.2mm de large, elle fournit trois pics d'absorption. L'absorption est d'environ 98.6% à 8.55 GHz et d'environ 96.2% à 13.25 GHz alors que le 3 eme pic a une valeur plus faible environ 88% à 4.89 GHz.

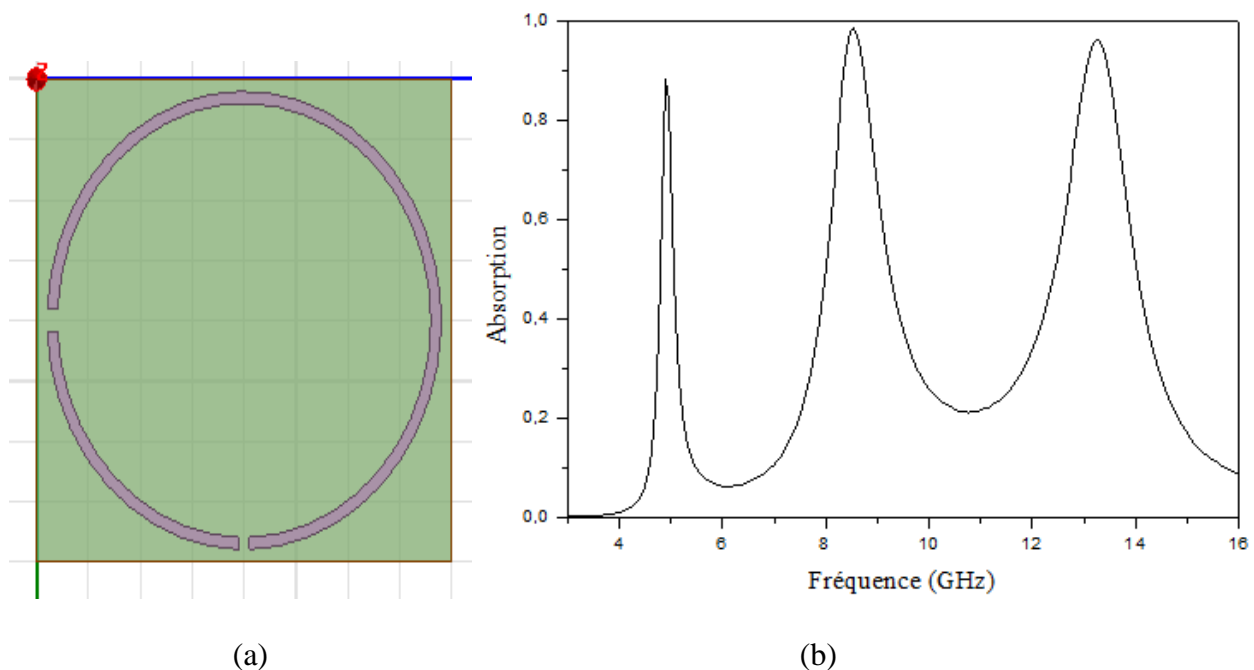


Figure III.4 : (a) Cellule unitaire (modèle1) ;(b) L'absorption en fonction de la fréquence

CHAPITRE III : ABSORBANT A METAMATERIAU ELECTROMAGNETIQUE A LARGE BANDE ET QUADRI BANDE

L'inclusion d'un autre anneau fendu, d'une largeur de 0,3 mm figure (III.5) donne des pics de résonance couvrant les bandes C et X, L'absorption est d'environ 93.4% à 8.22 GHz alors que des pics d'absorption avec des valeurs plus faibles sont obtenus à deux autres résonances, à savoir 4.82 et 10.77 GHz.

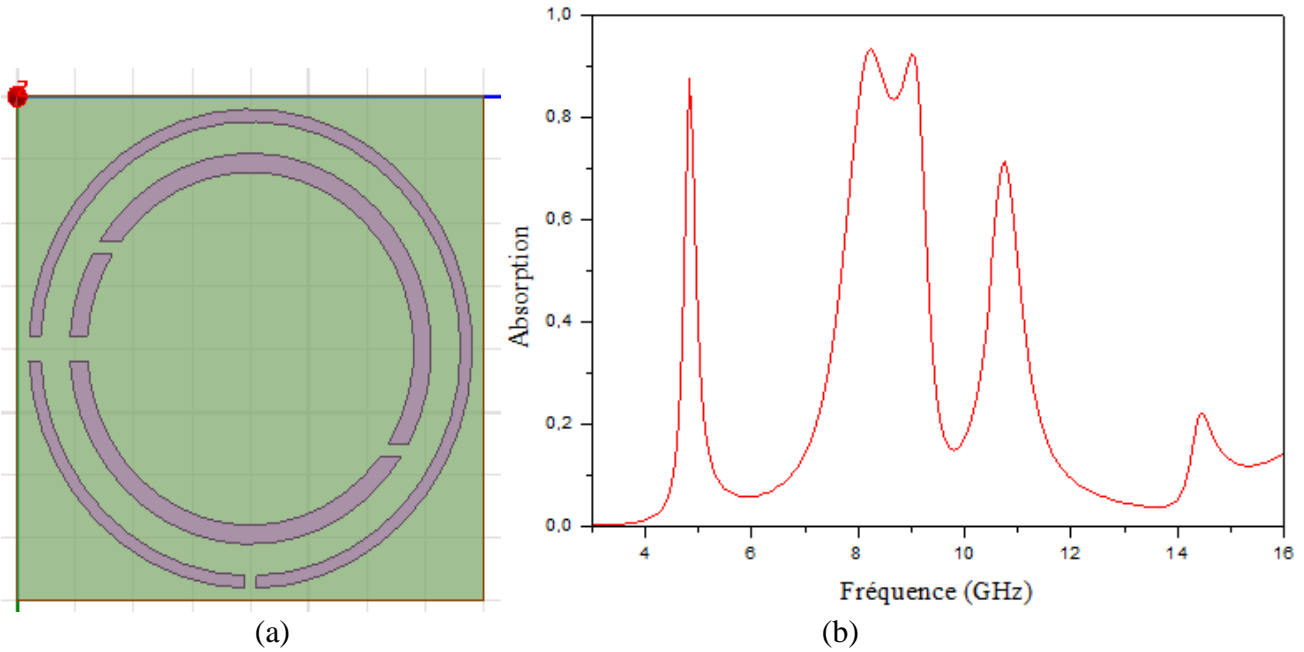


Figure III.5 : (a) Cellule unitaire (modèle2) ;(b) L'absorption en fonction de la fréquence

Lorsqu'un troisième anneau fendu de 0,7 mm de large est ajouté, la conception fournit trois pics d'absorption à 5.02, 8,16 et 12,21 GHz, couvrant tous les bandes C et X comme montre la figure (III.6).

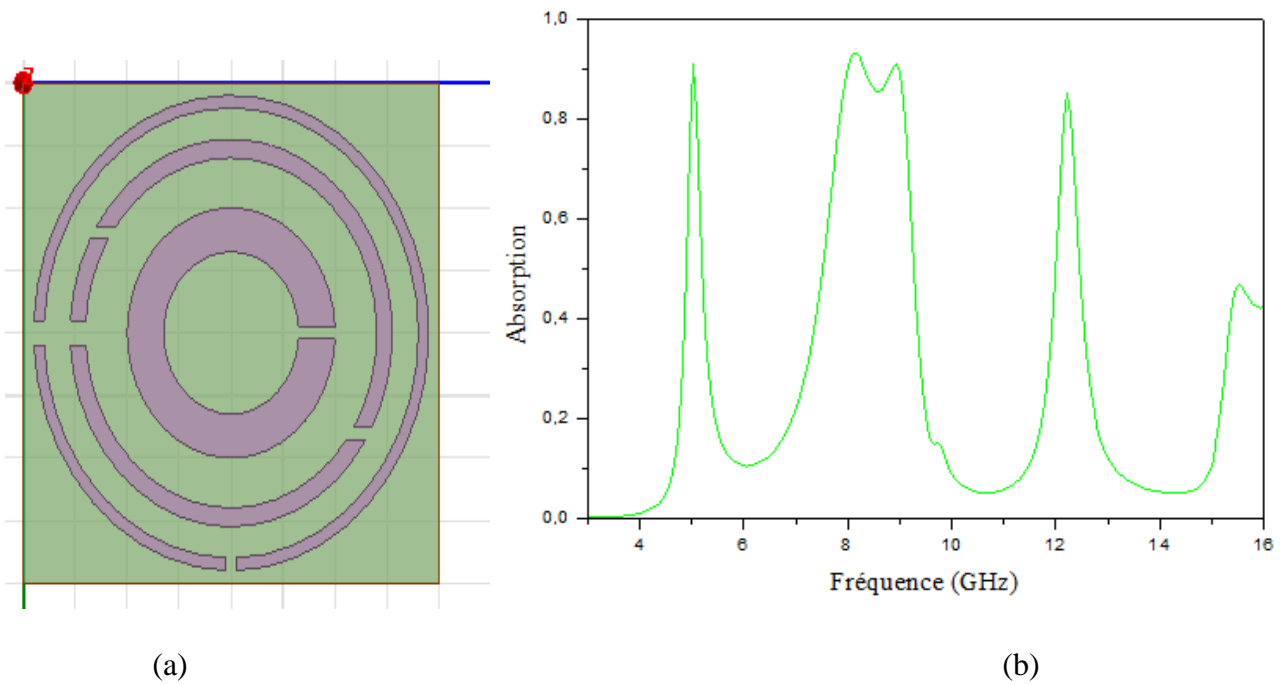


Figure III.6 : (a) Cellule unitaire (modèle 3) ; (b) L'absorption en fonction de la fréquence.

CHAPITRE III : ABSORBANT A METAMATERIAU ELECTROMAGNETIQUE A LARGE BANDE ET QUADRI BANDE

L'inclusion du troisième anneau entraîne également un décalage des fréquences d'absorption maximale et permet d'obtenir une amplitude plus élevée pour les pics d'absorption à 5.02 et 12.21 GHz.

La conception est encore modifiée en couplant deux anneaux extérieurs, comme le montre la figure (III.7), qui génère cinq pics d'absorption dans les bandes C et X avec un changement d'amplitude par rapport aux modèles précédents.

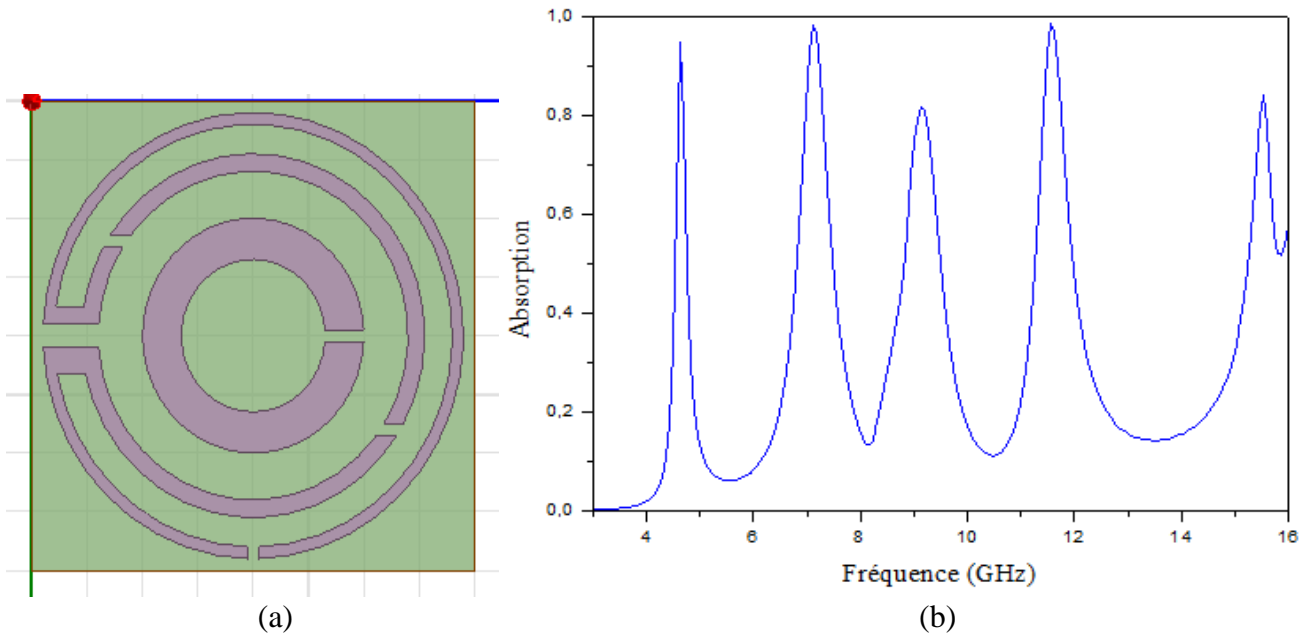


Figure III.7 : (a) Cellule unitaire (modèle 4) ; (b) L'absorption en fonction de la fréquence.

Dans le modèle étudié figure (III.2), Les anneaux de l'intérieur et extérieur sont couplés à une bande métallique étendue ce qui entraîne un décalage des pics d'absorption et fournit une absorption quasi unitaire à 3.98, 6.46, 8.48, 10.25 et 15.21 GHz. Le tableau (III.2) résume les résultats de différentes modèles.

Étapes de conception	Fréquence de résonance (GHz)	Maximum absorption (%)	Bands de couverture
Modèle 1	4.89, 8.55, 13.25.	88, 96.2, 98.6.	C, X, Ku-band
Modèle2	4.82, 8.22, 10.77.	87.5, 93.4, 71.2.	C, X-band
Modèle 3	5.02, 8.16, 12.21.	90.9, 93.01, 84.9.	C, X-band
Modèle 4	4.63, 7.11, 9.14, 11.55, 15.54.	94.6, 98.2, 81.6, 98.3, 83.6.	C, X-band
Modèle étudié	3.98, 6.46, 8.48, 10.25, 15.21.	86.2, 97.4, 85.7%, 99.8, 93.03.	C, X, Ku-band

Tableau III.2 : Absorption pour diverses étapes de conception de la cellule unitaire.

III.2.1 Etude paramétrique de la cellule unitaire MMA

Dans cette section, une étude paramétrique a été réalisée en tenant compte de l'effet de toute modification de l'écart entre les anneaux, et de l'épaisseur du substrat.

III.2.1.1 Influence de L'écart entre les anneaux

L'effet de la modification de l'écart de séparation d_2 est observé en faisant varier chacun de ces écarts dans les trois anneaux, tandis que l'épaisseur du substrat est réduite. Et la distance entre les anneaux reste constante. Les spectres d'absorption sont représentés sur la figure (III.8) pour le changement de l'espacement, d_2 ($d_2 = 0,3, 0,4, 0,5$ et $0,6$ mm).

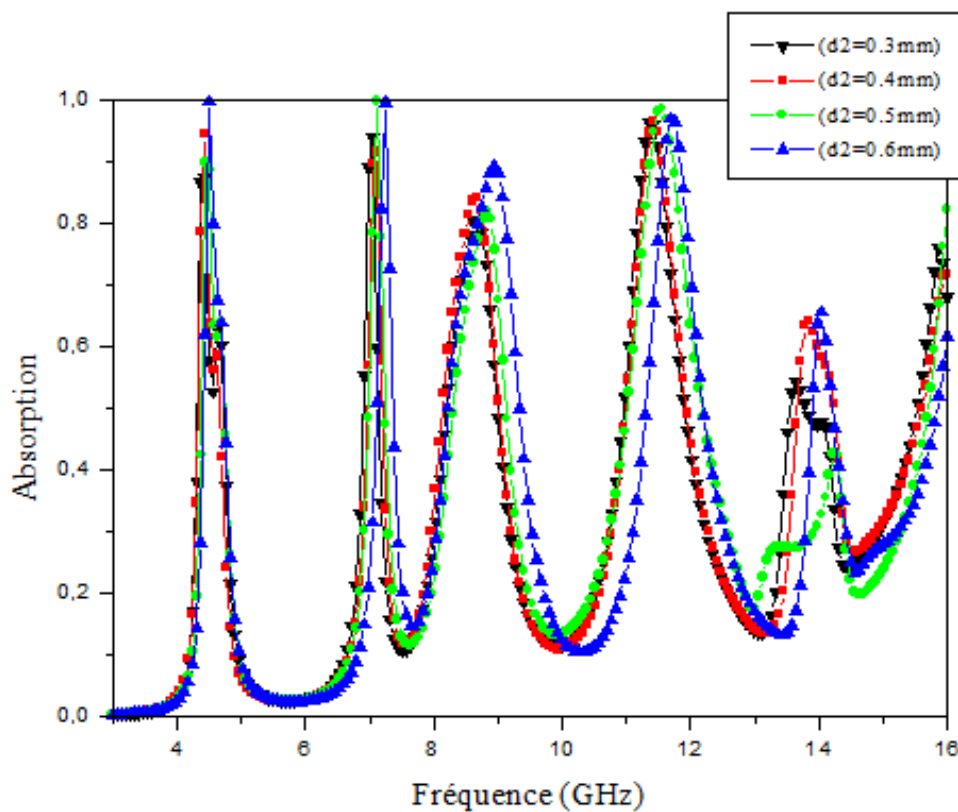


Figure III.8 : influence de changement de l'écart entre les anneaux sur l'absorption.

La figure (III.8) montre que lorsque d_2 est élevé, les pics d'absorption se produisent dans chaque bande à des fréquences plus élevées. Cependant, lorsque d_2 diminue, les fréquences des pics d'absorption se déplacent vers les valeurs inférieures. Les fentes dans l'anneau agissent comme des condensateurs à plaques parallèles de 0,035 mm d'épaisseur. Ainsi, la diminution de la distance entre les fentes augmente la capacité, qui à son tour réduit les fréquences de résonance du coefficient de réflexion. Pour cette raison, les pics d'absorption se déplacent vers des fréquences plus basses au fur et à mesure que l'écartement diminue.

III.2.1.2 Influence de l'épaisseur du substrat

L'effet de l'épaisseur du substrat est également examiné pour des changements d'épaisseur, h ($h= 1, 1.25, 1.75,$ et 2 mm), dont les résultats apparaissent sur la figure (III.9).

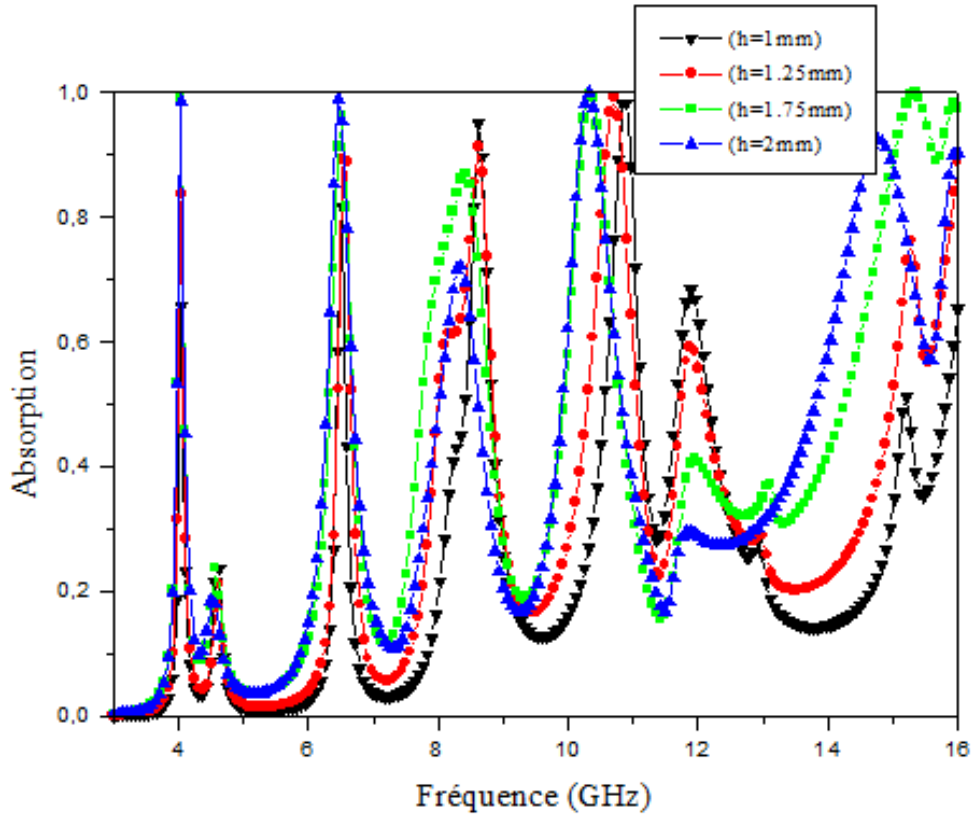


Figure III.9 : Influence de changement de L'épaisseur du substrat sur l'absorption.

On observe des changements notables dans les fréquences d'absorption de pointe coïncidant avec les changements d'épaisseur. Lorsque l'épaisseur augmente, les fréquences d'absorption maximales se déplacent vers les valeurs inférieures. De plus, l'épaisseur du substrat contribue à maintenir une meilleure d'absorption.

III.3 ABSORBANT A METAMATERIAU ELECTROMAGNETIQUE A LARGE BANDE

La figure (III.10) montre la structure de la cellule unitaire proposée et ses dimensions caractéristiques sont également présentées sous forme de tableau (III.3).

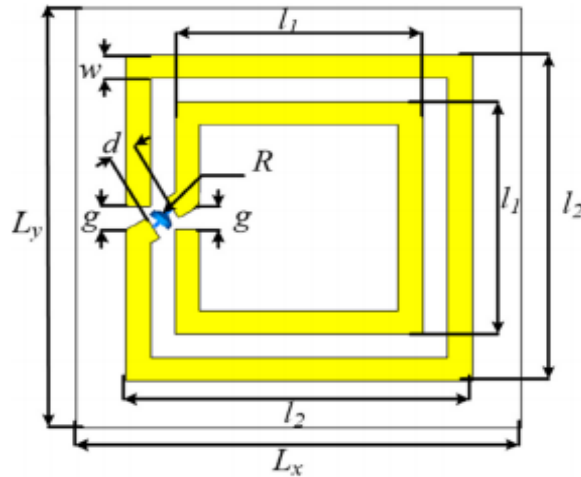


Figure III.10 : Cellule unitaire proposée.

Paramètre	Valeur (mm)
Lx	11
Ly	11
L1	5
L2	7
G	0.5
D	0.5
W	0.5

Tableau III.3 : Les valeurs des paramètres de la cellule proposée.

La cellule unitaire proposée est basée sur un anneau spirale chargé à deux anneaux qui fonctionne comme un absorbant à large bande dans la bande de fréquence des micro-ondes. Il se compose de trois couches. La couche supérieure est un anneau métallique carré en spirale, tandis que sous la couche supérieure se trouve un substrat diélectrique FR4 d'épaisseur 2,5 mm. La valeur de la constante diélectrique est $\epsilon_r = 5$ et la valeur de la tangente de perte est $\tan\delta = 0,04$. La couche inférieure est un plan de masse en cuivre.

Le cuivre a été initialement choisi pour avoir une épaisseur de 0.035 mm et une conductivité électrique métallique de $5,8 \cdot 10^7$ S/m. Afin d'obtenir une absorption large bande parfaite, cette structure unitaire simple a été simulée par (HFSS).

Le dispositif de simulation de la cellule unitaire est organisé comme indiqué sur la figure (III.11).

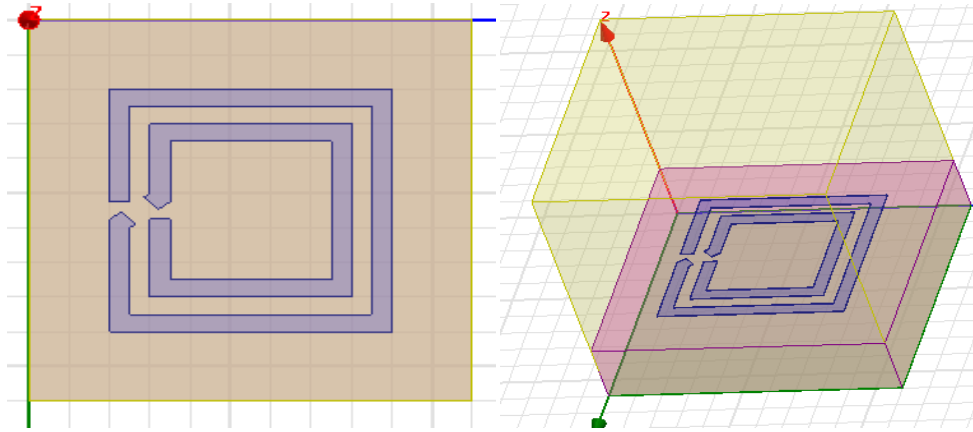


Figure III.11 : Cellule unitaire sous HFSS

III.3.1 Résultats

La figure (III.12) montre les coefficients de réflexion ainsi la magnitude d'absorption qui est calculée à partir du coefficient de réflexion uniquement (équation (III.3)).

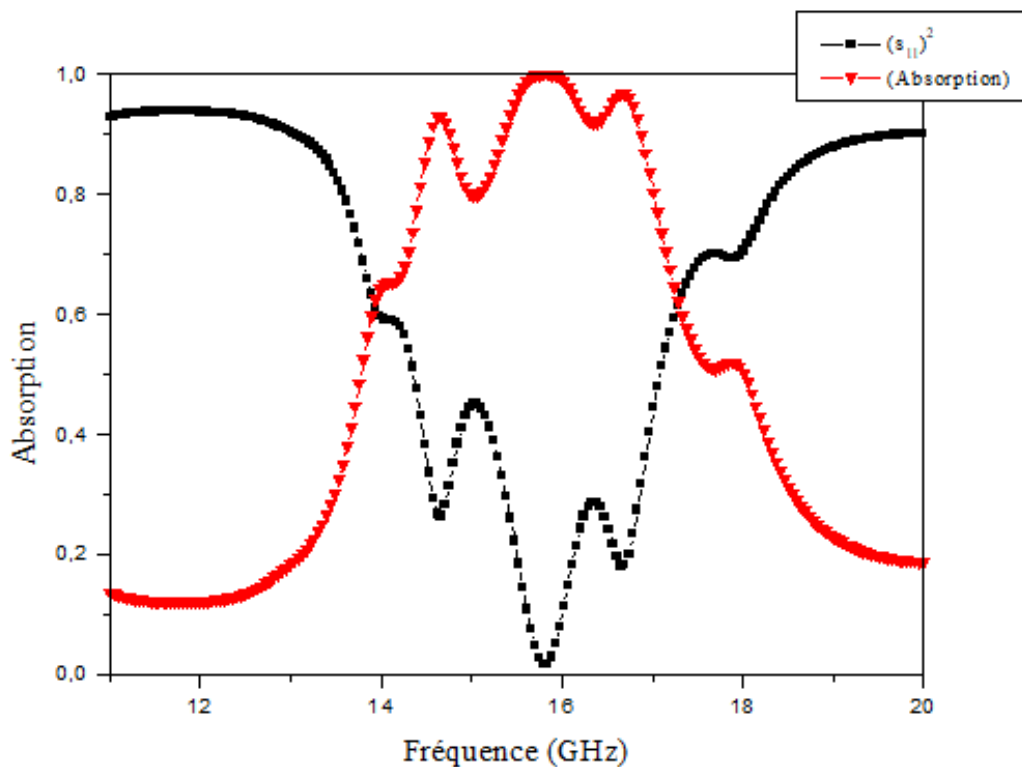


Figure III.12 : Coefficients de réflexion et la magnitude d'absorption.

la structure proposée fournit trois pics d'absorption à 93.04%, 99.98%, 96.68%, d'un niveau d'absorption parfait aux fréquences de résonance 14.66 GHz, 15.79 GHz et 16.69 GHz, respectivement.

III.3.2 Etude paramétrique de la cellule unitaire

Dans cette section, une étude paramétrique a été réalisée en tenant compte de l'effet de toute modification largeur de l'anneau métallique et constante diélectrique du substrat FR4.

III.3.2.1 Influence de largeur de l'anneau métallique

La largeur de l'anneau métallique est modifiée par pas de 0,2 mm. Dans la bande 15.56 GHz à 16.74 GHz nous remarquons, le spectre d'absorption reste élevé pour $w=0.5\text{mm}$, et quasi élevé pour $w=0.7\text{mm}$ mais pour $w=0.3\text{mm}$ le spectre est faible comme la montre la figure (III.13).

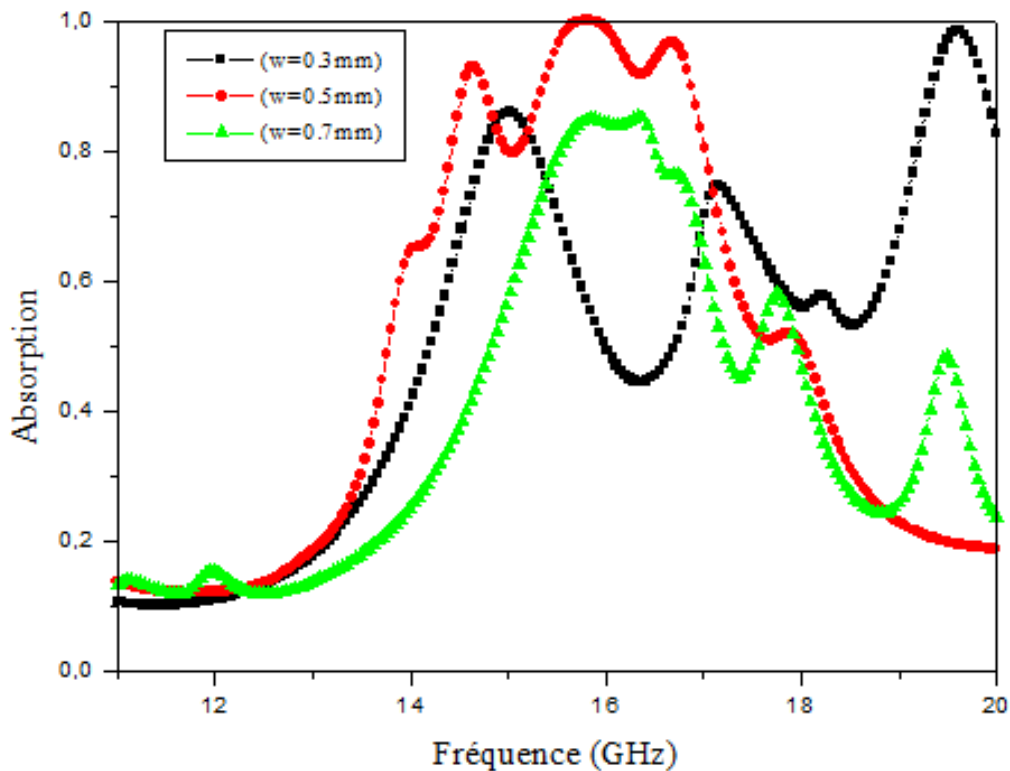


Figure III.13 : Influence de changement de largeur de l'anneau sur l'absorption.

III.3.2.2 Influence de la constante diélectrique du substrat

La constante diélectrique du substrat FR4 a un effet sur le spectre d'absorption et pour cela a été examinée avec un changement de pas de 0,5 figure (III.14).

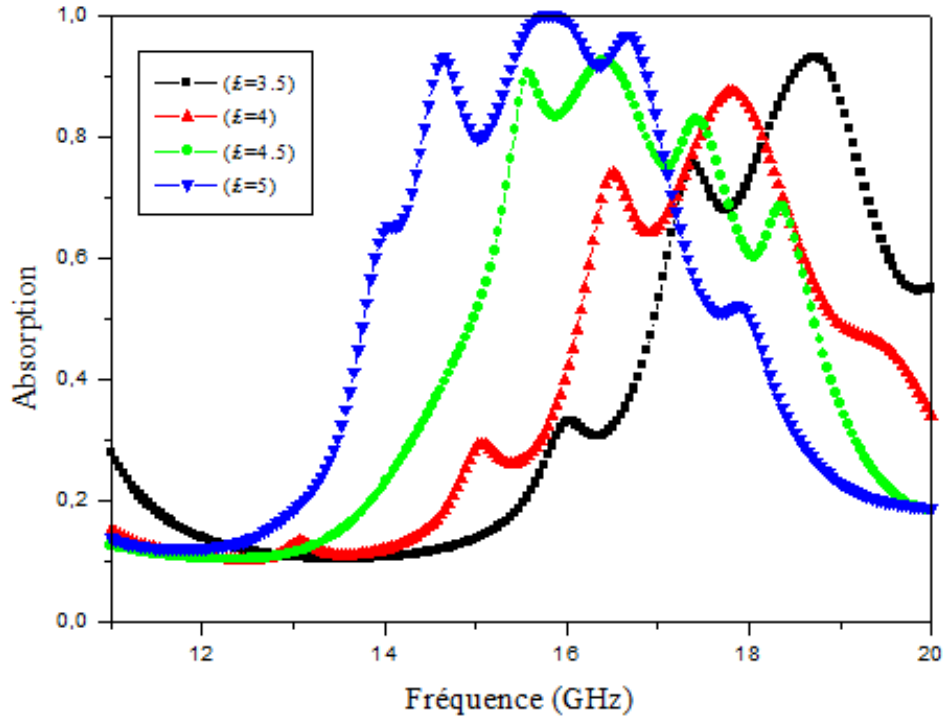


Figure III.14 : Influence de changement de la constante diélectrique du substrat sur l'absorption.

Nous constatons que lorsque la permittivité a été augmentée de 3,5, le niveau d'absorption a augmenté, avec un déplacement de fréquence.

III.4 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons examiné en première partie par simulation la performance de l'absorbant multi bande. Ce MMA est conçu sur un substrat FR-4 à faible cout d'une dimension physique de $8 * 8 \text{ mm}^2$ et ses propriétés sont étudiées par simulation.

La cellule unitaire présente un comportement négatif unique ainsi que cinq résonances à 3.98, 6.46, 8.48, 10.25, 15.21, ainsi qu'une absorption de 86.2, 97.4, 85.7%, 99.8, 93.03, est obtenue. Puis en seconde partie nous avons exposé un métamatériau capable d'absorber le rayonnement électromagnétique avec un haut degré d'efficacité. L'utilisation la plus encourageante des absorbants à métamatériaux concerne toutefois la bande des micro-ondes qui sont très prometteurs dans de nombreuses applications.

Notre simulation a démontré que la structure globale fournit trois résonances avec une magnitude d'absorption supérieure à 90%. La largeur de bande d'absorption est obtenue dans cette simulation prouvent que la récolte d'énergie basée sur un métamatériau est une bonne technologie pour alimenter les réseaux de capteurs.

Chapitre IV
ABSORBANT A
METAMATERIAU
MICRO-ONDE
POUR LES APPLICATIONS
DE DETECTION

IV.1 INTRODUCTION

Un absorbant à métamatériaux manipule les composants de perte de la permittivité et la perméabilité magnétique des métamatériaux, pour absorber de grandes quantités de rayonnement électromagnétique. Un capteur basé sur un absorbant à métamatériau (MA) est conçu et analysé pour divers applications importantes, notamment la détection de la pression, de la température, de la densité et l'humidité. Les capteurs MTM offrent une sensibilité et une résolution plus élevées que les structures traditionnelles en raison de leur forte localisation des champs [157]. Réduisent également la taille du capteur par rapport à une structure classique qui est moins proportionnelle à la fréquence de fonctionnement. La bande passante et appliquer à différents capteurs étant importantes pour les applications de capteurs à métamatériaux.

Nous avons fait dans ce chapitre la conception et la simulation de capteurs distincts pour la pression et la densité.

IV.2 CAPTEURS A BASE DE METAMATERIAUX

Les capteurs à micro-ondes évaluent les propriétés d'un échantillon en fonction de l'interaction des micro-ondes avec la matière. Ils contiennent généralement un générateur de signaux, un récepteur et un dispositif de sortie. Le générateur de signaux produit un signal hyper fréquence dans une certaine gamme de fréquences qui sera transmis par l'échantillon. La modification physique des caractéristiques de l'échantillon entraîne une modification de la réponse à une certaine excitation électromagnétique. Le récepteur tel que l'antenne reçoit les signaux micro-ondes diffusés. Pour les capteurs hyperfréquences de métamatériaux, un résonateur inspiré des métamatériaux est ajouté près des échantillons.

La dimension physique, la forme, la résonance et certaines propriétés uniques du résonateur sont autant d'atouts qui les rendent utiles pour la détection. L'une des raisons est que les résonateurs métamatériaux sont capables de localiser et de renforcer les champs électromagnétiques qui offrent une grande sensibilité [158].

Les champs électromagnétiques générés par le résonateur permettent de capter de petites quantités de changement. Par exemple, les modifications peuvent être provoquées par des échantillons liquides de concentrations différentes, des échantillons diélectriques solides de permittivité différente ou des substances ayant une teneur en humidité différente. La fréquence de résonance des métamatériaux est fortement dépendante de leurs propres dimensions géométriques. Il est ainsi possible d'apporter diverses modifications à leur conception structurelle afin de détecter des excitations externes dans lesquels tels que la pression, la température ou des paramètres structurels de vibrations physiques et donc des modifications de la fréquence de résonance

Les capteurs à métamatériaux ont une variété d'applications potentielles, y compris la caractérisation des matériaux, les diagnostics médicaux ou la bio-détection, la détection de la transformation dans les excitations externes telles que l'humidité de l'air, la température et la pression. Pour les applications industrielles, les matériaux peuvent être caractérisés à l'aide de capteurs à métamatériaux en fonction de leurs caractéristiques telles que la densité de la permittivité, la concentration, la pourcentage en humidité. Pour détecter les facteurs externes, les capteurs à métamatériaux peuvent être utilisés pour détecter les mouvements, les vibrations, l'humidité, la température et la pression. Les critères pour de bons capteurs à métamatériaux sont qu'ils sont capables de :

1. Fournir un signal mesurable permettant de suivre avec précision les fréquences de résonance.
2. Concerner La Linéarité De La Détection.
3. Permettent De Résoudre De Petits Changements (Bonne Sensibilité Du Capteur).
4. Avoir Une Basse Fréquence De Fonctionnement Pour Réduire L'absorption Par Le Substrat Et Le Fond.

IV.3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES CAPTEURS METAMATERIAUX

Les capteurs à métamatériaux ont pour principe de fonctionnement reposent sur le glissement de fréquence, la division de fréquence, la modulation d'amplitude et la modulation de couplage.

Le tableau (IV.1) résume les quatre principes opérations dont la comparaison des variables de détection, des avantages et des inconvénients.

CHAPITRE IV : ABSORBANT A METAMATERIAU MICRO-ONDE POUR LES APPLICATIONS DE DETECTION

Principes de fonctionnement	Variable de détection	Avantages	Inconvénients
Glissement de fréquence	<ul style="list-style-type: none"> • Permittivité • Pression • Teneur en humidité • Température 	<ul style="list-style-type: none"> • Conception simple • Faible coût 	<ul style="list-style-type: none"> • Étalonnage généralement requis pour mesures précises • Sensible aux variations environnementales
division de fréquence	<ul style="list-style-type: none"> • Permittivité 	<ul style="list-style-type: none"> • Peut être utilisé comme comparateur qui est utile dans la détection de défauts des échantillons 	<ul style="list-style-type: none"> • Couplage entre les deux résonateurs réduire la sensibilité du capteur
modulation d'amplitude	<ul style="list-style-type: none"> • Position angulaire • Vitesse angulaire 	<ul style="list-style-type: none"> • Angle quasi instantané les vitesses peuvent être obtenues • Grande fiabilité 	<ul style="list-style-type: none"> • De nombreux résonateurs sont nécessaires pour bonne précision des mesures et cela pourrait entraîner des effets de couplage croisé
Modulation de couplage	<ul style="list-style-type: none"> • Alignement • Déplacement 	<ul style="list-style-type: none"> • Solide contre l'environnement variations 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensible aux effets électromagnétiques interférence (IEM)

Tableau IV.1 : Les avantages et les inconvénients de chaque principe.

IV.4 LES RESONATEUR EN ANNEAU FENDU (SPLIT RING RESONATEUR SRR)

Un résonateur en anneau fendu (SRR) est une forme de structure artificielle commune aux métamatériaux. Leur but est de produire la susceptibilité magnétique désirée (réponse magnétique) dans divers types de métamatériaux jusqu'à 200 térahertz. Ces substrats créent le fort couplage magnétique nécessaire pour un champ électromagnétique appliqué, qui n'est pas disponible autrement dans les matériaux conventionnels. Par exemple, un effet tel que la perméabilité négative est produit avec un réseau périodique de résonateurs en anneau fendu [161].

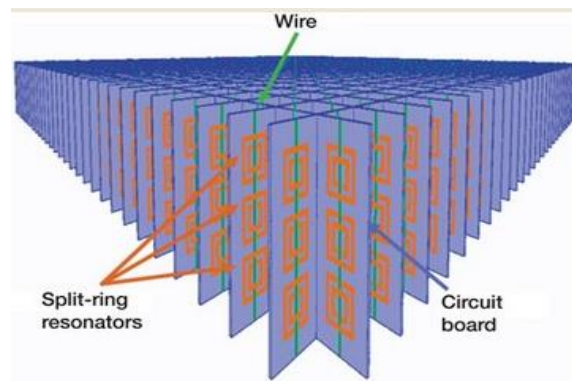


Figure IV.1 : Un exemple de résonateur à anneau fendu constitué d'un carré intérieur avec une fente d'un côté noyée dans un carré extérieur avec une fente de l'autre côté [159] [160].

Les résonateurs à anneau fendu (SRR) consistent en une paire d'anneaux métalliques concentriques gravés sur un substrat diélectrique, avec des fentes gravées sur les côtés opposés. Les SRR peuvent produire l'effet d'être électriquement plus petits lorsqu'ils répondent à un champ électromagnétique oscillant. Ces résonateurs ont été utilisés pour la synthèse de milieux gauchers et à indice de réfraction négatif, où la valeur requise de la perméabilité effective négative est due à la présence de RRF.

Lorsqu'un réseau de résonateurs électriques de petite taille est excité par un champ magnétique variable dans le temps, la structure se comporte comme un milieu effectif avec une perméabilité effective négative dans une bande étroite au-dessus de la résonance du résonateur. Les SRR ont également été couplés à des lignes de transmission planes, pour la synthèse de métamatériaux de ligne de transmission [162] [163] [164] [165].

IV.4.1 Le Complémentaire du résonateur En Anneau Fendu CSRR (Complementary Split Ring Resonator)

Le CSRR est beaucoup utilisé pour simuler les éléments métamatériaux. Cet élément clé est la partie complémentaire du CSRR (Figure (IV.2)). La première démonstration expérimentale sur les CSRR a été présentée par F. Flacone et al en 2004 [166]. Dans une première étape de son analyse, le comportement d'un CSRR parfaitement conducteur et infiniment mince dans un système électromagnétique externe. A partir de la dualité (comme SRR), un comportement similaire est attendu pour le CSRR illuminé par un champ magnétique externe polarisé le long de l'axe y

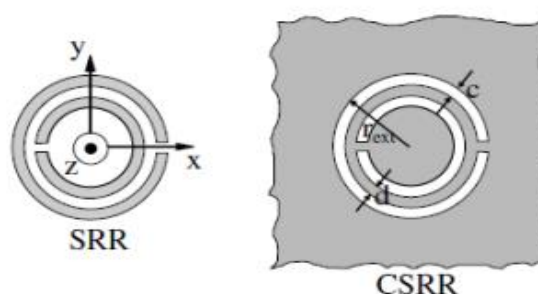


Figure IV.2 : Géométries du SRR et du CSRR.

Le CSRR de son côté, il est considéré comme un dipôle électrique ponctuel à polarisation négative. Il est excité par un champ électrique E se propageant parallèlement au plan du CSRR pour générer un fort dipôle électrique qui affecte la fréquence de résonance du CSRR [167]. Les SRR et les CSRR ont presque la même fréquence de résonance et ceci grâce à leurs dimensions identiques et partagées. Parfois, le décalage entre la fréquence de résonance des métasurfaces SRR et CSRR peut être principalement attribué à l'effet du substrat diélectrique, qui affecte de manière différente la fréquence de résonance des SRR et des CSRR.

Le CSRR, qui agit comme un dipôle électrique ponctuel à polarisabilité négative, a été proposé selon l'approche de Babinet. Le principe de Babinet a été appliqué à la conception de surfaces et de matériaux artificiels aux propriétés électromagnétiques extraordinaires.

Ce concept va au-delà de l'approche habituelle pour la fabrication de métamatériaux à permittivité négative, basée sur l'utilisation de fils ou de plaques métalliques.

IV.4.2 Type des SRR

Dans le cadre de la recherche basée sur les métamatériaux, et en particulier sur l'indice de réfraction négatif, on trouve des différents types de résonateurs à anneau fendu. Parmi les exemples, la plupart d'entre eux présentent un espace dans chaque anneau. En d'autres termes, dans le cas d'une structure à double anneau, chaque anneau présente un espace [168]. Il y a la structure à anneaux brisés 1-D avec deux anneaux carrés, l'un à l'intérieur de l'autre.

La structure symétrique annulaire est un autre exemple classique. Décrite par la nomenclature, elle est constituée de deux configurations rectangulaires de type D-carré, exactement de même taille, situées à plat, côte à côte, dans la cellule unitaire. De plus, elles ne sont pas concentriques [168].

La structure Oméga, telle que décrite dans la nomenclature, présente une structure en anneau Ω [169]. Il y en a deux, se tenant verticalement, côte à côte, au lieu d'être à plat, dans la cellule unitaire. En 2005, ils ont été considérés comme un nouveau type de métamatériaux.

Un autre nouveau métamatériau en 2005 était une structure en forme de "S" couplée. Il s'agit de deux structures verticales en forme de "S", côte à côte, dans une cellule unitaire. Il n'y a pas d'espace comme dans la structure en anneau, mais il y a un espace entre les parties supérieure et médiane du S et un espace entre les parties médiane et inférieure du S. En outre, il a toujours les propriétés d'avoir une fréquence de plasma électrique et une fréquence de résonance magnétique [168] [170].

IV.5 DETAILS DE CONCEPTION DE LA CELLULE UNITAIRE (MTM)

La structure MTM proposée, telle qu'elle est présentée sur la figure (IV.3).

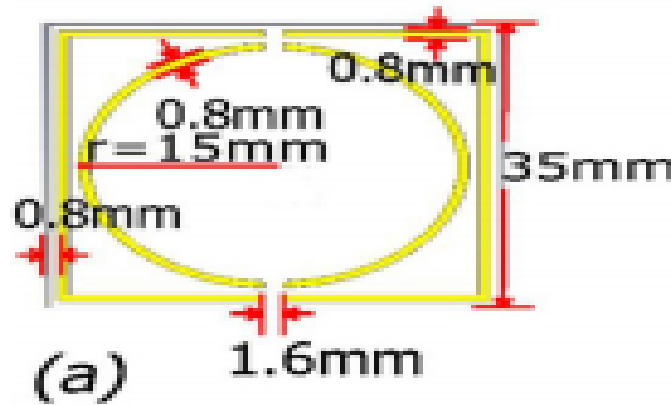


Figure IV.3 : Structure proposée.

Pour assurer les meilleurs résultats numériques, les dimensions sont spécialement choisies. La structure proposée est composée de deux résonateurs. L'un des d'eux est un carré et l'autre est une inclusion en forme d'anneau qui donne deux résonateurs. Les résonateurs sont constitués d'éléments en cuivre dont la conductivité est de 5.8×10^7 S/m. Le substrat utilisé est le matériau à pertes Arlon DiClad 527 de Rogerscorp , dont l'épaisseur est de 1,6 mm, la constante diélectrique de 2.50 et la tangente de perte de 0.0002. Les résonateurs carrés et a anneau fendu ont une épaisseur de 0.8 mm et la distance entre le résonateur carré et le bord de la cellule unitaire est également de 0.8 mm. La largeur de la fente des résonateurs est de 1.6 mm et le rayon extérieur du résonateur à anneau fendu est de 15 mm.

La conception proposée est testée numériquement pour des applications d'absorbant et de capteur. Dans le cas de la configuration de l'absorbant, une plaque de cuivre est utilisée au dessous de substrat diélectrique qui supporte les résonateurs. Pour le cas de la configuration du capteur, la couche du capteur est placée entre les deux substrats. Afin de montrer les caractéristiques d'absorption, un substrat diélectrique (DiClad 5.27) qui est soutenu par du cuivre est placé au dessus de la couche du capteur comme le montrent les figures (IV.4.a) et (IV.4.b).

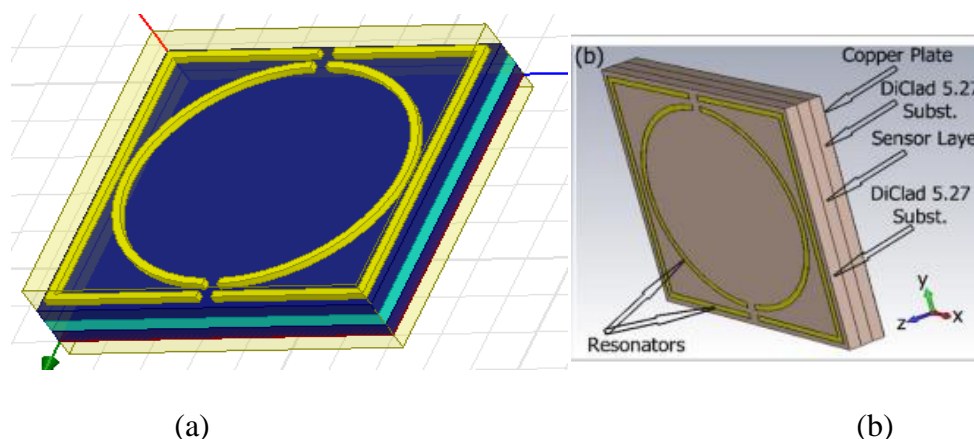


Figure IV.4 : (a) La structure proposée pour la configuration de détection montrant les couches ; (b) la structure proposée détaillée

IV.5.1 Influence de la constante diélectrique sur l'absorption

Afin de montrer les dimensions physiques de la structure proposée, l'étude de simulation suivante est présentée. L'épaisseur de la couche du capteur est fixée à 1.6 mm comme dans les applications proposées dans cette étude. Le spectre d'absorption est simulé pour différentes valeurs de la constante diélectrique ϵ_r de la couche du capteur =7, 9, 12 et 15 et les résultats sont représentés sur la figure (IV.5).

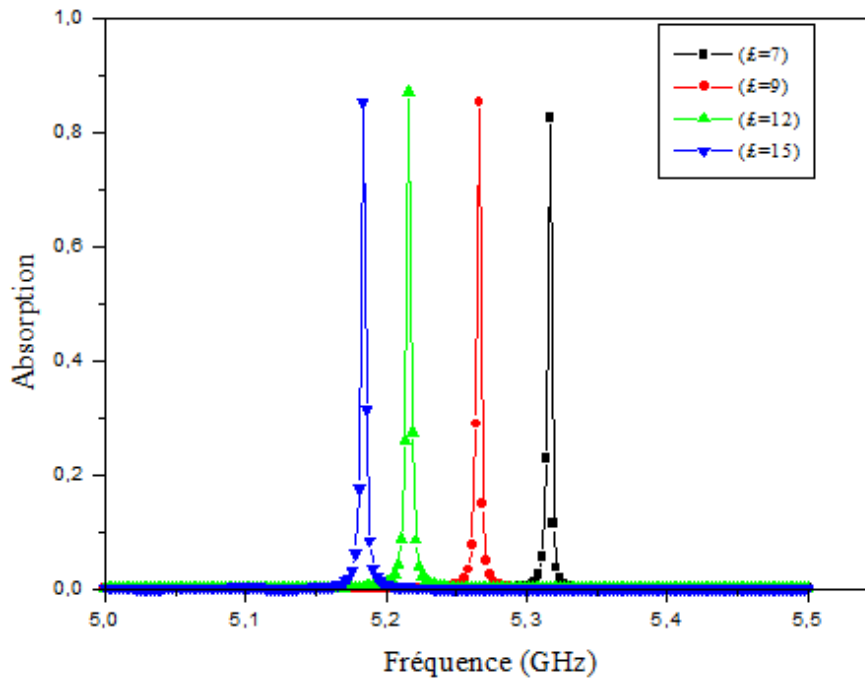


Figure IV.5 : Absorption en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de la constante diélectrique.

Nous observons que La fréquence de résonance diminue lorsque la constante diélectrique de la couche du capteur est augmentée en raison des effets capacitifs de la couche du capteur, tandis que le niveau d'absorption moyen est environ 84.97%. Le mécanisme d'absorption de la structure globale peut être expliqué en fonction de l'adaptation de l'impédance de l'espace libre d'où provient l'onde incidente et de l'impédance intrinsèque du MA proposé.

Il est bien connu que l'efficacité d'un absorbant est directement liée à la fois à l'adaptation de l'impédance des surfaces à la fréquence de résonance pour assurer une pénétration exacte de l'onde incidente et au plan de masse métallique au dessous pour retenir l'onde dans le MA.

IV.5.2 Extraction par la méthode de Nicolson-Ross-Weir

La méthode d'extraction de Nicolson-Ross-Weir (NRW) est basée sur l'inversion des formules de Fresnel exprimant les coefficients de réflexion et de transmission normaux d'une couche de milieu composite à travers l'impédance d'onde du milieu et son indice de réfraction. Grâce à l'impédance d'onde et à l'indice de réfraction, on peut trouver une permittivité et une perméabilité moyennes (pour les milieux anisotropes - composantes tangentielles des tenseurs de permittivité et de perméabilité).

Sous la dénomination alternative de la méthode à impédance distribuée, la méthode NRW est connue dans la caractérisation numérique et expérimentale des matériaux naturels ainsi que dans les matériaux composites (granulaires) avec un arrangement de grains très optiquement dense [171-172].

Cette méthode a été appliquée en premier dans le contexte des métamatériaux par Smith et al. [173]. La limite de cette méthode est résumée dans les conditions où il faut qu'un seul mode propagatif existe dans celui-ci à la fréquence considérée, l'extraction de paramètres effectifs, sera possible dans le cas où la longueur d'onde incidente est très supérieure aux tailles et aux distances entre les constituants élémentaires du milieu composite. La procédure d'extraction par la méthode NRW est décrite dans l'algorithme de la figure (IV.6) ci dessous :

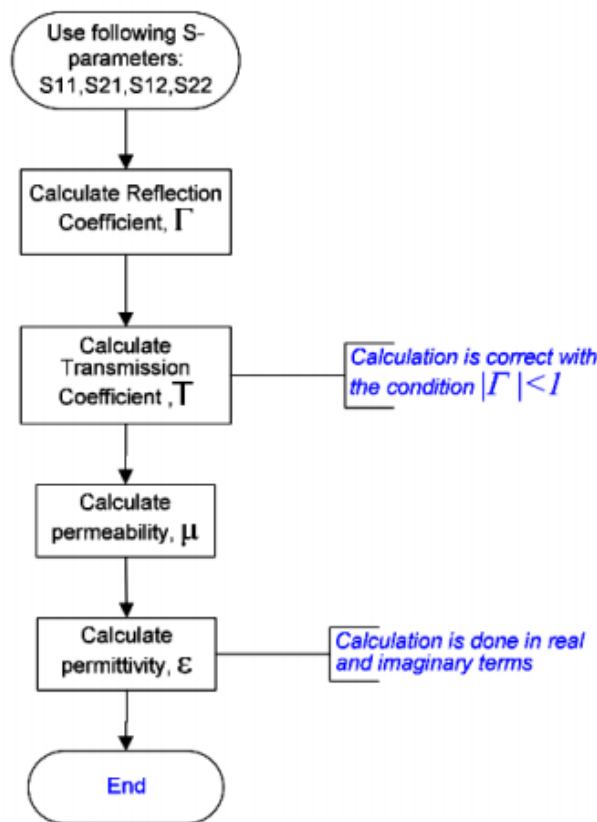


Figure IV.6 : Le processus de la méthode NRW.

La méthode NRW est simplement basée sur le calcul classique d'interférence donnant la transmission et la réflexion d'une couche de matériau en fonction de son indice (effectif), de son impédance (effective) et son épaisseur. Smith en [173] a démontré qu'on peut obtenir les valeurs de n_{eff} et Z_{eff} en fonction de l'épaisseur d de couche simulé à du coefficient de transmission $t' = S_{21}$ et de réflexion $r = S_{11}$ en inversant les formules de Fresnel :

$$Re(n_{eff}) = \pm Re \left(\frac{\arccos\left(\frac{1}{2t'}[1-(r^2-t'^2)]\right)}{kd} \right) + \frac{2\pi m}{kd} \quad (IV.1)$$

$$I_m(n_{eff}) = \pm I_m \left(\frac{\arccos\left(\frac{1}{2t'}[1-(r^2-t'^2)]\right)}{kd} \right) \quad (IV.2)$$

$$Z_{eff} = \pm \sqrt{\frac{(1+r)^2-t'^2}{(1-r)^2-t'^2}} \quad (IV.3)$$

La méthode d'extraction de NRW pose des problèmes de choix de branche complexe quand l'épaisseur selon la direction de propagation est supérieure à plusieurs longueurs d'ondes. Afin d'éviter les erreurs du à la discontinuité de la fonction arccos lorsque l'on utilise les équations (IV.1) et (IV.2) (indétermination de signe et de m), nous avons basé sur une procédure décrite en [174] permettant de choisir correctement la branche et le signe.

Dans la figure (IV.7) nous avons montré comment il est possible de déclarer les expressions de NRW pour extraire le signe de l'indice de réfraction du filtre sous le simulateur HFSS, avec les paramètres "epsi", "mu" et "n" qui sont la partie réelle de la permittivité ϵ , la perméabilité μ et l'indice de réfraction effectif n respectivement. V1 et V2 sont la somme et la soustraction des coefficients de transmission et de réflexion.

À partir de l'indice et de l'impédance effective, on peut également obtenir les paramètres effectifs :

$$\epsilon_{eff} = \frac{n_{eff}}{z_{eff}} \quad (IV.4)$$

$$\mu_{eff} = n_{eff} z_{eff} \quad (IV.5)$$

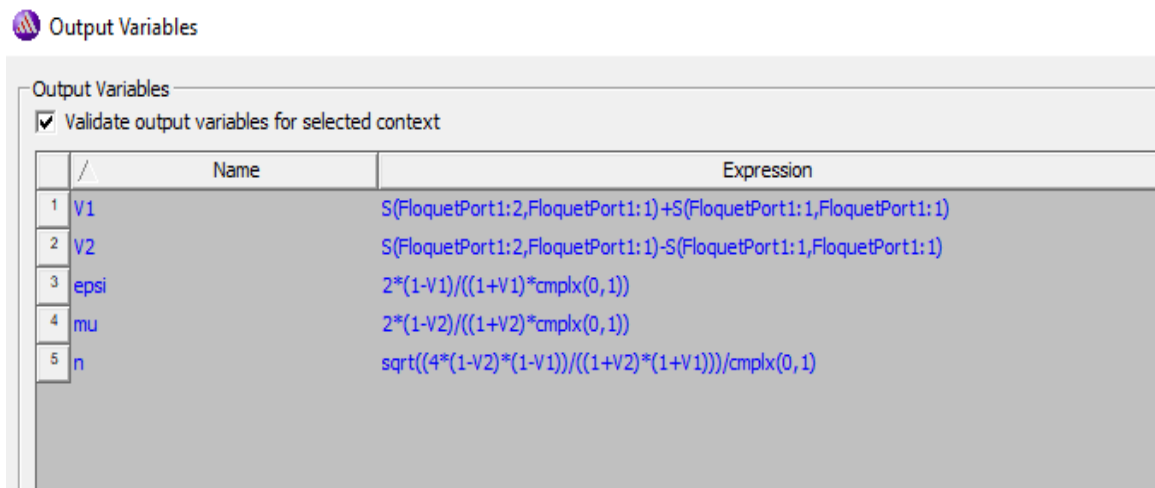


Figure IV.7 : Introduction des expressions de "NRW" dans HFSS.

Il est bien connu que l'efficacité d'un absorbant est directement liée à la fois à l'adaptation de l'impédance des surfaces à la fréquence de résonance pour assurer une pénétration exacte de l'onde incidente et au plan de masse métallique arrière pour retenir l'onde dans le MA.

Les deux conditions doivent être satisfaites à la fréquence de résonance. Afin de montrer les paramètres effectifs du matériau epsilon, mu et l'indice de réfraction, le graphique suivant est tracé entre 6 GHz et 8 GHz. Comme le montre la figure (IV.8.a), des valeurs négatives de l'indice de réfraction sont visibles aux points de résonance. Le modèle de circuit équivalent de la structure de capteur proposée est présenté à la figure (IV.8.b). Les résistances R1 et R2 indiquent la perte de puissance totale dans les parties résonateurs de la structure proposée [175]. L'inductance effective globale L1 et L2 est constituée d'un résonateur à cellule unitaire avec une inductance mutuelle. Cs1 et Cs2 proviennent de la capacité mutuelle entre les cellules unitaires voisines [176]. Cg1 et Cg2 sont les effets de l'espace capacitif placé dans le résonateur interne et externe de la structure, respectivement, et ils fournissent l'accumulation de charge par le champ externe.

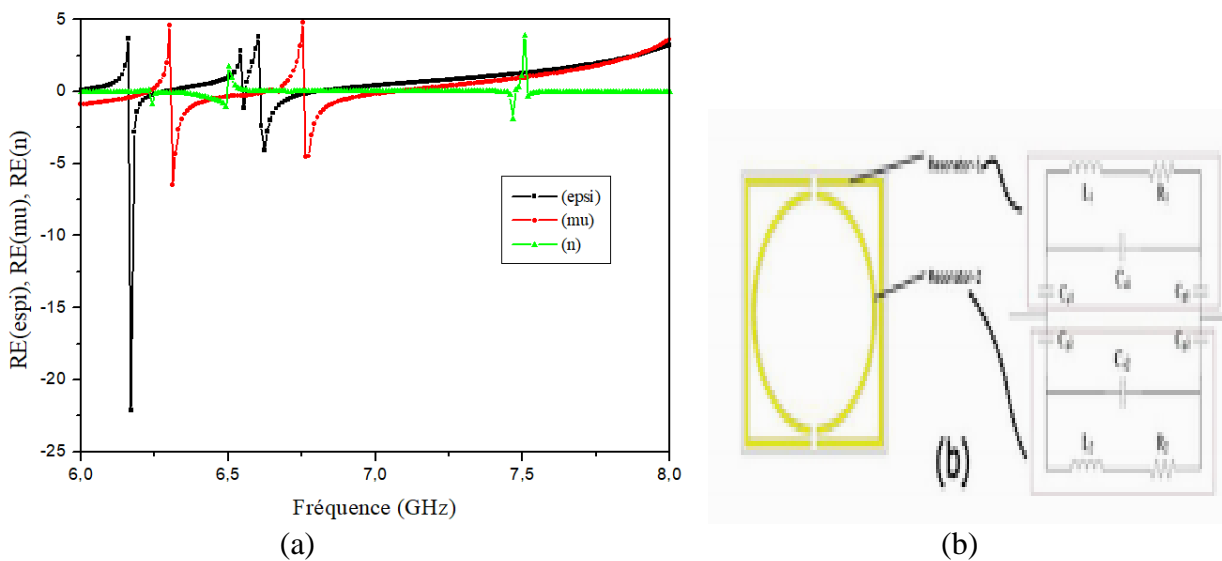


Figure IV.8 : (a) Paramètres effectifs de matériau, (b) Modèle de circuit équivalent de la structure proposée.

IV.6 ABSORBANT ET CAPTEUR A METAMATERIAU

Étant donné que les applications proposées pour les capteurs MTM sont basées sur le mécanisme de l'absorbant. Cette étude a pour but de réaliser des applications de capteurs très efficaces en utilisant un absorbant à métamatériau (MA).

IV.6.1 Application de l'absorbant métamatériaux

Pour les applications d'absorbant, une plaque de cuivre est placée au dessous du diélectrique des résonateurs, il est connu que l'exigence essentielle d'un absorbant est de capter l'énergie pénétrée dans la structure. Les ondes réfléchies et transmises doivent être minimisées $R(\omega) \& T(\omega) \rightarrow 0$ de sorte que ces ondes doivent être aussi petites que possible afin de réaliser une absorption parfaite.

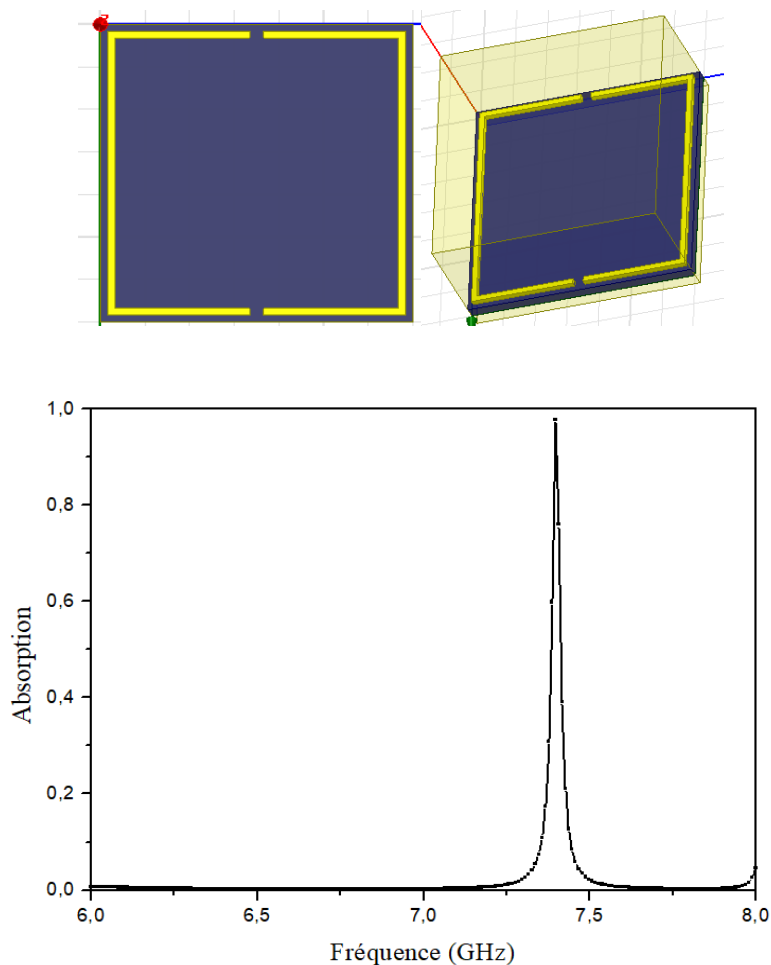
L'utilisation de deux résonateurs devant la structure MA proposée permet d'obtenir plus de valeurs d'absorption, ce qui augmente la sensibilité. L'autre raison de l'utilisation d'un second résonateur sur la face avant de la structure est l'accord.

Afin de vérifier numériquement l'application de l'absorbant, nous allons faire la démonstration à l'aide de HFSS

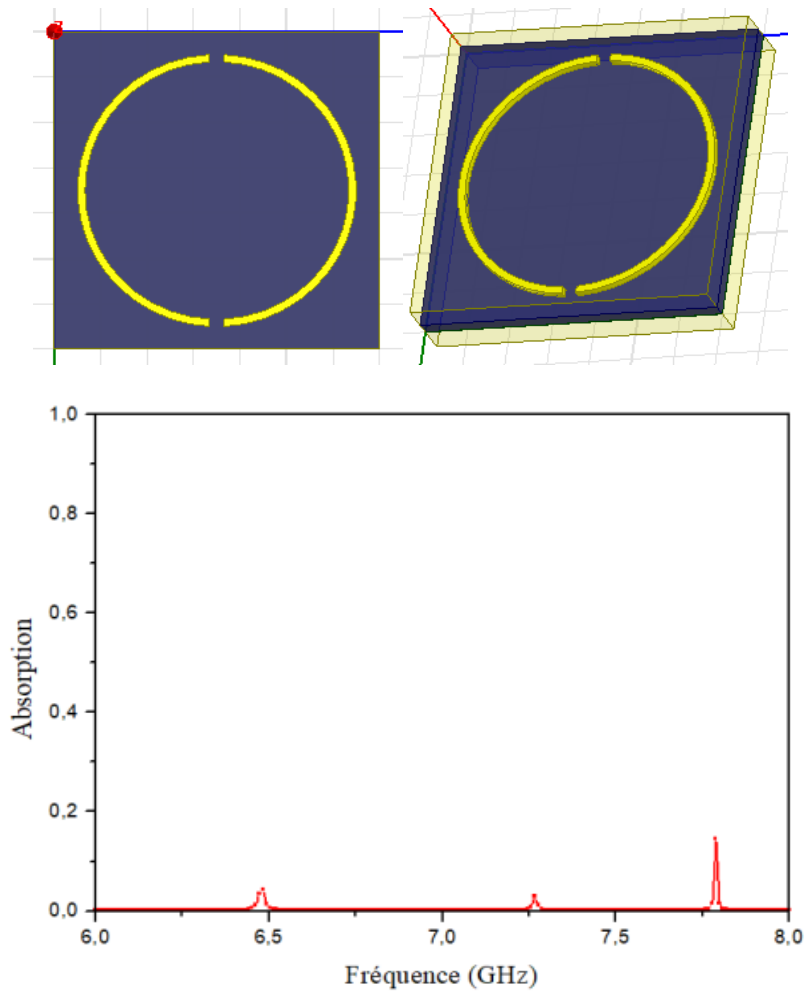
IV.6.1.1 Conception 1 « Etude de l'influence de l'épaisseur du substrat sur l'absorption »

- En premier partie Les résonateurs sont placés au dessus du substrat diélectrique, le substrat ayant une épaisseur de 1.6mm puis la plaque de cuivre est placée au dessous du substrat diélectrique pour réaliser une configuration d'absorbant sans couche de capteur. La structure est composée d'un résonateur en anneau carré, comme indiqué sur la figure (IV.9.a), nous ne voyons qu'une seule résonance autour de 7,39 GHz.

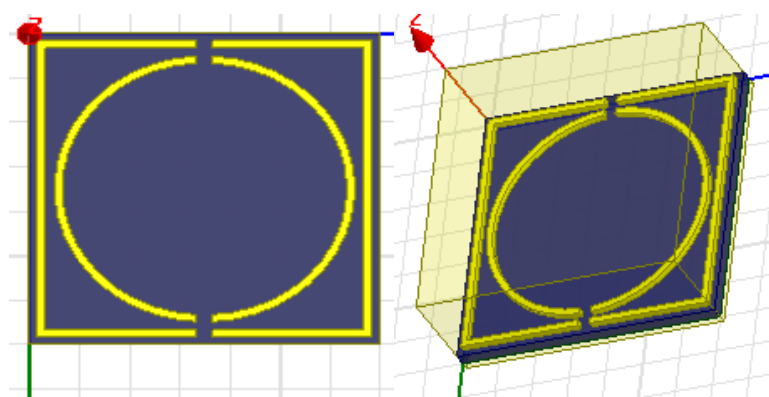
Par contre si un seul résonateur en anneau fendu avait été utilisé dans la structure proposée, comme le montre la figure (IV.9.b), nous n'aurions pas d'absorption significative. Cependant, si nous utilisons à la fois des résonateurs à anneau carré et à anneau fendu comme dans la structure proposée, nous avons deux points de résonance entre 6 GHz et 8 GHz, comme le montre la figure (IV9.c).

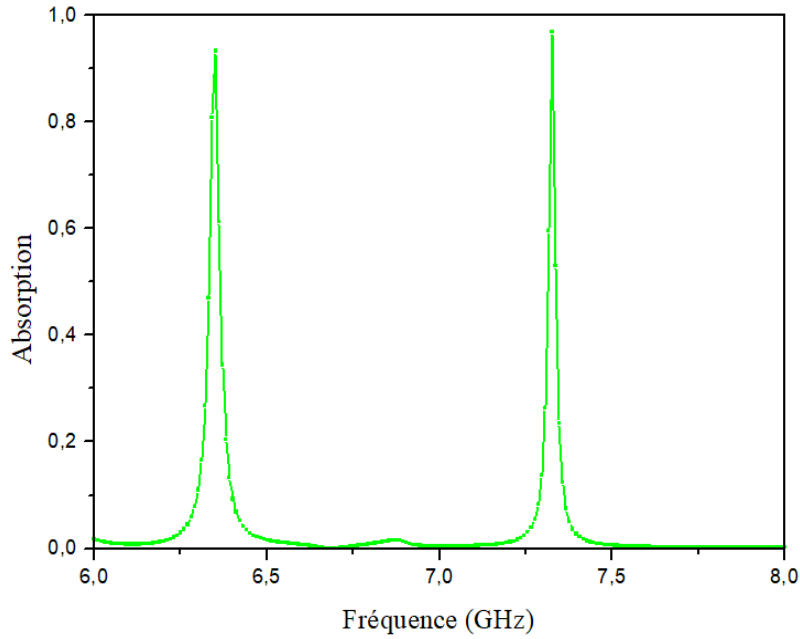


(a)



(b)



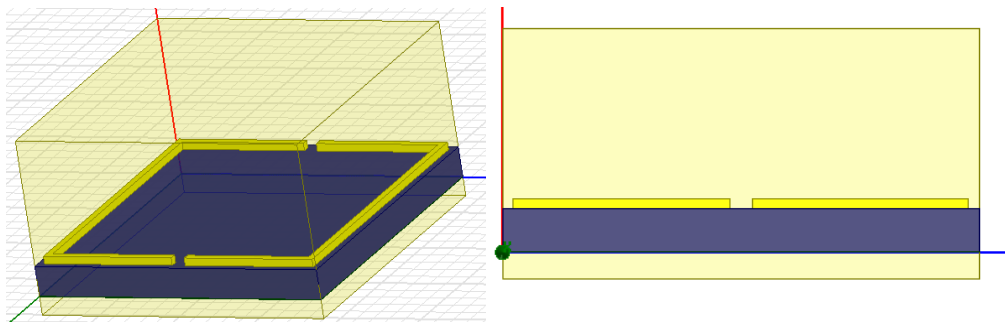


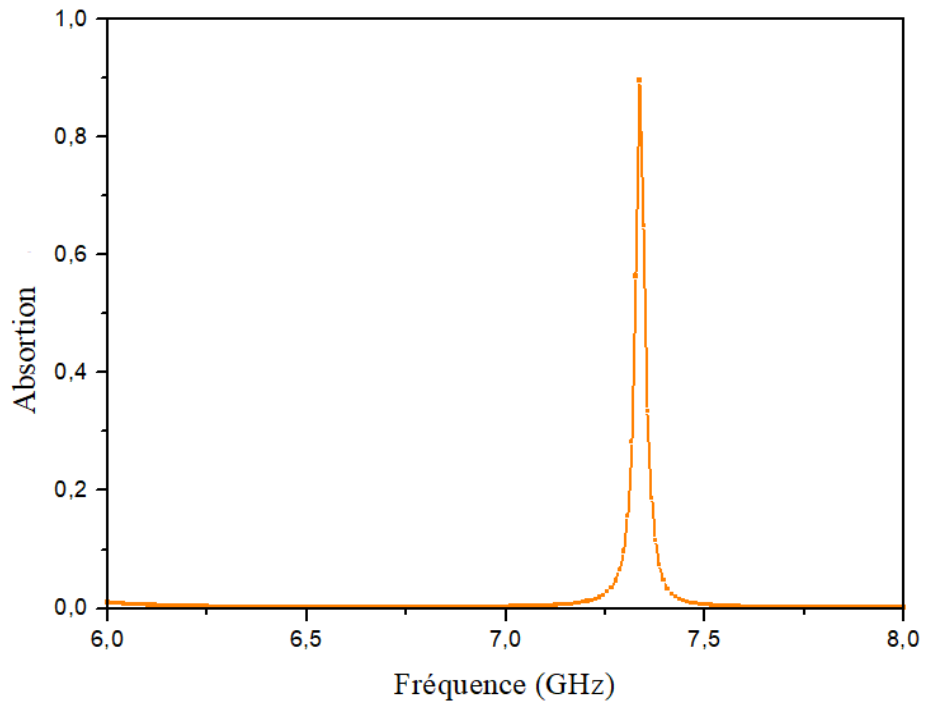
(c)

Figure IV.9 : (a) Structure comportant un résonateur carré, (b) Structure comportant un résonateur à anneau fendu, (c) Structure proposée qui a un anneau carré et un résonateur en anneau fendu.

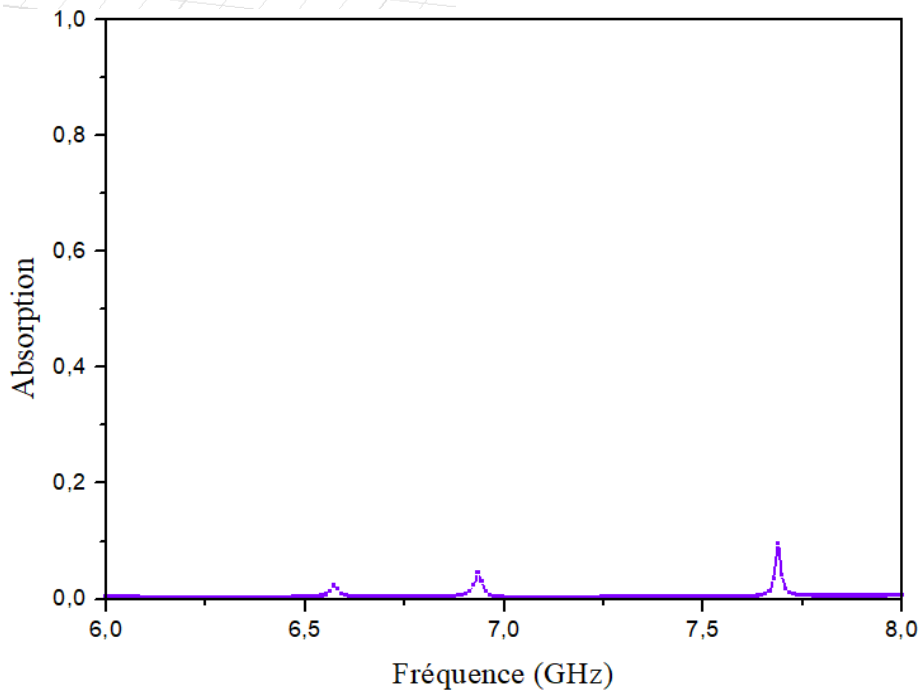
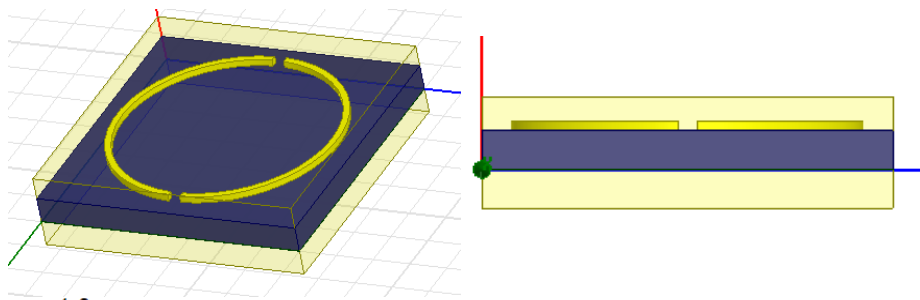
Comme le montre la figure (IV.9), le résonateur à anneau carré affecte directement les fréquences de résonance. Sans résonateur à anneau fendu, l'absorption se produit à environ 7.39 GHz. Ces effets sont causés par l'inductance mutuelle et l'auto-inductance avec les valeurs de capacité des résonateurs.

- Dans la 2^{ème} partie nous exécuterons la même procédure que la 1^{er} partie mais en prenant en compte avec une épaisseur du substrat de 3.2mm





(a)



(b)

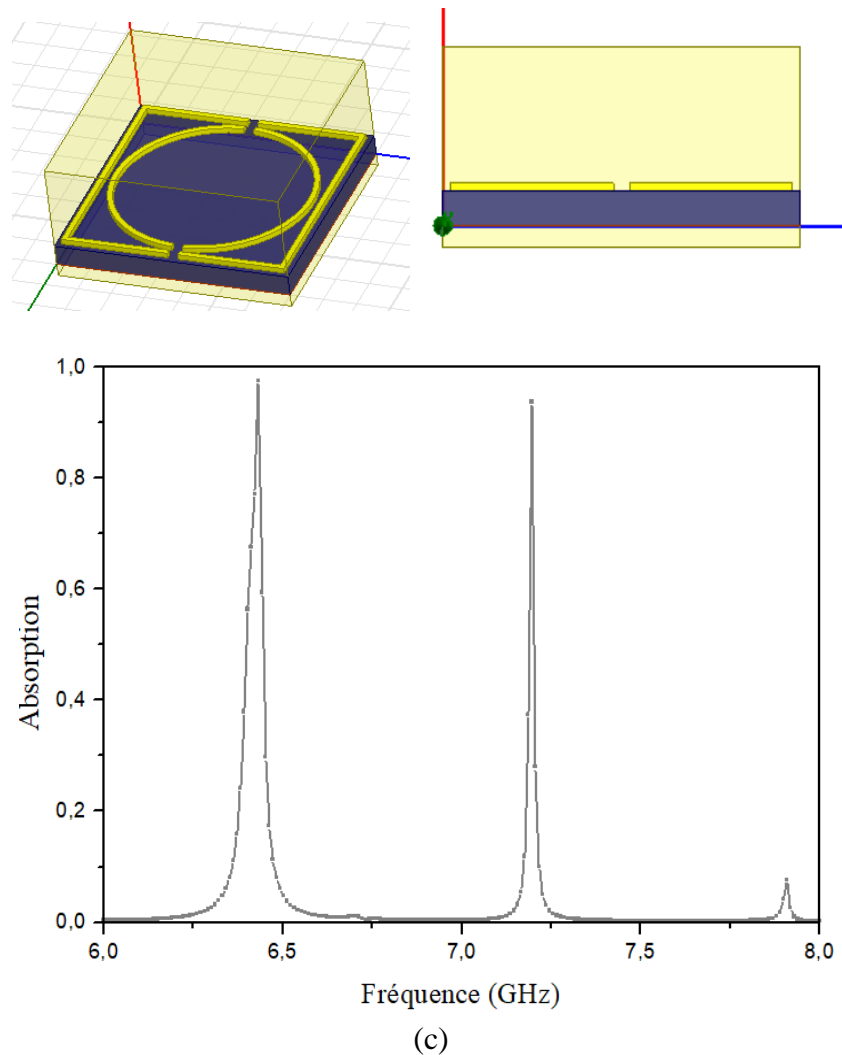


Figure IV.10 : (a) Structure comportant un résonateur carré, (b) Structure comportant un résonateur à anneau fendu, (c) Structure proposée qui a un anneau carré et un résonateur en anneau fendu avec épaisseur =3.2mm.

Comme le montre la figure (IV.10), le résonateur à anneau carré affecte directement les fréquences de résonance. Sans résonateur à anneau fendu, l'absorption se produit à environ 7.33 GHz.

Nous remarquerons entre le 1^{er} et la 2^{ème} partie que l'épaisseur n'exerce pas un effet sur le niveau d'absorption.

IV.6.2 Application du capteur de pression

La première application de la configuration de capteurs proposée est un capteur de pression. En modifiant l'épaisseur de la couche du capteur h vers le haut et vers le bas, ce qui correspond à une modification de la pression. Trois épaisseur d'air différents, de 1 mm, 1.5 mm et 2 mm, ont été pris comme échantillons pour montrer le coefficient de réflexion ainsi le spectre d'absorption, comme le montre la figure (IV.11).

Trois épaisseurs d'airs différents sont particulièrement choisies pour montrer la linéarité.

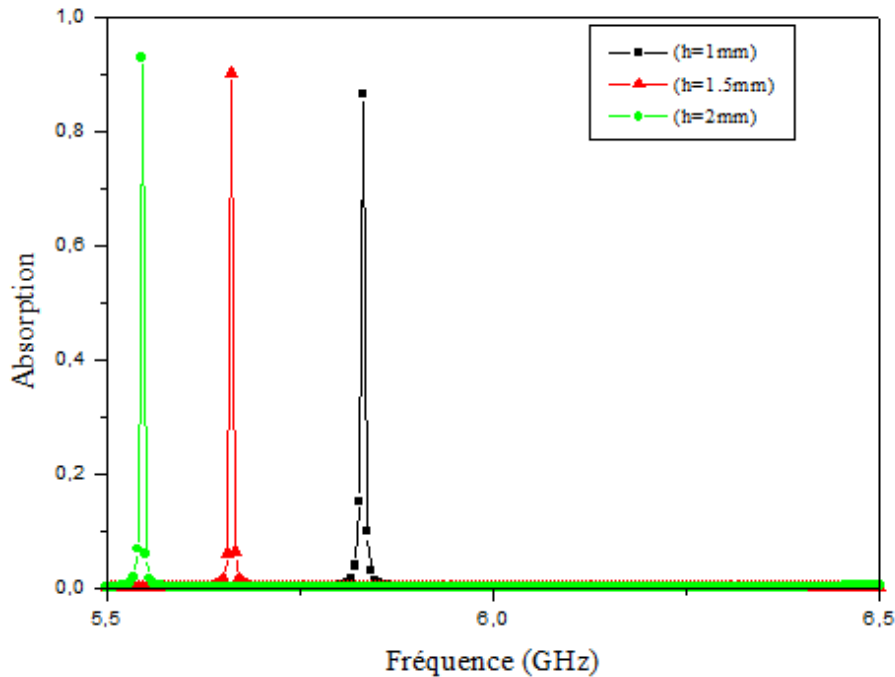


Figure IV.11 : Influence de changement d'épaisseur h sur l'absorption.

Le terme d'absorption A est le principal critère pour toutes les applications de capteurs dans cette étude, puisque l'air est un matériau isolant et que son épaisseur influe sur l'absorption. Les fréquences d'absorption pour la couche du capteur d'une épaisseur de 1 mm, 1.5 mm et 2 mm ont été définies comme étant respectivement de 5.83 GHz, 5.66 GHz et 5.54GHz, comme le montre la figure (IV.11). Les valeurs d'absorption correspondantes sont de 0.86, 0.90, 0.92 aux fréquences de résonance de 5.83, 5.66 et 5.54GHz, respectivement. Les meilleures valeurs d'absorption sont observées pour les épaisseurs de couche de 1.5 et 2 mm.

La figure (IV.11) montre également qu'une variation de l'épaisseur de la couche du capteur montre un décalage de la fréquence de résonance.

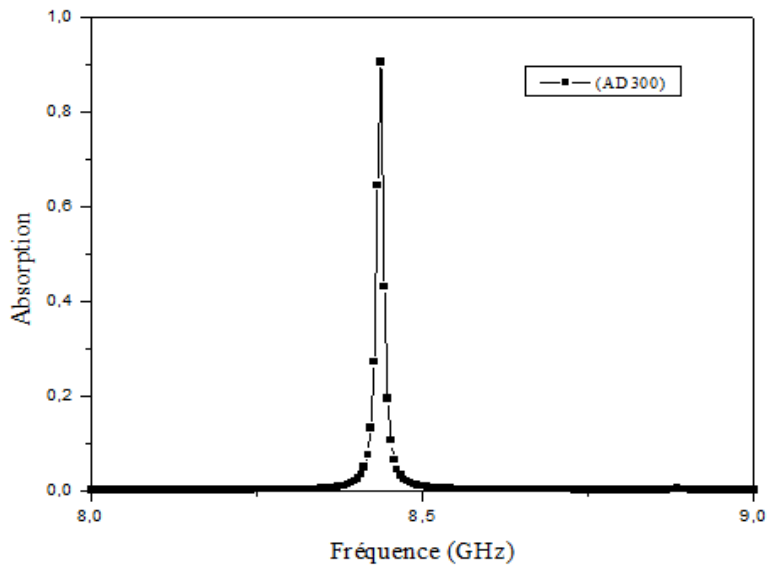
IV.6.3 Application du capteur de densité

La couche de détection peut être utilisée pour détecter la densité d'un matériau si elle est correctement configurée. Dans cette partie de l'étude, on suppose que la couche du capteur est remplie de ces matériaux qui ont des valeurs de densité différentes. L'épaisseur de la couche du capteur est de 1.6 mm. Pour commencer, trois matériaux à substrats différents connus sous le nom d'Arlon AD300, Arlon AD350 et Arlon AD 450 sont utilisés dans la couche du capteur.

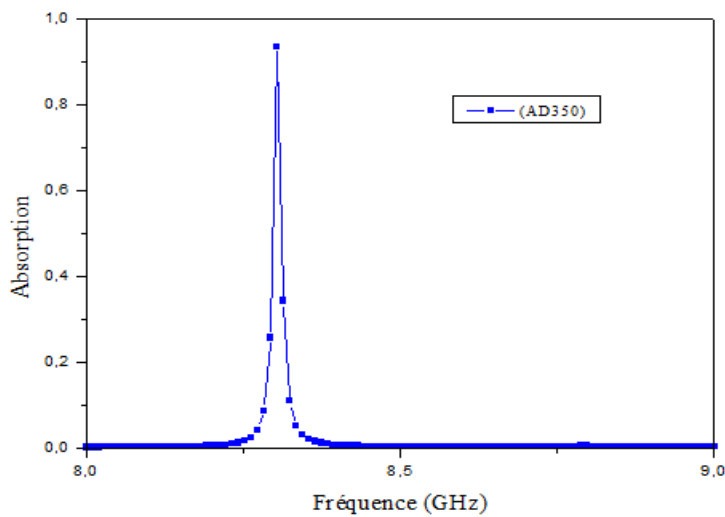
Les résultats sont présentés dans la figure (IV.9), Les fréquences de résonance sont de 8,43, 8,30, 8,15 GHz pour AD 300, AD350 et AD450, respectivement, ainsi le niveau d'absorption est à 90.4%, 93.5% et 98.02% respectivement.

CHAPITRE IV : ABSORBANT A METAMATERIAU MICRO-ONDE POUR LES APPLICATIONS DE DETECTION

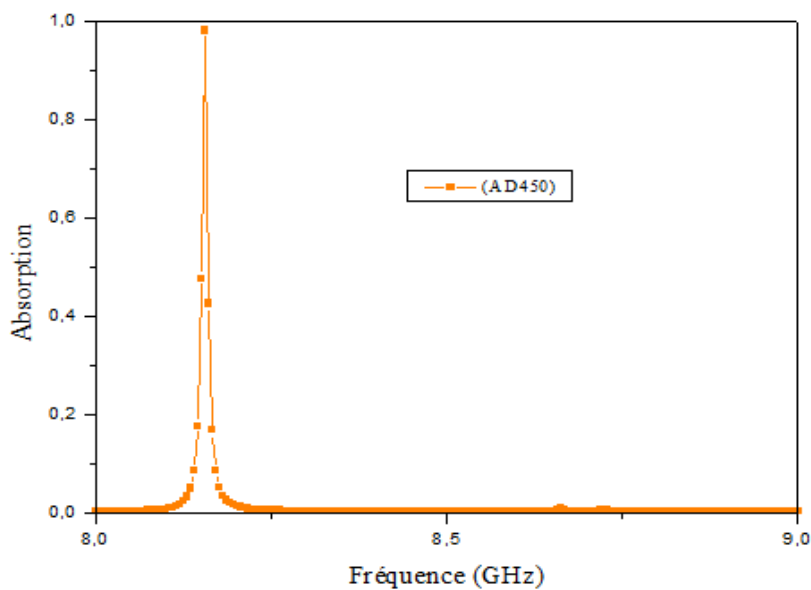
Lorsque le matériau de type AD450 est utilisé dans la couche du capteur, la valeur d'absorption est maximale. Les constantes diélectriques sont de 3, 3.5, 4.5 pour AD300, AD350 et AD450, respectivement. Comme le montre la figure (IV.12).



(a) AD300



(b) AD350



(c) AD450

Figure IV.12 : Comparaison des résultats de simulation pour les matériaux Arlon type (a)AD300, (b) AD 350 et(c) AD450.

CHAPITRE IV : ABSORBANT A METAMATERIAU MICRO-ONDE POUR LES APPLICATIONS DE DETECTION

Lorsque la constante diélectrique du matériau utilisé dans la couche du capteur augmente, la fréquence de résonance du capteur à base d'absorbant se déplace vers le bas.

Le décalage montre que le capteur à base d'absorbant est très sensible aux changements de la constante diélectrique de la couche du capteur. Cette relation est la base de toutes les applications de capteurs dans cette conception. . En raison des pertes des matériaux Arlon 350, Arlon 400 et Arlon 450 utilisés et d'autres erreurs de production, l'amplitude des signaux présente une différence de 5 % puisque $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$. Dans cette équation, les pertes affectent directement la permittivité diélectrique et indirectement le taux d'absorption. Les défis mondiaux liés à l'énergie, à la durabilité et aux incidences environnementales de la combustion des combustibles fossiles font qu'il est de plus en plus nécessaire de passer à l'utilisation de ressources propres [177].

Dans cette partie de la simulation, la couche du capteur est supposée être composée de ces matériaux sans changer ses dimensions et le taux d'absorption est simulé en fonction de ceux-ci comme montre la figure (IV.13).

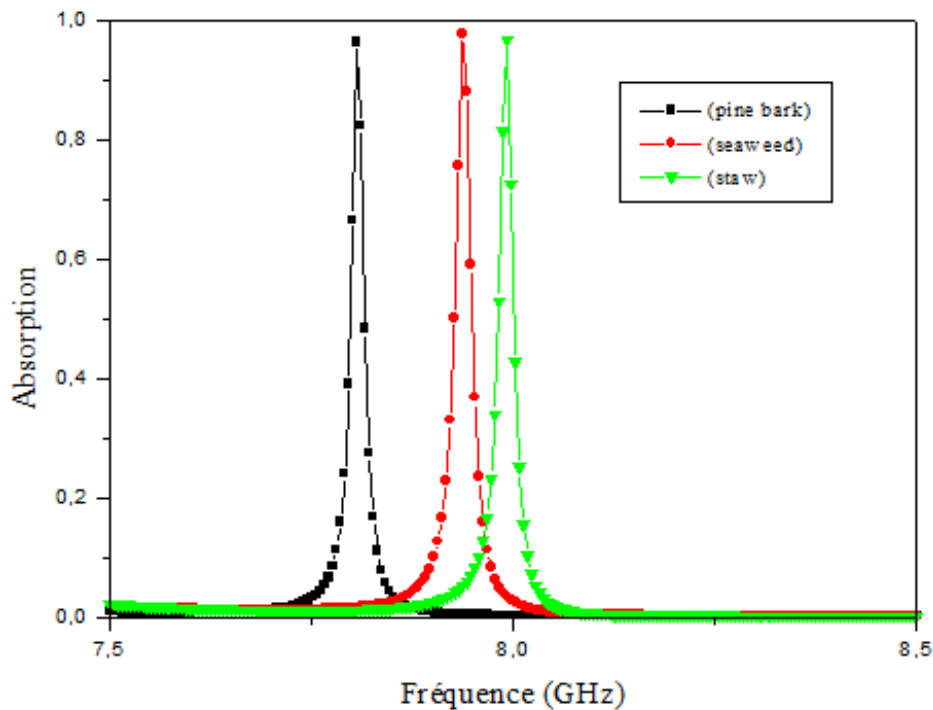


Figure IV.13 : Résultats de la simulation du capteur de densité basé sur le MA entre 7,5 et 8,5 GHz.

IV.7 CONCLUSION

Ce chapitre se concentre sur les applications de capteurs multifonctionnels basés sur le MA.

Les propriétés de détection de la conception de capteur suggérée sont présentées pour la pression et la densité.

Un ensemble de simulation est conçu pour illustrer le taux d'absorption en fonction de la fréquence. Le principe de fonctionnement de l'étude de l'application du capteur basée sur la MA proposée dépend de l'épaisseur de la couche du capteur ou de ses propriétés diélectrique.

Par conséquent, différentes applications de capteurs à usage industriel, scientifique et médical peuvent être développées si la valeur de la constante diélectrique change.

**CONCLUSION
GENERALE**

CONCLUSION GENERALE

Nous nous sommes intéressés aux absorbants à métamatériaux étant donné qu'ils sont une nouvelle piste pour la réalisation d'absorbants innovants de part leurs nombreux avantages tout au long de ce mémoire nous avons cherché à développer des absorbants simples à mettre en œuvre.

Pour cela nous avons utilisé des matériaux simples et avons défini des méthodes pour les optimiser.

Le premier chapitre présente le contexte général de ce mémoire en commençant par définir le concept des métamatériaux puis en développant au travers de l'histoire de cette science nouvelle, les principes fondamentaux.

Nous avons présenté théoriquement la propagation électromagnétique dans un milieu négatif, et ainsi que deux approches basées sur les réseaux de fils, les résonateurs magnétiques et la théorie des lignes de transmission enfin des exemples applications des métamatériaux ont été exposées.

Le deuxième chapitre permet de comprendre le premier terme du thème de ce manuscrit. On voit ce que sont les absorbants et ses principes d'absorption électromagnétique. Nous avons également vu les théories afin d'accéder à une absorption parfaite.

Le troisième chapitre est dédié aux simulations que nous avons effectuées sous logiciel HFSS. Nous avons analysé les taux d'absorbances en hyperfréquences.

Enfin le dernier chapitre est consacré également à des conceptions où nous avons exposé les résultats et les proportions d'absorption de chaque structure afin de démontrer ses performances.

Le but de ce mémoire a été de mettre en évidence le taux d'absorption presque totale des absorbants à métamatériaux dans plusieurs bandes hyperfréquences pour des applications de détection potentielles.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] V. G. Veselago, "The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of Epsilon and Mu," *Soviet Physics Uspekhi*, vol. 10, no. 4, pp. 509–514, 1968.
- [2] D. Smith, W. Padilla, D. Vier, S. Nemat-Nasser, and S. Schultz, "Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity," *Physical review letters*, vol. 84, no. 18, pp. 4184–4187, May 2000.
- [3] M. a Ordal, R. J. Bell, R. W. Alexander, L. L. Long, and M. R. Querry, "Optical properties of fourteen metals in the infrared and far infrared: Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Mo, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, V, and W.," *Applied optics*, vol. 24, no. 24, p. 4493, Dec. 1985.
- [4] J. Pendry, A. Holden, W. Stewart, and I. Youngs, "Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures," *Physical Review Letters*, vol. 76, no. 25, pp. 4773–4776, 1996.
- [5] J. Pendry, A. Holden, D. Robbins, and W. Stewart, "Low frequency plasmons in thinwire structures," *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 10, pp. 4785–4809, 1998.
- [6] D. R. Smith and S. Schultz, "Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients," *Physical Review B*, vol. 65, no. 19, pp. 1–5, Apr. 2002.
- [7] J. Pendry, A. Holden, D. Robbins, and W. Stewart, "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, vol. 47, no. 11, pp. 2075–2084, 1999.
- [8] D. Smith, D. Vier, N. Kroll, and S. Schultz, "Direct calculation of permeability and permittivity for a left-handed metamaterial," *Applied Physics Letters*, vol. 77, p. 2246, 2000.
- [9] D. R. Smith and N. Kroll, "Negative refractive index in left-handed materials," *Physical Review Letters*, vol. 85, no. 14, pp. 2933–2936, 2000.
- [10] 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, 2002. IEEE, 2002*, vol. 2, pp. 412–415.
- [11] C. Caloz and T. Itoh, "Left-Handed Transmission Lines and Equivalent Metamaterials for Microwave and Millimeter-Wave Applications," in *32nd European Microwave Conference, 2002, 2002*, pp. 1–4.
- [12] G. V. Eleftheriades, a. K. Iyer, and P. C. Kremer, "Planar negative refractive index media using periodically L-C loaded transmission lines," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 50, no. 12, pp. 2702–2712, Dec. 2002.
- [13] A. Grbic and G. V. Eleftheriades, "Experimental verification of backward-wave radiation from a negative refractive index metamaterial," *Journal of Applied Physics*, vol. 92, no. 10, pp. 5930–5935, 2002

- [14] A. Grbic and G. V. Eleftheriades, "A backward-wave antenna based on negative refractive index LC networks," in *Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2002. IEEE, 2002, vol. 4, pp. 340–343.
- [15] R. Shelby, D. Smith, and S. Schultz, "Experimental verification of a negative index of refraction," *Science*, vol. 292, no. 5514, p. 77, 2001.
- [16] C. Parazzoli, R. Gregor, K. Li, B. Koltjenbah, and M. Tanielian, "Experimental verification and simulation of negative index of refraction using Snell's law," *Physical Review Letters*, vol. 90, no. 10, p. 107401, 2003.
- [17] F. Zhang, S. Potet, J. Carbonell, E. Lheurette, O. Vanbésien, X. Zhao, and D. Lippens, "Negative-zero-positive refractive index in a prism-like omega-type metamaterial," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, vol. 56, no. 11, pp. 2566–2573, 2008.
- [18] J. Pendry, "Negative refraction makes a perfect lens," *Physical review letters*, vol. 85, no. 18, pp. 3966–9, Oct. 2000.
- [19] J. Pendry, D. Schurig, and D. Smith, "Controlling electromagnetic fields," *Science*, vol. 312, no. 5781, p. 1780, 2006.
- [20] A. Ourir, S. Burokur, and A. Lustrac, "Phase-varying metamaterial for compact steerable directive antenna," *Electronics Letters*, vol. 43, no. 9, pp. 493–494, 2007.
- [21] M. a. Antoniades and G. V. Eleftheriades, "Compact linear lead/lag metamaterial phase shifters for broadband applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 2, no. 1, pp. 103–106, 2003.
- [22] C. Caloz, A. Sanada, and T. Itoh, "A novel composite right-/left-handed coupled-line directional coupler with arbitrary coupling level and broad bandwidth," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, vol. 52, no. 3, pp. 980–992, 2004.
- [23] F. Mart n, J. Bonache, F. Falcone, M. Sorolla, and R. Marqués, "Split ring resonatorbased left-handed coplanar waveguide," *Applied Physics Letters*, vol. 83, no. 22, p. 4652, 2003.
- [24] F. Martin, F. Falcone, J. Bonache, R. Marques, and M. Sorolla, "Miniaturized coplanar waveguide stop band filters based on multiple tuned split ring resonators," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 13, no. 12, pp. 511–513, Dec. 2003.
- [25] J. Bonache, F. Martin, F. Falcone, J. Garcia, I. Gil, T. Lopetegi, M. a. G. Laso, R. Marques, F. Medina, and M. Sorolla, "Super compact split ring resonators CPW band pass filters," in *2004 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (IEEE Cat. No.04CH37535)*, 2004, pp. 1483–1486.
- [26] I. Gil, J. Garc a-Garc a, J. Bonache, F. Mart n, M. Sorolla, and R. Marqués, "Varactorloaded split ring resonators for tunable notch filters at microwave frequencies," *Electronics Letters*, vol. 40, no. 21, p. 1347, 2004.

- [27] H. Kim, A. B. Kozyrev, A. Karbassi, and D. van der Weide, "Linear tunable phase shifter using a left-handed transmission line," *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE*, vol. 15, no. 5, pp. 366–368, 2005.
- [28] J. Perruisseau-carrier, T. Lisec, and A. K. Skrivervik, "Circuit Model and Design of Analogically Controlled by MEMS," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 44, no. 12, pp. 2496–99, 2006.
- [29] J. Perruisseau-Carrier, K. Topalli, and T. Akin, "Low-loss Ku-band artificial transmission line with MEMS tuning capability," *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE*, vol. 19, no. 6, pp. 377–379, 2009.
- [30] G. Monti, R. De Paolis, and L. Tarricone, "Design of a 3-state reconfigurable CRLH transmission line based on MEMS switches," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 95, pp. 283–297, 2009.
- [31] O. Vendik, L. Vendik, D. Kholodnyak, S. Zubko, and E. Serebryakova, "Electronically controlled phase shifters based on right/left-handed transmission lines," in *Microwave Conference, 2005 European*, 2005, vol. 2, p. 4–pp.
- [32] D. Kuylenstierna, a. Vorobiev, P. Linner, and S. Gevorgian, "Composite right/left handed transmission line phase shifter using ferroelectric varactors," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 16, no. 4, pp. 167–169, Apr. 2006.
- [33] Y. Wang, M. J. Lancaster, F. Huang, P. M. Suherman, D. M. Holdom, and T. J. Jackson, "Superconducting Tunable Composite Right/Left-Handed Transmission Lines Using Ferroelectric Thin Films with a Resistive Bias Network," *2007 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium*, no. Mli, pp. 1415–1418, Jun. 2007.
- [34] A. Marteau, G. Velu, G. Houzet, L. Burgnies, E. Lheurette, J. C. Carru, and D. Lippens, "Ferroelectric tunable balanced right- and left-handed transmission lines," *Applied Physics Letters*, vol. 94, no. 2, p. 023507, 2009.
- [35] G. Houzet, K. Blary, S. Lepilliet, D. Lippens, L. Burgnies, G. Vélú, J.-C. Carru, E. Nguéma, and P. Mounaix, "Dielectric dispersion of BaSrTiO₃ thin film from centimeter to submillimeter wavelengths," *Journal of Applied Physics*, vol. 109, no. 1, p. 014116, 2011.
- [36] Mun (BA) "Frequency selective surfaces –Theory and design".
- [37] Yagi (H) "Beam transmission of ultra-short waves".
- [38] "André de Lustrac: Les superlentilles permettront d'accéder à une nouvelle optique" la recherche n°388, juillet 2005, p24.
- [39] Thierry lucas, la « superlentille » s'affranchir de la limite de la diffraction. L'usine nouvelle n°2964, 19 mai 2005.
- [40] Ricardo Marqués, Ferran Martín et Mario Sorolla, *Metamaterials with Negative Parameters* (2008).

- [41] University of Berkeley, http://www.eurekalert.org/pub_releases/2005-04/uoc--nso041805.php
- [42] J.B. Pendry, "Negative Refraction Makes a Perfect Lens", Physical Review Letters (2000).
- [43] J-B-Pedry, D.shurig, and D.R.smith "controlling electromagnetic fields". Science , pp. 112597, 2006.
- [44] D.schrig, J.J.Mock, B.J.J.Justice, S.A.eummer, J.B Pendry, A.F.starr, and D.R.smith,"Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies" science, vol.314, pp. 977-980, 2006.
- [45] Ghasemi, R.(2012). Métamatériaux pour l'infrarouge et applications (doctoral dissertation).
- [46] Fan, Y. (2017). Application des métamatériaux en optique guidée (doctoral dissertation).
- [47] Engheta, N., "Thin absorbing screens using metamaterial surfaces", Antennas and Propagation Society International Symposium, 2002, IEEE, vol.2, no., pp. 392- 395 vol.2, 2002.
- [48] Teperik, T. V.; García de Abajo, F. J.; Popov, V. V. & Shur, M. S., "Strong terahertz absorption bands in a scaled plasmonic crystal", Applied Physics Letters, 2007, 90, -.
- [49] Tao, H.; Landy, N. I.; Bingham, C. M.; Zhang, X.; Averitt, R. D. & Padilla, W. J., "A metamaterial absorber for the terahertz regime: design, fabrication and characterization", Opt. Express, OSA, 2008, 16, 7181-7188.
- [50] Shchegolkov, D. Y.; Azad, A. K.; O'Hara, J. F. & Simakov, E. I., "Perfect subwavelength fishnetlike metamaterial-based film terahertz absorbers", Phys. Rev. B, American Physical Society, 2010, 82, 205117.
- [51] Huang, L.; Chowdhury, D. R.; Ramani, S.; Reiten, M. T.; Luo, S.-N.; Taylor, A. J. & Chen, H.-T., "Experimental demonstration of terahertz metamaterial absorbers with a broad and flat high absorption band", Opt. Lett., OSA, 2012, 37, 154-156 .
- [52] Collin, S.; Pardo, F.; Teissier, R. & Pelouard, J.-L., "Efficient light absorption in metal semiconductor metal nanostructures", Applied Physics Letters, 2004, 85, 194-196 .
- [53] Hao, J.; Wang, J.; Liu, X.; Padilla, W. J.; Zhou, L. & Qiu, M., "High performance optical absorber based on a plasmonic metamaterial", Applied Physics Letters, 2010, 96, 251104 .
- [54] Liu, N.; Mesch, M.; Weiss, T.; Hentschel, M. & Giessen, H., "Infrared Perfect Absorber and Its Application As Plasmonic Sensor", Nano Letters, 2010, 10, 2342-2348.
- [55] Alici, K. B.; Turhan, A. B.; Soukoulis, C. M. & Ozbay, E., "Optically thin composite resonant absorber at the near-infrared band: a polarization independent and spectrally broadband configuration", Opt. Express, OSA, 2011, 19, 14260-14267.
- [56] Diem, M.; Koschny, T. & Soukoulis, C. M., "Wide-angle perfect absorber/thermal emitter in the terahertz regime", Phys. Rev. B, American Physical Society, 2009, 79, 033101.

- [57] Liu, X.; Starr, T.; Starr, A. F. & Padilla, W. J., "Infrared Spatial and Frequency Selective Metamaterial with Near-Unity Absorbance", *Phys. Rev. Lett.*, American Physical Society, 2010, 104, 207403.
- [58] Maier, T. & Brueckl, H., "Multispectral microbolometers for the midinfrared", *Opt. Lett.*, OSA, 2010, 35, 3766-3768.
- [59] Dayal, G. & Ramakrishna, S. A., "Metamaterial saturable absorber mirror", *Opt. Lett.*, OSA, 2013, 38, 272-274.
- [62] Teperik, T. V.; García De Abajo, F. J.; Borisov, A. G.; Abdelsalam, M.; Bartlett, P. N.; Sugawara, Y. & Baumberg, J. J., "Omnidirectional absorption in nanostructured metal surfaces", *Nature Photonics*, Nature Publishing Group, 2008, 2, 299-301.
- [61] Hibbins, A. P.; Murray, W. A.; Tyler, J.; Wedge, S.; Barnes, W. L. & Sambles, J. R., "Resonant absorption of electromagnetic fields by surface plasmons buried in a multilayered plasmonic nanostructure", *Physical Review B*, American Physical Society, 2008, 74, 1-4.
- [62] Ding, P.; Liang, E.; Cai, G.; Hu, W.; Fan, C. & Xue, Q., "Dual-band perfect absorption and field enhancement by interaction between localized and propagating surface plasmons in optical metamaterials", *Journal of Optics*, 2011, 13, 075005.
- [63] Aydin, K.; Ferry, V. E.; Briggs, R. M. & Atwater, H. A., "Broadband polarization-independent resonant light absorption using ultrathin plasmonic super absorbers", *Nature communications*, Nature Publishing Group, 2011, 2, 517 .
- [64] Landy, N. I.; Sajuyigbe, S.; Mock, J. J.; Smith, D. R. & Padilla, W. J., "Perfect metamaterial absorber", *Physical Review Letters*, APS, 2008, 100, 207402.
- [65] Tao H, Landy NI, Bingham CM, Zhang X, Averitt RD, Padilla WJ. A metamaterial absorber for the terahertz regime: Design, fabrication and characterization. *Optics Express*. 2008;(10):7181-7188 .
- [66] Li J, Wang F, Wen G, Huang Y, Zhu W. Planar metamaterial for matched waveguide termination. *ACES Journal*. 2013;28:1236-1243.
- [67] Landy NI, Sajuyigbe S, Mock JJ, Smith DR, Padilla WJ. Perfect metamaterial absorber. *Physical Review Letters*. 2008;100:207402.
- [68] Chen H-T. Interference theory of metamaterial perfect absorbers. *Optics Express*. 2012;20:7165-7172 .
- [69] Wanghuang T, Chen W, Huang Y, Wen G. Analysis of metamaterial absorber in normal and oblique incidence by using interference theory. *AIP Advances*. 2013;3:102118.
- [70] Bilotti F, Nucci L, Vegni L. An SRR based microwave absorber. *Microwave and Optical Technology Letters*. 2006;48:2171-2175.
- [71] 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.

- [72] Watts CM, Liu X, Padilla WJ. Metamaterial electromagnetic wave absorbers. *Advanced Materials*. 2012;24:OP98-OP120 .
- [73] 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 .
- [74] 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.
- [75] Zhu W, Rukhlenko ID, Premaratne M. Graphene metamaterial for optical reflection modulation. *Applied Physics Letters*. 2013;102:241914.
- [76] Ra'di Y, Simovski CR, Tretyakov SA. Thin perfect absorbers for electromagnetic waves: Theory, design, and realizations. *Physical Review Applied*. 2015;3:037001.
- [77] Liu X, Starr T, Starr AF, Padilla WJ. Infrared spatial and frequency selective metamaterial with near-unity absorbance. *Physical Review Letters*. 2014;104:207403.
- [78] 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.
- [79] 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.
- [80] Gu S, Su B, Zhao X. Planar isotropic broadband metamaterial absorber. *Journal of Applied Physics*. 2013;104:163702.
- [81] 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 .
- [82] Kim YJ, Yoo YJ, Kim KW, Rhee JY, Kim YH, Lee YP. Dual broadband metamaterial absorber. *Optics Express*. 2015;23:3861-3868
- [83] Diem M, Koschny T, Soukoulis CM. Wide-angle perfect absorber/thermal emitter in the terahertz regime. *Physical Review B*. 2009;79:033101.
- [84] 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.
- [85] Zhu W, Zhao X. Metamaterial absorber with random dendritic cells. *European Physical Journal Applied Physics*. 2010;50:21101.
- [86] 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 .
- [87] Liu Y, Gu S, Luo C, Zhao X. Ultra-thin broadband metamaterial absorber. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*. 2012;108:19-24.

- [88] 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.
- [89] 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
- [90] 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.
- [91] 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.
- [92] 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
- [93] 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.
- [94] 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
- [95] 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 .
- [96] Plum E, Fedotov VA, Zheludev NI. Optical activity in extrinsically chiral metamaterial. *Applied Physics Letters*. 2008;93:191911.
- [97] 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 .
- [98] Fan J, Sun G, Zhu W. Electric and magnetic dipole couplings in split ring resonator metamaterials. *Chinese Physics B*. 2011;20:114101.
- [99] 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.
- [100] Hand TH, Cummer SA. Frequency tunable electromagnetic metamaterial using ferroelectric loaded split rings. *Journal of Applied Physics*. 2008;103:066105.
- [101] 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 .
- [102] Linder J, Halterman K. Graphene-based extremely wide-angle tunable metamaterial absorber. *Scientific Reports*. 2016;6:31225.

- [103] 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 .
- [104] Shrekenhamer D, Chen W-C, Padilla WJ. Liquid crystal tunable metamaterial absorber. *Physical Review Letters*. 2013;110:177403.
- [105] 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*.
- [106] 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.
- [107] 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.
- [108] Zhu W, Huang Y, Rukhlenko ID, Wen G, Premaratne M. Configurable metamaterial absorber with pseudo wideband spectrum. *Optics Express*. 2012;20:6616-6621.
- [109] 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.
- [110] 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.
- [111] Zhu W, Rukhlenko ID, Si L, Premaratne M. Graphene-enabled tunability of optical fishnet metamaterial. *Applied Physics Letters*. 2013;102:121911.
- [112] Chong YD, Ge L, Cao H, Stone AD. Coherent perfect absorbers: Time-reversed lasers. *Physical Review Letters*. 2010;105:053901.
- [113] 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.
- [114] 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.
- [115] 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.
- [116] Feng S, Halterman K. Coherent perfect absorption in epsilon-near-zero metamaterials. *Physical Review B*. 2012;86:165103.
- [117] Gutman N, Sukhorukov AA, Chong YD, de Sterke CM. Coherent perfect absorption and reflection in slow-light waveguides. *Optics Letters*. 2013;38:4970-4973 .
- [118] 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 .
- [119] Zhu W, Xiao F, Kang M, Premaratne M. Coherent perfect absorption in an all-dielectric metasurface. *Applied Physics Letters*. 2016;108:121901.

- [120] Zhu W, Rukhenko 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.
- [121] 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.
- [122] Capaccioli, S., Lucchesi, M., Rolla, P. A., et al., "Dielectric response analysis of a conducting polymer dominated by the hopping charge transport", *Journal of Physics: Condensed Matter*, 1998, vol. 10, no 25, p. 5595.
- [123] Tanner, H. A., US Patent 2977591. 1961.
- [124] Wright, P. V., Wong, T.C.P., Chambers, B., Anderson, A.P., *Advanced Materials for Optics and Electronics* 1994, 4, 253.
- [125] Kuehl, S. A., Grove, S.S., Kuehl, E., Bingle, M., Cloete, J.H., "Manufacture of Microwave Chiral Materials and Their Electromagnetic Properties", *Advances in Complex Electromagnetic Materials*; Kluwer Academic Publishers: Netherlands, 1997.
- [126] Munk, B. A., "Frequency Selective Surfaces: Theory and Design", John Wiley & Sons, Inc., New York, 2000.
- [127] Munk, B. A., "Frequency Selective Surfaces: Theory and Design", John Wiley & Sons, Inc., New York, 2000.
- [128] Saville, P., RESEARCH, D. & (CANADA), D. A. D. (Ed.), "Review of Radar Absorbing Materials", *DEFENCE RESEARCH AND DEVELOPMENT ATLANTIC DARTMOUTH (CANADA)*, 2005.
- [129] Costa, F. & Monorchio, A., "Multiband electromagnetic wave absorber based on reactive impedance ground planes", *Microwaves, Antennas Propagation, IET*, 2010, 4, 1720-1727.
- [130] Costa, F.; Monorchio, A. & Manara, G., "Analysis and Design of Ultra Thin Electromagnetic Absorbers Comprising Resistively Loaded High Impedance Surfaces", *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 2010, 58, 1551-1558.
- [131] Fusco, V.; Cahill, R.; Hu, W. & Simms, S., "Ultra-thin tunable microwave absorber using liquid crystals", *Electronics Letters, IEE*, 2008, 44, 37-38.
- [132] Ding, Y. & Fusco, V., "Loading artificial magnetic conductor and artificial magnetic conductor absorber with negative impedance convertor elements", *Microwave and Optical Technology Letters, Wiley Subscription Services, Inc., A Wiley Company*, 2012, 54, 2111-2114.
- [133] Jacobs, I., *Bell System Technical Journal*, 1958, 37, 913.
- [134] Kuhnhold, R., US Patent 2771602. 1956.
- [135] Wright, R. W.; Wright, J. W., US Patent 3887920. 1975.
- [136] Kasevich, R. S.; Kocsik, M.; Heafey, M., US Patent 5214432. 1993.
- [137] Fallahi, A.; Member, A.; Yahaghi, A.; Benedickter, H.-r.; Abiri, H.; Shahabadi, M. & Hafner, C., "Thin Wideband Radar Absorbers", *Analysis*, 2010, 58, 4051-4058.

- [138] Bushbeck, M.D.; Chan, C.H., "A tuneable, switchable dielectric grating", *Microwave and Guided Wave Letters*, IEEE , vol.3, no.9, pp.296,298, Sept. 1993.
- [139] Pozar, David M., "A magnetically switchable ferrite radome for printed antennas", *Microwave and Guided Wave Letters*, IEEE , vol.3, no.3, pp.67,69, March 1993 .
- [140] Deri, R. J. & Spoonhower, J. P., "Microwave photodielectric effect in AgCl", *Phys. Rev. B*, American Physical Society, 1982, 25, 2821-2827.
- [141] Platte, Walter, "Periodic-structure photoexcitation of a silicon coplanar waveguide for selective optoelectronic microwave control", *Microwave Theory and Techniques*, IEEE Transactions on , vol.38, no.5, pp.638,646, May 1990 .
- [142] Sadow, Stephen E.; Thedrez, B.J.; Lee, Chi H., "An optoelectronic attenuator for the control of microwave circuits", *Microwave and Guided Wave Letters*, IEEE , vol.3, no.10, pp.361,362, Oct. 1993 .
- [143] Kost, Alan; West, Linda; Hasenberg, T.C.; White, Jeffrey O.; Matloubian, M.; Valley, G.C., "Optical control of microwaves with semiconductor n-i-p-i structures", *Applied Physics Letters* , vol.63, no.25, pp.3494,3496, Dec 1993 .
- [144] Lam, W.W.; Jou, C.F.; Chen, H.Z.; Stolt, K.S.; Luhmann, N.C.; Rutledge, D.B., "Millimeter-wave diode-grid phase shifters", *Microwave Theory and Techniques*, IEEE Transactions on , vol.36, no.5, pp.902,907, May 1988 .
- [145] Pitman, K. C., Lindley, M.W., Simkin, D., Cooper, J.F. *Radar and Signal Processing*, IEEE ProceedingsF 1991, 138, 223 .
- [146] 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
- [147] Mayer, F., US Patent 5872534. 1999.
- [148] Landy et al., 2008.
- [149] Al-Badri et al., 2017.
- [150] Al-Badri and Ekmekçi, 2016.
- [151] Dincer, 2015.
- [152] Gunduz and Sabah, 2016.
- [153] Nakanishi and Kitano, 2015.
- [154] Park JW, et al. Multi-band metamaterial absorber based on the arrangement of donut-type resonators. *Opt Express* 2013; 21(8):9691–702.
- [155] Landry Ni, et al. (21 mai 2008). « Absorbeur de métamatériaux parfait ». *Phys. Le révérend Lett.* 100(20):207402(2008).[4pages].Arxiv:0803.1670.bibcode:2008phrvl.100t207402.doi:10.1103/physrevlett.100.207402.pmid 18518577. Archive de l'original le 4 jui 2011 récupéré le 22 janvier 2010.

- [156] X. Yu, Y. Song, and S. Fan, "Research on a multiband metamaterial absorber," in AIP Conference Proceedings, 2017, vol. 1890, no. 1: AIP Publishing LLC, p. 040102.
- [157] T. Chen, S. Li, H. Sun, Metamaterials application in sensing, Sensors 12 (2012) 2742.
- [158] Withayachumnankul, W., Jaruwongrungrsee, K., Tuantranont, A., Fumeaux, C., & Abbott, D. (2013). Metamaterial-based microfluidic sensor for dielectric characterization. Sensors and Actuators A: Physical, 189, 233-237.
- [159] Smith, D. R.; padilla, Wj; Vier, DC; Nemat-Nasser, SC; Schultz, S(2000). "Milieu composite avec perméabilité et permittivité simultanément negatives". Lettres d'examen physique.84(18):4184-7. Bibcode :2000PhRvL..84.4184s. est ce que je :10.1103/physrevlett.84.4184.pmid10990641.
- [160] Shelby, R.A. ;smith,dr ;nemat –nasser,sc, ;schultz,s.(2001). "transmission par micro-ondes à travers un métamatériau bidimensionnel, iotrope, gauicher" letters de physique appliqué.78 (4):489. Bibcode :2001 apPhl..78.489s.est de que je :10.1063/1.1343489.
- [161] Gay-Balmaz, philippe ;martin, olivier j.f.(2002). ' Résonances électromagnétiques dans les résonateurs à anneau fendu individuels et couplés 'journal de physique appliquée.92(5) :2929.bibcode :2002JAP...92.2929G.est ce que je :10.1063/1.11497452.
- [162] Naqui, jordi ;duran-sindreu, miguel ;martin,ferran(2011). 'nouveaux capteurs basés sur les propriétés de symétrie des résonateurs à anneau brisé (srr)'.capteurs 11(12) : 7545-7553.est ce que je :100.3390 / s110807545.ISSN 1424-8220.PMC 3231717. PMID 22164031.
- [163] pendry ,jB, ; holden,A.j. ;Robbis,D.J., Stewart,w.j.(1999). 'magnétique des conducteurs et phénomènes non linéaires améliorés'. Transactions IEEE sur la théorie et les techniques des micro-ondes.47 (11)2075-2084. Bibcode :1999TMTT..47.2075P.citeseerX 10.1.1.564.7060.est ce que je :10.1109/22.798002.ISSN0018-9480.
- [164] smith ,D. ;Padilla, Willie ; vier,d ;nemat-nasser,S.; Schultz, S.(2000). 'milieu composite avec perméabilité et permittivité simultanément négatgives' Letters d'examen physique.84(18):4184-4187.Bibcode:2000 PhRRvL..84.414184.ISSN0031-9007.PMID10990641.
- [165] Shelby, R, A .(2001). 'vérification expérimentale d'un indice négatif de réfraction '.Science 292 (5514) :77-79. Bibcode :2001Sci...292...77s. CiteSeerX 10.1.1.119.1617.est ce que je :10.1126/science.1058847.ISSN0036-8075. PMID 11292865.
- [166] J. D. Baena, J. Bonache, F. Martin, and T. Lopetegui, "Equivalent-circuit models for splitting resonators and complementary split-ring resonators coupled to planar transmission lines", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 53, pp. 1451-1460, April 2005.
- [167] C. Caloz and T. Itoh, "electromagnetic metamaterials: transmission line theory and microwave applications", John Wiley & Sons, Inc., 2006.

- [168] Wu, B.-I. O.; Wang; J. Pacheco; X. Chen; T. Grzegorzczak; J. A. Kong (2005). 'une étude sur l'utilisation de métamatériaux comme substrat d'antenne pour améliorer le gain'. *progrès de la recherche électromagnétique*. 51 :295-328. est ce que je :10.2528 / PIER04070701. Archivé de l'original sur 2006-09-06. Récupéré 2009-09-23.
- [169] Slyusar V.I. métamatériaux sur les solutions d'antenne. // 7e conférence internationale sur la théorie et les techniques d'antenne ICATT'09, Lviv, Ukraine, du 6 au 9 octobre 2009. -Pp.19-24 [2].
- [170] J. Lezec, Henri; Jenifer A. Dionne, Harry A. Atwater (20/04/2007). 'réfraction négative aux fréquences visible'. *Science* 316 (5823) :430-2. Bibcode :2007Sci...316.430L. CiteSeerX 10.1.1.422.9475. est ce que je :10.1126 / science.1139266. PMID 7379773. Récupéré 2009-10-06.
- [171] A. M. Nicolson and G. F. Ross, "Measurement of the intrinsic properties of materials by Time-Domain techniques", *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. 19, n. 4, pp. 377–382, 1970.
- [172] W. Weir, "Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies", *Proceedings of the IEEE*, vol. 62, n. 1, pp. 33–36, 1974.
- [173] D. R. Smith and S. Schultz, "Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients", *Physical Review B*, vol. 65, n 19, pp. 1–5, April 2002
- [174] L. Sylvain, "Etude théorique de métamatériaux formés de particules diélectriques résonantes dans la gamme submillimétrique : magnétisme artificiel et indice de réfraction négatif", Thèse de Doctorat de l'Université de Bordeaux 1, 2011.
- [175] A. Sellier, V. Tatiana, A. Lustrac, Resonant circuit model for efficient metamaterial absorber, *Opt. Express* 21 (106) (2013) A997–A1006.
- [176] S. Bhattacharyya, G. Saptarshi, K.V. Srivastava, Equivalent circuit model of an ultra-thin polarization-independent triple band metamaterial absorber, *AIP Adv.* 4 (9) (2014) 097127.
- [177] M.A.B. Adam, Understanding microwave pyrolysis of biomass materials, PhD thesis, University of Nottingham, 2017.