

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -

Faculté de TECHNOLOGIE



## **MEMOIRE**

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

**En : Télécommunications**

**Spécialité : Système de télécommunications**

**Par :**

**RAHOUI NIHED**

**TAABANI WAFAA**

**Sujet**

**Etude des absorbants métamatériaux pour le contrôle  
de la propagation des ondes électromagnétiques**

Soutenu publiquement, le / / , devant le jury composé de :

<b>Mme F.BOUSALAH</b>	Maitre de conférences (B) à l'université de Tlemcen	Présidente
<b>Mme F.Z.GOURARI</b>	Maitre de conférences (B) à l'université de Tlemcen	Examinatrice
<b>Mme. BENMOSTEFA Naima</b>	Maitre de conférences (A) à l'université de Tlemcen	Encadreur

2019-2020

# remerciement

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

Par ailleurs, nous souhaitons exprimer nos plus profonde gratitude à nos encadrante de mémoire madame **BENMOSTEFA NAIMA**, Maître de conférence classe B à l'université de Tlemcen pour son bon encadrement, ses conseils, sa patience et son attention et son soutenir moralement pendant les moments difficiles.

Nos remerciements les plus vifs s'adressent aussi à madame la présidente **BOUSALAH FAYZA**, Maître de conférence à l'université de Tlemcen, qui nous avons l'honneur et le plaisir de présider le jury de notre soutenance.

Nous exprimons aussi nos sincères remerciements à madame **GOURARI Fatima Zohra**, Maître de conférence à l'université de Tlemcen, d'avoir acceptée d'examiner et d'évaluer nos travail et l'enrichir par ces propositions

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

Nous soulignons une profonde gratitude pour nos camarades, particulièrement la promotion de deuxième année Master Système de Télécommunication.

Enfin nous sommes reconnaissants à toute personne qui a contribué d'une façon ou d'une autre à la réalisation de ce présent mémoire.

Merci à toutes et à tous...

## *Dédicace*

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

**Je le dédie à :**

**A mes très chers parents qui m'ont accompagné dans chaque pas de ma vie, qui m'ont encouragé et soutenu.**

**Merci pour votre amour, pour votre patience infini. Que ce modeste travail soit le fruit de vos sacrifices.**

**A ma sœur chérie imane, merci pour ton encouragements. A mes beaux-frères lakhder et younes que le bon Dieu vous protège.**

**A toute la famille de taabani.**

**A tous mes chers amis.**



**wafa**

## **Dédicace**

*Je dédie ce modeste travail à mon cher père qui je pense serait fière de moi. À toi ma chère maman qui est toujours m'accompagner dans ma carrière et m'encourager, à mes adorables frères :Rachida hafida Nabila ,Mohamed,Rihab,Abdou ,ainssi qu'a à ma soeur Hnanen et leurs enfants Aymoun khaloussa yassour hanouaa samsoumi amirou khalilou et cher nourri.*

*A mon mari Fethi , qui m'a toujours encouragé et qui a été compréhensif et patient.*

*A toute la familles Rahoui et Boubekour.*

*A toutes mes amies. Et tous les étudiants de ma promotion.*



*nihed*

## Table des matières

<b>Dédicase</b> .....	II
Liste des figures.....	VI
<b>Liste des abréviations</b> .....	X
<b>Résumé :</b> .....	XI
<b>Abstract :</b> .....	XII
المخلص.....	XIII
<b>I. 1. INTRODUCTION</b> .....	5
<b>I.2. BREVE HISTOIRE DE NIMS ET DE REFRACTION NEGATIVE</b> .....	6
<b>I.3.MEDIA EFFICACES</b> .....	8
<b>I.4. DIFFERENT STRATEGIE DE CONCEPTION METAMATERIAUX</b> .....	9
<b>I.4.1. FILS METALLIQUES MINCES</b> .....	10
<b>I.4.2.STRUCTURES ‘SWISS ROLL’</b> .....	11
<b>I.4.3. SPLIT RING RESONATEUR</b> .....	12
<b>I.4.4 Le principe de Babinet :</b> .....	15
<b>I. 5.PROPRIETE DES METAMATERIAUX</b> .....	15
I. 5. 1. Définition.....	15
I. 5. 2. Les équations de Maxwell.....	15
I. 5. 3. Le vecteur de Poynting.....	17
<b>I. 6. LES PHENOMENES DUS AUX METAMATERIAUX</b> .....	18
I.6.1. L’inversion de la loi de Snell-Descartes.....	18
I. 6. 2. Permittivité Négative.....	20
I. 6. 3. Perméabilité Négative.....	21
I. 6. 4. Inversion D'Effet De Doppler Et De Rayonnement De Cerenkov.....	22
I. 6. 5. Vitesse de groupe et vitesse de phase.....	23
<b>I. 7. APPLICATIONS DES METAMATERIAUX</b> .....	24
I. 7. 1. La super lentille.....	24
I. 7. 2. Le cloaking.....	27
I. 7. 3. Application en technologie micro-ruban.....	28
<b>I. 8. CONCLUSION</b> .....	29
<b>1. Introduction</b> .....	32
<b>3. La Structure :</b> .....	35
<b>4. ABSORBEURS DE MÉTAMATÉRIAUX À BANDE ÉTROITE</b> .....	37
<b>4.1 Absorbeur de métamatériaux à base de résonateur à anneau fendu (SRR)</b> .....	37

4.2	Absorbeur de métamatériaux à base de résonateur annulaire électrique (ERR) .....	38
4.3	ABSORBEURS DE MÉTAMATÉRIAUX MULTIBANDES ET À LARGE BANDE .....	44
4.3.1	<i>Absorbeurs de métamatériaux à double bande et multibande</i> .....	44
4.3.2	<i>Absorbeurs de métamatériaux à large bande</i> .....	49
5.	Autres applications : .....	54
	al'onde réfléchie, au lieu de l'onde transmise ,étaitpris comme le signal modulé.[78] .....	54
6.	Conclusion.....	54
III.1.	Introduction.....	56
III.2.	Conception de l'absorbant méta matériaux .....	57
	(c) .....	58
III.2.1	Absorbant de méta matériaux a ondes millimétriques à large bande sur l'intégration des résonateurs .....	59
III.2.1.1	<i>Absorbant méta matériaux utilisant SRR forme C a deux résonateurs</i> .....	59
III.2.1.2	<i>Absorbant de méta matériaux utilisant SRR un seul résonateur carré</i> .....	61
III.3.	Conclusion .....	66
	<b>LA BIBIographie</b> : .....	70

# Liste des figures

## Chapitre I :les métamatériaux

<b>Figure I.1</b> : Représentation des différents types de medias.....	9
<b>Figure I.2</b> : Les fils métallique qui donnent le constant diélectrique négatif .....	10
<b>Figure I.3</b> :La perméabilité effective du milieu en fonction de la fréquence	11
<b>Figure I.4</b> : La structure Swiss-Role qui donne une perméabilité négative ...	12
<b>Figure I.5</b> : (a) Représentation d'un résonateur split-ring (SRR) et son circuit équivalent.  (b) Représentation d'une complémentaires résonateur split-ring (SRR) et son modèle de circuit équivalent .....	13
<b>Figure I.7</b> : Le champ électrique E, le champ magnétique H, le vecteur de propagation k et le vecteur Poynting dirigent S pour la propagation des ondes électromagnétique (a) RHM ( $\epsilon > 0, \mu > 0$ ) (b) LHM ( $\epsilon < 0, \mu < 0$ ) .....	20
<b>Figure I.8</b> :Réfraction de la lumière et loi de Snell .....	21
<b>Figure I.9</b> :Réfraction dans un matériau d'indice négatif (méta matériau) ...	22
<b>Figure I.10</b> : a) l'effet Doppler dans un milieu main droite.  b) l'effet Doppler dans un milieu main gauche ou A représente la source des radiations et B le récepteur .....	25
<b>Figure I.11</b> :Inversion de l'effet de Cerenkov .....	26
<b>Figure I.12</b> :Vitesses de phase et de groupe pour RHM et LHM.....	28
<b>Figure I.13</b> :Focalisation avec une lentille ordinaire (a) et une super lentille (b) .....	29
<b>Figure I.15</b> :Le principe du cloaking : contournement d'un obstacle à partir d'une source ponctuelle [18].....	32
<b>Figure I.16</b> :(a) Cellule de base de la ligne micro ruban LHM (face supérieure), (b) Circuit équivalent du modèle.....	32

## Chapitre II :Les absorbants

<b>Figure II.1</b> :Absorbeur de méta matériaux basé sur le SRR (a) arrangement de conception (b) conception de cellule unitaire (c) réponse simulée [28].....	<b>38</b>
<b>Figure II.2</b> :(a) Conception de la cellule unitaire de l'absorbeur parfait de méta matériaux à la fréquence des micro-ondes (b) absorption simulée réponse .....	<b>39</b>
<b>Figure II.3</b> :Réponse d'absorption simulée pour plusieurs couches .....	<b>39</b>
<b>Figure II.4</b> :(a) Conception de la cellule unitaire de l'absorbeur parfait de méta matériaux à la fréquence de THz (b) absorption simulée réponse .....	<b>41</b>
<b>Figure II.5</b> :(a) Absorbeur basé sur la CLE avec une masse métallique continue et (b) sa réponse d'absorptivité.....	<b>41</b>
<b>Figure II.6</b> :(a) Conception de la cellule unitaire de l'absorbeur parfait de méta matériaux à la fréquence des micro-ondes (b) Circuit équivalent et (c) la réponse d'absorption simulée .....	<b>42</b>
<b>Figure II.7</b> :(a) Réseau métallique de la structure de l'absorbeur placé orthogonalement à la direction de propagation (b) cellule unitaire.....	<b>42</b>
<b>Figure II.8</b> :Première démonstration expérimentale du mécanisme de structure multiple pour obtenir des pics de résonance multiples .....	<b>45</b>
<b>Figure II.9</b> :(a) absorbeur de méta matériaux à double bande avec des structures identiques encastrées les unes dans les autres et sa (b) réponse d'absorption.....	<b>45</b>
<b>Figure II.10</b> : Conception de la cellule unitaire et réponse d'absorption : le premier absorbeur bi-bande basé sur une structure multi-résonante à THz fréquence .....	<b>46</b>
<b>Figure II.11</b> : (a) Conception de cellules unitaires multi résonnantes de l'absorbeur de méta matériaux à triple bande et son (b) absorption simulée réponse.....	<b>44</b>

pentagonale multi résonante et de son (b) simulateur la réponse d'absorption .....47

**Figure II.13** : (a) Absorbeur à méta matériau à double bande basé sur des structures magnétiques résonantes et sa (b) réponse d'absorption .....47

**Figure II.14** : (a) Absorbeur de méta matériaux multi bandes ultrafins basé sur la mise à l'échelle des dessins individuels dans la cellule unitaire et son (b) Réponse d'absorption .....48

**Figure II.15** : (a) Conception de la cellule unitaire de l'absorbeur multicouche de méta matériaux à largeur de bande améliorée et de ses (b) réponse d'absorption simulée..... 49

**Figure II.16** : (a) Conception de la cellule unitaire de l'absorbeur multicouche de méta matériaux à largeur de bande améliorée et de son (b) Simulation réponse d'absorption pour une épaisseur variable de la couche supérieure la plus diélectrique .....50

**Figure II.17** : (a) Absorbeur de méta matériaux basé sur des patchs multi-carrés e (b) réponse d'absorption simulée..... 50

**Figure II.18** : (a) Conception de la cellule unitaire de l'absorbeur de méta matériaux à largeur de bande améliorée et (b) absorption simulée réponse .....51

# Chapitre III : Absorbant de méta matériaux a ondes millimétrique à large bande sur l'intégration des résonateurs

<b>Figure III.1:</b> Schéma de l'absorbant méta matériau.....	<b>55</b>
<b>Figure III.2 :</b> Résultat de l'absorbeur de méta matériaux à la fréquence 77 GHz.....	<b>57</b>
<b>Figure III. 4:</b> Absorbant large bande sous HFSS .....	<b>59</b>
<b>Figure III.5:</b> Résultats de simulation paramètre d'absorption utilisant un SRR pour l'amélioration bande passante.....	<b>60</b>
<b>Figure III.6:</b> Absorbant large bande avec variation de l'opposition du SRR ...	<b>61</b>
<b>Figure III.7:</b> Résultat de simulation des paramètres d'absorption .....	<b>61</b>
<b>Figure III.8.</b> Configuration pour la mesure du coefficient de réflexion du absorbeur .....	<b>62</b>

## Liste des abréviations

<b>Symbole</b>	
f	Fréquence.
$\omega$	Fréquence angulaire.
$\mu$	perméabilité magnétique.
$\epsilon$	permittivité électrique.
C	Capacité.
L	Inductance.
$\vec{H}$	Vecteur champ magnétique
$\vec{E}$	Vecteur champ électrique
K	Facteur de propagation.
n	Indice de réfraction.
N	le nombre d'enroulements .
$\rho$	résistance par unité de longueur .
$V_g$	Vitesse de groupe
<b>Abréviation</b>	
MMT	Métamatériaux.
EM	Électromagnétiques.
DNG	Double Negative.
SRR	Split-ring resonator.
LHM	Left Handed materal.
ENG	Electrical Negative
CSRR	Complementary split-ring resonator
DPS	Double Positive
MNG	Magnetic Negative
LCS	Liquid crystals
NLCs	Nématique liquid crystals
NIM	Négative index metamaterial
TL	Ligne de transmission.
EBGs	électromagnétique bande-gap.

## Résumé :

Les absorbeurs parfaits à base de métamatériaux ont fait l'objet d'une attention particulière en raison de leur capacité à absorber complètement les ondes électromagnétiques avec des profils de sous-longueurs d'onde très importants. L'objectif visé est le développement de structures absorbantes à base des méta matériaux, en vue d'isoler des ondes électromagnétiques (EM). L'étude sera menée sous l'environnement HFSS et CST.

Cette thématique est un sujet d'actualité qui doit répondre à court terme aux besoins de l'électronique et des équipements électroniques modernes multi-bande, multi polarisation, créant des pollutions, des couplages et des interférences EM dans leur environnement de plus en plus dense.

**Mots clés:** Méta matériaux, Ondes électromagnétiques, Absorption, Conception, HFSS, EADS.

## **Abstract :**

The perfect absorbers based on metamaterials have been the subject of particular attention because of their ability to completely absorb electromagnetic waves with very large sub-wavelength profiles. The objective is the development of absorbent structures based on meta materials, in order to isolate electromagnetic waves (EM). The study will be conducted under the HFSS and CST environment.

This theme is a topical issue which must meet in the short term the needs of electronics and modern multi-band, multi-polarized electronic equipment, creating pollution, coupling and EM interference in their increasingly dense environment. .

Keywords: Metamaterials, Electromagnetic waves, Absorption, Design, HFSS, EADS.

## الملخص:

حظيت أجهزة الامتصاص المثالية القائمة على المواد الفوقية باهتمام خاص بسبب قدرتها على امتصاص الموجات الكهرومغناطيسية بشكل كامل مع ملفات تعريف الطول الموجي الفرعية الكبيرة جدًا.

الملخص :

الهدف هو تطوير هياكل ماصة تعتمد على المواد الخارقة ، من أجل عزل الموجات الكهرومغناطيسية (EM) . سيتم إجراء الدراسة في ظل بيئة HFSS و CST . هذا الموضوع هو قضية الساعة التي يجب أن تفي بالاحتياجات قصيرة الأجل للإلكترونيات والمعدات الإلكترونية الحديثة متعددة النطاقات والأقطاب ، مما يؤدي إلى التلوث والاقتران والتدخل الكهرومغناطيسي في بيئتهم كثيفة بشكل متزايد . الكلمات المفتاحية: المواد الخارقة ، الموجات الكهرومغناطيسية ، الامتصاص ، التصميم ، HFSS ، EADS .

# introduction générale

De nombreuses innovations, études et recherches expérimentales ont traité des effets des matériaux ferromagnétiques sur le spectre des ondes électromagnétiques, les méthodes de préparation, la nature de leur interaction.

Diverses tentatives ont été menées pour développer des technologies faiblement observables et réduire la section transversale radar (RCS), telles que la technologie furtive.. donc, il a été constaté que certains absorbant à méta matériaux pour les ondes électromagnétiques a la capacité de réduire la réflectivité de ces ondes aux fréquences radar.

Les métamatériaux sont des milieux artificiels, dont la structure périodique su longueur d'onde permet d'avoir un contrôle sur la permittivité ( $\epsilon$ ), la perméabilité ( $\mu$ ), ou les deux grandeurs à la fois, offrant la possibilité d'un indice négatif, une condition qui n'existe pas dans la nature.

Les matériaux absorbants radars (MAR) ont été créés en 1940 à la suite de la mise en place des premiers réseaux de radars. En anglais, ils portent souvent le nom de RAM (Radar Absorbing Materials).

Le MAR idéal ressemblerait à une peinture efficace pour toutes les polarisations sur une grande bande de **fréquences** et une grande plage d'incidences. Malheureusement, un tel matériau n'existe pas et la probabilité d'en voir apparaître un prochainement est assez faible.

Pratiquement, le type d'absorbant le plus efficace dans une situation donnée est fortement dépendant de plusieurs paramètres (fréquence du radar, forme de l'onde émise, largeur de bande, forme de la cible, etc.).

Les exigences et les propriétés des absorbants sont déterminées par les considérations suivantes :

- **fréquence de fonctionnement .**
- **incidence de l'onde .**
- **milieu composite ou homogène .**
- **tenue en puissance .**
- **considérations géométriques .**
- **stabilité temporelle .**
- **considérations de poids**
- **coûts de réalisation, de vente et d'installation .**
- **facilité de fabrication .**

Les absorbeurs d'ondes électromagnétiques à base de méta matériaux ont fait l'objet de nombreuses recherches en raison de leur faible profil et de leur processus de fabrication simple.

**Dans le premier chapitre**, nous abordons en premier lieu l'historique de la réfraction négative, une explication de média efficaces .puis les différentes stratégies de conception méta matériaux , ces propriétés, et les phénomènes dus aux méta matériaux.

A la fin, nous allons cité les différentes applications de méta matériaux.

**Le deuxième chapitre** traite une étude générale d'absorbant et les différents types d'un absorbant électromagnétique et sa structure. Ensuite, nous étudions l'absorbant méta matériaux à bande étroite ainsi nous donnons quelque applications de l'absorbeur d'EM.

**Le troisième chapitre** étudie la conception de l'absorbant méta matériaux. Ensuite, l'absorbant de méta matériaux à ondes millimétriques à large bande sur l'intégration des résonateurs.

# **Chapitre I : Les métamatériaux**

## I. 1. INTRODUCTION

La définition des métamatériaux n'est pas complètement déterminée et peut être établie en tenant compte des aspects divers et de différents degrés de flexibilité. Périodicité et exotiques des propriétés électromagnétiques peuvent être considérées comme des questions essentielles pour une structure doit être considérée comme des métamatériaux. Nous allons utiliser cependant une définition plus large des métamatériaux, dans laquelle ces deux aspects ne sont pas essentiels. Nous examinerons métamatériaux comme des «structures périodiques ou quasi-périodiques qui sont artificiellement créés pour en ce qui concerne la taille de la maille, ces structures peuvent être classées comme cristaux électromagnétiques(ou électromagnétique bande-gap-EBGs-) ou des médias efficaces.

Ces structures dont la période est de l'ordre de la longueur d'onde peuvent être considérées comme cristaux électromagnétiques. Ils présentent des effets d'interférence qui donnent lieu à la fréquence bande-gap, ce qui est connu sous le nom de dispersion de Bragg. La période effective dans ces médias est beaucoup plus petite que la longueur d'onde. Cela provoque à des champs électromagnétiques uniformes et par conséquent montre des propriétés efficaces électromagnétiques. Il est à noter que les caractéristiques efficace de l'ensemble du milieu ne doivent pas être les mêmes que ceux de l'unité de cellules qui le composent. Ce qui rend possible que métamatériaux présentent des propriétés qui ne peuvent pas être trouvés dans la nature. Sans aucun doute, les médias qui ont spécialement suscité l'intérêt dans la communauté scientifique sont des médias efficaces et en particulier ceux qui sont connus comme de gauche médias remis (médias LHouLHM). Dans ces métamatériaux la permittivité diélectrique( $\epsilon$ ) et la perméabilité magnétique( $\mu$ ), qui caractérisent la propagation d'ondes électromagnétiques dans un milieu, sont à la fois négative. cet nouveaux Négative (DNG) médias ne se comportent pas comme les autres matériaux trouvés dans la nature, ce qui ouvre la porte à de nouveaux effets et possibilités d'application. Aussi on traite des principales applications de LHmilieu. Métamatériaux à lignes de transmission sont aujourd'hui largement utilisés dans la conception de dispositifs à micro-ondes et plusieurs approches sont consacrées à cet objectif.

## I.2. BREVE HISTOIRE DE NIMS ET DE REFRACTION NEGATIVE

Historiquement, la réfraction négative d'ondes lumineuses et d'autres a été d'abord débattue par Mandelstam [4] en 1945. La courbe de dispersion d'une branche optique de phonon dans un treillis en cristal a été donnée comme exemple de tels médias peu communs. Le fait que la réfraction à l'interface d'un milieu avec  $\epsilon > 0$  et  $\mu > 0$  et des autres avec  $\epsilon < 0$  et  $\mu < 0$  ne peut pas seulement être négative, mais aussi sans réflexion, a été souligné par Veselago [3] en 1968. L'effet Doppler Renversé et le rayonnement en arrière de Cerenkov près de la réfraction négative et la propagation en arrière d'onde.

Après presque 30 ans depuis le travail séminal de Veselago, Pendry a proposé de diverses structures résonnantes magnétiques telles qu'une rangée de cylindres, et une rangée capacitive de feuilles enroulées sur les cylindres [5]. Pour chaque structure, il a prouvé que la perméabilité efficace peut être décrite comme modèle résonnant ce qui montre une perméabilité négative sur une certaine gamme de fréquence. En plus, Pendry plus tard a proposé quelques variations sur la conception fendue du résonateur d'anneau (SRR) de sorte qu'il fonctionne aux fréquences (IRES) infrarouges [6]. Le premier LHM artificiel a été conçu par Smith [7] employant une combinaison des fils et du SRRs. Smith et autres. ont rapporté la démonstration expérimentale des matériaux gauchers en empilant SRRs et structures minces de fil comme Metamaterials choix de 1-D et de 2-D a structuré des metamaterials composés (CMMs) [8]. Le milieu est établi en imprimant d'abord une feuille mince de métal dans la forme des anneaux fendus de circulaire d'un côté du substrat diélectrique. Les feuillards imprimés ont été alors placés à côté d'un ensemble de tiges métalliques relativement grandes [7]. Smith et autres. ont prouvé qu'un metamaterial contenant seulement SRR a une caractéristique de bande d'arrêt, alors qu'un metamaterial contenant seulement des tiges a une caractéristique passe-haut. Cependant, quand toutes les deux sont présentes, une bande de passage apparaît près de la bande d'arrêt pour le SRRs, De là, Smith et al. Conclure que la propagation est a permis à ces fréquences dû au fait que la permittivité et la perméabilité sont à la fois négatifs [8]. Un milieu avec la constante diélectrique et la perméabilité négatives a un indice de réfraction négatif et vice-versa [3]. La première démonstration expérimentale de cette manière a été effectuée par Shelby et al. [9]. Les auteurs ont placé un prisme en forme structure métamatériaux dans un guide d'ondes à plaques parallèles. Ils ont pu observer la réfraction négative et mesurer l'indice de réfraction négatif de la structure composée. La réfraction négative, et en général la propagation des ondes, dans les médias indice négatif ont

également été un sujet de controverse et ont suscité un vif débat. Valanju et Al [10] ont réclamé que la dispersion implique la réfraction positive de la vitesse de groupe même quand la vitesse de phase est réfractée négativement. Le comportement de la lentille parfaite des matériaux gauchers a été également critiqué. En particulier, Garcia [11] a affirmé que parfaite lentille ne peut théoriquement exister parce qu'elle exigerait la production d'énergie infinie.

Dans [12] Pendry contredit les réclamations de [11] et explique comment il prend en compte des pertes entièrement, de ce fait établir l'existence de la résolution superbe dans la limite sans absorption. Une grande partie de la confusion résulte des définitions contradictoires de la vitesse du groupe et Valanju et autres [10] ont incorrectement identifié la vitesse de groupe comme direction du mouvement de modèle d'interférence [13].

NIM ont attiré une attention croissante à la fois théorie et expérience. Une représentation alternative de l'INM est l'aide de la ligne de transmission (TL) approche [14]. En utilisant le modèle dual du TL conventionnel, un nouveau TL a été construit en utilisant la capacité en série et l'inductance de shunt. Un composé général de droite à gauche – remis (CRLH) se compose par capacité et inductance en série et inductance et capacité de shunt. Le CRLH est la base de beaucoup de composants de micro-onde comprenant des antennes, des coupleurs, et des résonateurs [14]. NIM souffre des pertes élevées et de la largeur de bande étroite. Après la réalisation expérimentale du manteau invisible dans le régime de micro-onde [15], un grand intérêt dans la transformation optique, utilisée pour expliquer la dissimulation dans la région optique du spectre, ainsi de l'invisibilité, a été développée [16]. Comme indiqué précédemment, LHM ne sont pas les seuls matériaux qui provoquent le concept négatif de réfraction. La réfraction négative est également réalisable en utilisant les 2-D PCs [17, 18].

Les PCs sont les structures en général périodiques construites en utilisant les matériaux diélectriques élevés [19]. La réfraction négative peut également être obtenue en utilisant (LC) les cellules à cristal liquide [20, 21]. Le faisceau réfracté est commandé en utilisant le champ électrique et la température [20]. Kang et autres. [22] ont employé un champ magnétique externe pour obtenir la réfraction négative dans LCS nématique (NLCs). Les auteurs ont utilisé un dispositif en forme de prisme NLC et ont montré que réfraction négative est idéalement réalisé en changeant l'angle d'incidence de la lumière et la direction du champ magnétique appliqué.

### I.3.MEDIA EFFICACES

Comme il a été déjà mentionné précédemment, les médias efficaces sont ceux dont l'unité et la période sont des cellules beaucoup plus petites que la longueur d'onde. Le rayonnement incident perçoit la structure comme un milieu homogène avec des propriétés efficaces, ce qui peut être différent des éléments du constituant. C'est l'une des caractéristiques les plus importantes des médias efficaces, étant donné qu'il permet la réalisation de certaines propriétés que les matériaux naturels ne présentent pas.

En ce qui concerne les grandeurs  $\epsilon$  et  $\mu$ , qui caractérisent la propagation des ondes vagues dans les médias, nous pouvons classer les différents matériaux dans différents types, selon si la permittivité diélectrique et / ou la perméabilité magnétique sont négatives ou positives [1]. Si un seul des deux paramètres est négatif, la structure est considérée comme un seul négatif media (SNG), tandis que ceux dont les deux paramètres sont négatifs sont double-Négative (DNG) médias. Les quatre différents types de matériaux sont décrits dans Fig.2.1 et leurs propriétés peuvent être déduites de l'étude des équations décrivant la propagation des ondes électromagnétiques dans les médias.

$$n^2 = \epsilon\mu$$

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} n^2$$

Si on considère matériaux isotropes sans perte avec des valeurs réelles pour la permittivité diélectrique et la perméabilité magnétique, l'inspection des équations (2,1) et (2,2) montre que les substances de  $\epsilon$  et  $\mu$  ayant différentes valeurs d'exposition signe imaginaire du vecteur de propagation  $k_1$  et l'indice de réfraction  $n$  et par conséquent ils ne sont pas des médias de propagation.

Toutefois, si les deux paramètres ont le même signe, peu importe si elles sont positives ou négatives, à la fois  $k$  et  $n$  sont réelles et le milieu permet la propagation des ondes (EM) . Prend cela en compte, nous pouvons conclure que les médias sont des médias SNG opaque, tandis que DNG et DPS (double positive) des médias sont transparents.

Nous pouvons essayer de trier les différents types de médias qui sont représentés dans Fig.I.1 selon les signes des paramètres  $\epsilon$  et  $\mu$ . matériaux diélectrique isotrope peuvent être trouvés dans le quadrant I, pour que les deux paramètres à la fois  $\epsilon$  et  $\mu$  sont positifs. Au contraire, les

matériaux situés dans les quadrants sombre (médiat SNG) ne permet pas la transmission, le fait que  $\varepsilon$  et  $\mu$  sont de signes opposés et les deux paramètres  $n$  et  $k$ , sont imaginaires par contre les modes évanescents sont autorisés. Certains de ces matériaux opaques peuvent être trouvés dans la nature, comme matériaux ferromagnétiques, qui ont  $\varepsilon > 0$ , mais  $\mu < 0$  (MNG  $\mu$  négatif) et appartiennent au quadrant II. Un autre type de milieu SNG serait métaux à des fréquences optiques et plasmas en vertu de leur fréquence de plasma, qui ont  $\varepsilon < 0$  et  $\mu > 0$  (epsilon négative ENG) et serait situé dans le quadrant IV.

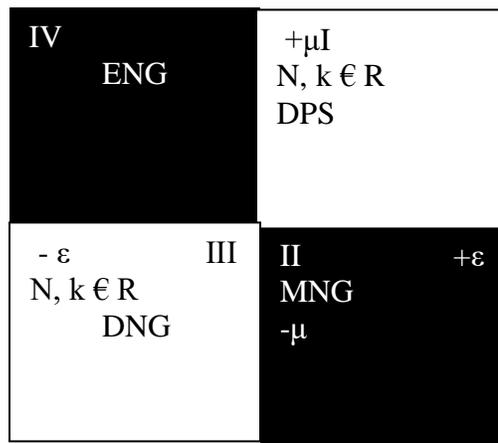


Figure I.1 : représentation différent type de medias

Les matériaux DNG serait donc transparent. Toutefois, pour autant qu'ils n'existent pas dans la nature ce type des matériaux et leurs propriétés ne pouvaient être étudiés théoriquement jusqu'à ces dernières années. La synthèse des médias DNG pour la première fois fait en 2000 [2] qui a ouvert la porte à l'étude et l'application de ces matériaux et leurs propriétés spéciales. (Également sont appelées des matériaux à main gauche ou gaucher (LH)).

#### I.4. DIFFERENT STRATEGIE DE CONCEPTION METAMATERIAUX

Dans l'histoire récente des metamateriaux, l'approche progressive a été privilégiée, c'est à dire que la réalisation de ces matériaux s'est faite en trois temps. La réalisation d'un réseau à permittivité négative, puis celle d'un réseau à perméabilité négative ont précédé la superposition des deux pour obtenir le metamateriau doublement négatif. Nous reprenons cette démarche en étudiant successivement les réseaux de fils métalliques et de résonateurs à activité magnétique, puis nous évoquons d'autres approches alternatives, comme l'utilisation d'un seul motif ou celle d'une structuration diélectrique.

### I.4.1. FILS METALLIQUES MINCES

La structure avec un  $\epsilon < 0$  décrit par Pendry [17] se compose d'une matrice carrée des fils métalliques parallèles infiniment minces et longs incorporés dans le milieu diélectrique (figure I.2) Pour la situation montrée sur la figure I.2, le milieu est vide, la longueur d'une unité de cellule est  $a$  et le rayon d'un fil simple est  $r \ll a$ . Si la fréquence pour le mode longitudinal de plasma est :

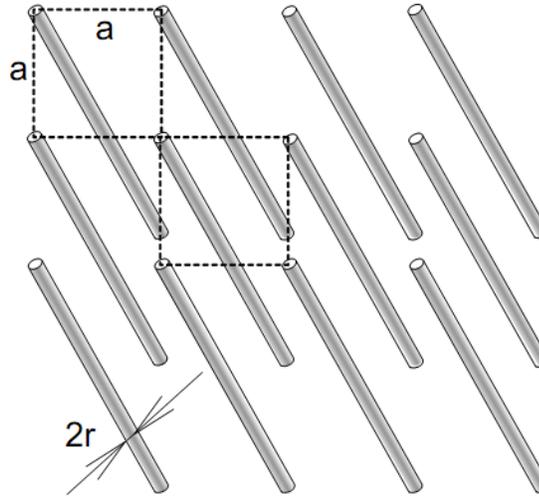


Figure I.2 : Les fils métallique qui donnent le constant diélectrique négatif

$$\omega_p = \frac{2\pi C^2}{a^2 \ln(a/r)}$$

Avec  $c$  : la vitesse de la lumière dans le vide.

La permittivité diélectrique effective peut être écrite comme suite :

$$\epsilon_{\text{eff}} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega \left[ \omega - \frac{i(\omega_p^2 a^2 \epsilon_0)}{\sigma \pi r^2} \right]} \approx 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$$

Ce terme devient négatif pour le  $\omega < \omega_p$ . La valeur approximative sur le côté droit de l'expression (I.3) est valide si la conductibilité  $\sigma \rightarrow \infty$ .

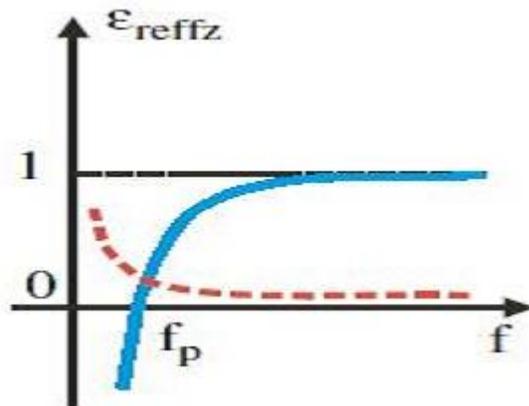


Figure I.3: la perméabilité effective du milieu en fonction de la fréquence.

#### I.4.2. STRUCTURES ‘SWISS ROLL’

Les courants induits dans une particule contribuent efficacement à sa magnétisation par leurs moments magnétiques. Cette contribution est non-négligeable si en même temps leur polarisation électrique est petite. Pour l’instant, si la perméabilité effective de la structure des cylindres en métal est considérée, semblable à celle montrée dans la Figure I.4, on obtient que sa perméabilité ne puisse pas atteindre des valeurs négatives. Cependant, l’introduction des éléments capacitifs dans la structure fournit  $\mu < 0$ .

Ceci peut être pratiquement fait par le roulement d’un feuillage métallique dont les enroulements en forme spirale assument la forme d’un cylindre [6] (Figure I.4). C’est la structure populairement connue sous ‘SwissRoll’.

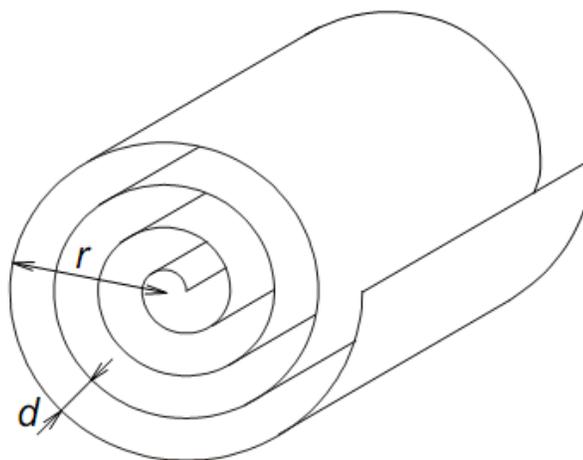


Figure I.4 : la structure Swiss-Roll qui donne une perméabilité négative.

Les feuilles des enroulements sont séparées par un isolateur avec une épaisseur  $d$ . si le nombre d'enroulements est  $N$  et leur résistance par unité de longueur est  $\rho$ , la perméabilité  $\mu$  effective devient :

$$\mu_{eff} = 1 - \frac{\frac{\pi r^2}{a^2}}{1 - \left[ \frac{da^2}{2\pi^2 r^3} (N - 1) \omega^2 + l \frac{2\rho}{\mu_e \omega r (N-1)} \right]}$$

Les structures Swiss-Role sont particulièrement accommodées pour les applications basses fréquences.

**I.4.3. SPLIT RING RESONATEUR**

Les motifs métalliques permettant d'obtenir une perméabilité effective négative qui ont contribué a dynamiser la recherche sur les metamateriaux sont les Split Ring Resonators (SRR), propose par J. B. Pendry [119]. Il s'agit de deux cylindres ouverts imbriqués l'un dans l'autre. Ils sont excités par un champ magnétique transverse à la direction de propagation de l'onde, et dirige selon l'axe des cylindres. La permittivité effective négative est obtenue dans un réseau de SRR grâce à un comportement très fortement non linéaire du motif. Celui-ci est réalisé par la combinaison d'effets inductifs et capacitifs qui entrent en résonance. J. B. Pendry a démontré que de cette façon la perméabilité effective, calculée comme la moyenne volumique de la perméabilité sur une cellule unitaire, pouvait prendre au voisinage de la résonance des valeurs négatives. Une ouverture est pratiquée sur les cylindres pour éviter d'avoir des courants circulant entièrement autour de l'anneau, de manière à créer un effet capacitif sur le cylindre.

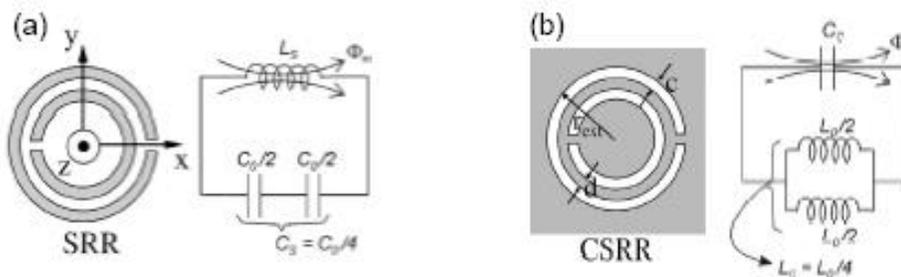


Fig.I.5 :(a) Représentation d'un résonateur split-ring (SRR) et son circuit équivalent. (b) Représentation d'une complémentaires résonateur split-ring (SRR) et son modèle de circuit équivalent.

La SRR est formé de deux anneaux métalliques concentriques ouverte, comme Fig.I.5(a) représente. Le résonateur peut être excité par une axiale (direction z sur la figure) champ

magnétique externe variant dans le temps, ce qui induit des courants dans les anneaux. Les split présents dans les anneaux des forces de passage du courant que permet le courant de déplacement entre eux. La boucle de courant est donc fermée à travers la distribution de la capacité qui apparaît entre l'intérieur et la bague extérieure (capacité de bord). Le résonateur peut être modélisé comme le montre la Fig.I.5(a) [4,5].  $L_s$  est la self-inductance du résonateur et  $C_0/2$  est la capacité en relation avec chacune des deux moitiés SRR.  $C_0$  peuvent être obtenus que  $C_0 = 2\pi r C_{pul}$ ,

Où  $C_{pul}$  représente la capacité par unité de longueur entre les anneaux qui forme le résonateur. En ce qui concerne  $L_s$ , il peut être rapproché de l'inductance d'un seul anneau avec le rayon moyen du résonateur et la largeur des anneaux,  $c$ . Il y a deux caractéristiques de la SRR qui le rendent particulièrement intéressant. L'un des d'eux est sa petite taille électrique. A la fréquence de résonance:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_s C_s}}$$

Le périmètre du résonateur est plus petit que la moitié de la longueur d'onde excitation. La taille électrique du résonateur peut être réduite par la réduction de l'écart entre les anneaux et la largeur des cernes (en vue d'accroître  $C_s$  et  $L_s$ , respectivement). Ainsi, la fréquence de résonance minimale réalisable sera déterminée par les limites imposées par la technologie considérée. Les caractéristiques des sous-longueurs d'onde faire SRR parfaitement apte à être appliquée que dans les unités élémentaires pour la synthèse des médias efficaces. La seconde propriété et la plus importants de ce résonateur est le fait que des médias efficaces formé par SRR autour de leur fréquence de résonance représente une perméabilité magnétique effectif négative,  $\mu_{eff}$ . La perméabilité effective d'un tel milieu peut être estimé (en négligeant les pertes) en tant que:

$$\mu_{eff} = 1 - \frac{F\omega^2}{\omega^2 - \omega_0^2}$$

Où  $F$  est la zone fractionnelle occupée par l'intérieur du résonateur au sein de la cellule unitaire [2,3].

Le comportement typique d'un média efficace MNG est représenté dans Fig.I.6. La variation de  $\mu_{eff}$  autour de la fréquence de résonance est indiquée dans Fig.I.6(a). Juste au-dessus  $\omega_0$  et jusqu'à  $\omega_{mp}$  (la fréquence de plasma magnétique), la perméabilité effective est négative. Écart de fréquence correspondant à l'absence de la propagation autorisée peut être observé dans le diagramme de dispersion représenté sur la Fig.I.6(b). L'apparition du résonateur split-ring a

ouvert la porte à la synthèse de la première des médias efficace MNG[3] et DNG[2]. En outre, il a été largement utilisé dans la mise en œuvre des différents types de médias efficaces, ainsi que lignes de transmission avec des caractéristiques métamatériaux contrôlables.

En raison des propriétés symétrique de la SRR, la polarisation croisée (excitation électrique des dipôles magnétiques et vice versa) est possible[6, 7,8]. Bien que cette réalité puisse représenter un inconvénient pour la synthèse de milieux isotropes, il n'est pas en général déterminant pour son application dans le dispositif planaire mise en œuvre.

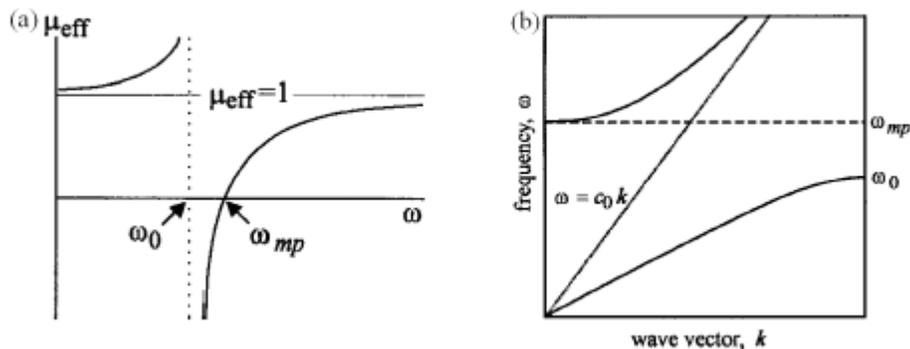


Fig.I.6 : (a) la perméabilité magnétique effectif d'un milieu de MNG. (b) diagramme de dispersion d'un milieu de MNG. La transmission est inhibée dans la gamme de fréquence  $\omega_0 - \omega_{mp}$ , où est  $\mu_{eff}$  négatif. Chiffres extraits de[3]

Sur la base de la SRR, de nombreuses SRR avec des topologies similaires ont été proposées. L'un d'eux est la complémentaire de SRR, la complémentarité résonateur split-ring (CSRR) (voir Fig.I.5(b)). Dans ce cas, les anneaux formant le résonateur sont gravés sur une surface métallique. Il apparaît d'appliquer l'idée du principe de Babin et à la SRR [9,10]. Selon ce principe, dans telles structures complémentaires, champs électriques et magnétiques, les courants, et échanger leurs rôles. Cela se produit de telle manière que, idéalement, à la fois les structures ont la même fréquence de résonance, mais, contrairement à la SRR, le CSRR représente des valeurs négatives de la permittivité diélectrique autour de sa résonance, ce qui peut être excité par moyen d'un champ électrique axial.

**I.4.4 Le principe de Babinet :**

La plupart des métamatériaux proposés sont fabriqués à base des résonateurs d'anneaux fendus (SRRs), ou à base des géométries semblables, pour avoir une perméabilité effective négative dans une certaine gamme de fréquence [14]. Le constant diélectrique négatif est généralement obtenu à partir d'une rangée de fils ou de plaques métalliques [13,4].

Récemment plusieurs circuits planaires unidimensionnels et bidimensionnels qui montrent le comportement main gauche ont été proposés [15,16], certains d'entre eux utilisent le concept des (SRRs) [5]. Le concept des (SRRs) est basé sur le principe de Babinet. L'élément clé de ce nouveau concept est le résonateur complémentaire d'anneaux fendus (CSRRs), L'image complémentaire du SRR.

**I. 5. PROPRIETE DES METAMATERIAUX****I. 5. 1. Définition**

Pour qu'un matériau présente un indice de réfraction négatif, il doit révéler à la fois une permittivité et une permittivité relatives négatives ( $n = \pm\sqrt{\epsilon_r\mu_r}$ ). Dans la nature, il n'existe aucun matériau de ce type. Il en existe bien présentant des matériaux de permittivités négatives (les plasmas, les métaux dans l'infrarouge), et de perméabilités négatives (Ferrite et ferromagnétiques près de la résonance gyromagnétique), mais aucun ne présente les deux phénomènes simultanément.

**I. 5. 2. Les équations de Maxwell**

Avant de considérer des phénomènes plus complexes, il est utile d'étudier le concept le plus simple de la propagation des ondes EM. Dans toute cette dissertation, on assume que tous les milieux sont linéaires (les propriétés ne dépendent pas des champs électriques et magnétiques), homogènes (les propriétés ne dépendent pas de la position de fonctionnement), dispersifs (les propriétés dépendent de la fréquence) et isotropes (aucun effet de polarisation). Les champs EM sont décrits par les équations de Maxwell respectant les relations des conditions aux limites.

Les équations de Maxwell dépendant du temps sont décrit par :

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (I. 1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (I. 2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \quad (\text{I.3})$$

$$\nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{J}(\mathbf{r}, t) + \frac{\partial \mathbf{D}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \quad (\text{I.4})$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{r}, t) = \varepsilon(t) * \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \int_{-\infty}^t \varepsilon(t-t') \mathbf{E}(\mathbf{r}, t') dt' \quad (\text{I.5})$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \mu(t) * \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \int_{-\infty}^t \mu(t-t') \mathbf{H}(\mathbf{r}, t') dt' \quad (\text{I.6})$$

Où  $\mathbf{E}$  est le champ électrique,  $\mathbf{D}$  est le déplacement électrique,  $\mathbf{H}$  est le champ magnétique,  $\mathbf{B}$  est l'induction magnétique,  $\rho$  est la densité de charge libre et  $\mathbf{J}$  est la densité de courant. Pour la propagation des ondes dans un système optique, les milieux ne présentent aucune charges libres ou courant de conduction c.-à-d,  $\rho = 0$  et  $\mathbf{J} = 0$ .

Les équations (I.1) et (I.4) deviennent :

$$\nabla \cdot \mathbf{D}(\mathbf{r}, t) = 0 \quad (\text{I.7})$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \frac{\partial \mathbf{D}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \quad (\text{I.8})$$

La constante diélectrique et la perméabilité sont généralement définies dans le domaine de fréquence. En utilisant la transformée de Fourier :

$$f(\omega) = \mathfrak{F}_t[f(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (\text{I.9})$$

$$f(t) = \mathfrak{F}_t^{-1}[f(\omega)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (\text{I.10})$$

Nous trouvons  $\varepsilon(\omega) = \mathfrak{F}_t\{\varepsilon(t)\}$ ,  $\mu(\omega) = \mathfrak{F}_t\{\mu(t)\}$ , où le  $\varepsilon(\omega)$  et le  $\mu(\omega)$  sont respectivement, la constante diélectrique et la perméabilité liées à la fréquence. Afin de définir correctement la propagation des ondes nous avons besoin également des relations constitutives dans le domaine fréquentielle. Dans le cas des milieux linéaires, homogènes, isotropes, et en prenant la transformée de Fourier des équations constitutives pour les méta-matériaux des équations (I.5) et (I.6), nous obtenons :

$$D(\mathbf{r}, \omega) = \varepsilon(\omega)E(\mathbf{r}, \omega) \quad (\text{I.11})$$

$$B(\mathbf{r}, \omega) = \mu(\omega)H(\mathbf{r}, \omega) \quad (\text{I.12})$$

Dans le domaine de fréquence, les équations de Maxwell. (I.3) et (I.4) peuvent être écrites comme :

$$\nabla \times H(\mathbf{r}, \omega) = j\omega\varepsilon(\omega)E(\mathbf{r}, \omega) \quad (\text{I.13})$$

$$\nabla \times H(\mathbf{r}, \omega) = j\omega\varepsilon(\omega)E(\mathbf{r}, \omega) \quad (\text{I.14})$$

En cette dissertation nous prévoyons de traiter les champs harmoniques avec une variation de temps de forme  $e^{jt\omega}$ . Définissant le vecteur de phase correspondant

$F(\mathbf{r}, \omega) = \Re\{F(\mathbf{r}) e^{jt\omega}\}$ , où  $F$  ne représente aucune quantité physique dans les équations (I.9) à (I.12), les équations de Maxwell deviennent

$$\nabla \cdot E(\mathbf{r}) = 0 \quad (\text{I.15})$$

$$\nabla \cdot H(\mathbf{r}) = 0 \quad (\text{I.16})$$

$$\nabla \times E(\mathbf{r}) = -j\omega\mu(\omega)H(\mathbf{r}) \quad (\text{I.17})$$

Pour l'onde plane la solution est de la forme de  $e^{r\mathbf{k}j}$ , et en suivant les lois algébriques, les équations de Maxwell dans le domaine de fréquence deviennent :

$$\mathbf{k} \times E(\mathbf{r}) = \omega\mu(\omega)H(\mathbf{r}) \quad (\text{I.18})$$

$$\mathbf{k} \times H(\mathbf{r}) = -\omega\varepsilon(\omega)E(\mathbf{r}) \quad (\text{I.19})$$

Où  $\mathbf{k}$  est le vecteur de propagation des ondes.

### **I. 5. 3. Le vecteur de Poynting**

Pour le  $\varepsilon < 0$ ,  $\mu < 0$ , les équations. (I.18) et (I.19) montrent que le vecteur de propagation, le champ électrique et le champ magnétique forme un système de main gauche ; par conséquent le nom LHM.

$$S(\mathbf{r}) = E(\mathbf{r}) \times H(\mathbf{r}) \quad (\text{I.20})$$

Le flux d'énergie lié à la propagation des ondes est noté par le vecteur de Poynting comme

$$E = \hat{\mathbf{p}}e^{-j\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} \quad (\text{I.21})$$

$$H = \frac{1}{\omega\mu}(\mathbf{k} \times \hat{\mathbf{p}})e^{-j\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} \quad (\text{I.22})$$

$$\Rightarrow \langle S \rangle = \Re\{E \times H^*\} = \frac{1}{\omega\mu} \hat{\mathbf{p}} \times (\mathbf{k} \times \hat{\mathbf{p}}) = \frac{1}{\omega\mu} [(\hat{\mathbf{p}} \cdot \hat{\mathbf{p}})\mathbf{k} - (\hat{\mathbf{p}} \cdot \mathbf{k})\mathbf{k}] = \frac{\mathbf{k}}{\omega\mu} \quad (\text{I.23})$$

Où  $\langle S \rangle$  est le vecteur de Poynting moyen instantané. Ce résultat prouve que le vecteur de Poynting moyen est dans la direction opposée du vecteur de propagation des ondes dans un LHM. La figure I.7 (a), (b) montre les orientations des vecteurs EM pour les matériaux droitier et LHM, respectivement. Le vecteur de Poynting est toujours dirigé à partir de la source de rayonnement. Mais le vecteur de propagation d'onde est orienté vers le sens opposé de la source pour LHM et à partir de la source pour RHM. Nous pouvons dire que les fronts d'onde de phase fonctionnent vers l'arrière dans LHM.

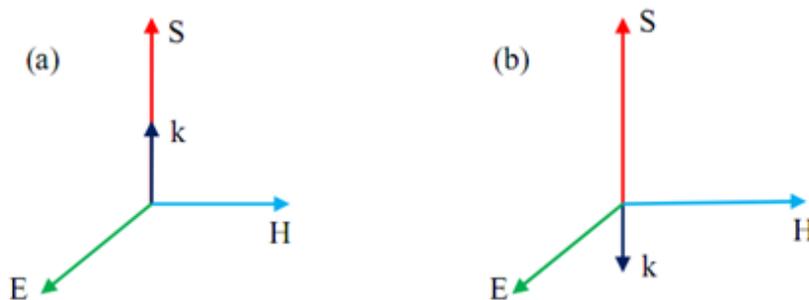


Figure I.7. Le champ électrique  $E$ , le champ magnétique  $H$ , le vecteur de propagation  $k$  et le vecteur Poynting dirigent  $S$  pour la propagation des ondes électromagnétique (a) RHM ( $\epsilon > 0, \mu > 0$ ) (b) LHM ( $\epsilon < 0, \mu < 0$ ).

## I. 6. LES PHENOMENES DUS AUX METAMATERIAUX

### I.6.1. L'inversion de la loi de Snell-Descartes

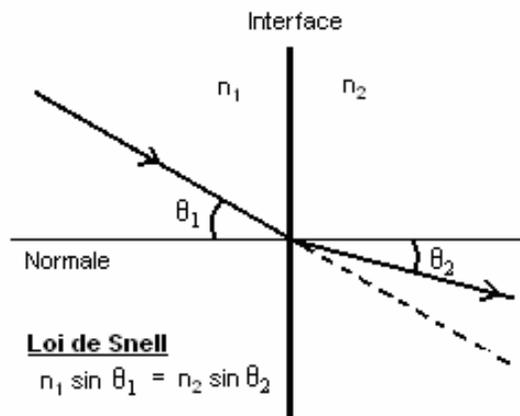


Figure I.8. Réfraction de la lumière et loi de Snell.

L'indice de réfraction  $n$  est le rapport entre la vitesse de la lumière dans le milieu en question et celle dans le vide, donc  $n = c_0/c$ , où  $c_0$  et  $c$  sont les vitesses de la lumière dans le vide et le milieu, respectivement. Plus  $n$  est grand, plus petite est la vitesse de la lumière.

L'indice de réfraction dépend de la structure microscopique du milieu dans lequel la lumière se propage. Les physiciens, en calculant théoriquement cet indice à partir des équations de Maxwell, ont pu trouver que  $n^2 = \epsilon\mu$ , où  $\epsilon$  est la permittivité électrique relative du matériel et  $\mu$  est sa perméabilité magnétique relative. Le paramètre  $\epsilon$  est indicatif de la force d'interaction entre le champ électrique et les dipôles électriques des atomes, tandis que la perméabilité  $\mu$  est reliée à la force d'interaction entre le champ magnétique et les dipôles magnétiques. Dans la vaste majorité des matériaux,  $\epsilon$  et  $\mu$  prennent des valeurs plus grandes ou égales à 1, ce qui fait que  $n$  est habituellement plus grand que 1, et donc la lumière est plus lente dans un matériau que dans le vide. Par contre, lorsque ces deux paramètres sont tous les deux négatifs, il faut pour des raisons mathématiques et techniques que l'indice  $n$  prenne une valeur négative. Le méta-matériau est justement un milieu où  $n < 0$ .

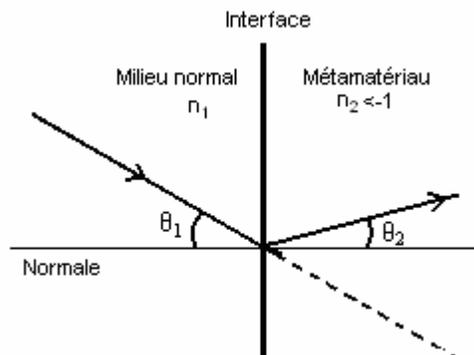


Figure I.9. Réfraction dans un matériau d'indice négatif (métamatériau).

Par la loi de Snell, comme conséquence nous obtenons un angle de réfraction négatif, comme illustré à la figure (1.9). C'est un petit détail, direz-vous, mais les conséquences sont importantes. Mais avant de donner les applications, soulignons qu'il est en pratique très difficile de façonner un méta-matériau. La Nature produit déjà plusieurs matériaux qui ont  $\epsilon < 0$  – les plasmas sont des exemples -- mais  $\mu < 0$  ne se produit que dans des structures artificielles.

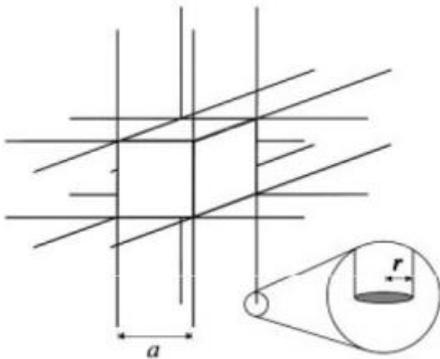
Cela explique le long intervalle de temps entre la prédiction théorique de Veselago et la création d'un méta-matériau. Récemment, l'équipe de Smith et Schultz ont construit un système de maillage métallique dans lequel la perméabilité magnétique est effectivement négative. Lorsque combiné avec un plasma, le résultat global est un méta-matériau.

Dans un matériau artificiel comme le méta-matériau, aussi longtemps que la texture (le maillage) est sur une échelle beaucoup plus petite que la longueur d'onde de la lumière, le matériau se comporte comme un matériau uniforme et homogène comme il se doit. Il est donc plus facile de fabriquer un méta-matériau pour les longues longueurs d'ondes comme les micro-ondes. Dans l'optique visible, où la longueur d'onde est d'un micromètre, c'est un tour de force. Les méta-matériaux actuels fonctionnent, au mieux, dans la région infrarouge du spectre.

### I. 6. 2. Permittivité Négative

- Pour les métaux cette condition est remplie en dessous de la fréquence plasma, mais dans l'infrarouge l'absorption est trop importante.

- Réseau de fils métalliques de rayon  $r$  disposés sur un réseau carré de pas  $a$  :



– Densité équivalente d'électrons :  $n_{eq} = n\pi r^2/a^2\theta_{t.LMH} = -\theta_{t.RMH}$

– La masse effective des électrons est modifiée par le couplage inductif entre les fils :

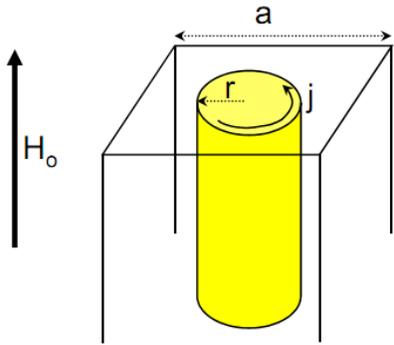
$$m^* = 1/2 \mu_0 r^2 e^2 n \ln(a/r) \quad (I. 24)$$

- L'expression de la fréquence plasma devient :

$$\omega p^2 = \frac{n_{eq} e^2}{m^* \epsilon_0} = 2\pi c^2 \cdot [a^2 \ln(a/r)] - 1 \quad (I. 25)$$

- Il est possible d'avoir une permittivité négative avec peu d'absorption même dans l'IR lointain et les micro-ondes.

Réponse 'magnétique' de tiges métalliques :



- $H_{moy} = H_0 + j - (\pi r^2 / a^2) \cdot j$
- Loi d'induction de Faraday :

$$-\pi r^2 \mu H_{moy} / dt = 2 \pi r \rho j$$

- $\mu_{eff} = B_{moy} / \mu_0 H_{moy} = 1 - \frac{\pi r^2 / a^2}{1 + i 2 \rho / \omega r \mu_0} \mu_{eff} \neq 0, \text{ mais } 0 < \mu_{eff} < 1 \quad (I.26)$

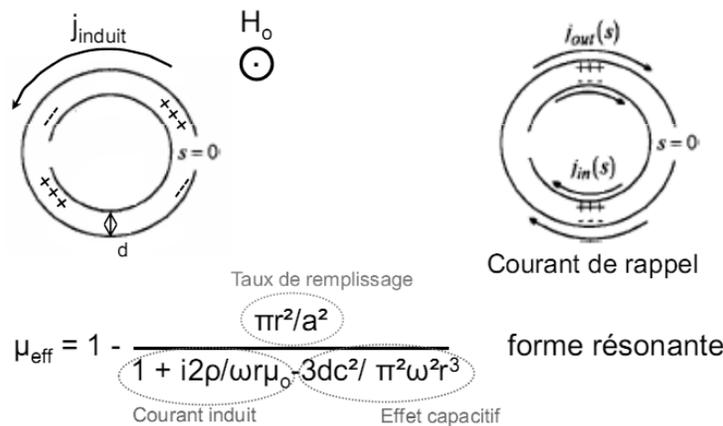
### I. 6. 3. Perméabilité Négative

- Il faut rajouter une force de rappel sur le courant induit (effet 'capacitif').

(1) On coupe la tige pour stopper le courant induit

(2) On place une deuxième tige coupée concentrique afin d'ajouter une force de rappel grâce aux charges créées par le courant induit.

- On utilise en fait des anneaux.



**I. 6. 4. Inversion D'Effet De Doppler Et De Rayonnement De Cerenkov**

L'effet Doppler autrement appelé l'effet RADAR est le décalage de fréquence d'une onde acoustique ou électromagnétique entre la mesure à l'émission et la mesure à la réception lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie au cours du temps.

Parmi les conséquences des métamatériaux sur les lois de la physique, l'effet Doppler est inversé ce qui veut dire que il y a inversion du décalage fréquentiel.

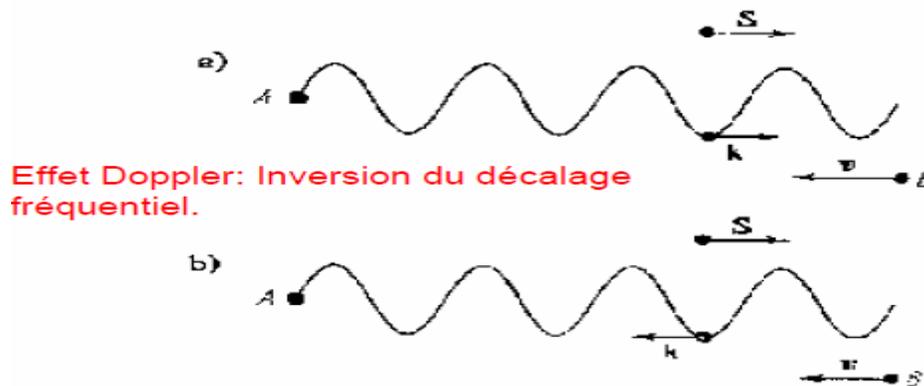


Figure I.10. a) l'effet Doppler dans un milieu main droite. b) l'effet Doppler dans un milieu main gauche ou A représente la source des radiations et B le récepteur.

En outre, Veselago a prouvé que le rayonnement de Cerenkov est inversé dans un milieu de main gauche. En effet l'effet Cerenkov est un phénomène similaire à une onde de choc, produisant un flash de lumière qui a lieu lorsqu'une particule chargée se déplace dans un milieu avec une vitesse supérieure à la vitesse de la lumière dans ce milieu (il faut garder à l'esprit que la vitesse de la lumière dans le vide est toujours supérieure à celle de la particule).

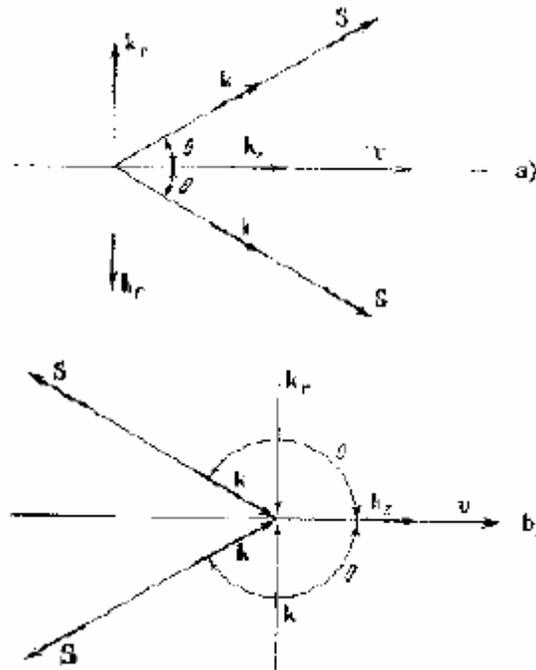


Figure I.11. Inversion de l'effet de Cerenkov.

**I. 6. 5. Vitesse de groupe et vitesse de phase**

Deux quantités importantes dans la propagation des ondes sont la phase et les vitesses de groupe. La vitesse de phase des surfaces de la phase constante, (ou des fronts des ondes)  $k \cdot r = \cos st$  est indiquée par

$$v_p = \frac{\omega}{k} \hat{k}, \left( \hat{k} \frac{k}{|k|} \right) \tag{I. 27}$$

Où  $k$  est le nombre des ondes,  $\lambda$  est la longueur d'onde dans le milieu,  $C$  c'est la vitesse de la lumière dans le vide, et  $n$  est l'indice de réfraction. Puisque la fréquence est une quantité positive  $k = 2\pi/\lambda = \sqrt{\epsilon}\sqrt{\mu}\omega = n \omega/c$ , nous pouvons dire que la vitesse de phase dans un LHM ( $n < 0$ ) est de sens opposé avec la vitesse de phase dans RHM ( $n > 0$ ).

La vitesse de groupe est la propagation de l'enveloppe du paquet d'ondes, est définie comme

$$v_g = \nabla_k \omega = \frac{\partial \omega}{\partial k_y} \hat{a}_y + \frac{\partial \omega}{\partial k_z} \hat{a}_z \quad (I.28)$$

Où le  $\nabla_k$  est le gradient du  $\omega$  dans l'espace de vecteur d'onde. Dans les milieux linéaires, isotropes et non dispersifs (sans absorption), la vitesse de groupe est égale à la vitesse d'écoulement d'énergie liée à la direction du vecteur de Poynting, qui ne dépend pas des propriétés matériaux. Les vitesses de groupe et d'énergie ne sont pas égales en présence de l'absorption ou en cas de dispersion anormale. Pour le cas des matériaux isotropes sans perte la vitesse de groupe peut être écrite comme :

$$v_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} \frac{k}{|k|} \quad (I.29)$$

Combinant l'observation des directions de  $k$  et de  $S$  nous constatons que dans un LHM les vitesses de phase et de groupe sont des signes opposés et les fronts d'onde se propagent vers la source. La Figure (I.121) récapitule les vitesses de phase et de groupe pour un diélectrique isotrope homogène RHM et des matériaux de LHM.

$\epsilon > 0, \mu > 0$	$\epsilon < 0, \mu < 0$
$\vec{S} \cdot \vec{k} > 0$	$\vec{S} \cdot \vec{k} < 0$
$\vec{S} \cdot \vec{v}_g > 0$	$\vec{S} \cdot \vec{v}_g > 0$
$\vec{v}_g \cdot \vec{k} > 0$	$\vec{v}_g \cdot \vec{k} < 0$
$\vec{v}_p \cdot \vec{k} > 0$	$\vec{v}_p \cdot \vec{k} > 0$

Figure I.12. Vitesses de phase et de groupe pour RHM et LHM.

## I. 7. APPLICATIONS DES METAMATERIAUX

### I. 7. 1. La super lentille

Une des applications les plus spectaculaires du méta-matériau est la « superlentille ». Une lentille ordinaire focalise un faisceau lumineux incident en un seul point, le point focal, et permet ainsi

de reproduire l'image d'une source de lumière sur un écran (Figure 1.12 a). La focalisation est possible grâce à la réfraction du faisceau sur la forme courbe de la lentille.

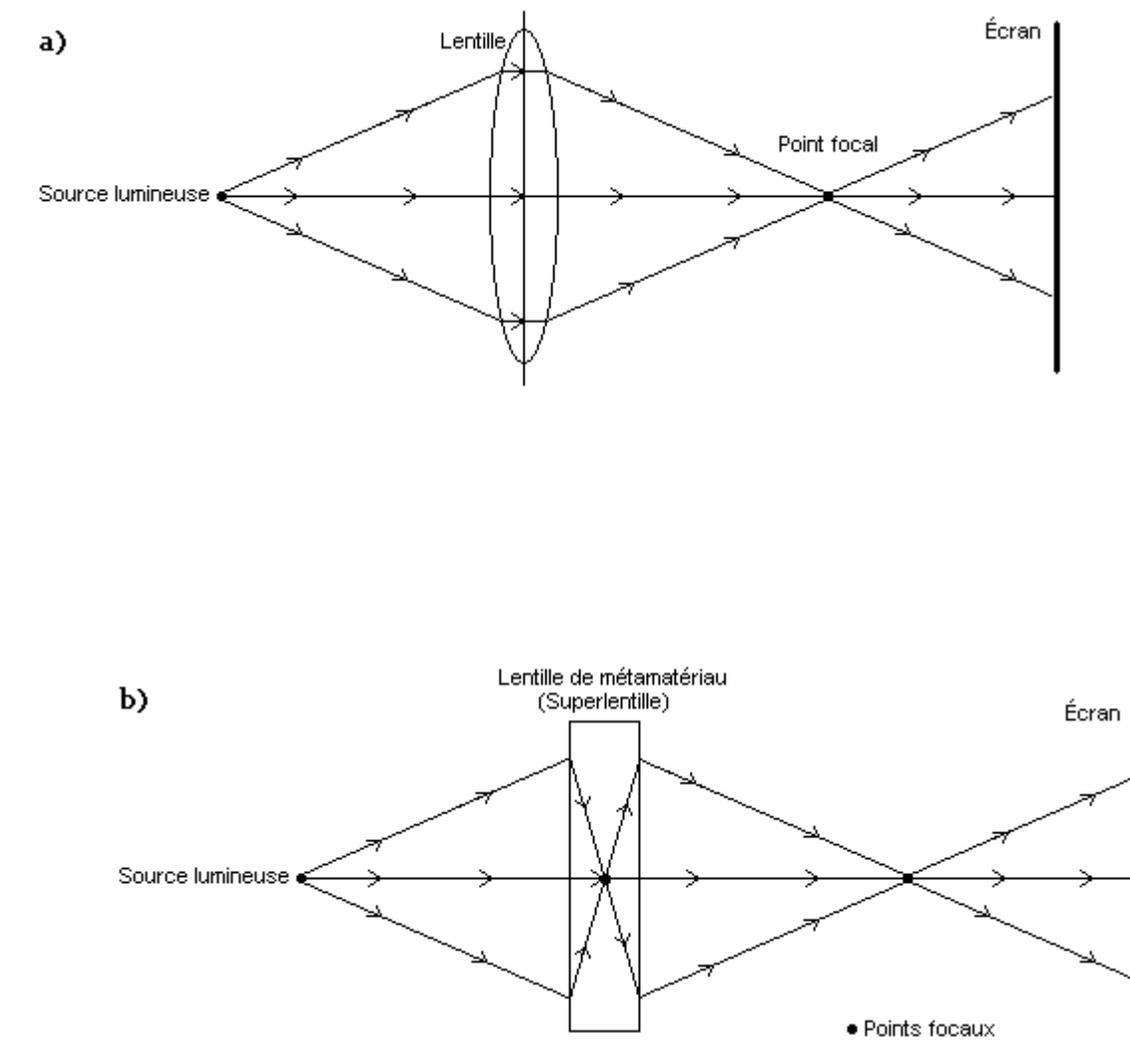


Figure I.13. Focalisation avec une lentille ordinaire (a) et une superlentille (b).

Une lentille faite à partir d'un métamatériau pourrait prendre une forme plane, comme montré la Figure (1.13 b). Parce que l'indice de réfraction est négatif, les rayons dévient vers l'intérieur, et si la lentille est suffisamment épaisse, un point focal se forme au milieu de celle-ci. Ce point focal interne n'a pas de grande utilité, mais un autre point focal se forme aussi à l'extérieur. On appelle "super lentille" ce dispositif car son pouvoir de résolution dépasse largement la résolution d'une lentille ordinaire. Étant plane, la super lentille élimine totalement

les aberrations sphériques de l'image que produit une lentille ordinaire. Les aberrations sphériques dans une lentille biconcave font en sorte que l'image devient un peu floue. Cela est dû à la forme de la lentille n'est pas optimale : la lumière passant par le bord de la lentille n'a pas le même point focal que la lumière passant près du centre.

La propriété la plus étonnante d'une super lentille est qu'elle peut atteindre une résolution plus grande que celle limitée par la limite de diffraction classique. Cette limite implique qu'il est impossible d'imager clairement une source lumineuse (active ou passive) qui est beaucoup plus petite que la longueur d'onde de la lumière utilisée. La partie de l'onde contenant l'information nécessaire pour obtenir cette résolution se dissipe très rapidement. Par contre, une superlentille amplifie ces parties de l'onde, permettant d'imager une source lumineuse beaucoup plus petite que la longueur d'onde de la lumière utilisée. La figure (1.14) montre un exemple frappant de cette différence entre une lentille classique et une superlentille, faite par l'Université de Berkeley.

Les chercheurs ont réussi à imager clairement le mot « NANO » écrit avec une épaisseur de ligne d'environ dix fois plus petite que la longueur d'onde de la lumière utilisé. Nous voyons qu'avec la lentille classique, nous obtenons une image plus floue qu'avec la superlentille.

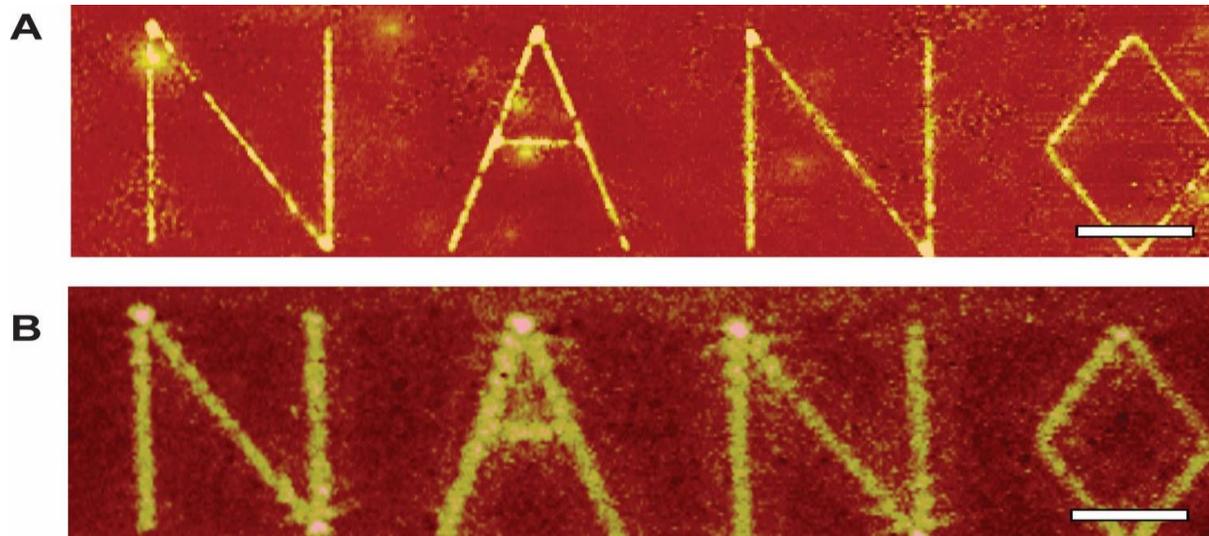


Figure I. 14. Image produite avec une super lentille (A) une et lentille ordinaire (B).

Il y a beaucoup d'avantages à avoir un meilleur niveau de résolution. Par exemple, il serait possible d'améliorer la capacité de stockage de disques optiques (les CD, DVD, etc.) puisque qu'il serait possible de graver beaucoup plus finement sur le disque. Dans le domaine de

la microscopie, nous serions capables d'observer à la lumière visible de très petits objets, tels les mitochondries à l'intérieur des cellules.

### **I. 7. 2. Le cloaking**

Le cloaking ou l'invisibilité, récemment ce sujet est devenu populaire grâce aux travaux de J.B. Pendry [18] et U. Lenhard[19]. En effet dans [20], il a été montré qu'il était possible de réaliser une sorte de cape d'invisibilité à l'aide des matériaux main gauche (MMG). Le principe est d'utiliser les MMG pour contrôler la lumière autour de l'objet à cacher de telle sorte que l'onde lumineuse après l'objet soit comme si elle n'avait pas traversé aurait ce dernier. Le défi est de réussir à faire un système large bande et surtout à faible perte afin d'obtenir une invisibilité sans effet de flou. Ce concept est particulièrement prometteur en termes d'applications, dans le domaine de la défense notamment. La conception et l'application des méta-matériaux furtifs nécessitent la connaissance précise des paramètres constitutifs ( $\epsilon$ ,  $\mu$ ) de ces structures et des pertes associées, la « cloak » idéale étant sans pertes. Le principe du cloaking tel que proposé par J. B. Pendry en 2006 [18] est illustré par la figure suivante :

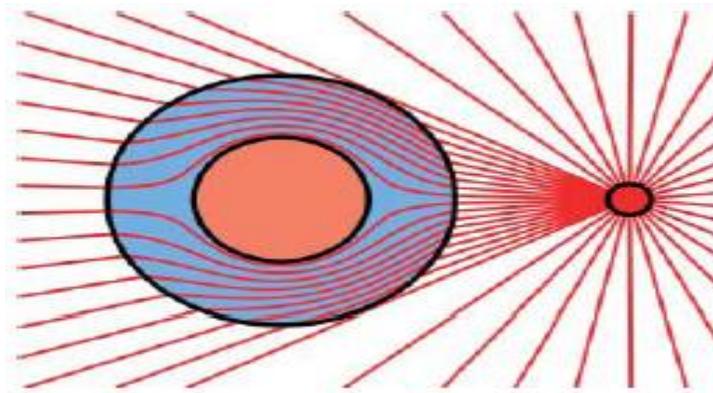


Figure I.15. Le principe du cloaking : contournement d'un obstacle à partir d'une source ponctuelle [18].

Le processus de conception de cloak est principalement basé sur une transformation de coordonnées de l'espace environnant l'objet à masquer. Cette transformation vise à définir des tenseurs de permittivité et de perméabilité qui vont permettre le guidage de l'onde électromagnétique autour de l'objet et la réduction de la section efficace de diffusion du

rayonnement arrivant sur l'objet (figure I.15). Ce résultat théorique a été immédiatement suivi d'une démonstration expérimentale de masquage d'un cylindre métallique aux longueurs d'ondes centimétrique [20].

### I. 7. 3. Application en technologie micro-ruban

A travers le temps, ce matériau est sous un grand nombre de travaux de recherche et de nombreuses applications sont découvertes tant dans le domaine optique, micro-ondes et des applications en technologies micro-ruban, comme les antennes a gain micro-ruban améliorée, le filtrage des signaux indésirables.

#### a) Les méta-matériaux pour les applications de filtrage

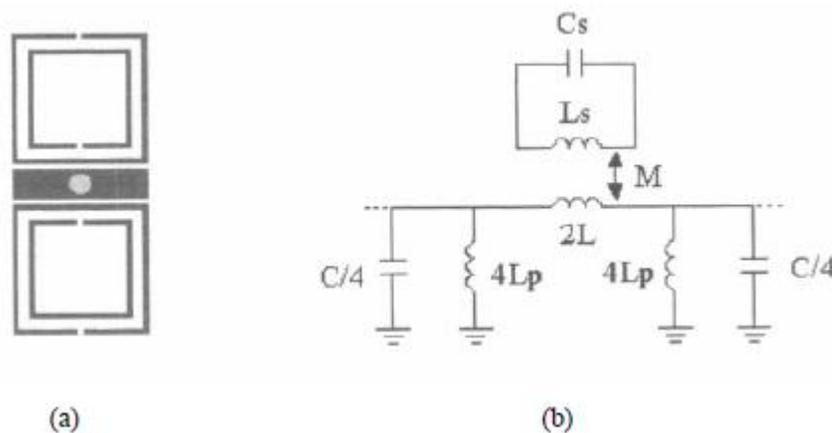


Figure I.16. (a) Cellule de base de la ligne micro ruban LHM (face supérieure), (b) Circuit équivalent du modèle.

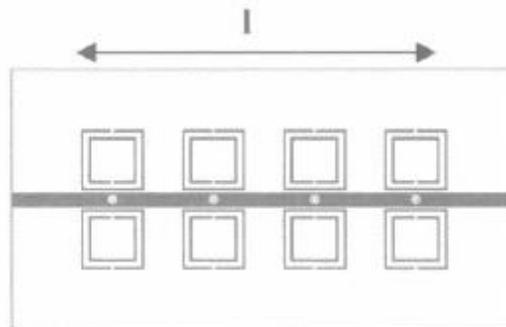


Figure I. 17. Plan d'une structure LH MMT en microruban.

En raison de la sélectivité élevée des structures SRR, le méta-matériau main gauche a été souhaité d'être construit en tant que filtres. Comme l'a démontré dans [21], les structures SRR ont été chargées périodiquement et gravé à proximité de la bande de chef d'orchestre et par des trous (figure 1.16). Comme indiqué précédemment, ces SRR fournissent la caractéristique de perméabilité négative dans le milieu dans une bande étroite au-dessus de leur fréquence de résonance, tandis que les vias agissent comme inducteurs shunt connecté connus sous le nom de la structure TW qui représente la propriété de la permittivité négative.

La noblesse de ce matériau ainsi que ces propriétés extraordinaires nous ont donné raison de penser à exploité ces derniers, et c'est ce qui constitue notre travail dans les chapitres suivants.

## I. 8. CONCLUSION

Depuis les années 2000, les matériaux « mains gauches » (LHM : LeftHandedMaterials) introduits par Veselago, ont fait couler beaucoup d'encre grâce aux travaux fondateurs de Pendry. Un effet de réfraction négative, propriété spécifique de ces matériaux, a été mis en évidence expérimentalement dans la bande des microondes et ce résultat a été reproduit plusieurs fois. La structure ayant permis d'obtenir ces effets probants est réalisée à l'aide d'une architecture de type réseau régulier utilisant deux types de motifs métalliques : des particules SRR et des réseaux de fils métalliques. Le métamatériau est constitué par l'association de 2 réseaux bi-périodiques imbriqués qui permettent de générer l'équivalent d'un milieu à indice négatif. En effet, le réseau de fils métalliques est réglé pour obtenir un comportement de type plasma avec une large bande dans laquelle la partie réelle de la permittivité est négative. La valeur négative de la perméabilité effective est réalisée grâce aux particules SRR qui se comportent comme des résonateurs magnétiques. Ainsi dans la zone de résonance des SRR on obtient une bande de fréquence où la perméabilité effective devient négative.

Une des difficultés apparaît donc clairement : les deux paramètres électromagnétiques  $\epsilon$  et  $\mu$  sont simultanément négatifs sur une bande de fréquences malheureusement étroite (à cause de la résonance magnétique). Un autre problème a été clairement mis évidence ; la structure est très sensible aux pertes ohmiques et diélectriques. Pour cela, nous allons nous pencher de manière plus profonde dans les différentes approches de la conception d'un métamatériau afin d'illustrer les lacunes de chacune d'elles.

## **Chapitre II :Les absorbants**

**1. Introduction**

Les absorbants actuels sont issues des recherches débutées durant la seconde guerre mondiale afin de se cacher des premiers radars. Les premières applications des absorbants étaient limitées, se cantonnant à réduire tant que possible la signature des avions et des périscopes de sous-marins tout en essayant de ne pas augmenter leur masse. Leur utilisation s'est aujourd'hui diversifiée à d'autres applications notamment et Compatibilité Electromagnétique (CEM). Nous allons présenter les différents absorbants classiques et commerciaux répartis en plusieurs catégories :

diélectriques, structuraux, résonants, comportant des circuits analogiques, adaptatifs et magnétiques. Nous abordons également les récentes avancées sur de nouveaux matériaux et de nouvelles techniques.[22]

Les absorbeurs d'ondes électromagnétiques (EM) sont des dispositifs que le rayonnement incident aux longueurs d'onde de fonctionnement peut être efficacement absorbée, puis transformée en la chaleur ohmique ou d'autres formes d'énergie. Ainsi, ni l'un ni l'autre transmission ni de réflexion est produite lorsqu'une onde passe à travers un absorbeur parfait. Absorption traditionnelle Les couches sont faites de matériaux à fortes pertes intrinsèques, mais les absorbeurs d'EM qui nous concernent sont principalement façonnés à partir de métaux nobles, comme l'or, l'argent ou le cuivre. Les mécanismes permettant de construire des absorbeurs d'EM sont polyvalents. Les premières recherches sur les absorbeurs EM remontent à 1902, lorsque Wood a observé les creux anormaux dans la réflexion spectres de réseaux métalliques sous illumination d'un blanc source de lumière [23]. Ces types d'absorbeurs métalliques sont composés de réseaux d'éléments métalliques avec périodicité sur l'ordre de la longueur d'onde incidente à l'optique fréquences [24-27]. Elles absorbent la lumière principalement en raison de l'excitation des polaritons plasmoniques de surface (ou SPP, pour court), qui sont des oscillations collectives d'électrons libres supporté à l'interface entre le métal et le diélectrique [28-29]. En raison de l'excitation des SPP, l'énergie incidente peut être étroitement emprisonné dans la région de champ proche de sorte que la lumière incidente peut être entièrement absorbée à certaines longueurs d'onde par les structures métalliques/diélectriques avec des géométries. Il existe différents types de configurations utilisés comme absorbeurs d'EM, tels que les grilles lamellaires

[30], des rainures convexes [31], des vides sphériques [32] et des réseaux de trous [33.34]. Ces absorbeurs sont faits de métaux nobles, et associé à la plasmonique qui contient des les phénomènes physiques associés à des phénomènes planaires ou localisés SPPs [35.36]. Les métamatériaux sont des assemblages artificiels de des éléments de taille inférieure à la longueur d'onde (c'est-à-dire beaucoup plus petits que la longueur d'onde des ondes incidentes) [37]. Elles sont souvent décrites comme des matériaux efficaces [38] et une telle description est très pratique pour une compréhension intuitive de la phénomène. La permittivité et la perméabilité effectives peuvent être désignés de zéro à l'infini, et par conséquent, diverses propriétés uniques qui ne sont pas disponibles dans la nature peut enfin être réalisé. Les dispositifs à base de métamatériaux en soi supporter une perte d'absorption en raison des parties imaginaires de d'indices optiques, dégradant les performances dans la plupart des des applications telles que l'imagerie à super-résolution, la détection, l'occultation, etc. Cependant, la perte d'absorption devient avantageux pour les absorbeurs d'EM, et une absorption parfaite peut être réalisée en concevant la géométrie de les éléments structurés [39]. En 2008, un absorbeur d'EM parfait basée sur les métamatériaux a été signalée pour la première fois à la régime de micro-ondes [40]. Depuis lors, les absorbeurs EM ont a été développée plus avant dans l'échelle des sous-longueurs d'onde profondes et peut toujours aspirer les radiations incidentes avec une quasi-unité absorptivité[41-52]. Aux fréquences optiques, les métamatériaux formés de sous-longueurs d'onde métalliques les structures sont parfois appelées métamatériaux plasmoniques lorsque l'excitation des modes SPP localisés est essentielle dans le processus d'absorption de la lumière [53,54]. Bénéficié de les technologies avancées de nanofabrication, Les absorbeurs d'EM à base de métamatériaux sont expérimentalement possible grâce à une miniaturisation accrue, une l'adaptabilité et une efficacité accrue Les absorbeurs d'EM basés sur des structures métalliques ont avantages distincts par rapport à leurs homologues. Dans différentes gammes de fréquences, ils ont différentes applications potentielles. Comme on le sait, Les dispositifs d'absorption sont des composants essentiels de l'énergie solaire les systèmes de récolte, qui ont fait l'objet d'une enquête sur le au cours du dernier demi-siècle. Jusqu'à présent, les différents types d'absorption solaire Des revêtements ont été inventés, y compris intrinsèques, absorbeurs multicouches, texturés à faible bande passante les semi-conducteurs, les revêtements composites métal-diélectrique, etc. [55-.59]. Aujourd'hui, les dispositifs de collecte de l'énergie solaire, les avec des nanostructures métalliques, sont des candidats prometteurs pour Récolter de l'énergie avec une efficacité accrue, un rayonnement solaire plus large et une moindre consommation de matériaux, et sont suscitant un intérêt général [60-

64]. Au micro-ondes fréquences, des dispositifs d'absorption, initialement composés d'un plan de masse métallique, une entretoise diélectrique et une résistance supérieure [65], ont été largement appliquées dans l'armée pour fournir dissimulation. Cependant, dans les conceptions modernes de micro-ondes les absorbeurs EM à base de métamatériaux sans les feuilles résistives ont des performances égales ou supérieures à ceux avec la feuille résistive . Selon la loi de Kirchhoff, un émetteur parfait est équivalent à un absorbeur. Ainsi, les émetteurs thermiques sélectifs peuvent être conçus basée exactement sur le même principe que celle de la sélectivité des absorbeurs aux fréquences infrarouges. En général, les semi-conducteurs les couches minces[66], les réseaux de semi-conducteurs [67] et le tungstène Les cristaux photoniques [68.69] sont utilisés pour composer des des émetteurs thermiques. Récemment, une série d'émetteurs thermiques ont été proposés sur la base de la sous-longueur d'onde métallique structures, car cette méthode introduit une plus grande liberté de adapter le spectre des émissions [70-71]. En outre, en qui traite des caractéristiques spectrales fines des absorbeurs EM, les chercheurs ont réussi à mettre en avant de nombreuses des configurations de biocapteurs à la sensibilité fortement accrue à la variation de l'indice de réfraction [72,73]. De plus, les récentes des études ont examiné comment obtenir des modulateurs EM basée sur l'absorption [74-75]. Cet examen vise principalement à décrire le principe de différents types d'absorbeurs EM à bande étroite ainsi que les diverses approches pour parvenir à la large bande/multibande absorbeurs. Il est mentionné que le champ d'application de notre travail est différent d'un article récent qui examinait principalement les recherches sur les absorbeurs d'EM à base de métamatériaux.

Les types d'absorbants électromagnétique :

Ce chapitre traite des différents types d'absorbants électromagnétiques qui existent. Les absorbants de type diélectriques, structuraux et magnétiques sont courants dans le commerce et sont accessibles au grand public. A l'inverse, les absorbants comportant des circuits analogiques et les absorbants adaptatifs sont réalisés pour des applications très précises car leur réalisation est complexe et leur coût de fabrication est important. Ces différents types de matériaux font encore l'objet d'études.

1. Absorbants diélectriques
2. absorbants structuraux, à adaptation d'impédance ,et en trouve :
  - a. Absorbants pyramidaux
  - b. Absorbants chargés progressivement
  - c. Absorbants à couches d'adaptation d'impédance
3. Absorbants résonants
4. Absorbants comportant des circuits analogiques
5. Absorbants adaptatifs
6. Absorbants magnétiques
7. Absorbants à métamatériaux

### **3.La Structure :**

La structure absorbante du métamatériau présentée ici est une structure résistive à deux couches de métamatériau Tableau des courbes de Hilbert..

La structure proposée ici a une taille de cellule unitaire de  $4,3 \text{ mm} \times 4,3 \text{ mm}$ . Courbe de Hilbert et la surface de PEC sont dans le plan XY et le vecteur K est le long du négatif Axe Z. Les inclusions sont des courbes de Hilbert de premier ordre dont la longueur de chaque côté est égale à  $3,7 \text{ mm}$  . Les inclusions étaient de  $2,96 \text{ mm}$  et  $3,4 \text{ mm}$  au-dessus du plan de la PEC. La largeur et la l'épaisseur des courbes de Hilbert sont respectivement de  $0,18 \text{ mm}$  et  $0,0196 \text{ mm}$  et La conductivité est de  $70 \text{ KSm}^{-1}$  (Graphite), ce qui donne  $40 \Omega \text{ mm}^{-1}$  de résistance par unité de longueur. L'intercalaire en polystyrène a été choisi pour sa faible permittivité, et le graphite pour son faible coût et un semi-conducteur facile à traiter. Les paramètres ont été optimisés grâce à l'optimisation dans le HFSS. La taille de la cellule unitaire n'est que de  $0,19\lambda \times 0,19\lambda$  à  $f_0$ , ce qui supprime les effets de la diffraction. La résonance d'une courbe de Hilbert dépend de la polarisation. Ainsi, pour avoir une bonne absorption pour les deux polarisations, deux couches de courbes de Hilbert Des orientations orthogonales sont

nécessaires, une pour chaque polarisation. Les orientations supérieure et inférieure Les inclusions permettent de faire résonner les polarisations  $E_x$  et  $E_y$ , respectivement, comme c'est le cas pour conduisant la courbe de Hilbert [76]. La nouvelle structure d'absorption présentée dans cet ouvrage combine avec succès les mérites d'absorbants traditionnels à base de courbes de remplissage de l'espace conducteur [77] et de circuits analogiques absorbants. Comme nous l'avons vu précédemment, une courbe de Hilbert résistive peut être considérée comme un sommet avec perte surface d'impédance équivalente à une surface de haute impédance en shunt avec une résistive ce qui se traduit par un faible RCS. Cette structure élimine la nécessité d'une feuille combinant une surface à résistive ou de toute en haute impédance élément, ce qui réduire considérablement la complexité des absorbants.

#### 4. ABSORBEURS DE MÉTAMATÉRIAUX À BANDE ÉTROITE

Les propriétés exotiques des métamatériaux ont inspiré les chercheurs du monde entier pour la conception et développement de divers absorbants à base de métamatériaux pour répondre à différents potentiels des applications allant des micro-ondes aux régimes de fréquences optiques. Dans cette section, au début Les conceptions des absorbants de métamatériaux ont été revues et, après de nouveaux développements dans le domaine des Les absorbants à bande étroite ont fait l'objet de discussions jusqu'à présent.

##### 4.1 Absorbant de métamatériaux à base de résonateur à anneau fendu (SRR)

En 2006, pour la première fois, une structure basée sur un résonateur en anneau divisé (SRR) a été théoriquement étudiée comme un absorbant de métamatériaux [26]. La disposition et l'unitéLes cellules aux dimensions géométriques sont représentées sur les figures 2.1 (a) et (b), respectivement. L'incidentle champ magnétique est le long de l'axe des y et il est perpendiculaire à un réseau de SRR, disposés périodiquementen avion XZ. Le réseau est placé à proximité d'une feuille résistive qui a été utilisée pour fournirla résistance de  $377 \Omega$  afin de faire correspondre l'impédance de l'absorbant avec l'espace libre similaireà l'écran traditionnel de Salisbury. La perte de retour S11 et la perte d'insertion S21 simulées sont indiquéesdans la figure 2.1 (c). S11 et S21 ont une valeur minimale à 2 Hz presque, ce quiindique la forte absorption à cette fréquence due au comportement de résonance de la structure.En raison de la disposition en pile de la structure, elle est d'une utilité limitée pour les applications planaires.La largeur de bande d'absorption n'est pas très importante, mais cette conception motive la poursuite des recherches enAbsorbants à base de SRR [71-73].

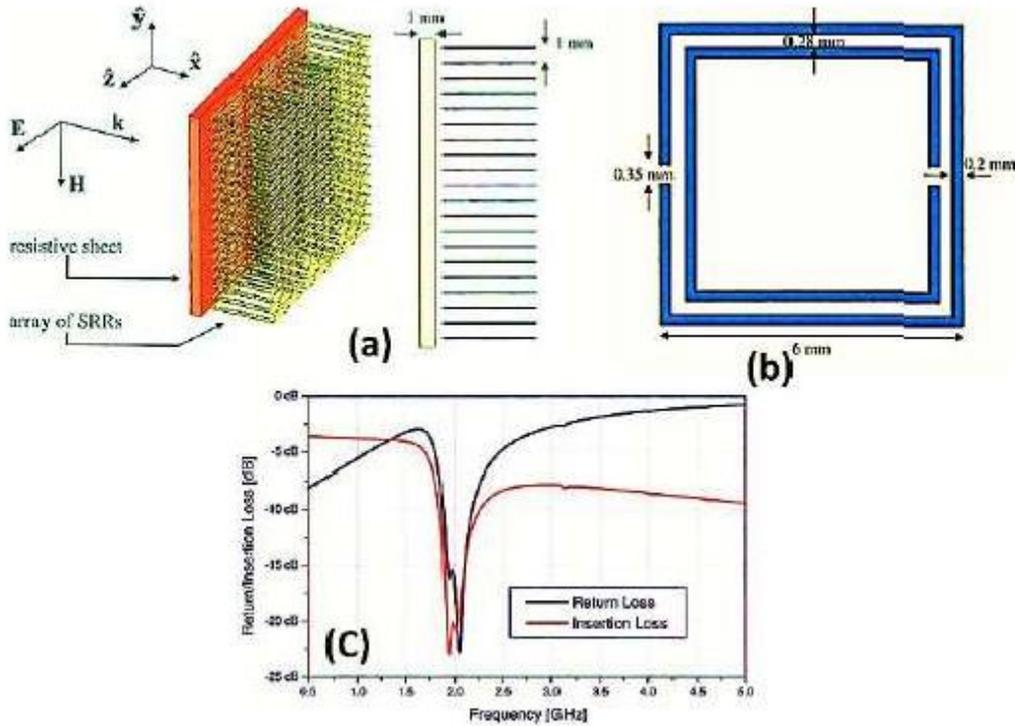


Fig. 2.1 Absorbant de métamatériaux basé sur le SRR (a) conception (b) conception de cellule unitaire (c) réponse simulée .

### 4.2 Absorbant de métamatériaux à base de résonateur annulaire électrique (ERR)

La difficulté de la mise en œuvre pratique des absorbants basés sur les RRF crée les exigences des structures absorbantes planes qui peuvent être facilement fabriquées. Cette exigence a servi à la conception et à la mise en œuvre du métamatériau basé sur le résonateur en anneau électrique absorbant [20]. La structure de l'absorbant est constituée de deux couches de résonateurs en métamatériau séparées par un substrat diélectrique FR-4 d'une épaisseur de 0,6 mm. La couche supérieure de l'absorbant est constituée d'un ERR et un fil coupé est conçu à la couche inférieure Fig. 2.2 (a).

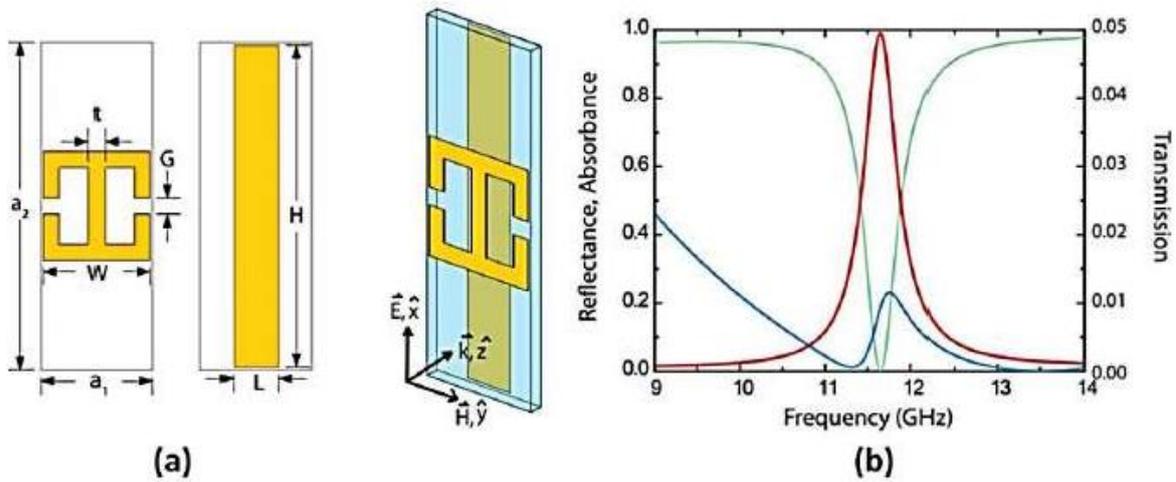


Fig. 2.2 (a) Conception de la cellule unitaire de l'absorbeur parfait de métamatériaux à la fréquence des micro-ondes (b) absorption simulée réponse.

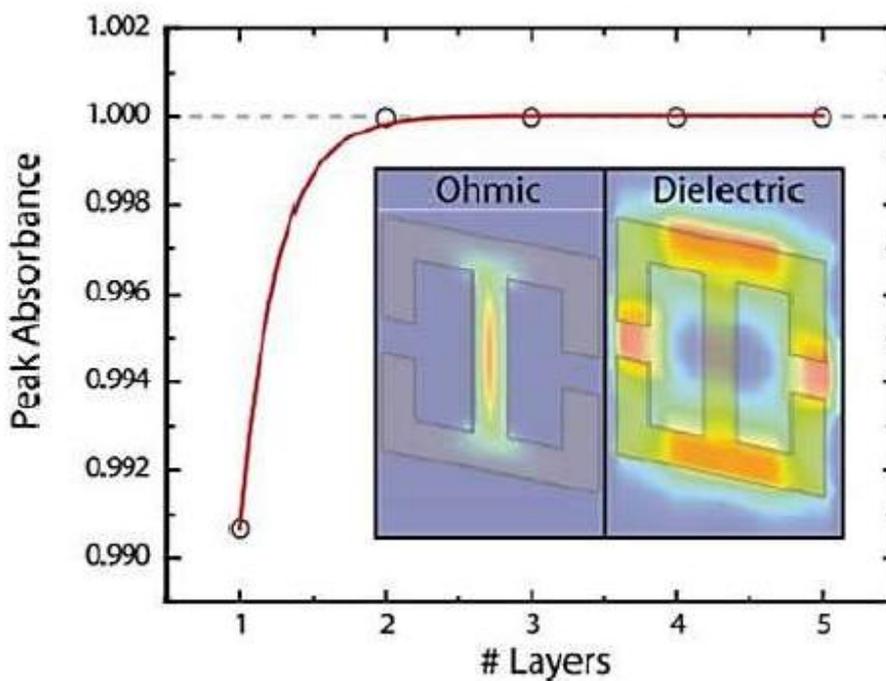


Fig. 2.3 Réponse d'absorption simulée pour plusieurs couches.

En outre, les chercheurs ont étudié rigoureusement le mécanisme de perte de l'absorbeur par et a postulé que la perte diélectrique est d'un ordre de grandeur supérieur à la perte ohmique

perte Fig 2.3. On observe que la région conductrice centrale fournit la perte ohmique, cependant, une perte diélectrique importante est observée entre les éléments du métamatériau à l'emplacement de champ électrique maximal [20]. Par conséquent, le diélectrique est le principal facteur de perte dans ce

Absorbeur de micro-ondes à base de métamatériaux. Cette première mise en œuvre d'un absorbeur de micro-ondes à base de métamatériaux.

L'absorbeur de micro-ondes est bientôt imité pour le régime de fréquence THz

.La structure consiste en un ERR comme la couche supérieure séparée de la couche inférieure du fil fendu par un diélectrique en polyimide Fig. 2.4. La

réponse simulée a montré une absorptivité de 98 % à 1,12 THz et le mécanisme d'absorption est le même que pour la conception de base de l'absorbeur , c'est-à-dire ERR et Le fil fendu se couple avec le champ électrique incident et le champ magnétique se couple avec le circulation de courants de surface antiparallèles dans les couches supérieure et inférieure. Un absorbeur similaire pour le régime de fréquence millimétrique a été proposé par quelques modifications des dimensions de la conception pour atteindre une absorption presque parfaite à près de 75 GHz .

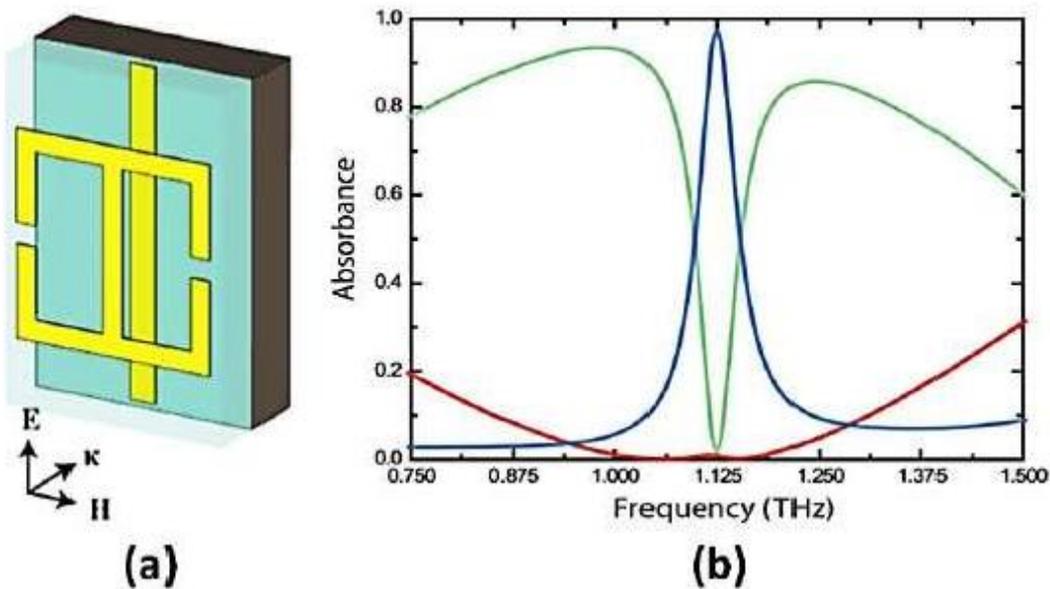


Fig. 2.4 (a) Conception de la cellule unitaire de l'absorbeur parfait de métamatériaux à la fréquence de THz (b) absorption simulée réponse.

Dans la conception de l'absorbeur basé sur l'ERR , un fil coupé est utilisé comme couche de terre et il y a donc transmission. Le sol métallique continu peut bloquer la transmission et il améliore l'absorption grâce à une meilleure adaptation de l'impédance avec les l'espace. L'absorbeur de métamatériaux avec une couche métallique continue au fond et un la structure métallique du résonateur en forme de croix sur le dessus a été conçue et expérimentée mis en œuvre. La réponse simulée a été signalée comme donnant une absorptivité de 97

% à la longueur d'onde de 6  $\mu\text{m}$ . Il est également signalé que la perte se produit principalement dans le diélectrique qui est conformément à la théorie postulée

dans les conceptions d'absorbants de métamatériaux pour les basses fréquences . Sur la base d'une approche similaire consistant à utiliser un support métallique continu et un absorbant à base d'ELC a été signalé comme le montre la figure 2.5 (a). La couche supérieure de la cellule unitaire est constituée d'un ELC résonateur et la couche inférieure est une couche métallique continue. Les dimensions de la couche métallique supérieure

sont  $a = 5 \text{ mm}$  ,  $d = 3,6 \text{ mm}$  ,  $l = 1,5 \text{ mm}$  ,  $l = 0,4 \text{ mm}$  et  $g = 0,2 \text{ mm}$ . Le haut et le

Les couches inférieures sont séparées par un diélectrique d'épaisseur. Le support métallique fournit transmission nulle, comme le montrent les résultats simulés de la figure 2.5 (b).

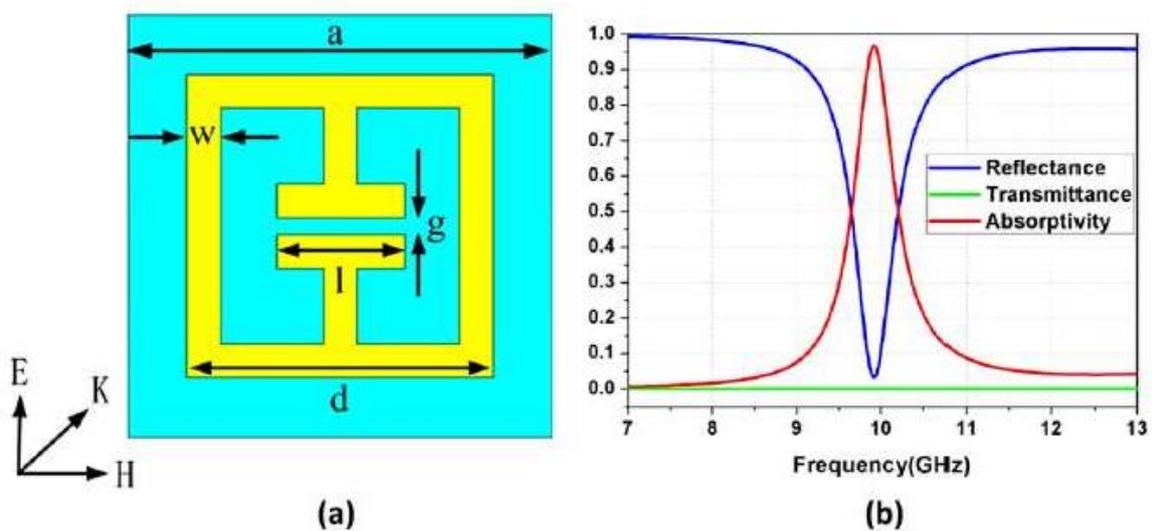


Fig. 2.5 (a) Absorbant basé sur la CLE avec une masse métallique continue et (b) sa réponse d'absorptivité .

En outre, un autre absorbant de micro-ondes à métamatériau à bande étroite avec un support métallique continu et une structure LC (ELC) légèrement modifiée, pilotée par un champ électrique, comme couche supérieure, comme le montre la figure. 2.6 (a) a été proposée .

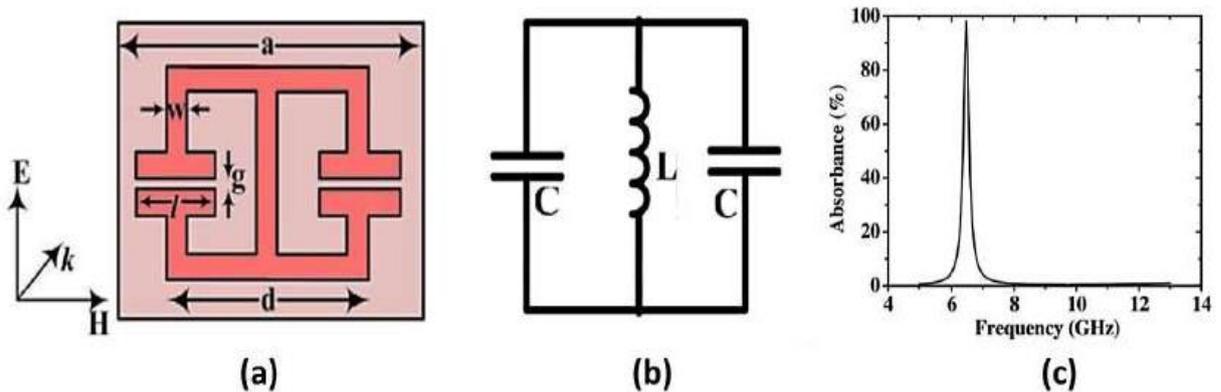


Fig. 2.6 (a) Conception de la cellule unitaire de l'absorbeur parfait de métamatériaux à la fréquence des micro-ondes (b) Circuit équivalent et (c) la réponse d'absorption simulée .

Le champ incident provoque un flux de courant à la surface supérieure qui produit une inductance et la Le champ stocké à l'intérieur des lacunes produit une capacité. La résonance est créée dans la structure par optimiser les dimensions de telle sorte

que l'absorbeur conçu se comporte parallèle circuit à la fréquence prévue pour l'onde électromagnétique incidente Fig. 2.6 (b). Le site La direction de l'onde électromagnétique incidente est perpendiculaire au motif

métallique de l'onde conception de l'a réponse simulée a montré une absorptivité de 98% à 6,46 GHz ig. 2.6 (c).

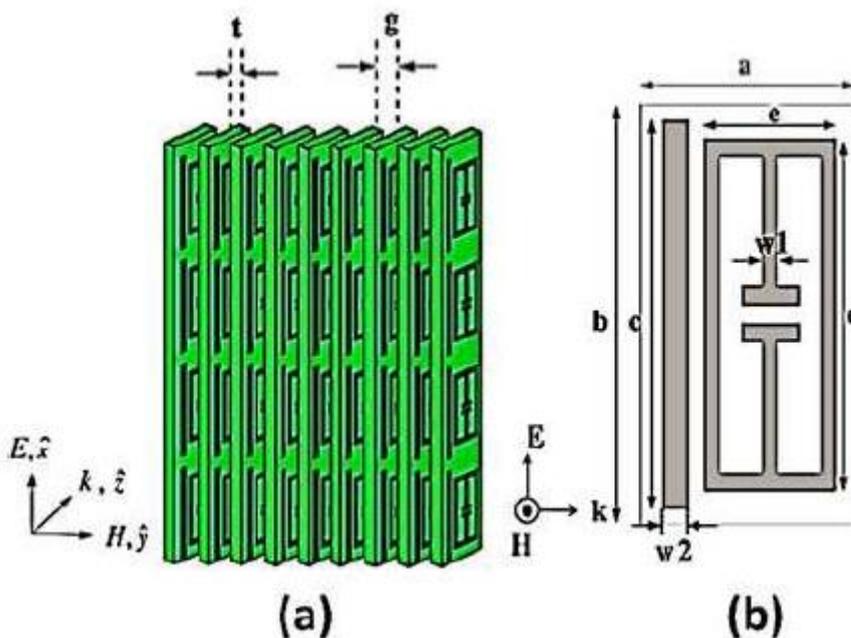


Fig. 2.7 (a) Réseau métallique de la structure de l'absorbeur placé orthogonalement à la direction de propagation (b) cellule unitaire

conception de l'absorbeur de métamatériaux par micro-ondes. Au lieu d'utiliser les absorbants standard basés sur l'ELC, une conception d'absorbeur consistant en des absorbants transversaux à fentes une plaque métallique continue comme couche inférieure, séparée par un FR4 Un substrat diélectrique a été proposé . Les effets de l'onde incidente sur les différentes conceptions des configurations d'absorbants électromagnétiques basées sur des surfaces à haute impédance pour la bande ultralarge à l'absorption à bande ultra-large sont signalés dans . D'autres formes ont également proposé comme alternative potentielle pour la conception d'absorbants à bande étroite à base de métamatériaux .

### **4.3 ABSORBEURS DE MÉTAMATÉRIAUX MULTIBANDES ET À LARGE BANDE**

Les premiers développements d'absorbants de métamatériaux dans les bandes de micro-ondes et de THz ont attiré une grande attention de la communauté scientifique. Par la suite, divers absorbants de métamatériaux de meilleure qualité avec la réponse d'absorption multibande et à large bande pour servir différentes applications potentielles telles que l'inband Réduction du RCS, applications des radars aéroportés au régime micro-ondes et imagerie de phase pour La détection des matières explosives à la fréquence THz, etc. a été proposée jusqu'à présent. Dans cette section présente les stratégies de conception de base pour développer le métamatériau multibande et à large bande Les approches visant à modifier un absorbant à bande étroite en un absorbant multibande et un absorbant L'absorbant à large bande peut être classé comme :

1. Combinaison de différentes structures résonantes dans une seule cellule unitaire.
2. Conception de structures multirésonantes.
3. Configuration de la conception multicouche.
4. Insertion d'inclusions magnétiques résonantes.
5. Incorporation des mêmes structures résonantes dans une seule cellule unitaire par mise à l'échelle de leurs dimensions.
6. Incorporation d'éléments groupés dans les résonateurs de métamatériaux.
7. Génération de modes d'ordre supérieur d'une structure résonante unique.

Les approches classées ci-dessus sont examinées ci-dessous à l'aide de différentes largeurs de bande des configurations telles que les absorbants de métamatériaux à double bande, multibande et large bande.

#### **4.3.1 Absorbants de métamatériaux à double bande et multibande**

Combiner les différentes structures de résonance dans une seule cellule unitaire pour obtenir des résonances multiples est l'une des toutes premières approches proposées pour améliorer la performance des les métamatériaux. Les différentes structures résonantes de la cellule unitaire résonnent séparément à de multiples fréquences comme représenté dans la figure 2.8. Diverses configurations géométriques ont également été a suggéré qu'ils peuvent être combinés pour obtenir des résonances multiples. Cette technique précoce permet d'atténuer les caractéristiques à bande étroite des métamatériaux résultant d'une réponse en fréquence multibande.

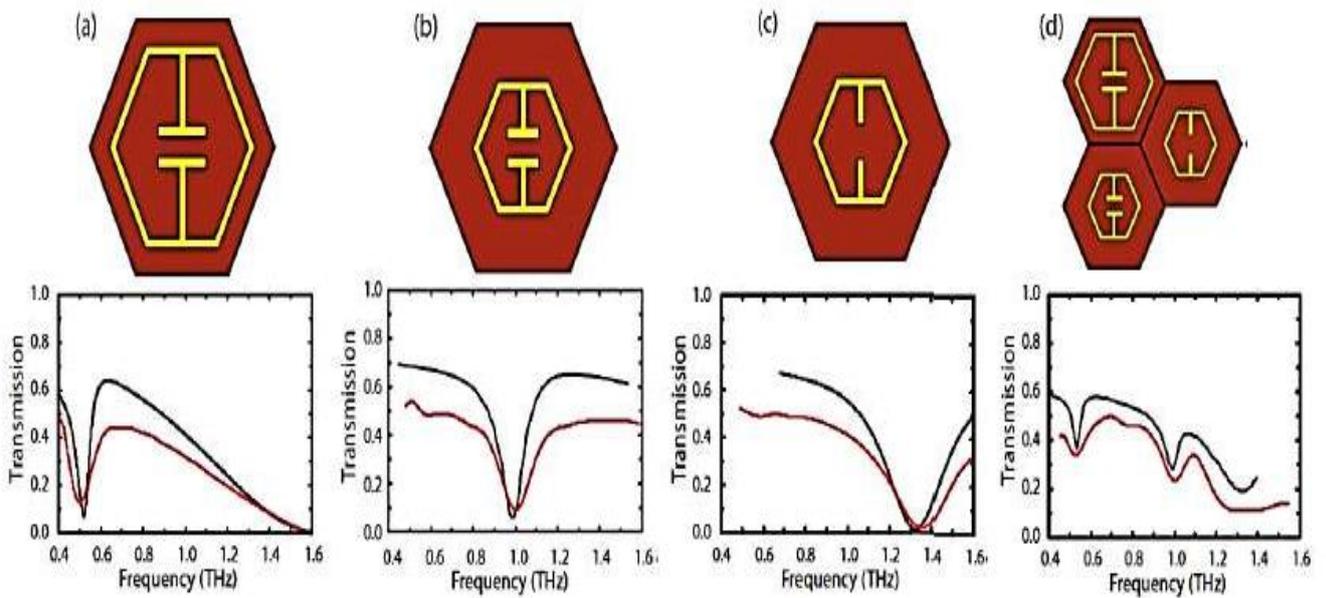


Fig. 2.8 Première démonstration expérimentale du mécanisme de structure multiple pour obtenir des pics de résonance multiples .

On a observé que la même approche était utilisée dans le régime de fréquence des micro-ondes .

La couche supérieure de la cellule unitaire est constituée de quatre résonateurs électriques à anneau fendu. La cellule unitaire

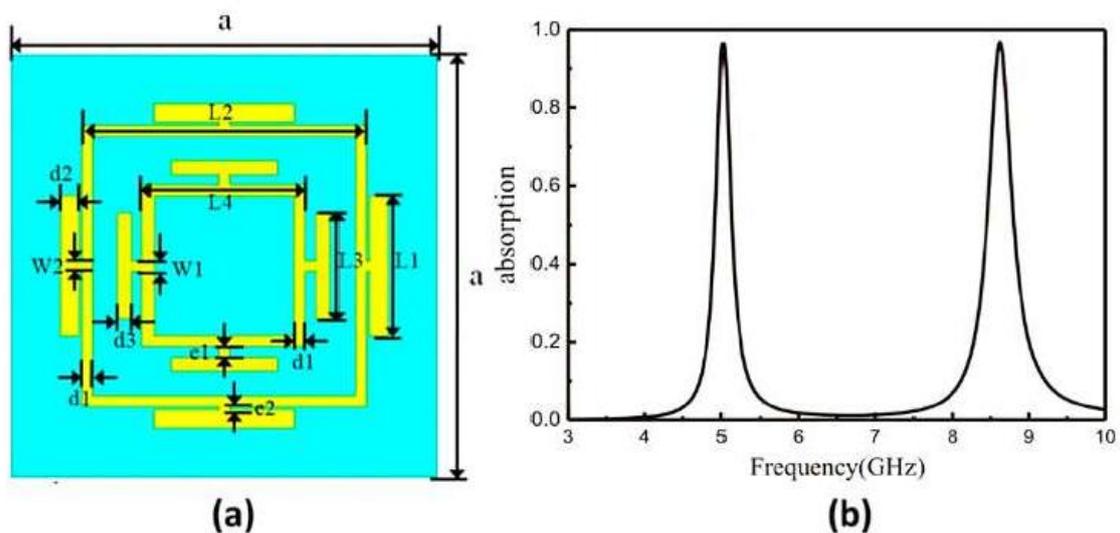


Fig. 2.10 (a) Conception de la cellule unitaire : absorbeur de métamatériaux à double bande avec des structures identiques encadrées les unes dans les autres et sa (b) réponse d'absorption .

Bien que de tels absorbeurs puissent fournir une absorption élevée à la résonance multiple mais elle nécessite des optimisations géométriques rigoureuses pour diminuer les couplages mutuels dans les entre les structures résonnantes

Sur la base de cette approche, un absorbeur de métamatériaux avec une réponse d'absorption à double bande en THz a été proposé dans [1], comme le montre la figure 2.12. C'est l'une des premières structures qui a été proposée et se compose de deux résonateurs électriques en anneau fendu reliés entre eux en une seule unité cellule. Ces deux résonateurs en anneau fendu sont constitués de différents types de fentes qui sont responsables pour générer deux pics d'absorption à 0,45 et 0,92 THz.

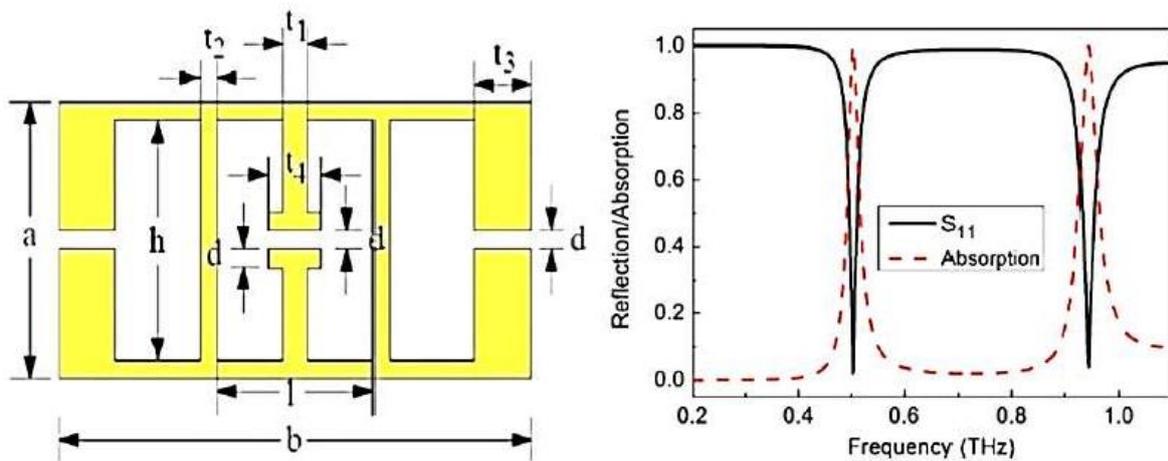


Fig. 2.12 Conception de la cellule unitaire et réponse d'absorption : le premier absorbeur bi-bande basé sur une structure multi-résonante à THz fréquence .

ces structures sont disposées en un réseau 2x2 comme suggéré dans [1] et représenté sur la figure 2.15 pour obtenir une triple absorption de bande. La taille unitaire des cellules (2a) est de 18 mm.

Bien que, avec cette approche combinatoire, une réponse multibande puisse être obtenue, l'absorbeur La conception est complexe et la taille globale de la cellule unitaire est également augmentée. En outre, la portée de la L'optimisation pour obtenir la bande d'absorption souhaitée est également limitée dans ce cas. Une méthode relativement simple et un absorbeur multirésonant compact qui présente des réponses d'absorption multiples avec une certaine flexibilité d'optimisation géométrique a été signalée pour servir les radars aériens comme représenté Fig. 2.16. La couche supérieure de la cellule unitaire est constituée d'un anneau fermé intégré dans un résonateur tétraflèche. La taille totale de la cellule unitaire ("a") est de 14 mm. Le site présente cinq pics d'absorption à 3,4,

8,34, 9,46, 14,44 et 16,62 GHz avec plus de 90 % d'absorptivité à toutes les fréquences.

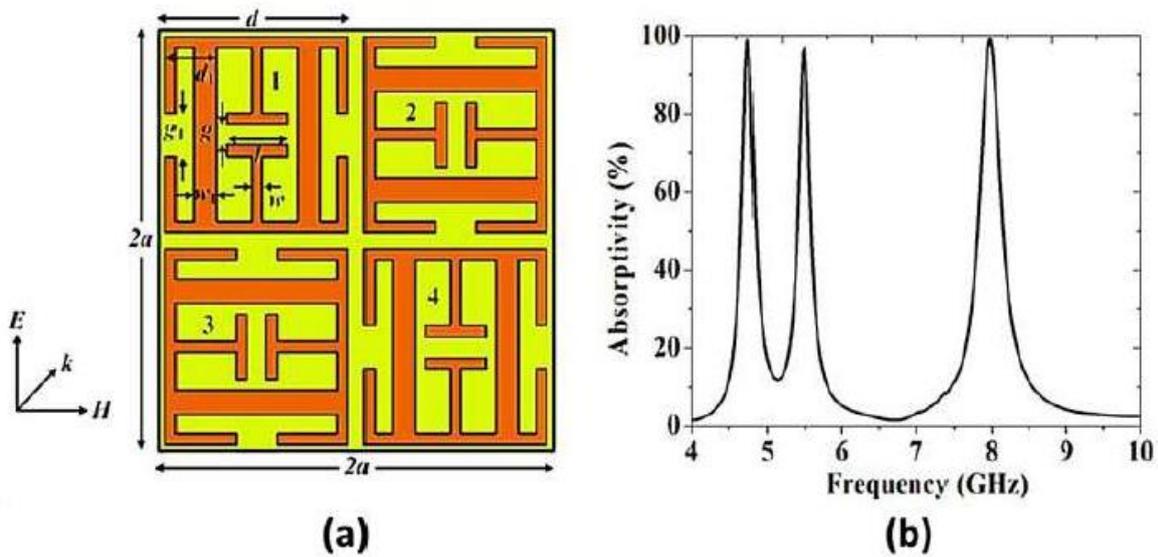


Fig. 2.15 (a) Conception de cellules unitaires multirésonnantes de l'absorbeur de métamatériaux à triple bande et son (b) absorption simulée réponse.

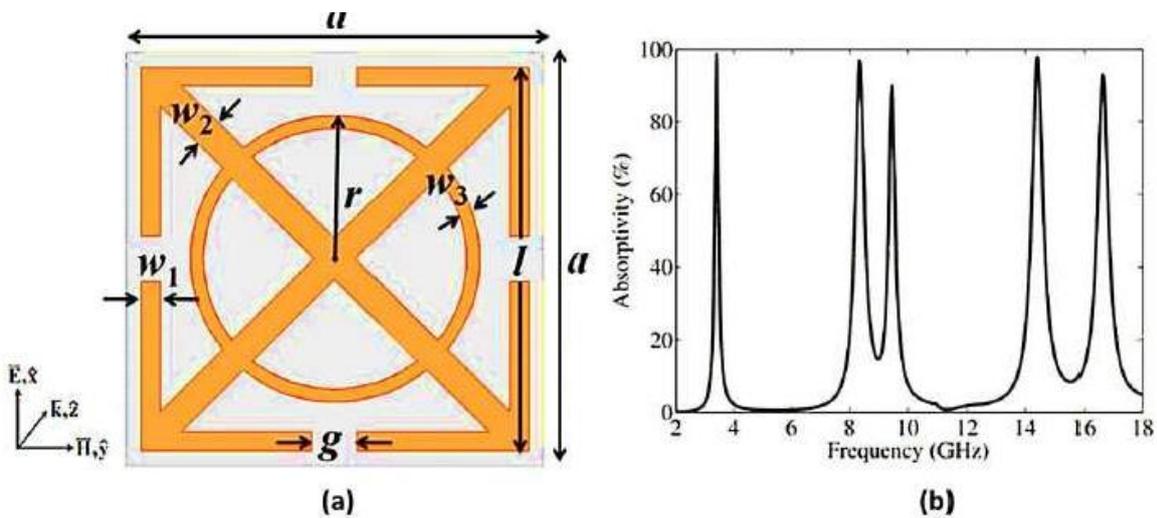


Fig. 2.16 (a) Conception de la cellule unitaire de l'absorbeur de métamatériaux à bande pentagonale multirésonnante et de son (b) simulateur la réponse d'absorption .

Absorbants avec réponse d'absorption à plusieurs fréquences utilisant la technologie multicouche

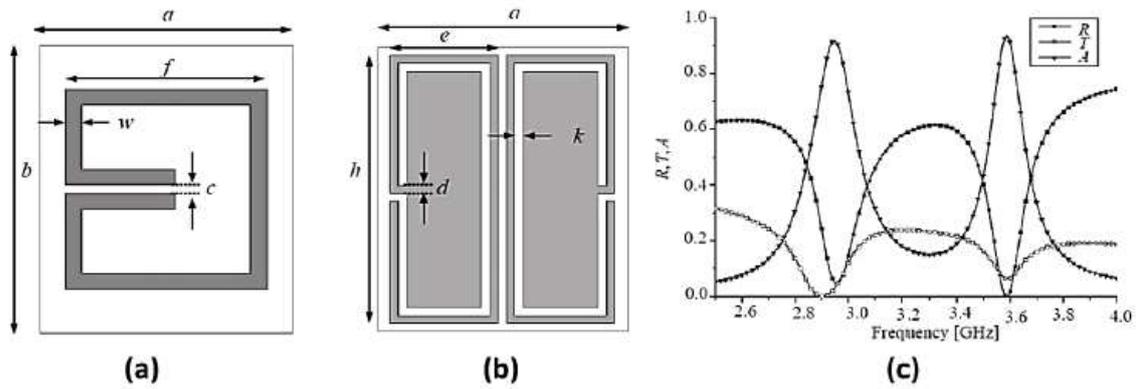


Fig. 2.18 (a) Absorbant à métamatériau à double bande basé sur des structures magnétiques résonantes et sa (b) réponse d'absorption .

L'idée de base de cette conception est d'éliminer la nécessité d'une plaque arrière métallique en la plaçant dans parallèle à la direction de la propagation de l'onde incidente. Une méthode similaire a été signalée dans

mais l'adaptation de l'impédance de l'absorbant à l'espace libre est réalisée par le l'incorporation de résistances regroupées dans la conception de l'absorbant. Cet absorbant est composé d'une seule résistance supérieure couche métallique sur un substrat de polyimide. Chaque cellule unitaire est constituée d'un résonateur ELC chargé par résistance et une bande métallique. Toutefois, la fabrication de ces absorbants nécessite une fabrication supplémentaire en raison du surcroît d'incorporation de résistances regroupées.

De plus, l'utilisation des mêmes structures résonantes dans une seule cellule unitaire par la mise à l'échelle de leur est une autre approche utile pour obtenir une réponse d'absorption multiple.

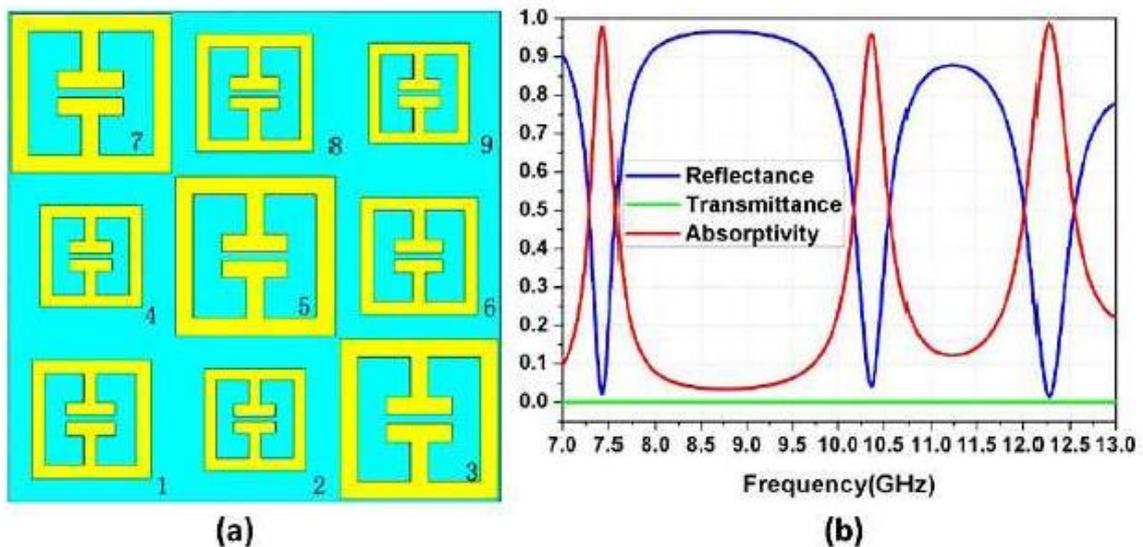


Fig. 2.19 (a) Absorbant de métamatériaux multibandes ultrafines basé sur la mise à l'échelle des dessins individuels dans la cellule unitaire et son

(b) Réponse d'absorption .

La même approche a été utilisée pour obtenir une absorption quadri-bande en régime de fréquence THz .La cellule unitaire de l'absorbant est constituée de quatre structures de type flocon de neige pour donner quatre pics d'absorption. De même, un autre absorbant multibande de THz basé sur cette technique a également été présentée dans .

**4.3.2 Absorbants de métamatériaux à large bande**

Jusqu'à présent, diverses techniques et structures ont été adoptées pour améliorer la largeur de bande des absorbants à base de métamatériaux. Dans cette section, les différentes approches utilisées pour concevoir la largeur de bande Les absorbants améliorés ont été discutés. Les principales techniques d'amélioration de la bande passante comprennent l'utilisation de structures absorbantes multicouches, incorporant de multiples éléments résonants de la même forme dans une seule cellule unitaire en mettant à l'échelle leurs dimensions géométriques, les éléments groupés et conception de structures multi-résonnantes. Un absorbant à bande passante améliorée de métamatériau avec la cellule unitaire qui consiste en trois couches a été signalée . À chaque couche diélectrique d'une épaisseur de 0,3 mm, un La boucle métallique carrée est imprimée comme le montre la figure 2.21. La taille unitaire des cellules est de 10,2 mm et la La valeur déclarée de la largeur de bande FWHM simulée est de 0,39 GHz et l'absorption est supérieure à 90 % pour une bande passante de seulement 0,25 GHz.

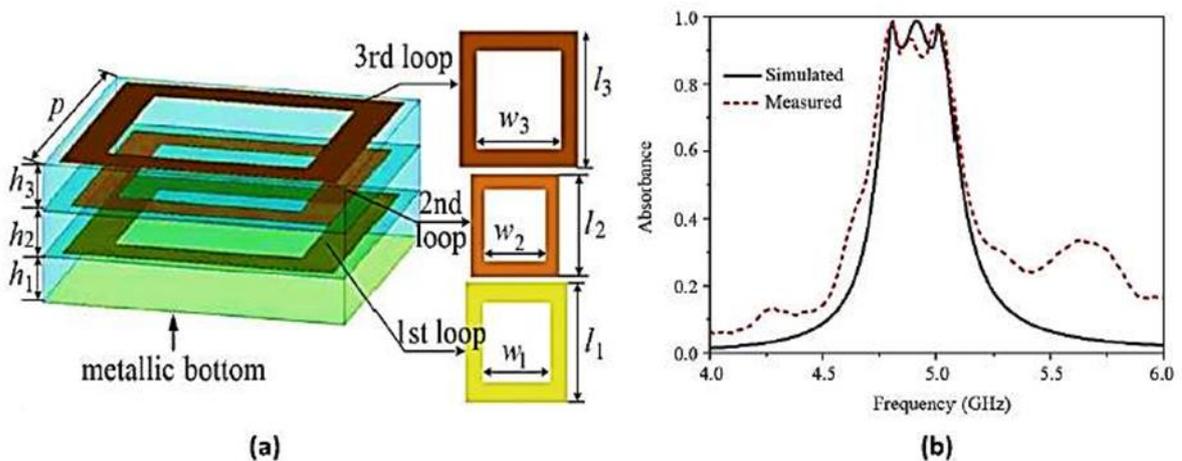


Fig. 2.21 (a) Conception de la cellule unitaire de l'absorbant multicouche de métamatériaux à largeur de bande améliorée et de ses (b) réponse d'absorption simulée.

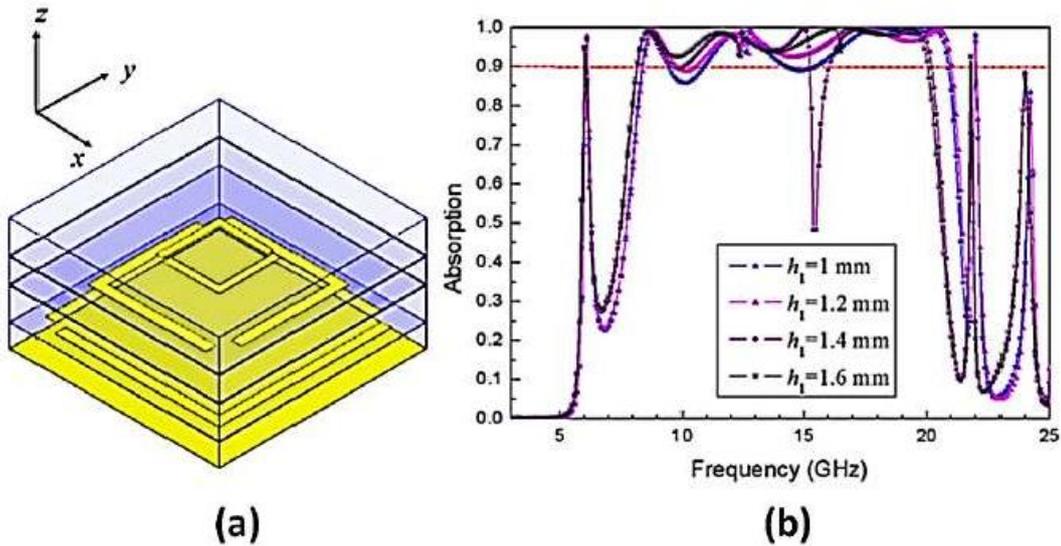


Fig. 2.22 (a) Conception de la cellule unitaire de l'absorbeur multicouche de métamatériaux à largeur de bande améliorée et de son (b) Simulation réponse d'absorption pour une épaisseur variable de la couche supérieure la plus diélectrique.

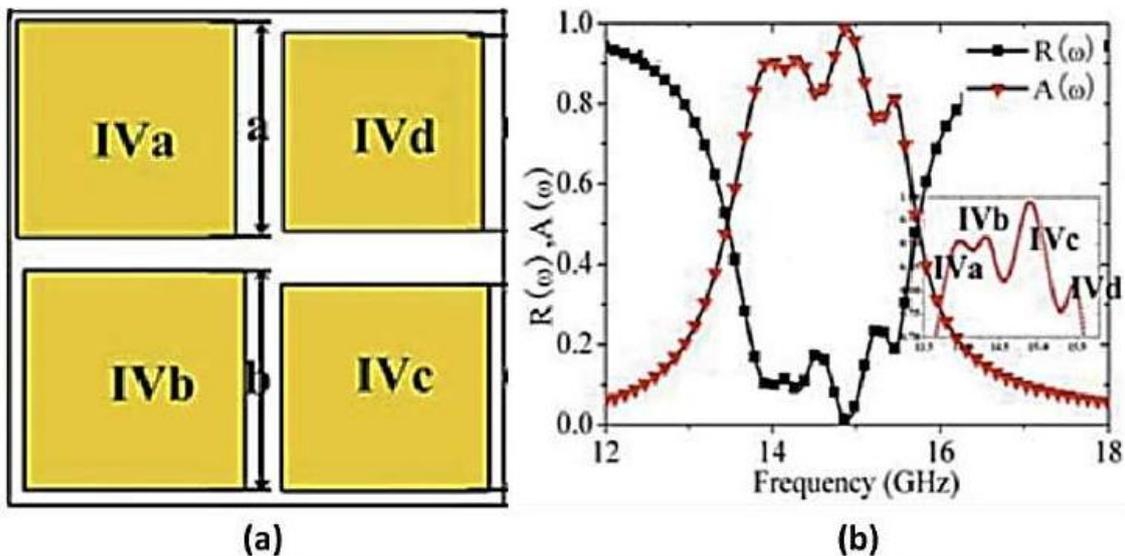


Fig. 2.23 (a) Absorbeur de métamatériaux basé sur des patches multi-carrés e (b) réponse d'absorption simulée .

Cette approche a également été utilisée pour concevoir des absorbeurs de micro-ondes à largeur de bande améliorée . Comme pour cette approche de mise à l'échelle, une conception de l'absorbeur basée sur l'intégration des différents des éléments résonants et des éléments identiques de dimensions géométriques différentes dans le Des cas d'unités uniques ont également été signalés

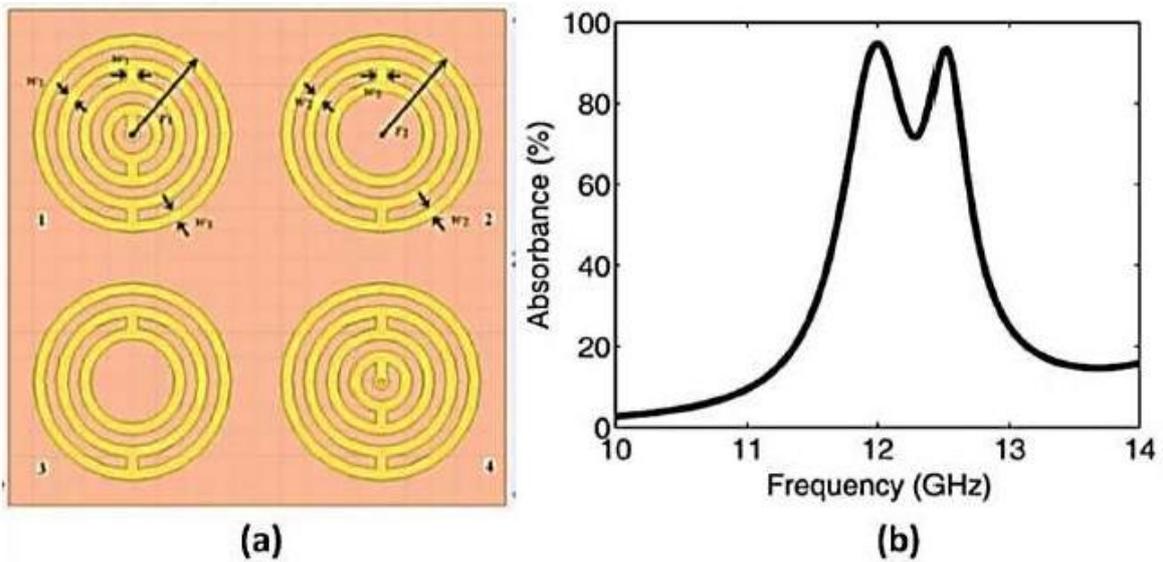


Fig. 2.24 (a) Conception de la cellule unitaire de l'absorbeur de métamatériaux à largeur de bande améliorée et (b) absorption simulée réponse.

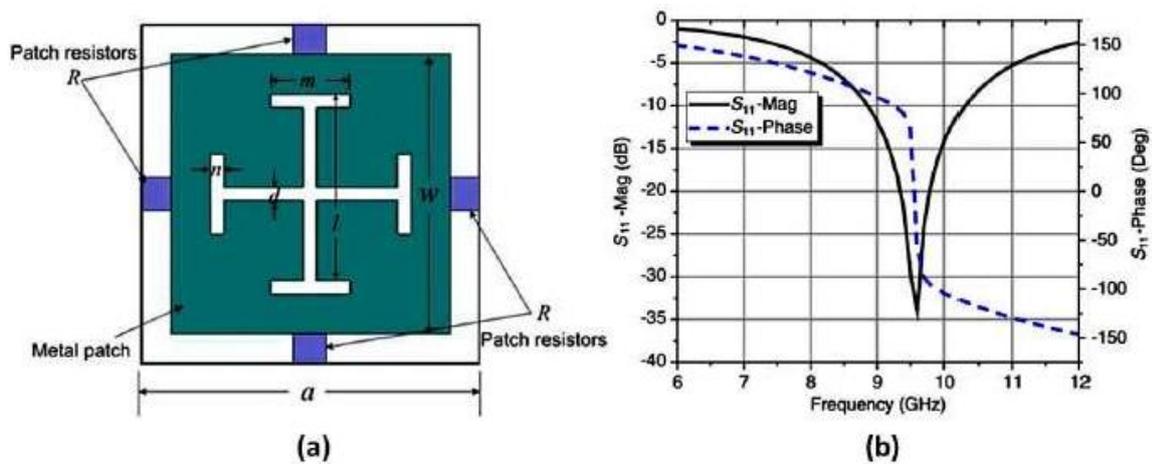


Fig. 2.25 (a) Conception de cellule unitaire d'un absorbeur à largeur de bande améliorée basé sur la fente de la croix de Jérusalem avec patch groupé et sa réponse à la réflexion

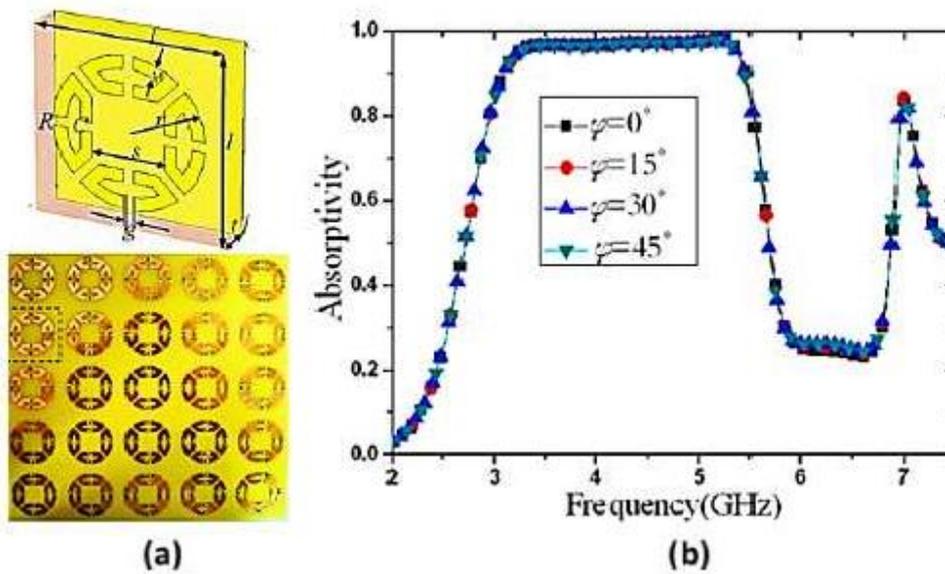


Fig. 2.26 (a) Cellule unitaire et modèle fabriqué d'absorbeur de métamatériaux à base d'éléments en morceaux (b) simulé, la réponse d'absorption pour différents angles de polarisation .

Selon la même approche, divers absorbeurs de métamatériaux à large bande basés sur des éléments groupés ont été proposées dans la littérature . On observe que dans ces types de dessins et modèles, bien que la bande passante soit élargie.

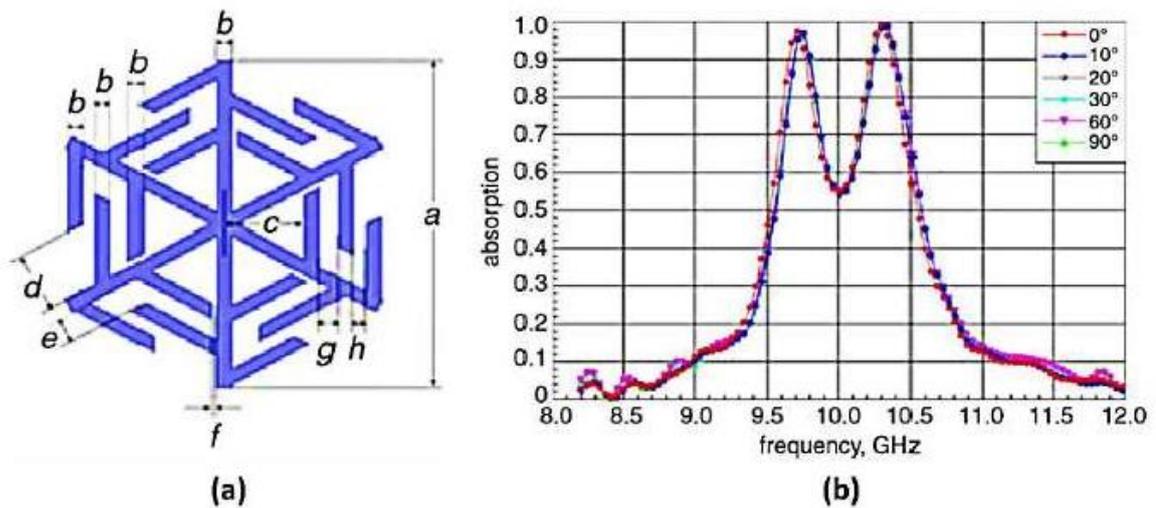


Fig. 2.27 (a) Conception de la cellule unitaire de l'absorbeur de métamatériaux à large bande améliorée et (b) absorption expérimentale pour différents angles de polarisation.

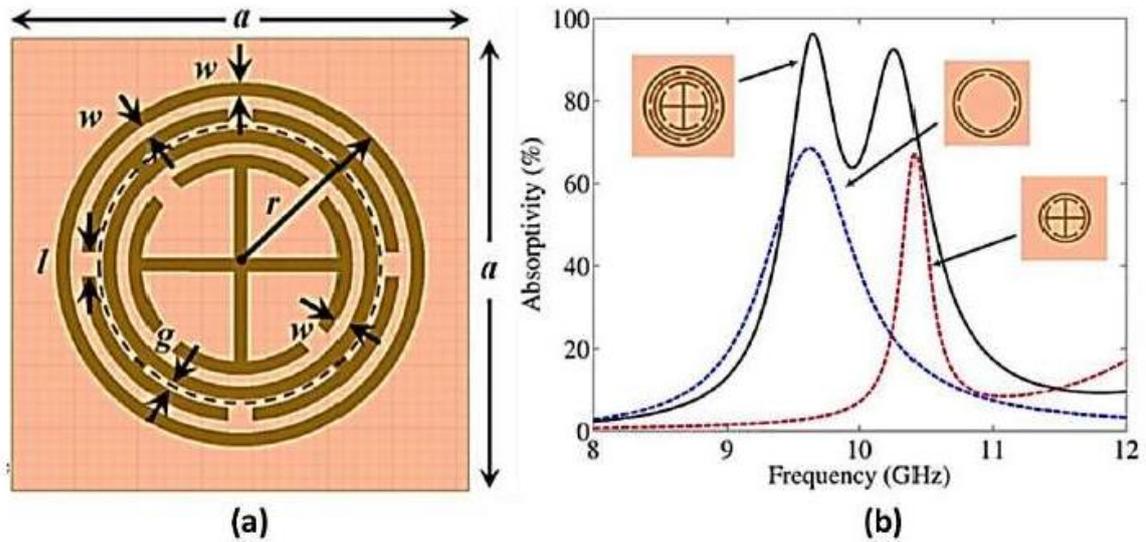


Fig. 2.28 (a) Conception de la cellule unitaire de l'absorbeur de métamatériaux à base d'anneaux interconnectés à largeur de bande améliorée.

(b) la réponse d'absorption simulée.

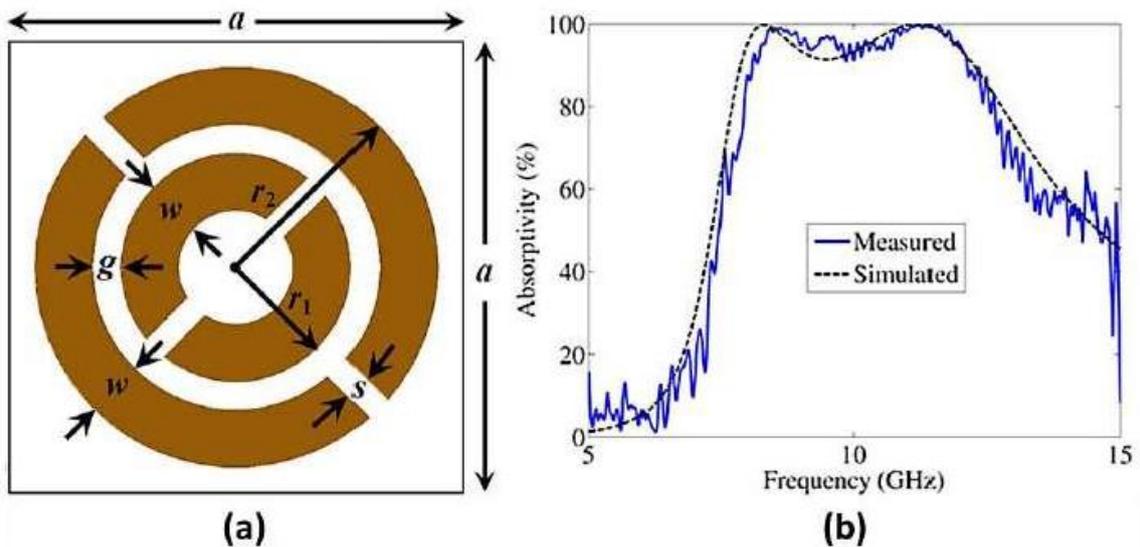


Fig. 2.29 (a) Conception de la cellule unitaire de l'absorbeur de métamatériaux à bande passante améliorée basé sur un anneau à fente circulaire et son (b) réponse d'absorption simulée .

On observe que les modèles de conception de ces absorbeurs multirésonnants rapportés jusqu'à présent sont compliquée. Par conséquent, malgré une absorption à large bande et une épaisseur ultrafine, il est difficile de contrôler simultanément les fréquences de résonance individuelles dans ces types de structures d'absorption.

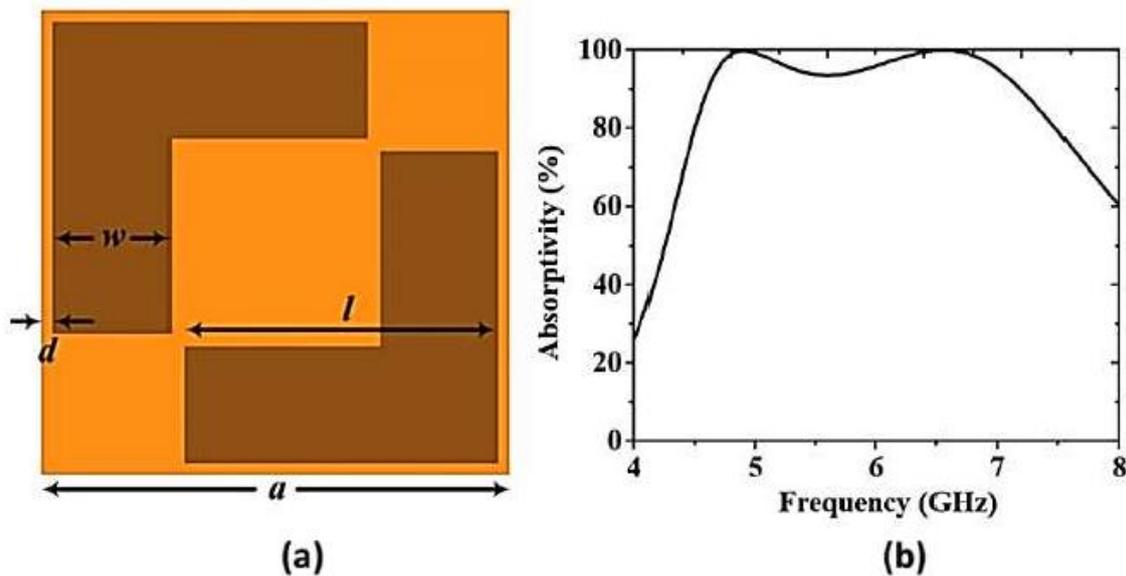


Fig. 2.30 (a) Conception de la cellule unitaire de l'absorbeur de métamatériaux à couche unique à large bande et son (b) absorption simulée réponse.

### 5. Autres applications :

En outre, les absorbeurs d'EM peuvent être appliqués dans des capteurs infrarouges performants, des biocapteurs, modulateurs, émission d'un seul photon, photonique détecteurs, etc. Par exemple, un modulateur de THz a été proposé en contrôlant la densité de porteurs dans le spaceur semi-conducteur dopé n entre une couche supérieure avec des plaques métalliques à motifs et une plaque de base métallique. Il a été constaté que l'absorption varie fortement en fonction de la différentes polarisations de tension appliquées. L'amplitude de l'onde réfléchie, au lieu de l'onde transmise, était prise comme le signal modulé. [78]

### 6. Conclusion

Ce chapitre traite de façon exhaustive des différents types d'absorbants électromagnétiques qui existent. Le domaine des absorbants à méta matériaux est assez récent notamment pour ce qui est des micro-ondes (2008). Les études sont nombreuses mais ne donnent pas beaucoup de réponses vis-à-vis de l'ingénierie de conception de tels matériaux. Néanmoins, on peut facilement mettre en avant les avantages de solutions à base d'absorbants à méta matériaux ; à savoir qu'ils sont fins (bien en dessous de  $\lambda/4$ ), légers (car non chargés en particules métalliques) et utilisent des matériaux.

**Chapitre III : Absorbant de  
méta matériaux a ondes  
millimétrique à large bande sur  
l'intégration des résonateurs**

### III.1. Introduction

Les métamatériaux sont fabriqués par l'inclusion de sous-longueur d'onde métallique structures en milieu diélectrique hôte, conçues pour réaliser des propriétés non trouvées dans la nature. Récemment, les méta matériaux a permis la conception d'absorbants d'ondes électromagnétiques minces [79]. Les absorbants ont de nombreuses applications dans les radars, l'imagerie [80], communication sans fil [81].et éventuellement dans les cellules solaires [83]. Comparé aux absorbants à ondes millimétriques conventionnels qui sont physiquement épais et où les performances de fréquence sont dictées par la permittivité complexe inhérente [84] et la perméabilité [85, 86] de le matériau en vrac, les absorbants à base de méta matériaux peuvent être adaptés pour la réponse en fréquence à travers la géométrie des inclusions métalliques. Les absorbants méta matériaux sont sélectifs en fréquence et ont déjà été étudiée sur une large gamme de fréquences couvrant la micro-ondes [79], Téra hertz (THz) [87, 88], infrarouge (IR) [89], et spectre optique [90]. La conception d'absorbant à ondes millimétriques ou plus les fréquences utilisant des approches basées sur les méta matériaux sont évolutives en fréquence par rapport aux absorbants classiques à base de matériaux en vrac. cependant, la bande passante de l'absorbant à base de méta matériaux repose sur la résonance largeur de bande de la structure du résonateur qui est généralement à bande étroite. Cependant, il faut une large bande passante pour un bon nombre de ces applications. Plusieurs approches ont été étudiées pour concevoir des absorbants au-delà résonance unique. Un exemple est celui de l'absorbant double bande démontré aux fréquences millimétriques [91, 92] et au THz [87, 88] fréquences. Dans une autre application, un absorbant large bande à 2,4 GHz a été étudié en utilisant des résonateurs multi-fréquences empilés qui atteint une bande passante d'absorption de 700 MHz [93]. Un ultra haut débit absorbeur sur une gamme de fréquences de 6 à 18 GHz avec un niveau d'absorption de 90% a été démontré en utilisant une surface résistive sélective en fréquence qui repose sur le réglage de la résistivité des matériaux [94]. Un autre absorbant à large bande (7,8–14,7 GHz) est réalisée en utilisant une structure multicouche dans le forme d'une pyramide qui nécessite une approche de fabrication complexe [96]. Absorbant à large bande à longueur d'onde IR conçu en utilisant le multiplexage il a été démontré que les plaques de métal atteignent une absorption de 98% sur 3,4– 3,55  $\mu\text{m}$  [97]. Un absorbant infrarouge à

large bande est également réalisé en utilisant du plasmonique nano antennes à résonance multiple [98] et double résonance [99] réponses d'absorption.

Dans ce travail , un absorbant de méta matériaux à ondes millimétriques la fréquence est étudiée pour l'amélioration de la largeur de bande d'absorption à la fréquence de résonance. Pour concevoir cet absorbant, un absorbant double bande forme la base dans laquelle un deuxième résonateur avec une fréquence de résonance près du premier résonateur est encastré à l'intérieur du premier résonateur

### III.2. Conception de l'absorbant méta matériaux

L'absorbant de méta matériaux est présenté schématiquement sur la figure III.1 (a).

La couche de l'absorbant est constituée d'un réseau périodique 2D de résonateurs à anneau fendu (SRR) en métaux tels que l'or à motifs sur un diélectrique en polyimide couche d'espacement. L'arrière de l'absorbant est recouvert d'une couche continue fine couche métallique. Les interactions simultanées de l'électricité (dans l'espace du SRR) et des champs magnétiques (entre le SRR et le métal onde incidente avec le résultat du méta matériau dans l'impédance d'onde ( $\eta = E / H = \sqrt{(\mu / \epsilon)}$ ) adaptation de l'absorbant à l'espace libre

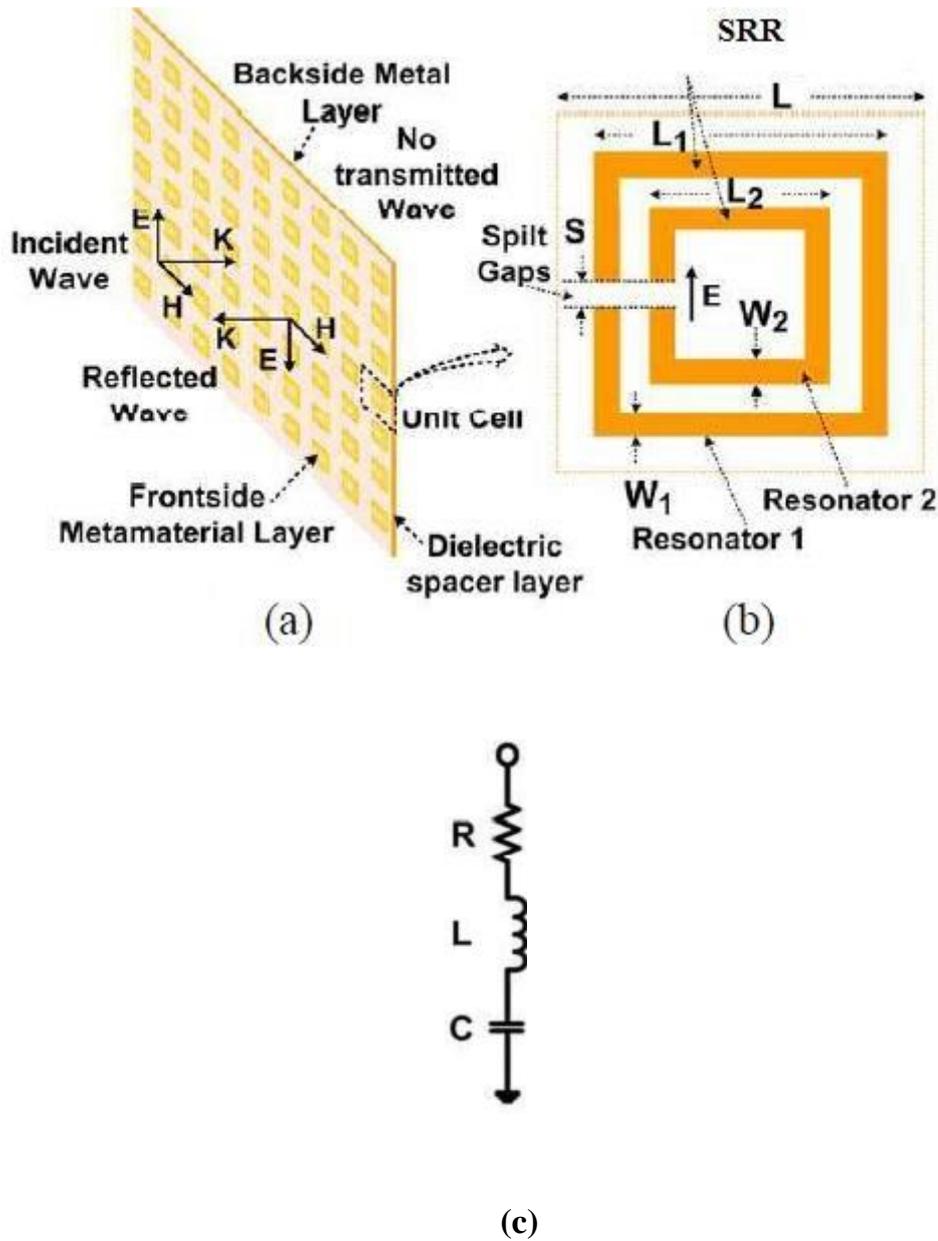


Figure III.1: Schéma de l'absorbant méta matériau.

Dans la figure III.1(a) nous représentons schématiquement l'absorbant métamatériau. Nous remarquons que l'onde incidente est réfléchie et il n'y a pas d'onde transmise en raison de la couche métallique continue à l'arrière. L'onde est absorbée à fréquence de résonance lorsque le champ électrique est parallèle à l'espace du résonateur comme indiqué sur la figure. (b) Disposition des cellules unitaires pour double absorbeur de bande utilisant deux résonateurs,

fréquence de résonance éliminant la réflexion [79]. La figure III.1.c montre le modèle basé sur le circuit (RLC) du résonateur SRR unique

Cette vague incidente obtient absorbé sous forme de pertes métalliques et diélectriques à la fréquence de résonance. Les ondes de fréquence autre que la résonance sont réfléchies principalement en raison de la présence de la couche métallique continue arrière; ça aussi implique une transmission nulle à travers l'absorbant.

### **III.2.1 Absorbant de méta matériaux a ondes millimétriques à large bande sur l'intégration des résonateurs**

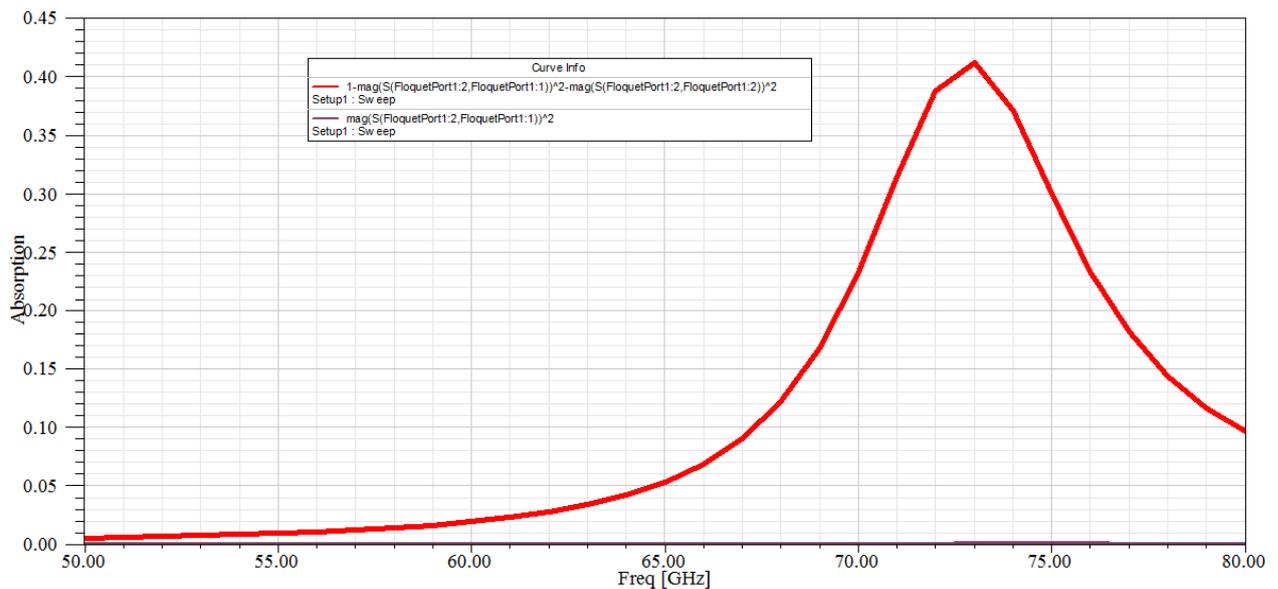
#### **III.2.1.1 Absorbant méta matériaux utilisant SRR forme C a deux résonateurs**

Le résonateur à anneau fendu (en forme de «C») est utilisé comme unité de méta matériau cellule représentée sur les figures 1 (b) avec une fréquence de résonance de 77 GHz. Un autre résonateur à anneau fendu est inséré à l'intérieur du premier résonateur pour atteindre la deuxième fréquence d'absorption résonnante. la fréquence d'absorption du résonateur peut être modélisée en utilisant une inductance équivalente (L) et la capacité (C) du résonateur comme indiqué sur la figure 1 (c). le fréquence d'absorption résonante du résonateur,  $f = 1 / (2\pi \sqrt{LC})$  peut varier en changeant ses dimensions. L'augmentation ou la diminution de la valeur d'inductance du résonateur est liée à l'augmentation ou à la diminution dans la longueur du résonateur, respectivement. De même, la valeur de la capacité peut être augmentée ou diminuée en augmentant ou en diminuant la capacité de séparation de l'espace du SRR. Puisque le deuxième résonateur est placé à l'intérieur du premier résonateur, sans en changer la conception, il ont une longueur plus petite et présenteront donc une résonance beaucoup plus élevée fréquence que le premier résonateur. Afin d'améliorer l'absorption la bande passante à une seule fréquence de résonance, le but serait d'apporter la deuxième résonance proche de la première résonance afin que la combinaison réalise une large absorption. Pour atteindre cet objectif, nous avons varié différents paramètres pour le résonateur. Les conceptions des absorbeurs sont simulées dans HFSS. Polyimide d'une épaisseur de 125  $\mu\text{m}$  ( $\epsilon = 3,16$ ,  $\text{tand} = 0,01$ ) est utilisé comme couche d'espacement diélectrique. Dans cette conception, aucune onde transmise est observée en simulation en raison de la présence de la couche conductrice. Paramètre S obtenu à partir de la simulation

est utilisée pour déterminer le coefficient de réflexion de puissance ( $R = |S_{11}|^2$ ). Le coefficient de transmission étant nul ( $T = |S_{21}|^2 = 0$ ), le coefficient d'absorption de puissance ( $A$ ) est directement déterminé à partir de la coefficient de réflexion de puissance:

$$(A = 1 - R - T = 1 - R).$$

Il est important de mentionner que lorsque deux résonateurs sont amenés plus près dans l'espace, ils se couplent mutuellement, modifiant leur réponse résonante dans un comportement communément appelé hybridation ou éclatement résonnant [100, 101]. L'étendue du couplage mutuel dépend non seulement sur l'espacement, mais aussi sur l'orientation relative (ou polarité) d'un résonateur par rapport à l'autre.



**Figure III.2 :** Résultat de l'absorbant de méta matériaux à la fréquence 77 GHz.

- ✓ (a) l'absorbant a bande unique absorbeur conçus à 77 GHz et (b) (coefficients d'absorption et de réflexion de la bande passante absorbant méta matériaux utilisant un double SRR . Résultat de l'absorbant de méta matériaux conçu en utilisant un SRR unique à 77 GHz est donné pour les dimensions suivant ;  $L_1 = 352 \mu\text{m}$ ,  $L_2 = 266 \mu\text{m}$ ,  $L$

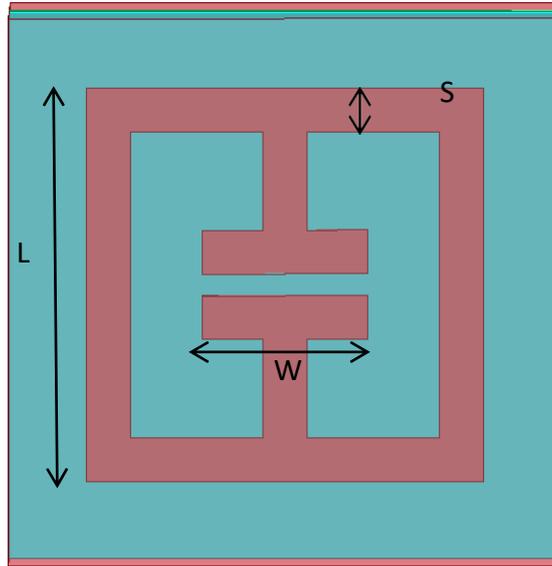
= 407  $\mu\text{m}$ ,  $W1 = 26 \mu\text{m}$ ,  $W2 = 22 \mu\text{m}$ ,  $S1 = 36 \mu\text{m}$ ,  $S2 = 15 \mu\text{m}$ , et  $L4 = 99 \mu\text{m}$  pour la structure représentée sur la figure 1.

Le couplage entre structures est beaucoup plus fort lorsqu'elles sont sur des côtés opposés entraînant un éclatement de résonance dû à une forte effets d'hybridation. Le couplage peut être observé à partir de l'induit courants de surface dans les résonateurs comme le montrent pour deux différentes orientations des résonateurs. Le courant de surface plus élevé est induit dans les deux résonateurs à chacune des deux fréquences de résonance lorsque ils sont orientés dans la direction opposée. Cette le couplage est fortement réduit lorsque les résonateurs sont orientés dans le même direction que celle. Cela a réduit l'hybridation effets très importants et les deux résonances se produisent très proches l'une de l'autre.

Optimisation supplémentaire de la conception grâce à la simulation numérique peut être effectuée pour obtenir une absorption parfaite sur cette bande de fréquence. Pour démontrer l'absorbant avec une bande passante élargie, en utilisant l'approche proposée d'avoir des résonateurs orientés dans le même direction, nous présentons des résultats de simulation sur deux conceptions qui mettent en valeur comment l'élargissement de la bande passante est réalisé. Dans la conception 1, la résonance la fréquence correspondant au résonateur externe est sélectionnée à 77 GHz et au résonateur interne

### **III.2.1.2 Absorbant de méta matériaux utilisant SRR un seul résonateur carré**

Dans cette section nous sommes intéressé a montre influence du cube d'air que l'on ajoute dans la simulation hfss , nous avons utilisé une plaque de cuivre sur le côté arrière de ma conception. Et nous faisons varier la longueur de la boîte à air (qui est utilisée pour attribuer les limites maître / esclave et pour l'incidence de la vague à travers le port du flotteur) à l'arrière de l'absorbant. En raison de la plaque de cuivre à l'arrière, , Comme montre la figure III.3 la cellule SRR



**Figure III.3 :** la cellule SRR utilisé pour la conception du absorbant

a) Première configuration d'absorbant :

Dans cette configuration le SRR est situé au milieu du box d'air les résultats du simulation sont montré sur la figure III.5.

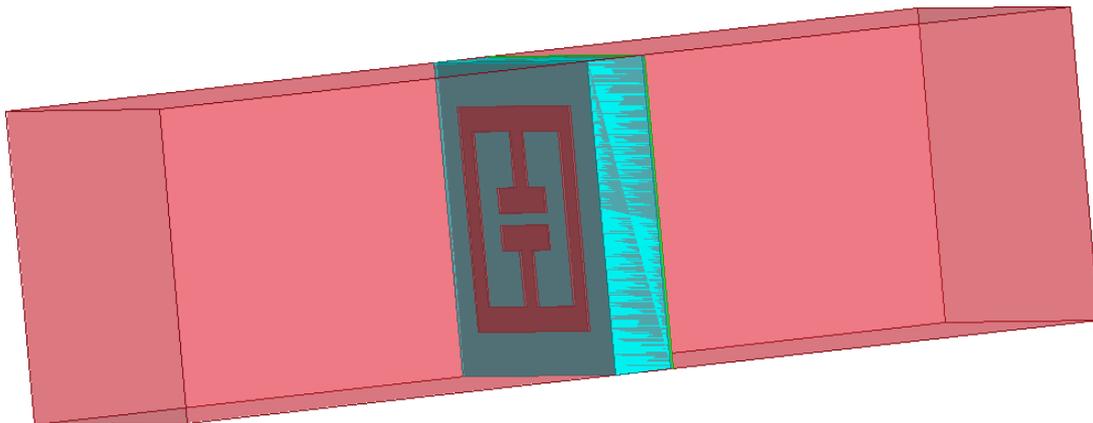
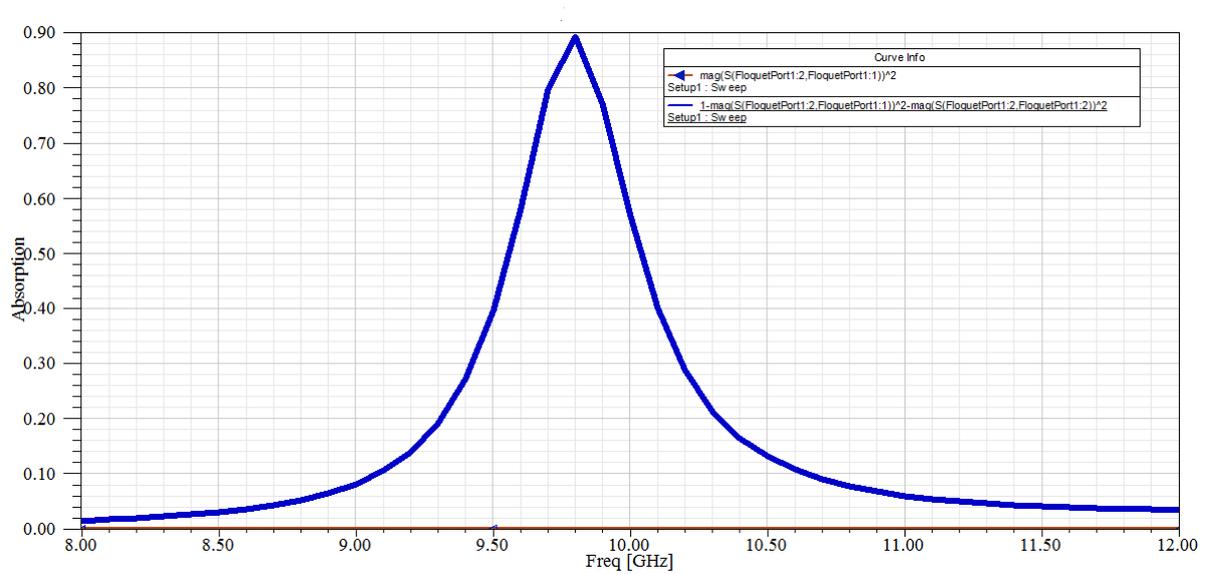


Figure III. 4: Absorbant large bande sous HFSS



**Figure III.5:** Résultats de simulation paramètre d'absorption utilisant un SRR pour l'amélioration bande passante.

(a) Conception

b) La deuxième configuration consiste à déplacer le SRR vers le bas et voir l'influence de ce déplacement sur l'absorption

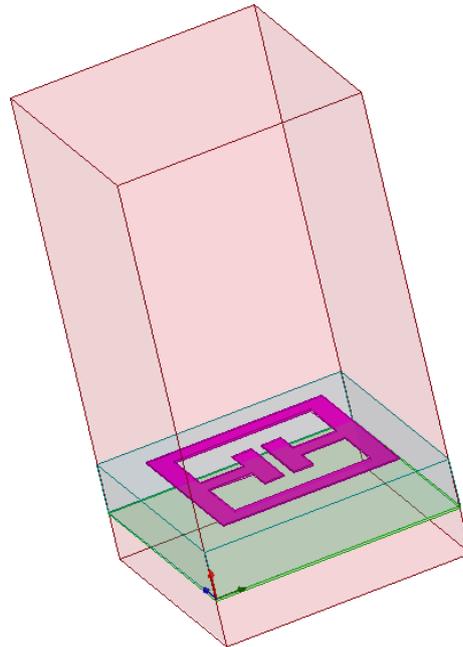


Figure III.6: Absorbant large bande avec variation de l'opposition du SRR

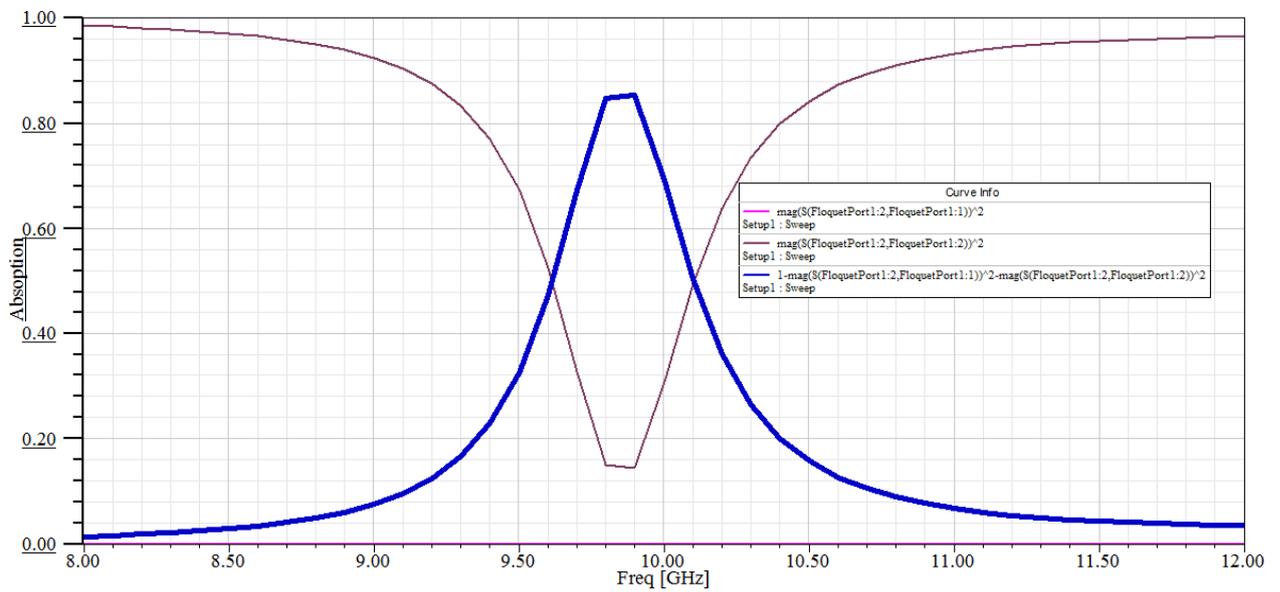


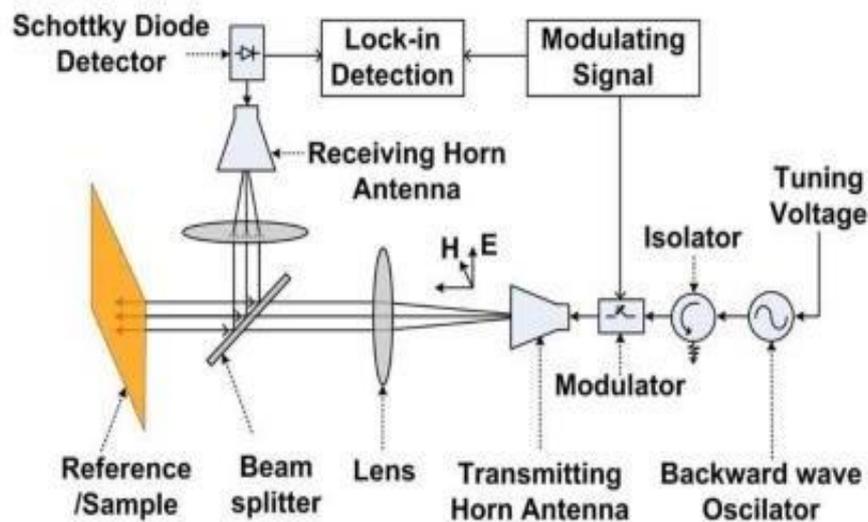
Figure III.7: Résultat de simulation des paramètres d'absorption

HFSS a besoin d'une boîte à air pour modéliser le rayonnement de l'espace libre. Une frontière de rayonnement est utilisée pour émuler l'espace libre en tronquant l'espace libre infini en domaine de calcul fini. Cela minimise les reflets des surfaces extérieures et garantit une absorption maximale. Ceci est très similaire à une chambre anéchoïque.

2. Pour cela, la distance du radiateur doit être au minimum de  $\lambda / 4$  (ou  $\lambda / 2$ ) pour les surfaces rayonnantes fortes. Ici,  $\lambda$  représente la longueur d'onde pour la fréquence minimale utilisée.

3. Une distance de  $\lambda / 4$  de la surface rayonnante est prise pour la raison que des mésappariements d'impédance similaires peuvent être annulés aux quarts de longueur d'onde. Cela garantit qu'il n'y a pas d'ondes réfléchies et ainsi la limite de rayonnement absorbe tout le rayonnement.

4. L'absorption maximale d'énergie se produit lorsque les champs sont perpendiculaires à la frontière.



**Figure III.8.** Configuration pour la mesure du coefficient de réflexion du absorbeur.

**III.3. Conclusion**

En conclusion, les absorbant à base de méta matériaux avec une large bande passante et des fréquences d'ondes millimétriques sont conçus à l'aide de deux résonateurs, un

intégré dans un autre. Les résultats de simulation montrent une augmentation de la bande passante d'absorption d'un facteur deux par rapport au boîtier de résonateur unique. Les conceptions montrent une nouvelle approche pour orienter les résonateurs dans la même direction de telle sorte que le couplage mutuel est minimisé et qu'aucun effet d'hybridation significatif n'est observé. Les absorbant mis en œuvre sont ultra fins (1 / 30 ème de la longueur d'onde) et exible. Ces absorbants à base de méta matériaux peuvent être mis à l'échelle à d'autres fréquences de RF à THz couvrant diverses applications dans le WiFi, les radars automobiles, les radômes et le point à point et communications sans fil.

# conclusion générale

Les travaux présentés dans cette thèse ont été consacrés à l'étude des absorbons métamatériaux puis à le contrôle de la propagation des ondes électromagnétiques à base des .métamatériaux aux fréquences microondes

L'objectif de cette thèse était de contrôle de la propagation des ondes .électromagnétiques à partirune étude des absorbons métamatériaux

Le premier chapitre de ce travail, présente un état de l'art sur les métamatériaux qui présentent des propriétés intrinsèques exceptionnelles (permittivité et/ouperméabilité négatives). Durant la première partie de ce chapitre et en se basant sur la théorie de Veselago, nous avons défini au départ les notions de base qui régissent les matériaux dits à main gauche .(LHM)

Une classification des métamatériaux a été ensuite présentéeen fonction du signe des paramètres effectifs des cellules métamatériaux (ENG, MNG et DNG). Une liste des motifs et structurations des cellules appartenant à cette classification ont étéégalement présentées. Pour profiter des propriétés intéressantes des métamatériaux (taille de cellules très inférieure à la longueur d'onde et caractère résonnant), nous avons terminés ce chapitre par la présentation .des différentes applications demétamatériaux

Dans le second chapitre, nous abordons les travaux de conception et de simulation qui ont été réalisés. Tout d'abord les différentes structures unitaires simples que nous utilisons dans le .cadre du développement d'absorbants à métamatériaux sont présentées

Les structures utilisant des patches carrés, rectangles et circulaires sont étudiées en détail. Des modèles de calcul de la fréquence defonctionnement et d'optimisation du niveau d'absorption sont détaillés. Ces modèles sont mis en application dans des simulations pour .illustrer les possibilités données par nos absorbants

L'optimisation du niveau d'absorption permet de tendre vers une absorption totale. Deux méthodes d'optimisations de la bande passante sont présentées, l'une tirée des couches de Jaumann et l'autre des absorbants comportant des circuits analogiques. Nous présentons les différentes structures qui ont été conçues lors de ma thèse pour la réalisation de prototypes. Les différentes simulations caractérisant ces matériaux sont données et le comportement de chaque structure est analysé

Grâce à ces structures, nous avons réalisé des simulations de différents cas illustrant les possibilités qu'offrent ces matériaux. La conception d'une structure à patches circulaires imitant le fonctionnement d'une structure à patches carrés est la première simulation particulièrement intéressante

Puis deux possibilités d'optimisation du fonctionnement de ces structures sont étudiées. La simulation de nos absorbants à métamatériaux sur support courbé montre la possibilité de les conformer. Et enfin l'étude du couplage de différents types d'absorbants pour la réalisation d'absorbants hybrides permet de présenter le caractère innovants de ces absorbants à métamatériaux

le troisième chapitre consacre pour contrôler les ondes électromagnétiques L'objectif de la requête peut être de : connaître le niveau global d'exposition et sa conformité au seuil réglementaire, connaître le niveau d'exposition par service (WiFi, télévision, radio, téléphonie...) connaître l'exposition détaillée pour chaque bande de fréquence pour l'ensemble des fréquences

: Le formulaire doit impérativement être signé par un organisme habilité collectivité territoriale, agence régionale de santé ou association agréée de protection de l'environnement par exemple. Il suffit ensuite de transmettre le document à l'ANFR, qui dépêche un laboratoire indépendant accrédité pour réaliser la mesure

Le but de nos thèse a été de développer et réaliser des absorbants à métamatériaux avec des performances inédites. Nous avons réalisé des absorbants résonants très petits devant la longueur d'onde et pouvant atteindre une absorption totale. Ces absorbants peuvent couvrir de petites bandes d'absorption et sont faciles à concevoir grâce aux modèles que nous avons présentés

Nous avons proposé une démarche méthodologique d'ingénierie de conception des cellules métamatériaux. A cet effet un ensemble de configurations de cellules métamatériaux unitaires notamment les RAFs, la tige et RAFCs a été conçu et analysé sous HFSS

Ensuite, Les simulations électromagnétiques de tous les éléments à activité magnétique ou électrique sont effectuées à l'aide du logiciel HFSS, basé sur la méthode des éléments finis. Pour chaque cellule, nous avons présenté les coefficients de transmission et de réflexion obtenus au moyen de ce logiciel

Nos résultats de simulations concordent avec beaucoup de résultats de recherches faites dans le domaine des métamatériaux

Plusieurs perspectives peuvent être envisagées à partir des travaux de cette thèse. Tout d'abord, il paraît intéressant de continuer les recherches sur les filtres et les antennes métamatériaux. Pour valider nos résultats de simulation, il est important de réaliser les structures proposées et effectuer des mesures sur différentes configurations

## LA BIBLIOGRAPHIE :

- [1] V. Veselago. "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$ ". Soviet Physics Uspekhi, vol. 10, no. 4, February 1968.
- [2] A. Sihvola. "Metamaterials in electromagnetics". Metamaterials, vol. 1, no. 1, February 2007.
- [3] H. Lamb. "On group-velocity". In Proc. London Math. Soc., pages 473–479, 1904.
- [4] H. C. Pocklington. "growth of a wave-group when the group-velocity is negative". Nature, vol. 71:607–608, 1905.
- [5] A. Schuster. An introduction to the Theory of Optics. Edward Arnold, London, 1904.
- [6] L. I. Mandelshtam. "Lectures on some problems of the theory of oscillations". Complete Collection of works, vol. 5 :428–467, 1950.
- [7] G. D. Malyuzhinets. "A note on the radiation principle". Zhurnal Technicheskoi Fiziki, vol. 21 :940–942, 1951.
- [8] D. V. Sivukhin. "The energy of electromagnetic waves in dispersive media". Opt. Spektrosk, vol. 3 :308–312, 1957.
- [9] V. E. Pafomov. "jetp 33". Soviet Physics, vol. 33 n°4, 1957.
- [10] R. A. Silin. "Possibility of creating plane-parallel lenses". Opt. Spektrosk, vol. 44 :189–191, 1978.
- [11] D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz. "composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity". Physical review letters, vol. 84 no 18 :4184–4187, 2000.
- [12] J. Brown. "Artificial dielectrics". progress in dielectrics, vol. 2 :195–225, 1960.
- [13] W. Rotman. "Plasma simulation by artificial and parallel plate media". IRE Trans. Ant. Propagat., vol. 10 :82–95, 1962.
- [14] S. A. Schelkunoff and H. T. Friis. Antennas : Theory and practice. New York : John Wiley and Sons, 1952.
- [15] H. J. Schneider and P. Dullenkopf. "Slotted tub resonator : A new nmr probe head at high observing frequencies". Rev. Sci. Instrum., vol. 48 no. 1 :68–73, 1977.
- [16] W. H. Hardy and L. A. Whitehead. "split-ring resonator for use in magnetic resonance from 200-2000 mhz". Rev. Sci. Instrum., vol. 52 no. 2 :213–216, 1981.
- [17] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart. "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena". IEEE Trans. on Microwave Theory and Techn., vol.47 no. 11 :2075–2084, 1999.

- [18] R. A. Shelby, D. R. Smith, and S. Schultz. "Experimental verification of a negative index of refraction". *Science*, vol. 292 :77–79, 2001.
- [19] P. M. Valanju, R. M. Walser, and Vlaju A. P. "wave refraction in negative-index media : always positive and very inhomogeneous". *Physical review letters*, vol. 18 no 18, 2002.
- [20] J. B. Pendry and D. R. Smith. "comment on "wave refraction in negative-index media : always positive and very inhomogeneous"". *Physical review letters*, vol. 90 no 2, 2003.
- [21] V. G. Veselago and E. E. Narimanov. "The left hand of brightness : past, present and future of negative index materials". *Nature materials*, vol. 5, 2006.
- [22] Alexandre Sellier. *Absorbants à métamatériaux : étude théorique et expérimentale. Matériaux*.  
Université Paris Sud - Paris XI, 2014. Français. NNT : 2014PA112111. tel-01060182.
- [23] R. W. Wood, *Proc. Phys. Soc. Londres* 18, 269-275 (1902).
- [24] J. Hägglund et F. Sellberg, *J. Opt. Soc. Am.* 56,1031-1040 (1966).
- [25] R. H. Ritchie, E. T. Arakawa, J. J. Cowan et R. N.Hamm, *Phys. Rev. Lett.* 21, 1530-1533 (1968).
- [26] M. B. Sobnack, W. C. Tan, N. P. Wanstall, T. W.Preist, et J. R. Sambles, *Phys. Rev. Lett.* 80,5667-5670 (1998).
- [27] J. L. Pérchec, P. Quemerais, A. Barbara et T.López-Ríos, *Rev. phys. Lett.* 100, 066408 (2008).
- [28] H. Raether, *Surface Plasmons on smooth and roughsur les surfaces et sur les grilles* (Springer, Berlin, 1988).
- [29] J. A. Schuller, E. S. Barnard, W. Cai, Y. C. Jun, J. S.White, et M. I. Brongersma, *Nat. Mater.* 9,193-204 (2010).
- [30] T. López-Ríos, D. Mendoza, F. J. García-Vidal, J.Sánchez-Dehesa, et B. Pannetier, *Phys. Rev. Lett.*81, 665 (1998).
- [31] T. Søndergaard, S. M. Novikov, T. Holmgaard, R. L.Eriksen, J. Beermann, Z. Han, K. Pedersen, et S. I.Bozhevolnyi, *Nat. Commun.* 3, 969 (2012).
- [32] M. Wang, C. Hu, M. Pu, C. Huang, Z. Zhao, Q.Feng, et X. Luo, *Opt. Express* 19, 20642-20649 (2011).
- [33] J. Braun, B. Gompf, G. Kobiela et M. Dressel, *Rev. phys. Lett.* 103, 203901 (2009).
- [34] C. Hu, L. Liu, Z. Zhao, X. Chen et X. Luo, *Opt. Express* 17, 16745-16749 (2009).

- [35] S. A. Maier, *Plasmonics : fundamentals and*(Springer, New York, 2007).
- [36] E. Ozbay, *Science* 311, 189-193 (2006).
- [37] D. R. Smith, J. B. Pendry, et M. C. K. Wiltshire, *Science* 305, 788-792 (2004).
- [38] X. Chen, T. M. Grzegorczyk, B.-I. Wu, J. Pacheco, et J. A. Kong, *Phys. Rev. E* 70, 016608 (2004).
- [39] C. M. Watts, X. Liu, et W. J. Padilla, *Adv. Mater.* 24, OP98-OP120 (2012).
- [40] N. I. Landy, S. Sajuyigbe, J. J. Mock, D. R. Smith, et W. J. Padilla, *Phys. Rev. Lett.* 100, 207402 (2008).
- [41] B. Wang, T. Koschny, et C. M. Soukoulis, *Phys. Rev. B* 80, 033108 (2009).
- [42] Q.-Y. Wen, H.-W. Zhang, Y.-S. Xie, Q.-H. Yang, et Y.-L. Liu, *Appl. Phys. Lett.* 95, 241111 (2009).
- [43] J. Yang, X. Hu, X. Li, Z. Liu, X. Jiang et J. Zi, *Opt. Lett.* 35, 16-18 (2010).
- [44] E. Popov, S. Enoch, et N. Bonod, *Opt. Express* 17, 6770-6781 (2009).
- [45] J. Yang, X. Hu, X. Li, Z. Liu, Z. Liang, X. Jiang, et J. Zi, *Phys. Rev. B* 80, 125103 (2009).
- [46] Z. H. Jiang, S. Yun, F. Toor, D. H. Werner, et T. S. Mayer, *ACS Nano* 5, 4641-4647 (2011).
- [47] Y. Cui, K. H. Fung, J. Xu, H. Ma, Y. Jin, S. He, et N. X. Fang, *Nano Lett.* 12, 1443-1447 (2012).
- [48] M. Pu, Q. Feng, C. Hu et X. Luo, *Plasmonics* 7, 733-738 (2012).
- [49] F. Ding, Y. Cui, X. Ge, Y. Jin, et S. He, *Appl. Phys. Lett.* 100, 103506 (2012).
- [50] Y. Ma, Q. Chen, J. Grant, S. C. Saha, A. Khalid, et D. R. S. Cumming, *Opt. Lett.* 36, 945-947 (2011).
- [51] X. Liu, T. Starr, A. F. Starr et W. J. Padilla, *Phys. Rev. Lett.* 104, 207403 (2010).
- [52] H.-T. Chen, J. Zhou, J. F. O'Hara, F. Chen, A. K. Azad, et A. J. Taylor, *Phys. Rev. Lett.* 105, 073901(2010). J. Hao, J. Wang, X. Liu, W. J. Padilla, L. Zhou, et M. Qiu, *Appl. Phys. Lett.* 96, 251104 (2010).
- [53] M. K. Hedayati, *Mater.* 23, 5410-5414 (2011).
- [54] K.-Q. Peng et S.-T. Lee, *Adv. Mater.* 23, 198-215 (2011).
- [56] C. E. Kennedy, dans 14e Biennale CSP SolarPACES Symposium, Progrès dans le développement d'un Revêtement solaire sélectif, NREL/CD-550-42709.

- [57] Sergent N. P., O. Pincon, M. Agrawal et P. Peumans, *Opt. Express* 17, 22800-22812 (2009).
- [58] Y. X. Yeng, M. Ghebrebrhan, P. Bermel, W. R. Chan, J. D. Joannopoulos, M. Soljagic, et I. Celanovic, *PNAS* 109, 2280-2285 (2012).
- [59] H. Sai, H. Yugami, Y. Kanamori, et K. Hane, *Sol. Energ. Mater. Sol. Cells* 79, 35-49 (2003).
- [60] H. A. Atwater et A. Polman, *Nat. Mater.* 9, 205-213 (2011). Q. Gan, F. J. Bartoli, et Z. H. Kafafi, *Adv. Mater.* 25, 2377 (2013).
- [61] Y. Wang, T. Sun, T. Paudel, Y. Zhang, Z. Ren, et K. Kempa, *Nano Lett.* 12, 440-445 (2012). L. Yang, L. Mo, Y. Okuno, et S. He, *Prog. Photovolt : Res. Appl.* 21, 1077-1086 (2013).
- [62] V. E. Ferry, J. N. Munday, et H. A. Atwater, *Adv. Mater.* 22, 4794-4808 (2010).
- [63] E. Knott , J. F. Shaeffer , et M. T. Tuley *Radar Cross Section*, 2 ed. (Scitech, Raleigh, 2004).
- [64] E. A. Vinogradov, G. N. Zhizhin, A. G. Mal'shukov, et V. I. Yudson, *Solid State Commun.* 23, 915-921 (1977).
- [65] J.-J. Greffet, R. Carminati, K. Joulain, J.-P. Mulet, S. Mainguy, et Y. Chen, *Nature* 416, 61-64 (2002).
- [66] S. Y. Lin, J. Moreno, et J. G. Fleming, *Appl. Phys. Lett.* 83, 380-382 (2003).
- [67] M. U. Pralle, N. Moelders, M. P. McNeal, I. Puscasu, A. C. Greenwald, J. T. Daly, E. A. Johnson, T. George, D. S. Choi, K. El, et R. Biswas, *Appl. Phys. Lett.* 81, 4685-4687 (2002).
- [68] X. Liu, T. Tyler, T. Starr, A. F. Starr, N. M. Jokerst, et W. J. Padilla, *Phys. Rev. Lett.* 107, 045901 (2011).
- [69] Y.-H. Ye, Y.-W. Jiang, M.-W. Tsai, Y.-T. Chang, C.-Y. Chen, D.-C. Tzuang, Y.-T. Wu, et S.-C. Lee, *Appl. Phys. Lett.* 93, 033113 (2008).
- [70] C.-Y. Chen, M.-W. Tsai, Y.-W. Jiang, Y.-H. Ye, Y.-T. Chang, et S.-C. Lee, *Appl. Phys. Lett.* 91, 243111 (2007).
- [71] N. Liu, M. Mesch, T. Weiss, M. Hentschel et H. Giessen, *Nano Lett.* 10, 2342 (2010).
- [72] A. V. Kabashin, P. Evans, S. Pastkovsky, W. Hendren, G. A. Wurtz, R. Atkinson, R. Pollard, V. A. Podolskiy, et A. V. Zayats, *Nat. Mater.* 8, 867-871(2009).
- [73] H. Zhou, F. Ding, Y. Jin, et S. He, *PIER* 119, 449-460 (2011). X. Shen et T. J. Cui, *J. Opt.* 14, 114012 (2012).
- [74] F. Hu, Y. Qian, Z. Li, J. Niu, K. Nie, X. Xiong, W. Zhang, et Z. Peng, *J. Opt.* 15, 055101 (2013).

- [75]. K.J. Vinoy, K.A. Jose, V.K. Varadan, et V.V. Varadan, "Fréquence de résonance des antennes fractales à courbe de Hilbert", dans le cadre du symposium international de l'IEEE sur Antennas and Propagation , vol.3, pp.648-651, 2001.
- [77]. J. McVay, N. Engheta, et A. Hoorfar, "Thin Absorbers Using Space-Filling- Curve High-Impedance Surfaces", IEEE Antennas and Propagation Society Symposium international, 3-8 juillet 2005, vol. 2A, pp. 22- 25, 2005.
- [78]. Absorbeurs de matières premières : un bilan
- [79].Landy, N. I., S. Sajuyigbe, J. J. Mock, D. R. Smith, and W. J. Padilla, \Perfect metamaterial absorber," Phys. Rev. Lett., Vol. 100, 207402-1{207402-4, 2008.
- [80].Noor, A. and Z. Hu, \Metamaterial dual polarised resistive hilbert curve array radar absorber," IET Microw. Antennas Propag., Vol. 4, 667{673, 2010.
- [81]. Takimoto, Y., \Considerations on millimeter-wave indoor LAN," Topical Symposium on Millimeter Waves, 111{114, 1997.
- [83].Maier, T. and H. Bruckl, \Wavelength-tunable microbolometers with metamaterial absorbers," Optics Letters, Vol. 34, 3012{3014, 2009.
- [84]. Aydin, K., V. E. Ferry, R. M. Briggs, and H. A. Atwater, \Broadband polarization-independent resonant light absorption using ultrathin plasmonic super absorbers," Nature Communications, Vol. 2, Article No. 517, DOI: 10.1038/ncomms1528.
- [85]. Takase, Y., O. Hashimoto, K. Matsumoto, and T. Kumada, \Suppression of electromagnetic radiation noise from wireless modules in the millimeter-wave band by means of alumina containing carbon black," Electronics and Communications in Japan, Vol. 93, 25{33, 2010.
- [86] Iijima, Y., Y. Hoqjou, and R. Sato, \Millimeter wave absorber using M-type hexagonal ferrite," IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Vol. 2, 547{549, 2000.
- [87].Korolev, K. A., J. S. McCloy, and M. N. Afsar, \Ferromagnetic resonance of micro- and nano-sized hexagonal ferrite powders at millimeter waves," J. Appl. Phys., Vol. 111, 07E113-1{07E113-3, 2012.
- [88].Wen, Q.-Y., H.-W. Zhang, Y.-S. Xie, Q.-H. Yang, and Y.-L. Liu, \Dual band terahertz metamaterial absorber: Design, fabrication, and characterization," Appl. Phys. Lett., Vol. 95, 241111-1{ 241111-3, 2009.
- [89].Tao, H., C. M. Bingham, D. Pilon, K. Fan, A. C. Strikwerda, D. Shrekenhamer, W. J. Padilla, X. Zhang, and R. D. Averitt, \A dual band terahertz metamaterial absorber," J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 43, 225102-1{225102-5, 2010.
- [90]. Mason, J. A., S. Smith, and D. Wasserman, \Strong absorption and selective thermal

- emission from a midinfrared metamaterial," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 98, 241105-1{241105-3, 2011.
- [91]. Hao, J., J. Wang, X. Liu, W. J. Padilla, L. Zhou, and M. Qiu, \High performance optical absorber based on a plasmonic metamaterial," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 96, 251104-1{251104-3, 2010.
- [92]. Soh, T., A. Kondo, M. Toyota, and O. Hashimoto, \A basic study of millimeter-wave absorber for two frequency bands using transparent resistive  $\epsilon$ lms," *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 1, 149{154, 2003.
- [93]. Singh, P. K., K. A. Korolev, M. N. Afsar, and S. Sonkusale, \Single and dual band 77/95/110 GHz metamaterial absorbers on °exible polyimide substrate," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 99, 264101-1{2641014,2011.
- [94].Gu, S., J. P. Barrett, T. H. Hand, B.-I. Popa, and S. A. Cummer, \A broadband low-reflection metamaterial absorber," *J. Appl. Phys.*, Vol. 108, 064913-2{064913-6, 2010.
- [96]. Sun, L. K., H. F. Cheng, Y. J. Zhou, and J. Wang, \Broadband metamaterial absorber based on coupling resistive frequency selective surface," *Optics Express*, Vol. 20, 4675{4678, 2012.
- [97]Wakatsuchi, H., S. Greedy, C. Christopoulos, and J. Paul, \Customised broadband metamaterial absorbers for arbitrary polarisation," *Optics Express*, Vol. 18, 22187{22198, 2010.
- [98]Ding, F., Y. Cui, X. Ge, Y. Jin, and S. He, \Ultra-broadband microwave metamaterial absorber," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 100, 1035061-1{1035061-4, 2012.
- [99]Hendrickson, J., J. Guo, B. Zhang, W. Buchwald, and R. Soref, \Wideband perfect light absorber at midwave infrared using multiplexed metal structures," *Optics Letters*, Vol. 37, 371{373, 2012.
- [100]. Bouchon, P., C. Koechlin, F. Pardo, R. Haidar, and J.L. Pelouard, \Wideband omnidirectional infrared absorber with a patchwork of plasmonic nanoantennas," *Optics Letters*, Vol. 37, 1038{1040, 2012.
- [101]. Koechlin, C., P. Bouchon, F. Pardo, J.-L. Pelouard, and R. Ha<sup>3</sup>dar, \Analytical description of subwavelength plasmonic MIM resonators and of their combination," *Optics Express*, Vol. 21, 7025{7032, 2013.
- [100]. Guo, H., N. Liu, L. Fu, T. P. Meyrath, T. Zentgraf, H. Schweizer, and H. Giessen, \Resonance hybridization in double split-ring resonator metamaterials," *Optics Express*, Vol. 19, 12095{12101, 2007.
- [101]. Aydin, K., I. M. Pryce, and H. A. Atwater, \Symmetry breaking and strong coupling in planar optical metamaterials," *Optics Express*, Vol. 18, 13407{13417, 2010.