

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
جامعة أبي بكر بلقايد – تلمسان –  
Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen –  
Faculté de TECHNOLOGIE



## **MEMOIRE**

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

**En : Télécommunications**

**Spécialité : Systèmes de Télécommunications**

**Par : KHALID AMIR FAYSSAL & MENDACI OUKACHA**

**Sujet**

**COLLECTE D'ÉNERGIE RF À HAUT RENDEMENT PAR  
UN ABSORBANT MÉTAMATÉRIAU PARFAIT.**

**Soutenu le 14 juin , devant le jury composé de :**

Mr Bahri.S.M	MCA	Univ. Tlemcen	Président
Mme Gourari.F	MCB	Univ. Tlemcen	Examinatrice
Mme Benmostefa.N	MCA	Univ. Tlemcen	Encadrant
Mlle Atmani.R	Doctorant	Univ. Tlemcen	Co- Encadrant

Année universitaire : 2022 /2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## **Remerciement**

*Nous remercions tout d'abord DIEU pour toutes les bénédictions qui nous ont donné durant toutes ces années la santé et le courage pour suivre notre étude.*

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

*Nous remercier aussi notre c- encadrant Mlle **ATMANI RAHMA** pour les grands efforts que vous avez faits pour nous.*

*Nous remercions également Monsieur **BAHRI S. M** maitre de conférence à l'université de Tlemcen, pour l'honneur qu'il nous fait en présidant le jury de notre mémoire, ainsi qu'à Madame **GOURARI.F** pour l'intérêt qu'elle a bien voulu porter à ce travail en acceptant de faire partie du jury.*

*Nous tenons à remercier nos parents de nous avoir soutenues, et de nous avoir encouragées pendant de longues années, nous ne serions jamais assez reconnaissant envers nos parents qui ont toujours tout mis en œuvre pour qu'on s'épanouisse dans tous ce qu'on entreprend.*

*Enfin, nous adressons nos respectueux remerciements à tous nos enseignants et toute personne qui nous ont aidés de près ou de loin durant notre travail et en particulier tous nos collègues de la promotion ST.*

## **Dédicaces**

*A nos pères et nos mères :*

*Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que vous méritez, pour*

*Tous les sacrifices que vous n'avez cessé de nous donner depuis notre naissance, durant nos enfance et même à l'âge adulte.*

*Nous vous dédions ce travail en témoignage de notre profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, vous préserver et vous accordez santé, longue vie et bonheur.*

*A nos frères,*

*Nous vous remercions infiniment pour votre aide ainsi que vos encouragements et votre fidélité.*

*A toute nos familles*

*Et tous nos Amis(es),*

*Je vous dédié ce travail avec tous mes vœux de bonheur et de santé*

## **RESUME**

La collecte d'énergie radiofréquence (RF) est un domaine de recherche visant à récupérer l'énergie des ondes électromagnétiques présentes dans notre environnement. Cette technologie exploite les signaux RF émis par des sources telles que les antennes de télécommunication, les réseaux sans fil et les radars. L'objectif est de capter ces signaux RF et de les convertir en électricité utilisable. Cela permettrait de réduire notre dépendance aux sources d'énergie traditionnelles et d'alimenter des dispositifs électroniques de manière plus efficace et durable. Cependant, il reste des défis à relever, tels que l'optimisation de l'efficacité de conversion et l'intégration de cette technologie dans des dispositifs de petite taille. Malgré cela, la collecte d'énergie RF offre des perspectives prometteuses pour l'avenir de l'énergie sans fil.

**Les mots clés :** Collecte d'énergie, Métamatériau, Absorbant, Radio fréquence.

## **ABSTRACT**

Radio Frequency (RF) Energy Harvesting is a field of research aimed at harvesting energy from electromagnetic waves present in our environment. This technology exploits RF signals emitted by sources such as telecommunications antennas, wireless networks and radars. The goal is to capture these RF signals and convert them into usable electricity. This would reduce our reliance on traditional energy sources and power electronic devices more efficiently and sustainably. However, challenges remain, such as optimizing conversion efficiency and integrating this technology into small-sized devices. Despite this, RF energy harvesting offers promising prospects for the future of wireless energy.

**Key words:** Energy harvesting, Metamaterial, Absorbent, Radio frequency

## ملخص

حصاد الطاقة بالترددات الراديوية هو مجال بحثي يهدف إلى حصاد الطاقة من الموجات الكهرومغناطيسية (RF) الموجودة في بيئتنا. تستغل هذه التقنية إشارات التردد اللاسلكي المنبعثة من مصادر مثل هوائيات الاتصالات والشبكات اللاسلكية والرادارات. الهدف هو التقاط إشارات التردد اللاسلكي هذه وتحويلها إلى كهرباء قابلة للاستخدام. هذا من شأنه أن يقلل من اعتمادنا على مصادر الطاقة التقليدية والأجهزة الإلكترونية التي تعمل بالطاقة بشكل أكثر كفاءة واستدامة. ومع ذلك ، لا تزال هناك تحديات ، مثل تحسين كفاءة التحويل ودمج هذه التكنولوجيا في أجهزة صغيرة الحجم. على الرغم من ذلك ، يوفر حصاد طاقة التردد اللاسلكي آفاقاً واعدة لمستقبل الطاقة اللاسلكية.

**الكلمات المفتاحية:** حصاد الطاقة ، المواد الخارقة ، الامتصاص ، التردد الراديوي.

**LISTE DES MATIERES**

Remerciement .....	I
Dédicase .....	II
Liste des matières .....	III
Liste des figures .....	V
Liste des symboles .....	XI
Introduction générale .....	1

**CHAPITRE I**

I.1 INTRODUCTION .....	4
I.2 MÉTAMATERIAU .....	4
I.2.1 DÉFINITION ET HISTOIR DES MÉTAMATÉRIAU .....	4
I.2.2 LES TRAVAUX FONDATEURS DES MÉTAMATÉRIAUX .....	6
I.2.2.1 Les travaux de veselago .....	6
I.2.2.2 Confirmation expérimentale .....	6
I.2.3 MÉTAMATERIAU À INDICE NÉGATIVE .....	7
I.2.3.1 À partir de matériaux en l’an 2000 .....	7
I.2.3.2 Le concept d’un indice négative .....	8
I.2.3.3 Instruction pour créés les métamatériaux.....	9
I.2.3.4 La longuer d’onde du résonance du métamatériaux .....	10
I.2.4 PROPAGATION ÉLECTROMAGNÉTIQUE DANS UN MILIEU HOMOGENE	11
I.2.5 TERMINOLOGIE .....	14
I.2.6 LES APPLICATION DES MÉTAMATÉRIAUX .....	14
I.2.6.1Lentilles parfaits.....	14
I.2.6.2 Manteau invisible (cape d’invisibilité) .....	15
I.2.6.3 Application pour les anntennes .....	16
I.3 ABSORBANT MÉAMATÉRIAU .....	18
I.3.1 INTÉRET.....	18
I.3.2 TYPES D’ABSORBANTS ELÉCTROMAGNÉTIQUE.....	18
I.3.2.1 Absorbant électrique .....	18
I.3.2.2Absorbant avec structure d’adaptation d’impédance .....	19
I.3.2.2.1Les absorbants pyramidaux .....	19
I.3.2.2.2 Absorbants chargés progressivement.....	20

I.3.2.2.3 Absorbants avec couche d'adaptation d'impédance .....	21
I.3.3 LES APPLICATIONS DES ABSORBANTS MÉTAMATÉRIAUX.....	21
I.3.3.1 Filres et ecren électromagnétique .....	21
I.3.3.2 Capteurs et d'éctecteurs .....	22
I.3.3.3 Énergie solaire .....	22
I.4 CONCLUSION.....	22

## **CHAPITRE II**

II.1 INTRODUCTION .....	24
II.2 ÉNERGIE RADIOFRÉQUENCE (RF) .....	24
II.3 DÉFÉNITION DE LA COLLECTE D'ÉNEGIE.....	25
II.4 LA COLLECE D'ENERGIE RF PAR UN ABSORBANT METAMATERIAU .....	25
II.5 LES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUE .....	26
II.6 LA POLARISATION DES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUE .....	27
II.7 LES INTERFÉRENCE ÉLÉCTROMAGNÉTIQUE .....	28
II.7.1 RFI en radioastronomie .....	29
II.7.2 RFI sur la surveillance environnementale .....	29
II.8 RÉDUCTION DES INTERFÉRENCES ÉLECTROMAGNETIQUES.....	30
II.9 LA COLLECTE D'ÉNERGIE DANS UN MILIEU URBAN ET DOMESTOQUE .....	30
II.10 PRINCIPES DE LA COLLECTE D'ÉNERGIE RF.....	32
II.11 LES SOURCES D'ÉNERGIE RF DANS L'ENVIRONNEMENT.....	32
II.11.1 Système de transmission d'énergie sans fil .....	33
II.12 COLLECTE ET CONVERSION DE L'ÉNERGIE ELECTROMAGNETIQUE .....	34
II.13 AVANTAGES DE LA RECUPERATION D'ENERGIE RF .....	35
II.14 ULTRA LARGE BANDE .....	35
II.14.1 Définition .....	35
II.14.2 Bandes d'exploitation de l'UWB .....	36
II.14.3 Application de la technologie UWB .....	37
II.15 CONCLUSION .....	38

## CHAPITRE III

III.1 INTRODUCTION.....	40
III.2 ABSORBANT METAMATERIAU BASE SUR L'ANALYSE DE CIRCUIT EQUIVALENT POUR LES APPLICATION WI-FI DOUBLE .....	40
III.3 CONCEPTRION DE CELLULE UNITAIRE PAR ADS .....	42
III.4 RESULTAS DE LA SIMULATION .....	45
III.4.1 S paramètres.....	45
III.4.2 L'absorption de la cellule unitaire .....	46
III.4.3 Influence d'angle d'incidence sur l'absorption.....	47
III.5 INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DU SUBSTRAT SUR LE COEFFICIENT DE RÉFLEXION .....	49
III.6 INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DE LA MASSE Hg.....	49
III.6.1 Influence de l'épaisseur de la masse Hg sur le coefficient de réflexion .....	49
III.6.2 Influence de l'épaisseur de la masse Hg sur Le coefficient d'absorption.....	50
III.7 ANALYSE DE PERFORMANCES DE LA CELLULE UNITAIRE FINALISÉE ....	51
III.8 ABSORBANT DE MÉTAMATÉRIAU POUR LES APPLICATION DANS LA BANDES DE 2 GHZ A 22 GHZ.....	53
III.8.1 Le coefficient de réflexion $S_{11}$ .....	54
III.8.2 Le coefficient de d'absorption .....	55
III.8.3 Comparaison .....	55
III.8.4 Influence de multiplie les dimensions de la structure double couche par un facteur.....	56
III.8.5 Effet d'ajouter des résistances .....	57
III.8.6 Interprétation du Résultats .....	61
III.9 CONCLUSION .....	62

**LISTES DES FIGURES**

**CHAPITRE I**

Figure I.1: Une Représentation schématique des matériaux classiques et des métamatériaux...5

Figure I.2 :Le premier matériau à perméabilité et permittivité négative..... 7

Figure I.3: L'indice de réfraction pour les Métamatériaux ..... 9

Figure I.4: Les résonateurs à anneau fendu. (a): SRR Carrée (b): SRR Circulaire..... 10

Figure I.5: Des cellules en Métamatériaux..... 10

Figure I.6: Images virtuelles répliquées pour les supports MD et MG. .... 15

Figure I.7: Cape d'invisibilité de J. Pendry ..... 16

Figure I.8: Schéma de l'appareil où le métamatériau de la main gauche est placé au-dessus de l'antenne patch..... 16

Figure I.9: Comparez le gain d'antenne avec et sans métamatériau. (a) et (c) patch d'antenne en l'absence de métamatériau. (b) et (d) antenne patch en présence de métamatériau ..... 17

Figure I.10: Répartition du champ électronique : (a) antenne seule. (b) antenne en présence de métamatériau ..... 17

Figure I.11:(a) Description de la structure d'absorbant pyramidal et (b) exemple d'absorbant pyramidal..... 20

Figure I.12 : (a) Des courbes d'impédance idéales et typiques, et (b) Un exemple de matériau absorbant progressivement chargé. .... 20

Figure I.13: Illustration de divers types de matériaux de structure ..... 21

**CHAPITRE II**

Figure II.1: les applications d'énergie radiofréquence dans tous les secteurs de la vie quotidienne. .... 25

Figure II.2: Les ondes électromagnétiques dans le domaine de la communication. .... 26

Figure II.3: La polarisation des ondes électromagnétique. .... 27

Figure II.4: Les des différents d'états de polarisation (rectiligne, naturelle) ..... 28

Figure II.5 : Stockage locale de l'énergie solaire ..... 31

Figure II.6: Sources présentes dans l'environnement d'une récupération d'énergie RF. .... 33

Figure II.7: Schématisation d'un récupérateur d'énergie RF..... 34

Figure II.8: Dispositifs ultralarge bande fonctionnant au-dessous du «bruit radioélectrique ambiant» ..... 38

## CHAPITRE III

Figure III.1: La cellule unitaire .....	41
Figure III.2: La cellule unitaire sous CST STUDIO. ....	41
Figure III.3: Les différentes dimensions du patch et de la masse. ....	41
Figure III.4: Une impression détaillée du L, C et R dans (un) le résonateur en anneau fendu (SRR) -1 pour la fréquence inférieure, (b) le SRR -2 pour la fréquence la plus élevée, (c) le sol; et (d) la capacité parallèle due à la surface délimitée par les SRR.....	43
Figure III.5: Circuit équivalent de la cellule unitaire de l'absorbant .....	44
Figure III.6: S paramètres (dB) (Coefficient de réflexion (S11) et Coefficient transmission(S21) de la cellule unitaire). ....	46
Figure III.7: L'absorption de la cellule unitaire .....	46
Figure III.8: Influence de l'angle d'incidence ( $\phi$ ) sur le coefficient d'absorption de la structure. ....	47
Figure III.9 : Influence de l'angle d'incidence ( $\theta$ ) sur le coefficient d'absorption de la structure.....	48
Figure III.10: Influence de l'angle d'incidence ( $\phi$ et $\theta$ ) sur le coefficient D'absorption de la structure.. ....	48
Figure III.11: Variation du coefficient de réflexion en changeant l'épaisseur du substrat "h" de 1 mm à 2 mm.....	49
Figure III.12: Variation du coefficient de réflexion en changeant l'épaisseur de la masse Hg de 0.035 mm et 0.07 mm.....	50
Figure III.13: Variation du coefficient d'absorption en changeant l'épaisseur de la masse Hg de 0.035 mm et 0.07 .....	50
Figure III.14: Répartition du champ électrique à 2,7 GHz et 5.1 GHz sur la cellule unitaire.....	51
Figure III.15: Répartition du champ magnétique à 2,7 GHz et 5.1GHz sur la cellule unitaire MM.....	52
Figure III.16 : (a)permittivité, (b) perméabilité, et (c)indice de réfraction aux fréquences de fonctionnement.....	53
Figure III.17: La cellule unitaire.....	54
Figure III.18: Le coefficient de réflexion $S_{11}$ .....	54
Figure III.19: Le coefficient d'absorption.....	55

Figure III.20: le coefficient d'absorption d'une seule couche et double couche dans la bande de fréquence [2 ; 6] GHz.....55

Figure III.21: le coefficient d'absorption d'une seule couche et double couche dans la bande de fréquence [2 ; 22] GHz.....56

Figure III.22: Le coefficient de réflexion  $S_{11}$  de la structure double couche dans la bande de fréquence [2-22].....57

Figure III.23: Le coefficient d'absorption de la structure double couche dans la bande de fréquence [2-22] GHz .....57

Figure III.24: La cellule unitaire avec les résistances.....58

Figure III.25: Le coefficient de réflexion  $S_{11}$  .....58

Figure III.26: Le coefficient d'absorption..... 59

Figure III.27: Le coefficient de réflexion  $S_{11}$ .....56

Figure III.28: Le coefficient d'absorption..... 56

Figure III.29: Comparaison d'absorption de la cellule unitaire.....61

**SYMBOLES ET ABREVIATIONS**

$\varepsilon$  : Permittivité

$\mu$  : Perméabilité

$\varepsilon_0$  : Permittivité du vide

$\mu_0$  : Perméabilité du vide

$\varepsilon_r$  : Permittivité relative

$\mu_r$  : Perméabilité relative

$\sigma$  : Conductivité électrique

$n$  : Indice de réfraction

$E$  : Champ électrique

$B$  : Champ magnétique

$D$  : déplacement électrique

$H$  : excitation magnétique

MTM : métamatériau

MMA : absorbant à métamatériau

MPA: Metamaterial Perfect Absorber

SRR: Split-Ring-Resonator

EM : Electromagnetique

EM : Interferences Electromagnetique

HFSS: High Frequency Structure Simulator

CST: Computer Simulation Système

ADS: Advanced Design Système

RF: Radio Fréquence

$\omega$  : Pulsation

$\gamma$  : Constante de propagation

$\beta$  : Constante de phase

$C$  : La vitesse de la lumière

$f$  : La fréquence

## **INTRODUCTION GENERALE**

La collecte d'énergie est un domaine de recherche en constante évolution visant à exploiter des sources d'énergie alternatives et durables. L'une des approches prometteuses dans ce domaine est la collecte d'énergie radiofréquence (RF) ambiant, qui consiste à récupérer l'énergie des ondes électromagnétiques présentes dans notre environnement quotidien. L'un des moyens d'améliorer l'efficacité de cette collecte d'énergie RF est l'utilisation d'un absorbant métamatériau. Les métamatériaux sont des matériaux artificiels qui possèdent des propriétés électromagnétiques extraordinaires, résultant de leurs structures périodiques spécifiques. En utilisant des motifs et des géométries précises, les métamatériaux peuvent être conçus pour présenter des comportements électromagnétiques inhabituels, tels que l'absorption sélective des ondes RF.

L'objectif de la collecte d'énergie RF ambiant à haut rendement par un absorbant métamatériau est de capter efficacement les signaux RF présents dans notre environnement et de les convertir en électricité utilisable. Cette technologie exploite les signaux RF émis par des antennes de télécommunication, des réseaux sans fil, des radars et d'autres sources, qui représentent une quantité considérable d'énergie disponible. L'absorbant métamatériau, spécialement conçu pour maximiser l'absorption des ondes RF, joue un rôle central dans ce processus de collecte d'énergie. Lorsque les ondes RF frappent la structure de l'absorbant métamatériau, elles induisent des courants électriques à l'intérieur de celui-ci. Ces courants peuvent être capturés et convertis en électricité utilisable à l'aide de circuits de conversion d'énergie appropriés.

La collecte d'énergie RF ambiant à haut rendement présente plusieurs avantages potentiels. Elle permettrait de réduire notre dépendance aux sources d'énergie traditionnelles, d'accroître l'autonomie des dispositifs électroniques et de contribuer à la réalisation de systèmes énergétiquement autonomes. De plus, cela pourrait ouvrir de nouvelles opportunités dans des domaines tels que l'électronique portable, l'Internet des objets et les systèmes autonomes.

Ce mémoire comporte trois chapitres suivis par une conclusion générale :

Le premier chapitre est consacré à présenter l'état de l'art d'Absorbant métamatériau. Nous traiterons spécifiquement des principes et des propriétés après avoir fait un bref historique des métamatériaux. Ensuite, nous mentionnons les domaines d'application de ce type de matériau.

Le deuxième chapitre est consacré à présenter la collecte d'énergie RF, puis expliquer les sources d'énergies RF dans l'environnement.

Le troisième chapitre est consacré de la Conception d'un absorbant pour la collecte d'énergie RF à base de métamatériaux (MTM).

Enfin, nous terminons notre mémoire par une conclusion générale.

**CHAPITRE I**  
**ÉTAT DE L'ART D'ABSORBANT**  
**MÉTAMATÉRIAU**

## **I.1 INTRODUCTION**

La soif insatiable de la science et de la technologie pour mieux, plus Performant, peut promettre des perspectives illimitées. Dans la zone en optique, un nouveau venu fait grand bruit : les « métamatériaux ». Les métamatériaux sont des matériaux fabriqués par l'homme avec des propriétés Ondes électromagnétiques étranges que nous ne pouvons pas trouver dans la nature ou eux Les ingrédients sont séparés. La caractéristique la plus intéressante est la possibilité de Contrôler ou modifier la permittivité et la perméabilité des matériaux pour obtenir adaptez le comportement de l'application spécifique. Métamatériaux utilisés pour améliorer les antennes, les filtres et coupleur. Leur principal avantage est la miniaturisation du dispositif due à l'indexation réfraction assez facilement réglable, qui peut même être négative à certaines fréquences [1].

## **I.2 MÉTAMATERIAU**

### **I.2.1 DÉFINITION ET HISTOIR DES MÉTAMATERIAU**

En physique et en électromagnétique, le terme métamatériaux fait référence aux matériaux composites artificiels avec des caractéristiques électromagnétiques, qui ne se trouvent pas dans les matériaux naturels. Ce n'est pas une structure périodique qui équivaut à des matériaux uniformes qui n'existent pas dans la nature, la structure générale des composants électriques ou la métallurgie [2]. Il existe de nombreux types de super matériaux dans les effets électromagnétiques, plutôt que ceux qui présentent une autorisation négative et une annulation magnétique. Mais il y en a d'autres : les médias d'impédance infinis, qui sont inférieurs à 1, etc. En effet, le super matériau est très ancien, car par exemple, la lentille couleur utilisée dans les fenêtres en verre de couleur peut être considérée comme mon super matériau optique. De même, les cristaux de photons peuvent être considérés comme des métamatériaux. [3]

Les métamatériaux, qui sont des matériaux artificiels ayant des propriétés électromagnétiques inhabituelles, ont une histoire scientifique remontant au début du XXe siècle, mais leur développement en tant que domaine distinct et dynamique s'est produit au début des années 2000. Les métamatériaux sont désormais étudiés par une communauté de physiciens, de chimistes et d'ingénieurs en télécommunications, et ont

De nombreuses applications potentielles, notamment dans les domaines de l'optique et des télécommunications.[4]

L'histoire de la compréhension de la nature de la lumière et de ses propriétés est également liée à l'histoire des métamatériaux. Les premières avancées dans la compréhension de la lumière ont été réalisées par les philosophes et mathématiciens grecs de l'Antiquité, et au XVIIe siècle, les lois de la réfraction et de la réflexion ont été énoncées. La théorie ondulatoire de la lumière, qui a été grandement améliorée par Huygens et Fresnel, a été mise en avant, mais a été ignorée pendant près d'un siècle en raison de l'autorité scientifique de Newton. Ce n'est qu'avec les travaux de James Clerk Maxwell au XIXe siècle que la compréhension de la lumière a été grandement améliorée et que la relation entre la lumière, l'électricité et le magnétisme a été établie. [5]

Une Représentation schématique des matériaux classiques et des métamatériaux pour des fréquences  $\nu$  allant au-delà de quelques dizaines de gigahertz dans le plan  $(\epsilon, \mu)$ . Les matériaux classiques (métaux et diélectriques) ont une perméabilité proche de 1 pour ces fréquences. Le reste des possibilités correspond potentiellement aux métamatériaux comme le montre la figure I.1.

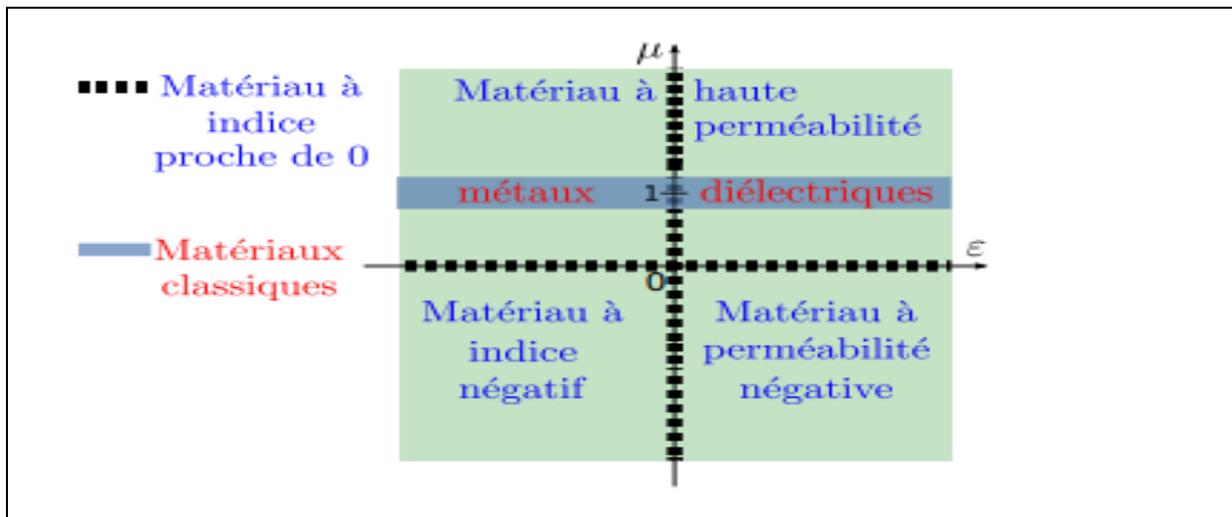


Figure I.1: Une Représentation schématique des matériaux classiques et des métamatériaux.

## **I.2.2 LES TRAVAUX FONDATEURS DES MÉTAMATERIAUX**

### **I.2.2.1 Les travaux de Veselago**

Tout commença en 1964 quand V. Veselago se demanda, d'un point de vue conceptuel, dont les propriétés d'un matériau dont la permittivité et la perméabilité seraient dans la même gamme de fréquence [6]. En appliquant les équations de Maxwell pour une onde plane dans un tel milieu, Veselago remarque que le formé par le vecteur d'onde, le champ électrique et le champ magnétique est indirect, tandis que dans le cas ce même trièdre est connu pour . Par ailleurs, Veselago observe que, dans le même temps, trièdre formé par le vecteur de Poynting, le champ et le champ magnétique reste en revanche direct, ce signifie que pour ces milieux, le vecteur d'onde et vecteur de Poynting pointent dans les directions opposés - inédits a priori. L'orientation du vecteur d'onde donnant le sens de propagation de la phase et l'orientation du vecteur de Poynting celui de la propagation de l'énergie, Veselago a conclu que dans ce type de phase cette matière et l'énergie voyagent dans des directions opposées. À partir des lois de la réfraction de Snell et des relations de passages entre deux milieux, il montre également que l'indice d'un tel milieu est négatif, dans le sens où, lors du passage d'un milieu d'indice positif à négatif (ou inversement), tout rayon est réfracté du même côté de la normale au plan d'incidence (dans un dioptré classique, le rayon "traverse" la normale à la réfraction). Cependant, comme le souligne Veselago dans la partie finale de sa publication théorique, l'absence de matériaux à perméabilité négative rendait, à cette époque, impossible la démonstration expérimentale de ses résultats et le sujet reste lettre morte pour les années.

### **I.2.2.2 Confirmation expérimentale**

Pour que le sujet se lance réellement, il devait la fin des années 1990, avec J. Pendry et son équipe qui réalisent des travaux sur les réseaux de fils métalliques (« wire medium » en anglais) [7, 8] et sur les résonateurs en forme d'anneaux coupés (split-ring resonators ou SRR) [9]. Ces deux types de milieux sont constitués de résonateurs dont les tailles caractéristiques sont très inférieures à la longueur d'onde incidente, et permettent respectivement d'obtenir une permittivité et une perméabilité négative, dans la gamme micro-onde. Dès lors, tous les outils sont réunis pour la expérimentale

des travaux de Veselago, et ce fut le dé. Smith qui fabriqua en 2001 le premier matériau à perméabilité et permittivité négative simultanées dans la gamme micro-onde (voir figure I.2). Ces chercheurs montrèrent que pour un matériau dont un des paramètres est négatif un où les deux paramètres sont négatifs. Dans une seconde publication, ils confirmèrent ensuite grâce à un montage mis en jeu un mètre matériau taillé en prisme, que l'on a bien un indice négatif avec ce type de matériau.

Les premiers métamatériaux (bidimensionnels) à indice négatif dans la gamme micro-onde. Il est constitué de SRRs et de fils en cuivre déposés sur un substrat de fibre de verre. La cellule unitaire à une taille de 5 mm et les métamatériaux est conçu pour fonctionner dans une gamme de longueurs d'onde autour de 3 cm Comme d'écrit dans la figure I.2 [10]



Figure I.2: Le premier matériau à perméabilité et permittivité négative.

### **I.2.3 MÉTAMATERIAU À INDICE NÉGATIVE**

#### **I.2.3.1 À partir de matériaux en l'an 2000**

Le préfixe "méta" signifie que ces matériaux sont fabriqués par l'homme car ils n'existent pas dans la nature, ils sont un mélange de différents matériaux. Leur construction est généralement un assemblage de matériaux électromagnétiques (tels

que des résonateurs électriques) empilés sur plusieurs couches d'un substrat. Cette configuration confère des propriétés macro atypiques, notamment des indices dits "négatifs". Le concept théorique de ce matériau a été développé par le chercheur russe Victor Veselago, qui a publié le premier article sur le sujet en 1968 et a montré leur intérêt théorique. Cependant, la technologie de l'époque ne leur permettait pas de mener des recherches expérimentales. Ce n'est qu'en 2000 que les chercheurs John Pendry et David Smith ont pu proposer une expérience concrète pour ces propriétés innovantes. Depuis, l'étude de ces matériaux a connu un véritable essor de la recherche scientifique.

### **I.2.3.2 Le concept d'un indice négative**

L'indice de réfraction, noté "n", est une caractéristique déterminante d'un matériau. Il régit les angles de réflexion et de réfraction des rayons incidents, conformément aux principes de Snell-Descartes. Il est à noter que cet indice est toujours égal ou supérieur à 1. En exploitant les propriétés uniques des métamatériaux, il est possible d'obtenir un indice de réfraction inférieur à 1, voire en territoire négatif. Ceci, à son tour, fait apparaître le rayon transmis du même côté de la normale que le rayon incident, comme nous voir dans la figure (I.3).

L'indice de réfraction est défini par la relation :

$$n = \sqrt{\varepsilon_r \cdot \mu_r} \quad (\text{I. 1})$$

Où est :

$\varepsilon_r$ : La Permittivité relative du matériau

$\mu_r$  : La perméabilité relative du matériau

Habituellement, cependant, seules les racines positives sont prises en compte, car nous n'avons trouvé aucun matériel pour vérifier les racines négatives jusqu'à présent.

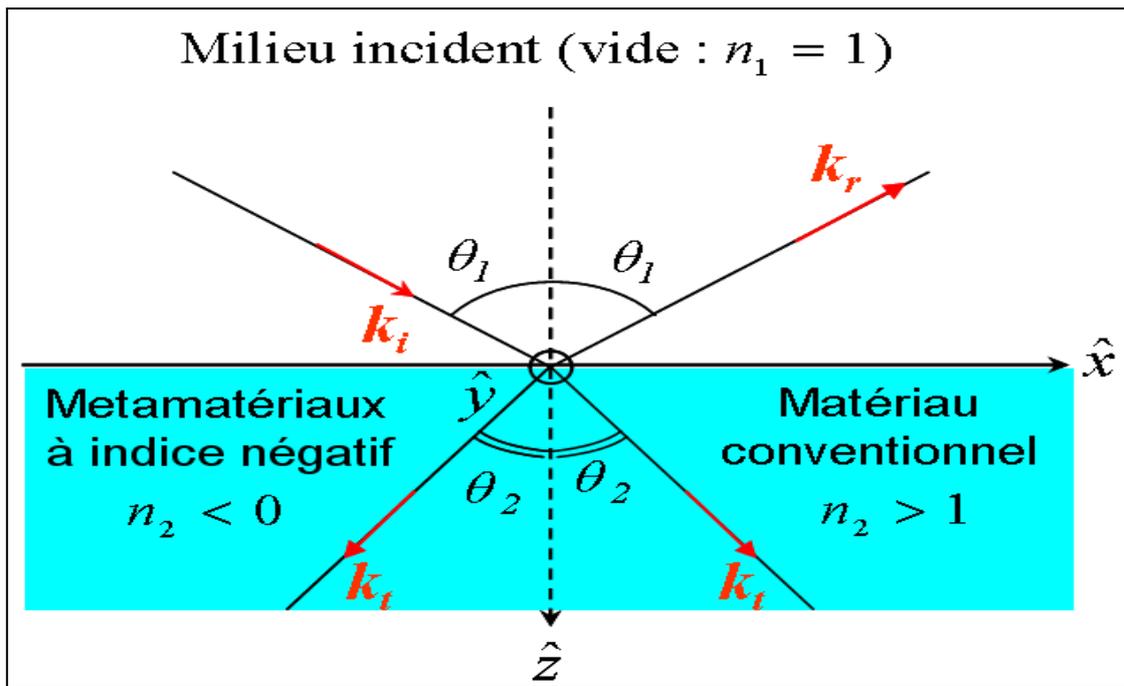


Figure I.3: L'indice de réfraction pour les Métamatériaux.

Où :  $\vec{k}$  est le vecteur d'onde, avec :

$\vec{k}_i$  : Sens de propagation du rayon incident.

$\vec{k}_r$  : Sens de propagation du rayon réfléchi.

$\vec{k}_t$  : Sens de propagation du rayon transmis.

La normale est l'axe des z.

### I.2.3.3 Instructions pour créer les métamatériaux

Les métamatériaux dépendent fortement des résonateurs, familièrement appelés "résonateurs à anneau fendu" (SRR « **Split Ring Resonators** »).

Figure I.4, dont la taille et les dimensions varient en fonction des études sur le terrain. Les résonateurs, d'un diamètre aussi petit qu'un millimètre, représentent la limite technologique. Pour accentuer les effets électromagnétiques, des résonateurs sont couplés, introduisant une inductance et une capacité mutuelles. Une cellule constituée de résonateurs imbriqués de deux millimètres de diamètre présente typiquement les caractéristiques suivantes :

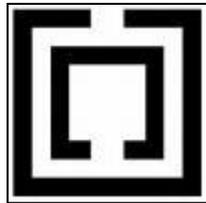
Inductance : 1nH

Inductance mutuelle : 0,01 nH

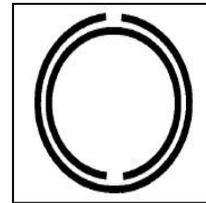
Capacité : 1pF

Capacité mutuelle : 0,01 pF

Résistance : 0,1  $\Omega$



(a)



(b)

Figure I.4: Les résonateurs à anneau fendu. (a): SRR Carrée (b): SRR Circulaire

Ces cellules sont ensuite imprimées, généralement périodiquement, sur des supports appelés substrats (teflon, fibres de verre, ...) et sont espacées de quelques millimètres les unes des autres. Les supports sont ensuite superposés de manière à former un bloc supposé par la suite homogène.

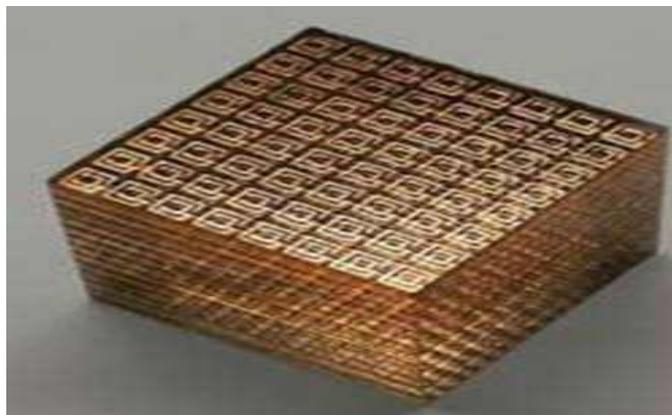


Figure I.5: Des cellules en Métamatériaux.

Comme tout échantillon, le coût de réalisation de ces métamatériaux est très élevé du fait de leur fabrication sur mesure et leurs caractéristiques électromagnétiques (inductance, capacité, résistance) restent aujourd'hui encore limitées.

#### **I.2.3.4 La longueur d'onde de la résonance du métamatériau**

La longueur d'onde de résonance d'un métamatériau dépend de sa conception spécifique et des propriétés électromagnétiques visées. En raison de la nature complexe et variée des métamatériaux, il n'y a pas de longueur d'onde de résonance

unique qui s'applique à tous les métamatériaux. Dans un métamatériau, la résonance peut être obtenue en ajustant les caractéristiques géométriques et les propriétés électromagnétiques des unités constitutives du matériau, telles que leur taille, leur forme, leur disposition et leurs propriétés magnétiques ou électriques. Cela signifie que la longueur d'onde de résonance d'un métamatériau peut être conçue pour fonctionner dans différentes parties du spectre électromagnétique, y compris les ondes radiofréquences. En ajustant les paramètres de conception, il est possible de créer des métamatériaux résonants à des longueurs d'onde spécifiques. Il est important de noter que les métamatériaux résonants peuvent être conçus pour avoir des résonances multiples ou larges [11].

### **I.2.4 PROPAGATION ÉLECTROMAGNÉTIQUE DANS UN MILIEU HOMOGENE**

Pour une onde électromagnétique monochromatique se propageant dans un milieu homogène,

On peut réécrire les équations de Maxwell sous cette forme [12] :

$$\nabla \times E = \frac{\partial B}{\partial t} \quad (I.2)$$

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} \quad (I.3)$$

$$B = \mu H \quad (I.4)$$

$$D = \varepsilon E \quad (I.5)$$

Où :

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (I.6)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0 \quad (I.7)$$

Et avec :

E : Le champ électrique.

H : Le champ magnétique.

B : L'induction magnétique.

D : L'induction électrique.

Et  $\mu$  : La perméabilité,  $\varepsilon$  : la permittivité.

Pour une onde plane se propageant dans la direction z, les propriétés d'onde ( $e^{j\omega t}$ ) et de propagation ( $e^{-\gamma z}$ ) sont associées aux champs électromagnétiques E et L'équation de propagation en fonction de champs électromagnétiques E et H s'écrit :

$$E = E_0 e^{j\omega t} e^{-\gamma z} \quad (I.8)$$

$$H = H_0 e^{j\omega t} e^{-\gamma z} \quad (I.9)$$

Les équations de Maxwell établissent une corrélation entre les champs E et H, ce qui signifie qu'une onde peut être représentée par l'un ou l'autre. Habituellement, le champ électrique est utilisé comme représentation de l'onde dans un but de simplification ;  
Donc :

$E_0$  Représente l'amplitude du champ électrique,  $\omega$  la pulsation qui est définie par :

$$\omega = 2\pi f \quad (I.10)$$

Avec  $f$  la fréquence.

Dans l'équation de propagation (1.8),  $\gamma$  est appelée la constante de propagation, elle est définie par :

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (I.11)$$

Avec  $\alpha$  : l'atténuation et  $\beta$  la constante de phase définie par  $\beta = \omega\sqrt{\varepsilon\mu}$ .

Selon la forme de la constante de propagation  $\gamma$  on définit trois cas :

a) La valeur de  $\gamma$  est purement réelle : ( $\gamma = \alpha$ ) l'onde électromagnétique est évanescente, elle décroît exponentiellement lors de sa propagation.

b) La valeur de  $\gamma$  est purement imaginaire : ( $\gamma = j\beta$ ) l'onde électromagnétique est propagative ( $\gamma$  constant de propagation)

c) La valeur de  $\gamma$  est complexe : ( $\gamma = \alpha + j\beta$ ) l'onde électromagnétique est propagative avec un terme de pertes.

Si on considère l'onde qui se propage sans pertes, on peut écrire les équations (I.8) et (I.9) :

$$E = E_0 e^{j\omega t} e^{-jkz} \quad (I.12)$$

$$H = H_0 e^{j\omega t} e^{-jkz} \quad (I.13)$$

Pour  $k$  nombres d'onde, sachez que dans l'hypothèse de propagation TEM :

$$\beta = k \quad (I.14)$$

A partir des équations (I.2), (I.3) (I.4) (I.5) et (I.12), (I.13) on peut réécrire les équations de Maxwell sous cette forme :

$$k \times E = \omega\mu H \quad (I.15)$$

$$k \times H = -\omega\mu E \quad (I.16)$$

Avec :

La permittivité relative : [14]

$$\varepsilon_r = \frac{2}{\sqrt{-kd}} \frac{1 - V_1}{1 + V_1} \quad (I.17)$$

Et la perméabilité relative : [14]

$$\mu_r = \frac{2}{\sqrt{-kd}} \frac{1 - V_2}{1 + V_2} \quad (I.18)$$

Avec:

- $d$  : Hauteur de la Substrat.
- $k = \frac{\omega}{c}$  : Nombres d'onde. (avec  $\omega = 2\pi f$  et  $c$  : la vitesse de la lumière)

Et on prend :

- $V_1 = S_{21} + S_{11}$
- $V_2 = S_{21} - S_{11}$

Donc à partir de l'équation (I. 1) l'indice de réfraction :

$$n = \text{real} \left[ \frac{c}{2\pi f d} \sqrt{\frac{(S_{21} - 1)^2 - (S_{11})^2}{(S_{21} - 1)^2 + (S_{11})^2}} \right] \quad (\text{I. 19})$$

Avec :

$n$  : L'indice de réfraction.

$c$  : La vitesse de la lumière

$f$  : La fréquence.

## I.2.5 TERMINOLOGIE

Plusieurs synonymes de MMT existent dans la documentation, rendant le document gaucher. Ils peuvent être résumés comme suit :

Matériel gauche :(left-handed materials).Le terme a été introduit par Veselago [6] .Il a mis en évidence une propriété fondamentale de l'opposition entre les vitesses de phase et de groupe, Matériau double négatif :(double-negative materials).Les marqueurs négatifs de perméabilité et de perméabilité sont clairement mentionnés. Par conséquent, le terme ne peut pas être utilisé hors de son contexte, Matériaux à indice négatif :(negative refractive index materials).Ce terme décrit bien les matériaux 2D et 3D.En revanche, il ne peut pas être utilisé pour les matériaux 1D car la notion d'angle de réfraction n'a plus de sens, Matériaux à ondes réfléchies, Matériaux de Veselago (Veselago medium) [15]

## I.2.6 LES APPLICATION DES MÉTAMATÉRIAUX

### I.2.6.1 Lentilles parfaits

Une lentille parfaite est une lentille qui ne se déforme pas, ne bascule pas et a une résolution infinie (l'image d'un point est techniquement un point). Une lentille convergente convexe régulière avec un indice de réfraction supérieur au vide ( $n = 1$ ) produit une image inversée dans le plan image. Dans ce cas, deux points distants de moins d'environ une demi-longueur d'onde sont impossibles à distinguer. Cette limite de résolution finale est due à la diffraction de la lumière incidente sur l'objet imagé. En 2000, J. Pendry a proposé la réalisation d'une « lentille plate », une simple lame d'indice de réfraction -1 présentée par Veselago. Il a donc mis en pratique le médium optique inventé par V. Veselago uniquement pour des fréquences spécifiques [16]. Mais en 2005, l'équipe de Shang Zhang à l'Université de Los Angeles a utilisé un métamatériau constitué d'un mince film d'argent pris en sandwich entre deux couches semi-conductrices pour obtenir plus d'un cinquième des fréquences dans la gamme visible. La résolution en longueur d'onde est démontrée expérimentalement. [17]

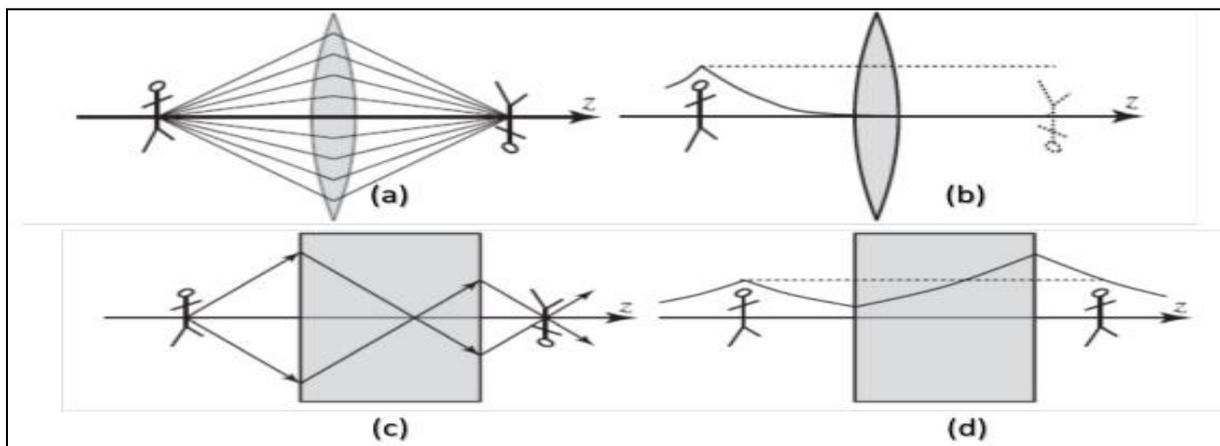


Figure I.6: Images virtuelles répliquées pour les supports MD et MG.

### I.2.6.2 Manteau invisible (cape d'invisibilité)

La première cape d'invisibilité micro-ondes a été mise au point par John Pendry en 2006. Il a proposé un métamatériau capable de contrôler et de manipuler les champs électromagnétiques. Cette coque invisible dévie les ondes centimétriques ou micro-ondes (Fig. I.7). Cette propriété est due à la présence de mini circuits de tailles inférieures à la longueur d'onde et à la structure en anneaux concentriques [18].



Figure I.7: Cape d'invisibilité de J. Pendry [19].

### I.2.6.3 Application pour les antennes

L'utilisation de métamatériaux dans les antennes vise à améliorer des propriétés telles que le gain et la directivité. Placer le matériau de gauche près de l'antenne patch (Figure I.8) améliore le gain et la directivité [20]. En fait, l'antenne a une ouverture de -3dB de  $30^\circ$  au lieu de  $100^\circ$ , ce qui la rend plus directionnelle, car elle n'a pas de métamatériau. Les bénéfices sont également améliorés. La figure I.9 montre le gain de l'antenne patch seule par rapport au gain de la même antenne avec le métamatériau présent. L'effet du matériau à gauche sur l'antenne patch peut s'expliquer en modifiant la représentation du champ de rayonnement. La figure I.10 compare la distribution du champ électrique sans et avec le matériau gauche.

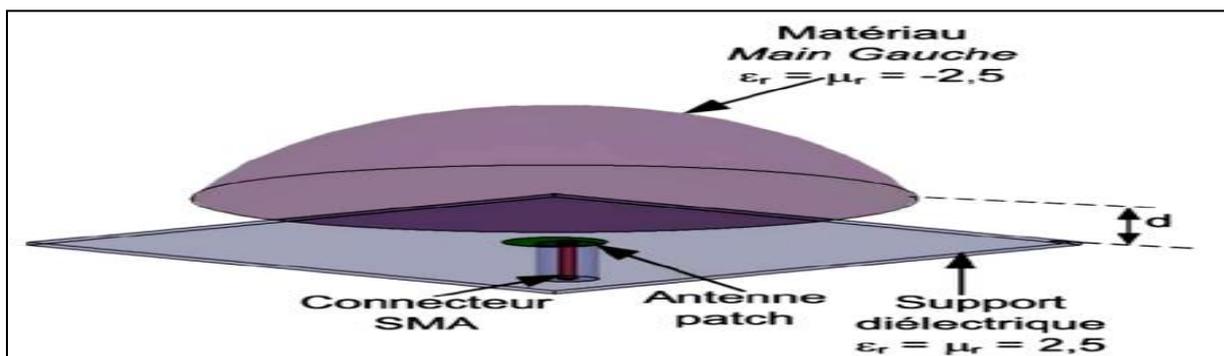


Figure I.8: Schéma de l'appareil où le métamatériau de la main gauche est placé au-dessus de l'antenne patch.

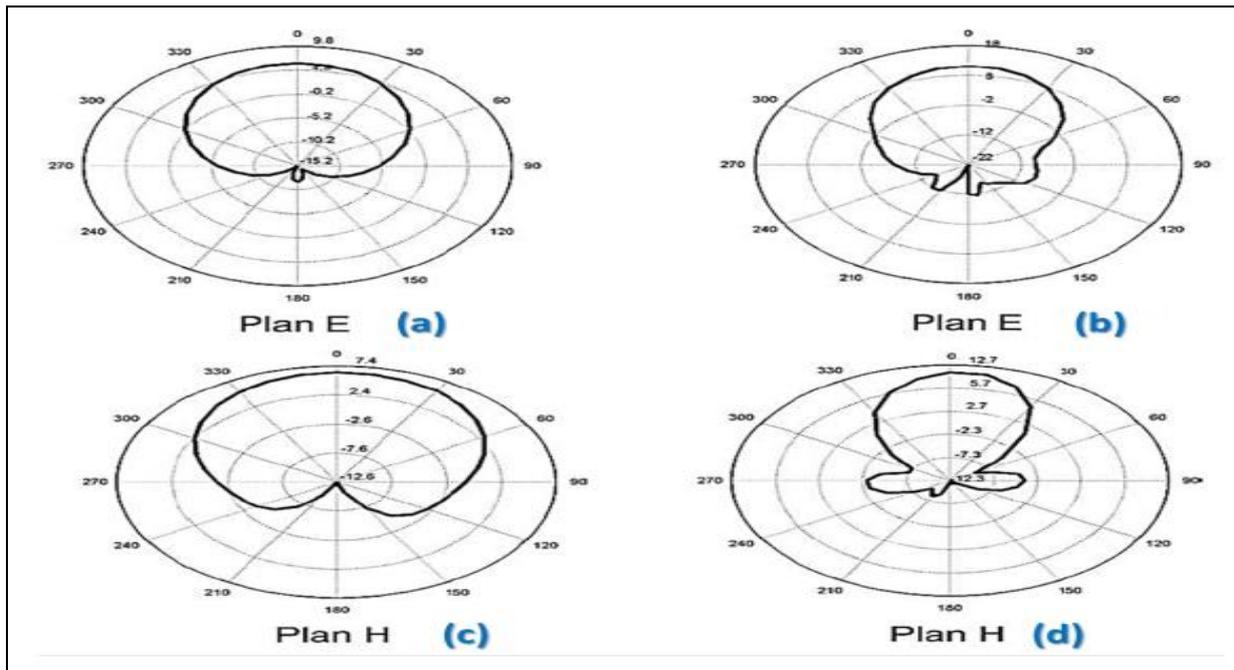


Figure I.9: Comparez le gain d'antenne avec et sans métamatériau. (a) et (c) patch d'antenne en l'absence de métamatériau. (b) et (d) antenne patch en présence de métamatériau [21]

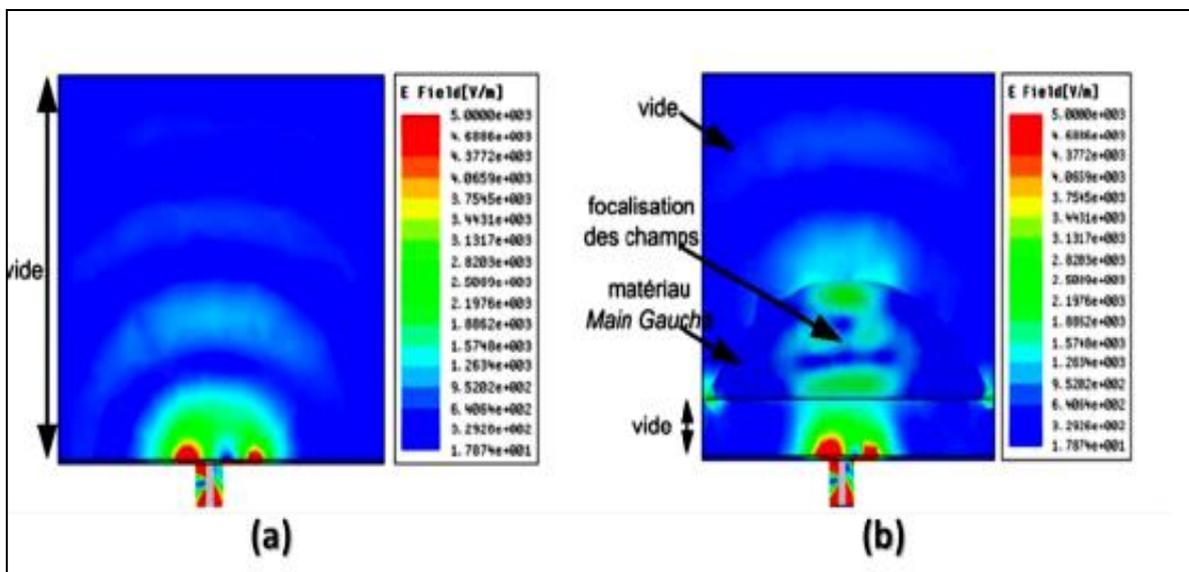


Figure I.10 : Répartition du champ électronique : (a) antenne seule. (b) antenne en présence de métamatériau.

Il existe également d'autres applications des métamatériaux telles que la collecte d'énergie radio fréquence dont nous parlerons dans le deuxième me chapitre.

### **I.3 ABSORBANT MÉAMATÉRIAU**

Un absorbant métamatériau est un matériau artificiel conçu pour absorber les ondes électromagnétique. Il est composé de structures artificielles qui sont conçues pour avoir des propriétés électromagnétiques spécifiques. Ces matériaux sont souvent utilisés dans les domaines de la communication sans fil, de la défense et de l'aérospatiale pour réduire les interférences électromagnétique et améliorer la qualité de signale. [22]

#### **I.3.1 INTÉRET**

Les recherches sur les absorbants avec des métamatériaux n'ont commencé que récemment, à l'instar de ce qui a été fait sur les matériaux absorbants contenant des circuits analogiques, en particulier pour les FSS. Par rapport aux absorbant comportant des circuits analogiques, l'amélioration apportée par ce type de matériau réside dans la réduction de l'épaisseur de la structure, c'est-à-dire en dessous de la barre de quart d'onde de la longueur d'onde  $d$  la plus faible qui passe dans la bande souhaitée. Les absorbants magnétiques ont également été réduits en épaisseur, mais leur principal inconvénient est leur masse, car ce sont des matériaux riches en particules de fer ou de ferrite. Les métamatériaux absorbants sont fabriqués sur des substrats diélectriques standards de faible qualité. Ainsi, les métamatériaux absorbants cumulent plusieurs avantages : faible épaisseur et masse réduite. Si l'on ajoute qu'ils peuvent être fabriqués sur des matériaux standards de la bande micro-ondes dans l'industrie des circuits imprimés, ce type d'absorbant peut répondre à des exigences de production jusqu'ici non satisfaites.

#### **I.3.2 TYPES D'ABSORBANTS ELÉCTROMAGNÉTIQUE**

##### **I.3.2.1 Absorbant électrique**

Ce type d'absorbant est à la base de la création d'autres absorbants. Ce sont des structures en mousse, en polymère ou en nid d'abeille remplies de particules de carbone ou de métal (fer, aluminium, cuivre, etc.). Ces matériaux sont conçus pour avoir une constante de perte diélectrique la plus élevée possible, convertissant ainsi en chaleur le maximum des ondes qui les traversent. L'impédance de ce type de matériau ne correspond pas nécessairement à celle de l'espace libre, ils peuvent donc présenter de fortes réflexions à leurs interfaces. [23]

### **I.3.2.2 Absorbants avec structure d'adaptation d'impédance**

On sait que la réflexion d'une onde à une interface matérielle est proportionnelle à l'impédance de celle-ci. Partant de ce constat, trois types d'absorbants (couches pyramidales, à charge progressive et d'adaptation d'impédance) ont été développés pour améliorer la diffusion des ondes électriques dans les couches absorbantes diélectriques.

#### **I.3.2.2.1 Les absorbants pyramidaux**

Sont un type de traitement acoustique utilisé pour réduire le bruit et les échos dans divers environnements. Les absorbants pyramidaux sont des matériaux généralement épais et structurés avec des formes pyramidales ou coniques espacées régulièrement et perpendiculairement à la surface de l'objet à dissimuler. Ces absorbants ont été conçus dans le but de créer une transition progressive à l'interface entre l'air et l'impédance d'absorbant. La longueur d'onde des ondes détermine la hauteur et la périodicité des pyramides, ce qui les rend plus efficaces. Lorsque les pyramides sont plus courtes ou que les longueurs d'onde sont plus longues, les ondes rencontrent un changement d'impédance plus brusque, entraînant des performances moins efficaces. En conséquence, les absorbants pyramidaux ont une fréquence de fonctionnement minimale spécifique qu'ils peuvent efficacement atténuer sur une large gamme de fréquences et d'angles. Dans l'ensemble, ces absorbants offrent des performances de haute qualité. Les absorbants pyramidaux sont connus pour présenter certains inconvénients, parmi lesquels leur épaisseur et leur propension à se fragiliser. Ces absorbants sont le plus souvent utilisés dans la création de chambres an échoïques spécifiquement pour des applications liées à la compatibilité électromagnétique (CEM). [24]

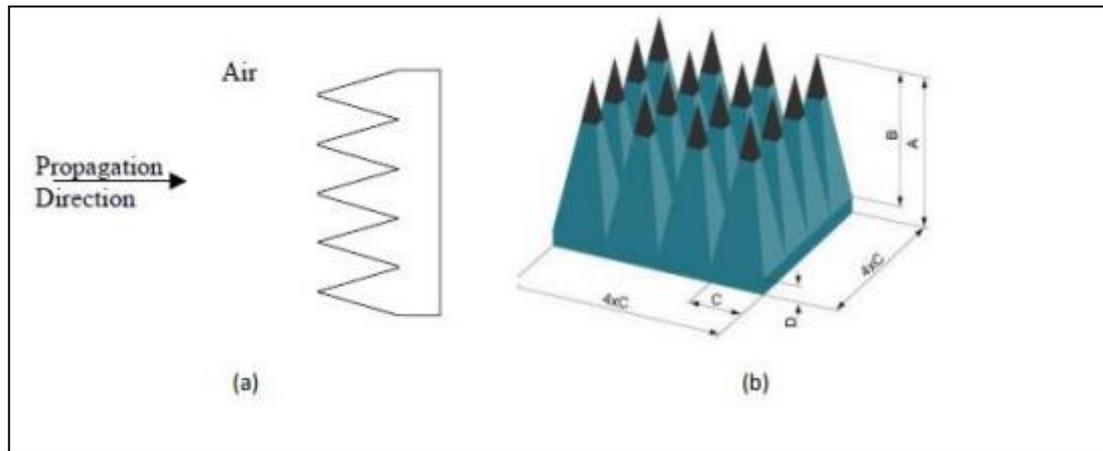


Figure I.11:(a) Description de la structure d'absorbant pyramidal et (b) exemple d'absorbant pyramidal.

**I.3.2.2 Absorbants chargés progressivement**

L'absorbant de charge rubané est typiquement composé de deux plaques : l'une en matériau à faible perte et l'autre en matériau à forte perte. Il existe deux types de structures distinctes pour ce matériau. Dans la structure idéale, la composante avec perte est dispersée de manière homogène parallèlement à la surface de l'objet à protéger, avec un gradient progressif et perpendiculaire à la surface. Cependant, la réalisation de ce type de gradient est difficile et coûteuse. La structure la plus courante est constituée de couches homogènes, avec une charge qui augmente dans le sens de la propagation. Ce type de structure crée le gradient comme une fonction en escalier. Bien que ces matériaux soient plus fins que les absorbants pyramidaux, ils sont également moins efficaces.

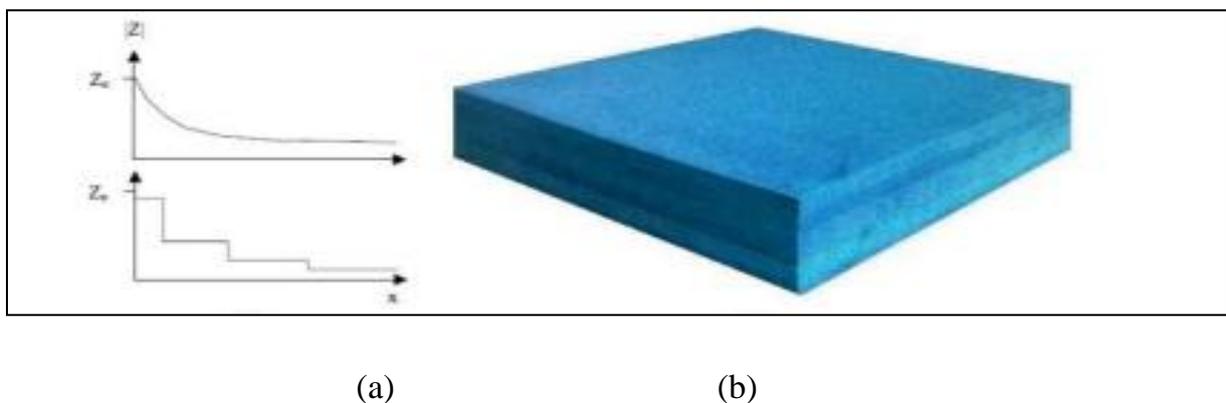


Figure I.12: (a) Des courbes d'impédance idéales et typiques, et (b) Un exemple de matériau absorbant progressivement chargé.

### I.3.2.2.3 Absorbants avec couche d'adaptation d'impédance

Un absorbant à couche adaptée tente de réduire l'épaisseur requise du matériau avec une charge croissante. Dans ce type d'absorbants, une couche de transition absorbante est placée entre l'onde incidente et le matériau absorbant. La couche de transition a une valeur d'impédance intermédiaire entre les impédances des deux supports. L'idée est de créer des transitions d'impédance entre différents supports. Cette adaptation se produit lorsque l'épaisseur de la couche d'adaptation est le quart de la longueur d'onde de l'onde incidente (voir Figure I.13) et :

$$Z_2 = \sqrt{Z_1 Z_3} \quad (\text{I. 20})$$

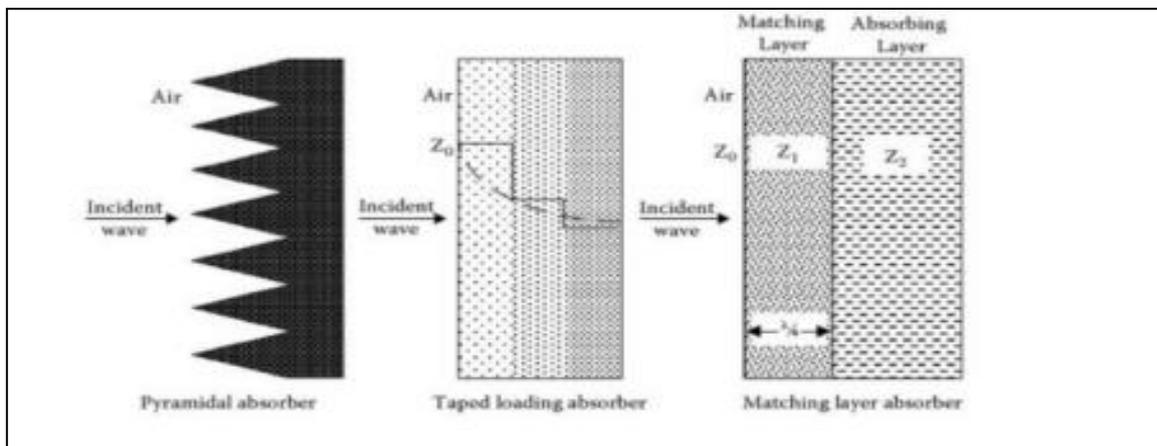


Figure I.13: Illustration de divers types de matériaux de structure

Et on a autre type d'absorbants électromagnétiques comme :

Absorbants résonants.

Absorbants comportant des circuits analogiques.

Absorbants adaptatifs.

Absorbants magnétiques.

Absorbant à Métamatériaux.

## I.3.3 LES APPLICATIONS DES ABSORBANTS MÉTAMATÉRIAUX

### I.3.3.1 Filtres et écran électromagnétique

Les métamatériaux absorbants peuvent être utilisés pour concevoir des filtres et des écrans qui bloquent sélectivement certaines fréquences électromagnétiques. Cela peut

être appliqué dans la conception de circuits, d'antennes, de cloisons et de revêtements pour réduire les interférences électromagnétiques.

### **I.3.3.2 Capteurs et d'détecteurs**

Les métamatériaux absorbants peuvent être utilisés dans la fabrication de capteurs et de détecteurs pour différentes gammes de fréquences, y compris les micro-ondes et les ondes infrarouges. Ces capteurs peuvent être utilisés dans des applications telles que la détection de fuites de gaz, la surveillance environnementale et la surveillance de sécurité.

### **I.3.3.3 Énergie solaire**

Les métamatériaux absorbants peuvent être utilisés pour augmenter l'efficacité des cellules solaires en capturant une plus grande quantité de lumière solaire et en la convertissant en électricité. Ces matériaux peuvent également être utilisés dans la conception de panneaux solaires flexibles et légers.

## **I.4 CONCLUSION**

Ce que l'on peut récapituler dans ce chapitre, c'est que les métamatériaux ont un rôle très important à jouer dans les nouvelles technologies, dans le domaine de collecte d'énergie RF ambiant absorbant, que nous expliquerons dans le deuxième chapitre.

## **CHAPITRE II**

# **COLLECTE D'ENERGIE RF AMBIANT**

## **II.1 INTRODUCTION**

Les systèmes de récupération d'énergie permettent de capter un maximum d'énergie pour la transformer en une autre forme selon notre désir. A ce stade, il existe plusieurs types de systèmes de récupération d'énergie tels que (photoélectriques, piézoélectriques, récupérateurs d'énergie RF, ...). Ces systèmes ont été inventés - pour éliminer l'utilisation de batteries et pallier les problèmes de décharge et de charge et rendre les différentes machines autonomes en termes d'alimentation électrique. Dans ce chapitre, nous présenterons le système de récupération d'énergie RF par un absorbant métamatériau. [25]

La collecte d'énergie par radiofréquence (RF) est une technologie émergente qui suscite de plus en plus d'intérêt dans le domaine de l'autonomie énergétique. Elle offre une approche novatrice pour capturer et utiliser l'énergie environnante présente dans les ondes électromagnétiques qui nous entourent, telles que les signaux radio, les télécommunications sans fil et les réseaux Wi-Fi. Cette technologie prometteuse permet de convertir ces ondes RF en énergie électrique exploitable, offrant ainsi une source d'énergie alternative et renouvelable pour alimenter une variété d'appareils électroniques. En exploitant les ressources énergétiques omniprésentes, la collecte d'énergie RF ouvre de nouvelles perspectives pour atteindre une plus grande autonomie énergétique et réduire notre dépendance aux sources traditionnelles d'énergie.

## **II.2 ÉNERGIE RADIOFRÉQUENCE (RF)**

L'énergie radiofréquence (RF) est une forme d'énergie qui se manifeste sous la forme d'ondes électromagnétiques à des fréquences spécifiques. Ces ondes sont générées par des appareils et des systèmes de communication qui utilisent des signaux radio pour transmettre des informations sans fil [26]. L'énergie RF est présente dans notre environnement quotidien, provenant notamment des émetteurs radio, des antennes de téléphonie mobile, des réseaux Wi-Fi, des dispositifs de communication sans fil, etc.

La collecte d'énergie par radiofréquence (RF) est une méthode qui permet de récupérer et de convertir cette énergie RF ambiante en énergie électrique utilisable [27]. Cela est rendu possible grâce à l'utilisation de dispositifs spécifiques appelés antennes de

collecte d'énergie ou antennes RF. Ces antennes sont conçues pour capter les ondes RF présentes dans l'environnement et convertir leur énergie en courant électrique.



Figure II.1 : les applications d'énergie radiofréquence dans tous les secteurs de la vie quotidienne. [28]

### **II.3 DÉFINITION DE LA COLLECTE D'ÉNERGIE**

La collecte d'énergie fait référence au processus de récupération et de stockage de l'énergie à partir de différentes sources pour une utilisation ultérieure. Il existe plusieurs techniques de collecte d'énergie, notamment la collecte d'énergie solaire, la collecte d'énergie éolienne, la collecte d'énergie thermique, la collecte d'énergie mécanique, la collecte d'énergie électromagnétique, etc. L'objectif de la collecte d'énergie est d'exploiter les sources d'énergie disponibles dans l'environnement afin de les convertir en une forme d'énergie utilisable pour alimenter des appareils électroniques, des systèmes de stockage d'énergie ou d'autres dispositifs.

### **II.4 LA COLLECTE D'ÉNERGIE RF PAR UN ABSORBANT MÉTAMATÉRIAU**

La collecte d'énergie radio fréquence par un absorbant à métamatériaux est une technique qui permet de convertir les ondes radio en énergie électrique. Les métamatériaux sont des matériaux artificiels possédant des qualités électromagnétiques uniques, notamment la capacité de présenter un comportement de réfraction négative. Les absorbant à métamatériaux sont utilisés pour la collecte d'énergie dans de

nombreuse application, telles que l'aérospatiale, les communications et la création de matériaux super-absorbants pour les applications électromagnétiques. Les antennes en métamatériaux peuvent absorber les ondes radio et les convertir en énergie réutilisable, ce qui pourrait changer les secteurs de l'énergie dans son ensemble.

Enfin, les absorbants à métamatériaux peuvent être utilisés pour créer des matériaux super-absorbants pour les applications électromagnétiques. [29]

## II.5 LES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Une onde électromagnétique est un type d'onde qui peut se propager dans un milieu se propageant tel que le vide ou l'air, à des vitesses proches de la vitesse de la lumière, soit proches de 300 000 km/s. Par exemple, ces ondes sont créées par le déplacement de charges électriques. Ils correspondent aux oscillations combinées des champs électriques et magnétiques dont l'amplitude évolue sinusoïdalement avec le temps [30].

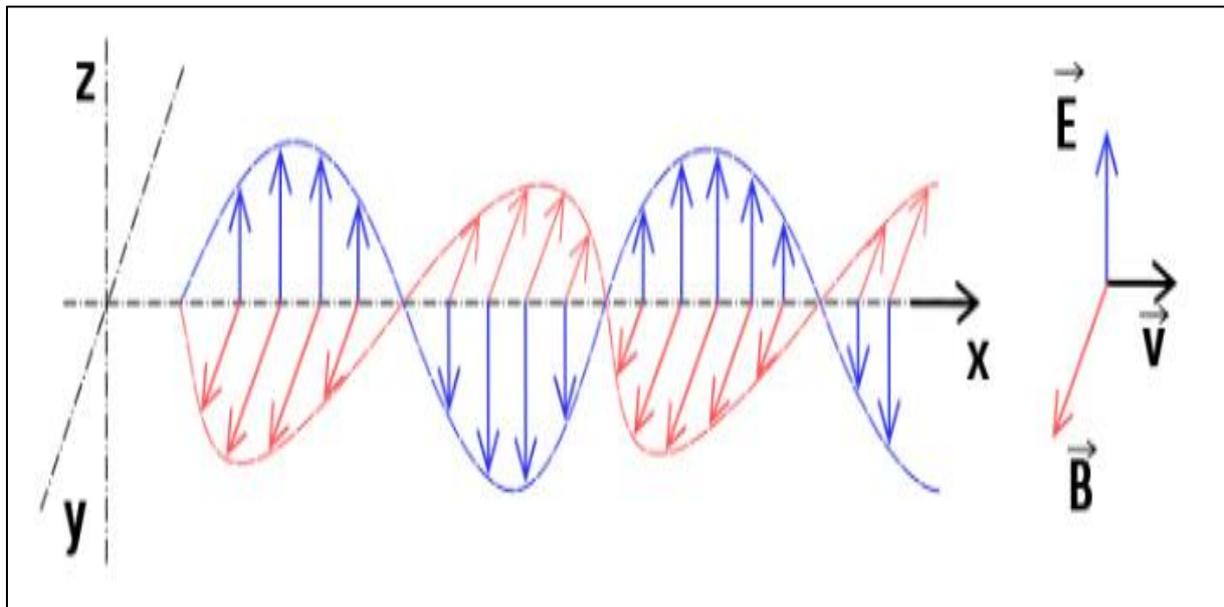


Figure II.2: Les ondes électromagnétiques dans le domaine de la communication. Les ondes électromagnétiques transportent de l'énergie, mais elles sont également capables de transporter des informations. C'est pourquoi ils sont utilisés dans le domaine de la communication. Plus précisément, les ondes électromagnétiques sont utilisées pour faire fonctionner les Smartphones, les radios ou sont utilisées pour prendre des radiographies du corps humain. De même, la lumière visible est une onde

électromagnétique ; Cela nous permet de voir les couleurs. Ces différentes ondes électromagnétiques se distinguent et se caractérisent par leur fréquence, c'est-à-dire le nombre d'oscillations par seconde. La fréquence est exprimée en Hertz. Une autre caractéristique des ondes électromagnétiques est la longueur d'onde, c'est-à-dire la distance entre deux oscillations d'onde. Elle est inversement proportionnelle à la fréquence.

Les ondes électromagnétiques sont classées selon leur fréquence dans ce que l'on appelle le "spectre électromagnétique".

## II.6 LA POLARISATION DES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUE

La polarisation des ondes électromagnétiques fait référence à l'orientation du champ électrique associé à l'onde. Elle décrit la direction dans laquelle les oscillations du champ électrique se produisent par rapport à la direction de propagation de l'onde.

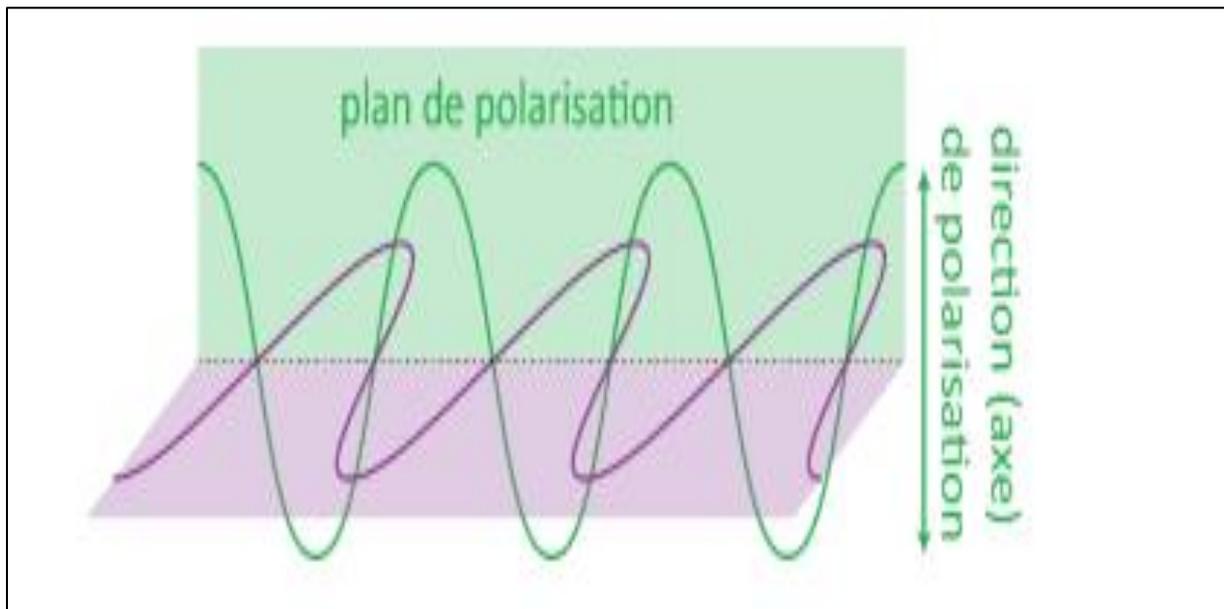


Figure II.3: La polarisation des ondes électromagnétique.

Il existe trois types de polarisation couramment rencontrés :

**Polarisation linéaire :** Dans ce cas, le champ électrique oscille dans une direction fixe le long de l'axe de propagation de l'onde. On peut avoir une polarisation linéaire horizontale, verticale ou inclinée à un angle spécifique.

**Polarisation circulaire :** Ici, le champ électrique oscille dans un plan perpendiculaire à l'axe de propagation de l'onde et suit une trajectoire circulaire. La polarisation circulaire peut être soit dans le sens des aiguilles d'une montre (polarisation circulaire

droite), soit dans le sens inverse des aiguilles d'une montre (polarisation circulaire gauche).

Polarisation elliptique : Cette polarisation est une combinaison de polarisation linéaire et circulaire. Le champ électrique oscille dans un plan perpendiculaire à l'axe de propagation de l'onde, suivant une trajectoire elliptique.

On a des différents d'états de polarisation comme :

La lumière naturelle pour un rayonnement au sein duquel toutes les directions de polarisation sont présentes. La lumière naturelle est dite non polarisée. Par exemple : Lumière émise par le Soleil, lumière émise par les vapeurs atomiques atomiques.

La lumière polarisée rectilignement : On parle de lumière polarisée rectilignement (ou lumière polarisée tout court) si une seule direction de polarisation est présente.

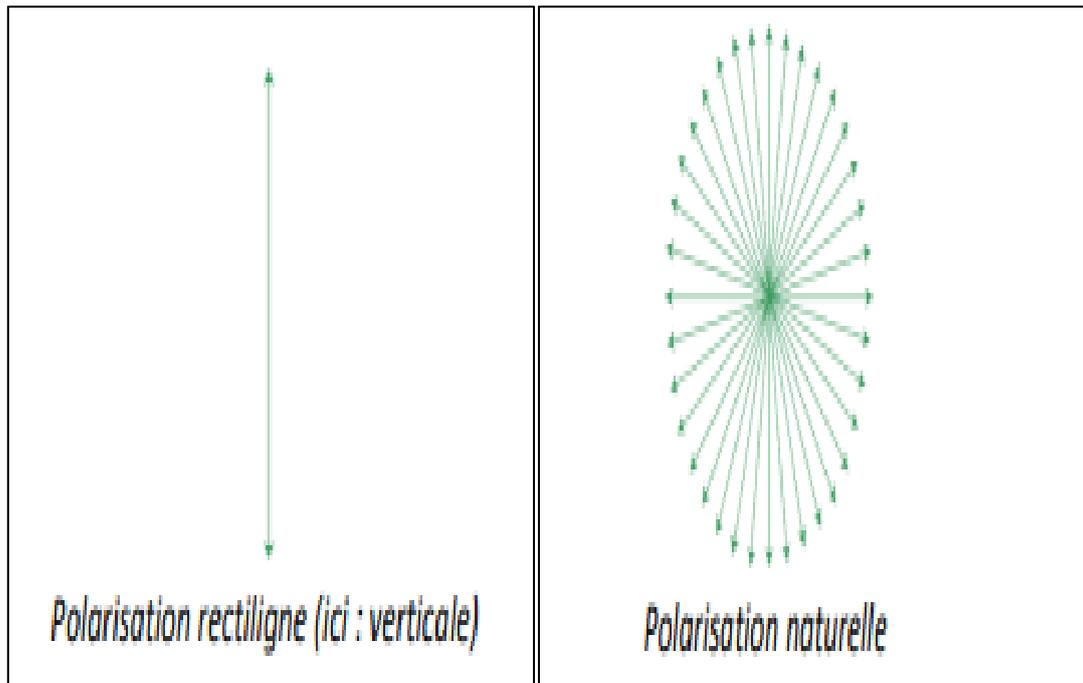


Figure II.4 : Les différents états de polarisation (rectiligne, naturelle)

## II.7 LES INTERFÉRENCE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Les interférences électromagnétiques (EMI ou EMI), également appelées interférences radioélectriques (RFI) lorsqu'elles se trouvent dans le spectre des radiofréquences, sont des interférences (générées par une source externe) qui affectent les circuits électriques par induction électromagnétique, à liaison électrostatique ou conductrice [31]. La perturbation peut réduire les performances du circuit ou même empêcher le circuit de fonctionner. Dans le cas des chemins de données, ces effets peuvent aller d'un taux

d'erreur accru à une perte complète de données [32]. Les sources artificielles et naturelles qui produisent des courants et des tensions variables peuvent provoquer des EMI

systèmes d'allumage, réseaux cellulaires de téléphonie cellulaire, foudre, éruptions solaires et aurores polaires (nord ou australiennes). TNCT affecte fréquemment la radio AM. Ils peuvent également affecter les téléphones portables, la radio FM et la télévision, ainsi que les observations de radioastronomie et de science atmosphérique. Les EMI peuvent être utilisées intentionnellement pour le brouillage radio, comme dans la guerre électronique

La compatibilité électromagnétique (CEM) consiste à adapter les appareils afin d'éviter les EMI. On peut distinguer trois types d'EMI :

Les interférences par conduction

Les interférences par induction

Les interférences par rayonnement (ou interférences radio)

### **II.7.1 RFI en radioastronomie**

Les interférences en radioastronomie sont toutes les sources radio (autre que les sources célestes elles-mêmes) qui se trouvent dans la bande de fréquence observée. Étant donné que les émetteurs sur et autour de la Terre peuvent être plusieurs fois plus puissants que le signal astronomique d'intérêt, la RFI est une préoccupation majeure pour la radioastronomie [33] [34]. Les sources naturelles d'interférences, telles que la foudre, le soleil et les aurores polaires sont également à considérer [35].

### **II.7.2 RFI sur la surveillance environnementale**

Avant l'introduction du Wi-Fi, l'une des plus grandes applications la bande des 5 GHz correspond au radar météorologique Doppler terminal [36] [37]. La décision d'utiliser la bande des 5 GHz pour le Wi-Fi a été finalisé lors de la Conférence mondiale des radiocommunications en 2003; cependant, la communauté météorologique n'a pas été impliquée dans le processus [38] [39]. La mise en œuvre laxiste et la mauvaise configuration du DFS qui ont suivi ont provoqué des perturbations importantes dans les opérations de radar météorologique dans un certain nombre de pays à travers le monde. En Hongrie, le système de radar météorologique a été déclaré non opérationnel pendant plus d'un mois. En raison de la gravité des interférences, les services

météorologiques sud-africains ont fini par abandonner le fonctionnement en bande C, basculant leur réseau radar sur la bande S [37].

## **II.8 RÉDUCTION DES INTERFÉRENCES ÉLECTROMAGNETIQUES**

La réduction des ondes électromagnétiques est un sujet d'intérêt croissant dans notre société, en particulier en ce qui concerne les effets potentiels sur la santé et l'environnement. Les ondes électromagnétiques sont produites par de nombreux appareils électroniques couramment utilisés, tels que les téléphones portables, les antennes de télécommunication, les réseaux Wi-Fi et les lignes électriques.

Il existe plusieurs façons de réduire l'exposition aux ondes électromagnétiques :

Utilisation d'appareils à faible émission : nous choisissons des appareils électroniques avec des niveaux d'émission d'ondes électromagnétiques les plus bas possible. Par exemple, certains téléphones portables ont des "modes avion" ou "modes sans fil désactivés" qui réduisent les émissions lorsqu'ils ne sont pas utilisés pour les appels ou les connexions sans fil.

Utilisation de dispositifs de protection : Il existe sur le marché des dispositifs de protection tels que des étuis pour téléphones portables qui prétendent bloquer ou réduire les ondes électromagnétiques. Cependant, l'efficacité de ces dispositifs peut varier, il est donc important de faire des recherches approfondies avant de les utiliser.

Distance et temps d'exposition : éloignons-nous autant que possible des sources d'ondes électromagnétiques, comme les antennes de télécommunication et les transformateurs électriques. Réduisez également le temps d'exposition en limitant l'utilisation des appareils électroniques et en prenant des pauses régulières.

## **II.9 LA COLLECTE D'ÉNERGIE DANS UN MILIEU URBAIN ET DOMESTIQUE**

La récupération d'énergie en milieu urbain domestique fait référence au processus de collecte et d'utilisation de différentes sources d'énergie disponibles dans les environnements urbains pour répondre aux besoins énergétiques des foyers. Cette approche vise à maximiser l'efficacité énergétique, à réduire la dépendance aux sources d'énergie traditionnelles et à promouvoir la durabilité environnementale.

Il existe plusieurs méthodes de récupération d'énergie en milieu urbain domestique, notamment :

Récupération de chaleur : Les systèmes de récupération de chaleur peuvent extraire la chaleur générée par les équipements électriques, les systèmes de climatisation, les systèmes de ventilation et autres sources de chaleur résiduelle, puis la réutiliser pour le chauffage de l'eau, le chauffage des espaces ou d'autres besoins thermiques.

Récupération d'énergie solaire : Les panneaux solaires peuvent être installés sur les toits ou les façades des bâtiments pour capturer l'énergie solaire et la convertir en électricité ou en chaleur utilisable dans les foyers.

Récupération d'énergie des eaux usées : Les systèmes de récupération de chaleur des eaux usées permettent de récupérer la chaleur contenue dans les eaux usées provenant des douches, des éviers et d'autres utilisations domestiques pour chauffer l'eau d'alimentation ou fournir de l'énergie thermique supplémentaire.

Récupération d'énergie mécanique : Certains dispositifs, tels que les systèmes de récupération d'énergie des escaliers mécaniques, des ascenseurs ou des vélos d'appartement, peuvent convertir l'énergie cinétique générée par les mouvements humains en électricité pour alimenter les appareils électriques ou charger des batteries.

Ces méthodes de récupération d'énergie en milieu urbain domestique contribuent à une utilisation plus efficace des ressources énergétiques, à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et à la promotion d'un mode de vie durable.

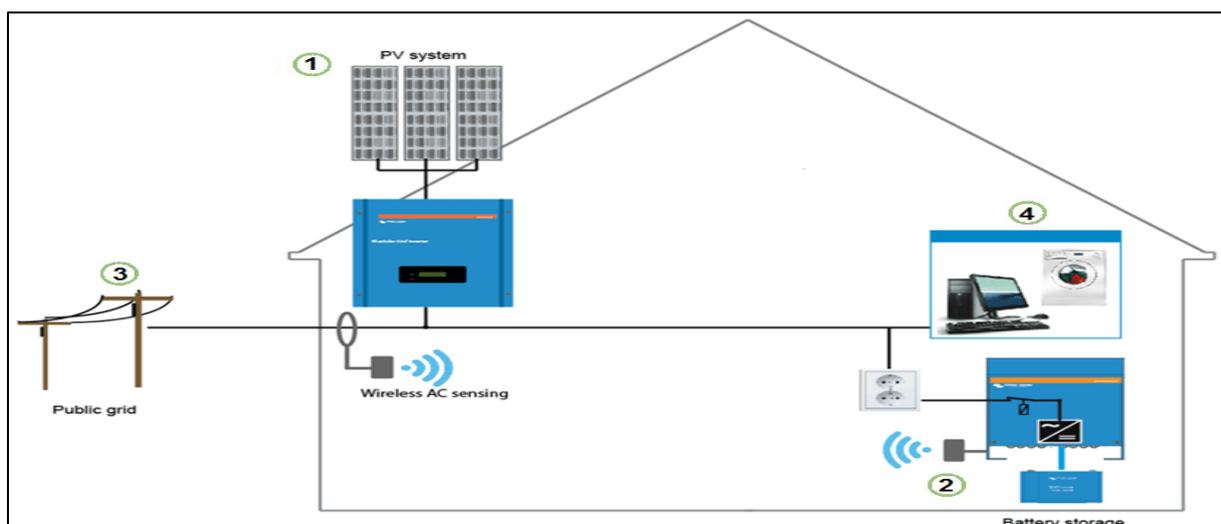


Figure II.5 : Stockage local de l'énergie solaire

## **II.10 PRINCIPES DE LA COLLECTE D'ÉNERGIE RF**

Le principe de la collecte d'énergie radiofréquence (RF) repose sur la conversion des ondes électromagnétiques présentes dans l'environnement en énergie électrique utilisable. Il s'agit d'une technique qui permet de récupérer l'énergie contenue dans les signaux RF, tels que les signaux Wi-Fi, les signaux de téléphonie mobile, les signaux de communication sans fil, etc.

La collecte d'énergie RF se fait généralement à l'aide d'un dispositif appelé un convertisseur d'énergie RF ou un dispositif de collecte d'énergie RF. Ce dispositif utilise des antennes spéciales pour capter les ondes RF et les convertir en électricité. L'énergie électrique ainsi collectée peut être stockée dans des batteries ou utilisée directement pour alimenter des appareils électroniques basse consommation.

Le principe de fonctionnement de la collecte d'énergie RF repose sur le phénomène de l'induction électromagnétique. Lorsque les ondes RF passent à travers les antennes du dispositif de collecte, elles induisent un courant électrique dans les bobines de ces antennes. Ce courant électrique est ensuite redirigé vers un circuit de conversion, où il est transformé en une tension continue utilisable.

## **II.11 LES SOURCES D'ÉNERGIE RF DANS L'ENVIRONNEMENT**

Les sources d'énergie radiofréquence (RF) dans l'environnement sont principalement liées aux systèmes de communication sans fil et aux émissions électromagnétiques générées par divers équipements électroniques. Voici quelques-unes des principales sources d'énergie RF présentes dans l'environnement :

**Réseaux de téléphonie mobile :** Les antennes de téléphonie mobile émettent des signaux RF pour la communication sans fil entre les téléphones portables et les stations de base. Ces signaux peuvent être une source d'énergie RF exploitée pour la collecte d'énergie.

**Réseaux Wi-Fi :** Les réseaux sans fil Wi-Fi émettent des ondes RF pour permettre la communication sans fil entre les appareils tels que les ordinateurs, les Smartphones et les routeurs. Les signaux Wi-Fi peuvent également être utilisés comme source d'énergie RF pour la collecte d'énergie.

Radiodiffusion et télévision : Les stations de radio et de télévision émettent des signaux RF pour diffuser des programmes audio et vidéo. Ces signaux peuvent également être captés et utilisés pour la collecte d'énergie RF.

Équipements de communication sans fil : Les appareils tels que les téléphones portables, les tablettes, les ordinateurs portables, les montres intelligentes, les dispositifs IoT et autres équipements de communication sans fil génèrent des émissions RF lorsqu'ils transmettent des données ou reçoivent des signaux. Ces émissions peuvent également être exploitées pour la collecte d'énergie RF.

Il convient de noter que la quantité d'énergie RF disponible dans l'environnement peut varier en fonction de divers facteurs tels que la proximité des sources RF, la puissance des signaux, la densité des appareils sans fil, etc. La collecte d'énergie RF nécessite des dispositifs spécifiques capables de capter et de convertir ces signaux RF en énergie électrique utilisable.

Il est important de noter que la collecte d'énergie RF doit respecter les réglementations en matière d'émissions RF et de fréquences attribuées afin de ne pas causer d'interférences nuisibles aux systèmes de communication existants.

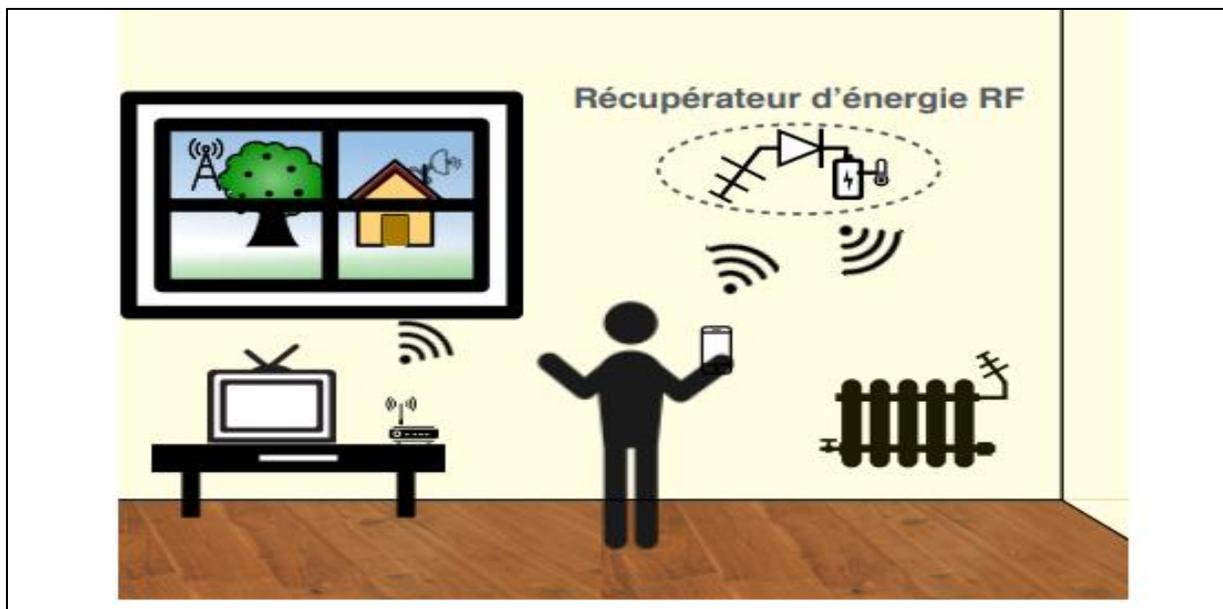


Figure II.6 : Sources présentes dans l'environnement d'une récupération d'énergie RF.

### II.11.1 Système de transmission d'énergie sans fil

Un système de transfert de puissance RF sans fil comporte de nombreux composants clés qui permettent à la puissance de se déplacer entre deux emplacements dans

l'espace. Un schéma de base d'un récupérateur d'énergie RF est illustré à la Figure (II.3). Tout d'abord, l'énergie RF doit être générée à la station de base. Cela se fait généralement par un magnétron ou une source à semi-conducteurs. Cette décision est généralement motivée par l'efficacité, le coût et la puissance de transmission requise. L'application détermine généralement la directivité et la polarisation de l'antenne, mais la puissance totale transmise doit être conforme aux exigences légales et de sécurité [38].

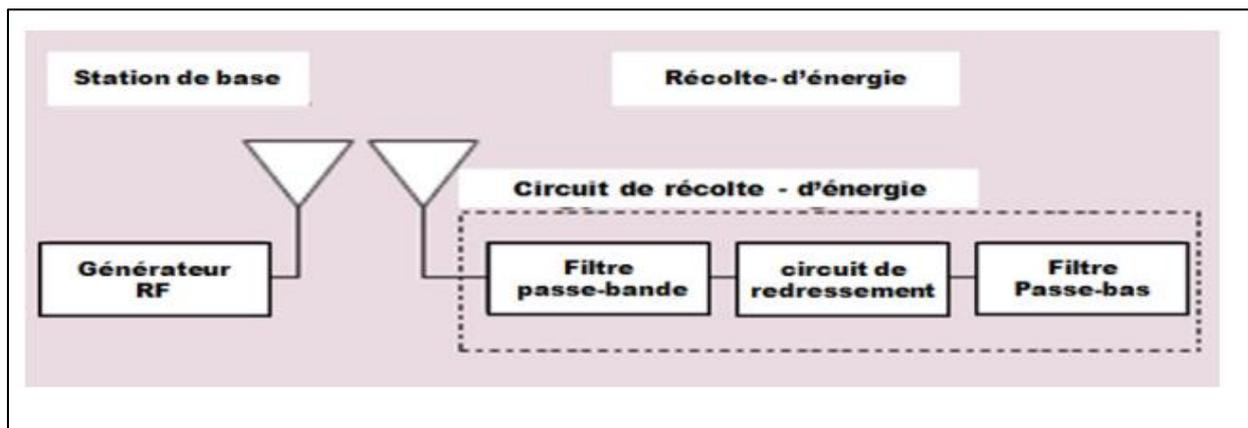


Figure II.7 : Schématisation d'un récupérateur d'énergie RF [38].

## II.12 COLLECTE ET CONVERSION DE L'ÉNERGIE ELECTROMAGNETIQUE

La collecte et la conversion de l'énergie électromagnétique font référence au processus de captage des ondes électromagnétiques présentes dans l'environnement et à leur conversion en énergie électrique utilisable. Ce processus permet d'exploiter l'énergie présente dans les ondes électromagnétiques pour alimenter des dispositifs électroniques ou pour recharger des batteries.

La collecte d'énergie électromagnétique implique l'utilisation d'une antenne spécialement conçue pour capter les ondes électromagnétiques environnantes. Cette antenne peut être conçue pour être omnidirectionnelle, capable de capturer les signaux provenant de toutes les directions, ou elle peut être orientée de manière spécifique pour capturer les signaux provenant d'une direction particulière.

Une fois que les ondes électromagnétiques sont captées par l'antenne, elles sont converties en énergie électrique utilisable. La conversion de l'énergie

électromagnétique en énergie électrique peut être réalisée à l'aide de dispositifs tels que des redresseurs ou des convertisseurs RF-DC. Ces dispositifs convertissent les signaux RF en courant continu (DC) à l'aide de diodes ou d'autres circuits de conversion appropriés.

La conversion de l'énergie électromagnétique en énergie électrique permet d'alimenter des dispositifs électroniques directement à partir de l'énergie captée ou de stocker cette énergie dans des batteries ou des condensateurs pour une utilisation ultérieure.

La collecte et la conversion de l'énergie électromagnétique sont utilisées dans diverses applications, notamment les systèmes de surveillance sans fil, les capteurs autonomes, les appareils portables, les réseaux de capteurs distribués, etc. Ces applications tirent parti de l'énergie disponible dans l'environnement pour alimenter leurs opérations sans avoir besoin d'une alimentation électrique traditionnelle ou de batteries remplaçables.

Il est important de noter que la quantité d'énergie électromagnétique disponible dans l'environnement peut varier en fonction de facteurs tels que la puissance du signal, la distance par rapport à la source et les interférences. Par conséquent, la collecte et la conversion de l'énergie électromagnétique nécessitent une conception et une optimisation appropriées pour répondre aux besoins énergétiques spécifiques du système et du dispositif aliment.

### **II.13 AVANTAGES DE LA RECUPERATION D'ÉNERGIE RF**

Les avantages de la récupération d'énergie dépendent de l'application, on trouve :  
Amélioration des performances du produit.

Permettre de nouvelles technologies de contrôle de processus ou de nouvelles applications.

Durée de vie plus longue de l'appareil par rapport aux systèmes à base de magnétron

L'efficacité relative du processus est plus élevée.

Passez au vert en éliminant les piles et les batteries.

### **II.14 ULTRA LARGE BANDE**

#### **II.14.1 Définition**

Le développement récent des technologies numériques dans le domaine des capteurs civils et militaires (radar, sonar, sismomètres, observatoires terrestres et spatiaux, etc.) Wifi/WiMax, WLAN, GPS), démontrant que plus de degrés de liberté et de flexibilité



radio, un ensemble de réglementations est appliquée aux systèmes de signalisation UWB ItanSmeHanl.

### **II.14.3 Application de la technologie UWB**

Les applications potentielles de la technologie radio UWB impliquent deux domaines techniques :

systèmes à très hauts débits et à courte portée (typiquement 200 Mbit/s jusqu'à 10 m), et à bas débits et systèmes à longue portée (typiquement 200 kbit/s à 100 m). Ces deux modes d'utilisation du spectre radio UWB permettent de visualiser certaines applications typiques des systèmes UWB. La technologie UWB a été développée à l'origine pour des applications militaires et a commencé à être utilisée dans des applications civiles. Les appareils UWB utilisent souvent des impulsions très courtes, ils occupent donc une très grande bande passante de transmission. La technologie UWB peut être intégrée dans une variété d'applications, y compris les systèmes d'imagerie radar. La puissance du signal UWB à travers le sol ou le mur et même à travers celui-ci permet de détecter ce qui est caché. n permet également de mesurer les distances avec précision. Le même principe s'applique au corps humain. Par conséquent, la technologie UWB peut être utilisée dans des applications militaires pour localiser des objets ennemis et est considérée comme une excellente solution pour localiser des objets en mouvement à l'intérieur avec une précision de plusieurs centimètres.

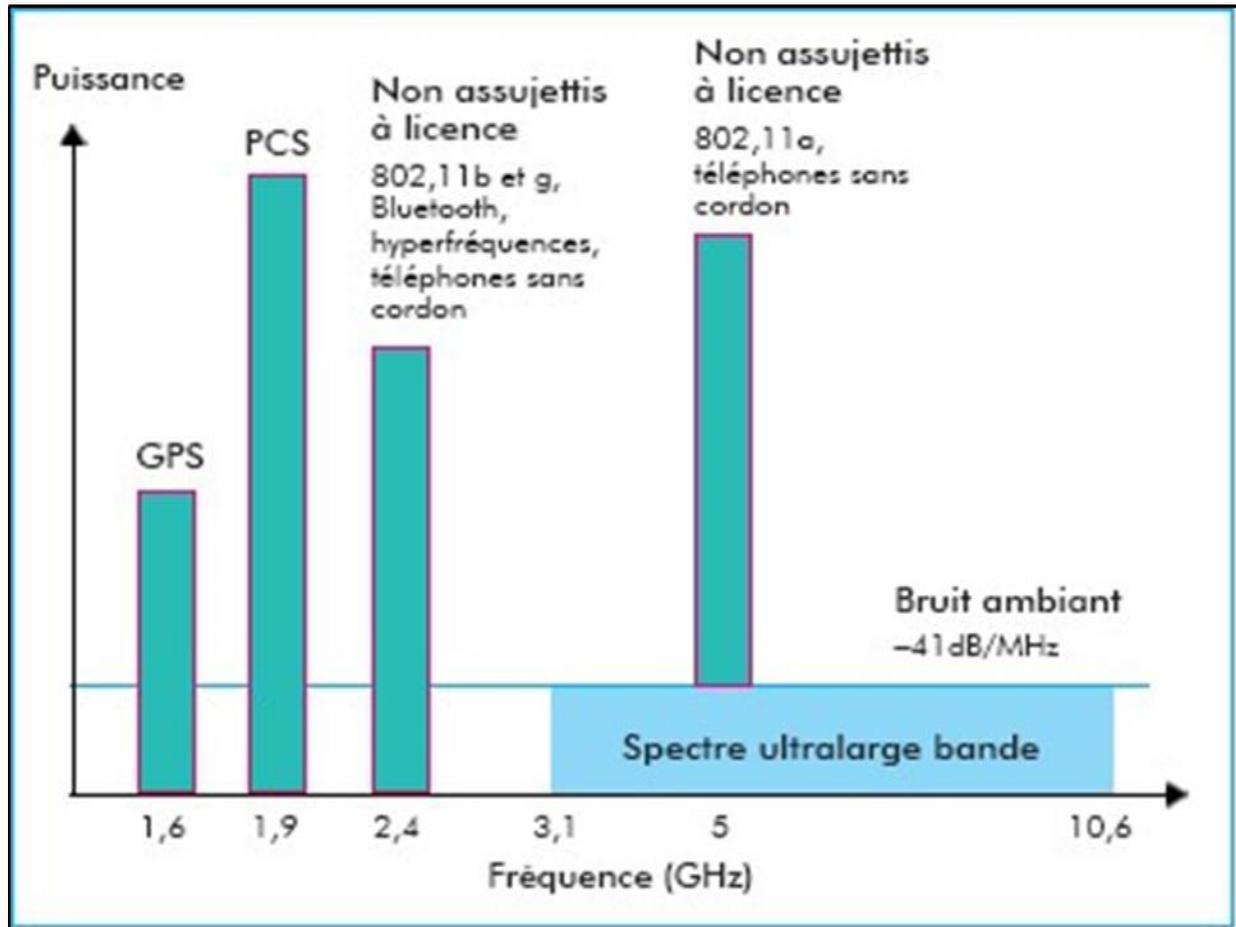


Figure II.8: Dispositifs ultralarge bande fonctionnant au-dessous du «bruit radioélectrique ambiant»

## II.15 Conclusion

En conclusion, la collecte d'énergie radiofréquence par un absorbant à métamatériaux est une technologie prometteuse qui peut être utilisée dans de nombreuses applications, notamment dans les domaines de l'aérospatiale et des communications.

**CHAPITRE III**

**CONCEPTION D'ABSORBANTS**

**MÉTAMATÉRIAUX (MTM) POUR LA**

**COLLECTE D'ENERIE RF**

### **III.1 INTRODUCTION**

Les absorbants à métamatériaux (MTM) sont principalement composés de couches métalliques et d'un substrat diélectrique intégré. Les couches métalliques génèrent une résonance électrique par l'excitation du champ électrique, tandis que les substrats diélectriques provoquent une réponse magnétique due à l'excitation d'un courant antiparallèle. Un autre facteur important à considérer est la réponse aux ondes électromagnétiques polarisées et la capacité à absorber les radiations provenant de différentes directions [40-41]. Des structures MTM à bandes étroites, doubles et multiples ont été réalisées expérimentalement et numériquement, avec un taux d'absorption excellent, approchant une absorption parfaite (supérieure à 99%) dans différentes bandes de fréquences du spectre électromagnétique. La première AMP a été proposée par Landy et al. [42] en 2008, atteignant un taux d'absorption de 99% dans une bande étroite de fréquences. Ces travaux ont ouvert la voie à de nombreuses recherches ultérieures sur les AMP dans diverses bandes de fréquences électromagnétiques.

Le but de ce chapitre est concevoir un absorbant métamatériau (MMA) pour la collecte d'énergie RF avec les paramètres S et les fréquences de résonance souhaités pour l'absorption du deux bandes, la bande de Wi-Fi(2 GHz et 6 GHz); et la bande de (15 GHz à 23 GHz) avec une absorption supérieure à 90 %. La cellule unitaire de l'absorbant proposé a été développée suivant un circuit équivalent.

### **III.2 ABSORBANT METAMATERIAU BASE SUR L'ANALYSE DE CIRCUIT EQUIVALENT POUR LES APPLICATION WI-FI DOUBLE**

Le schéma structurel de la cellule unitaire est présenté sur la figure (III.1) avec les dimensions nécessaires. La conception est initiée sur un substrat FR4 ayant une épaisseur de 1,5 mm, une constante diélectrique,  $\epsilon_r= 4,4$  et une tangente de perte de 0,02. Le matériel utilise pour la masse et structure proposée c'est en métal (Copper) et d'épaisseur 0.035mm.

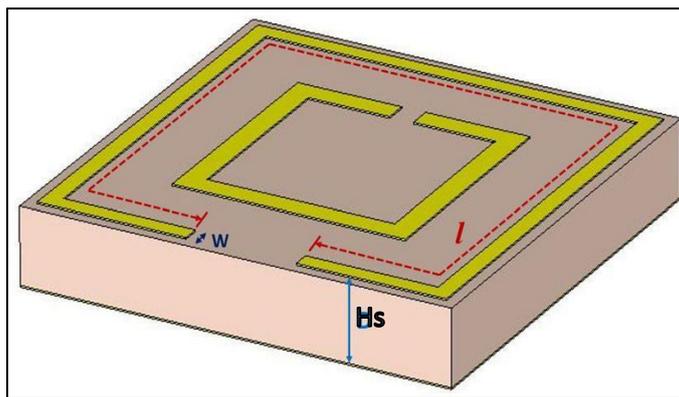


Figure III.1 : La cellule unitaire

Le dispositif de simulation de la cellule unitaire est organisé comme indiqué sur la figure (III.2), et Les tailles des différents segments de la MM sont indiquées dans la figure(III.3) et le tableau (III.1).

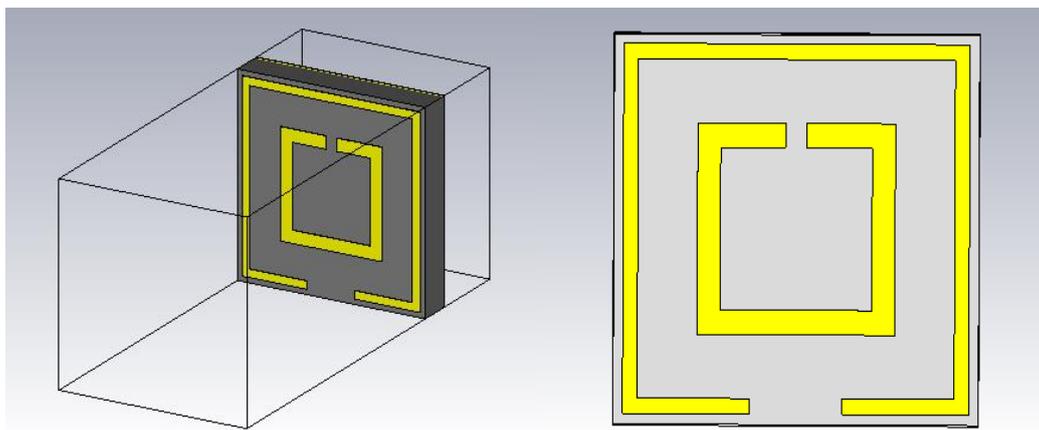


Figure III.2 : La cellule unitaire sous CST STUDIO.

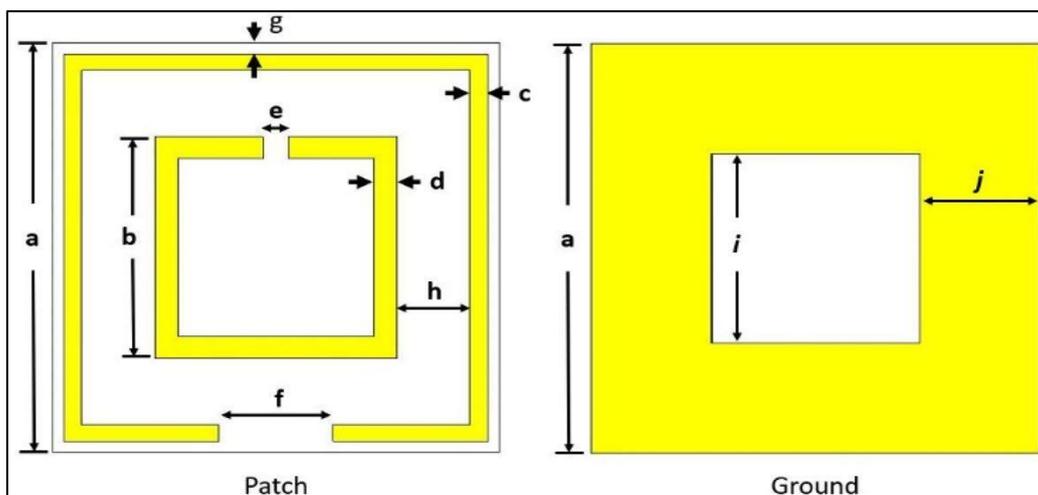


Figure III.3 : Les différentes dimensions du patch et de la masse

<b>Paramètres</b>	<b>Dimensions (mm)</b>
a	9.5
b	5.14
c	0.38
d	0.48
e	0.53
f	2.42
g	0.25
h	1.55
i	5.1
j	2.55

Tableau III.1 : Les différentes dimensions du patch et de la masse.

### **III.3 CONCEPTION DE CELLULE UNITAIRE PAR ADS**

Le patch avec des valeurs de précision pour chaque fréquence de résonance. Ces valeurs précises peuvent être obtenues à partir d'un modèle de circuit équivalent. Le circuit équivalent peut être conçu par un logiciel disponible comme ADS.

Détermination de L et C pour les fréquences de résonance. Chaque résonateur du patch de cellule unitaire absorbant MM a une valeur inductive, qui peut être déterminée [43] par l'équation suivante. (III. 1) [40] selon figure (III.1)

$$L_{ms} = 0.00508L \left[ \ln \left( \frac{2l}{H_s + W} \right) + 0.5 + 0.2235 + \left( \frac{H_s + W}{l} \right) \right] \quad (III. 1)$$

Où  $L_{ms}$  est l'inductance par unité de longueur du microruban  $\mu H$ ,  $l$  est la longueur de la bande (pouces).  $W$  est la largeur de la bande (pouces) et  $H_s$  est la distance entre la bande et le plan De la masse.

La longueur et la largeur du microruban SRR peuvent être obtenues à partir de l'équation (III .1). La valeur correspondante de la capacité pour la fréquence de résonance souhaitée peut être obtenue à partir de l'équation (III .2)

$$C = \frac{1}{Lms4\pi^2 + f^2} \quad \text{(III. 2)}$$

Où  $f$  est la fréquence de résonance souhaitée. Pour chaque fréquence souhaitée, les valeurs requises de  $L$  et  $C$  peuvent être obtenues à partir des équations.

(III .1) & (III .2) à utiliser dans le simulateur de circuit.

Sur le simulateur ADS, les valeurs de  $L$  et  $C$  doivent être mises pour chaque fréquence de résonance en tant que lignes de transmission parallèles connectées par un élément capacitif entre elles en raison des écarts capacitifs entre les résonateurs, comme on peut le voir sur la figure III.4. Aucun élément inductif ne peut être ajouté à la place des espaces capacitifs, car une très grande quantité d'inductance peut nécessiter ce qui désactivera les principaux inducteurs ( $L1$  et  $L2$ ) en raison de la connexion en série.

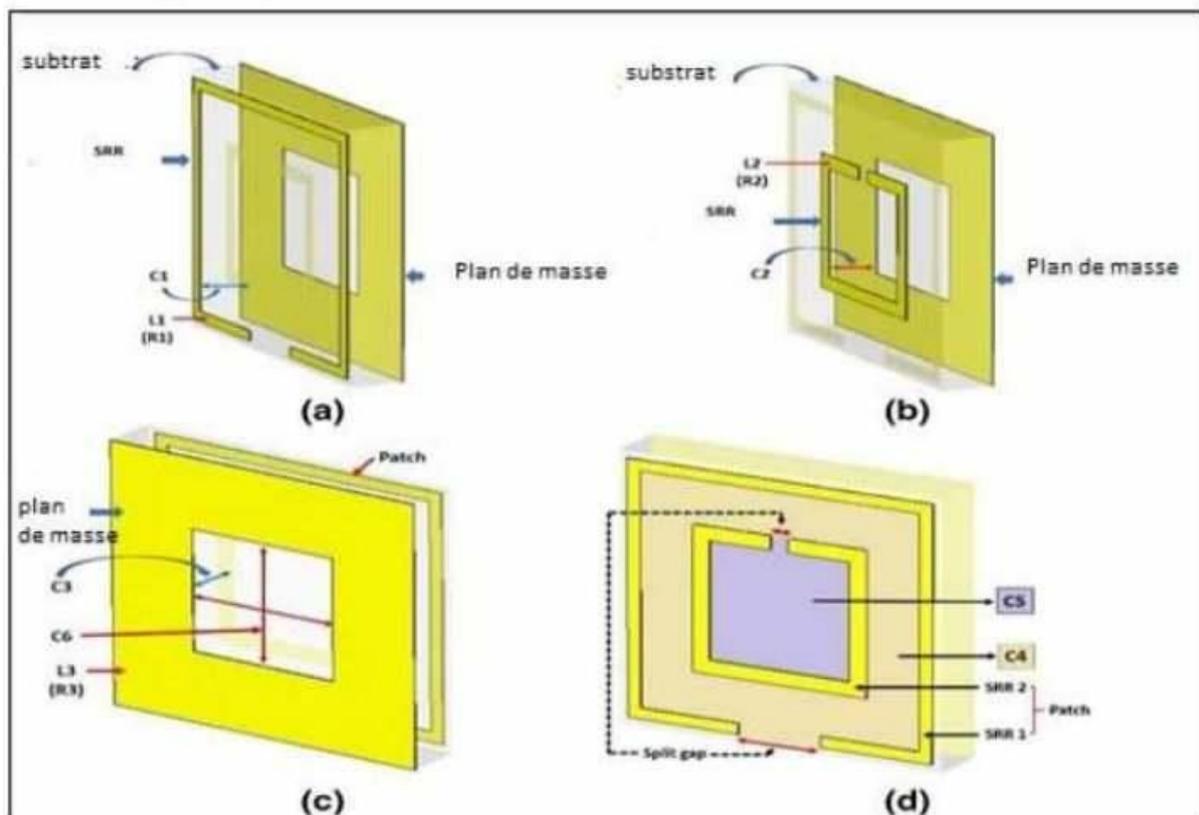


Figure III.4 : Une impression détaillée du L, C et R dans (un) le résonateur en anneau fendu (SRR) -1 pour la fréquence inférieure, (b) le SRR -2 pour la fréquence la plus élevée, (c) la masse ; et (d) la capacité parallèle due à la surface délimitée par les SRR

La cellule unitaire figure III.1 a été conçu pour absorber les signaux Wi-Fi à 2,4 GHz et 5 GHz. Deux SRR carrés classiques ont été utilisés à cette fin. Le SRR externe agit pour une fréquence de résonance basse (2,4 GHz) et le SRR interne fonctionne pour une fréquence de résonance plus élevée (5 GHz). Chaque résonateur a une inductance et une impédance propre (R). Les valeurs de L et C ont été définies sur le circuit ADS, comme illustré à la figure III.5. Les valeurs calculées d'inductance et de capacité pour les résonances de 2,4 GHz et 5 GHz sont respectivement  $L1 = 27,11$  nH,  $C1 = 0,162$  pF et  $L2 = 13,91$  nH,  $C2 = 0,0729$  pF. Pour le sol, les valeurs correspondantes sont trouvées comme  $L3 = 13,04$  nH,  $C3 = 0,371$  pF.

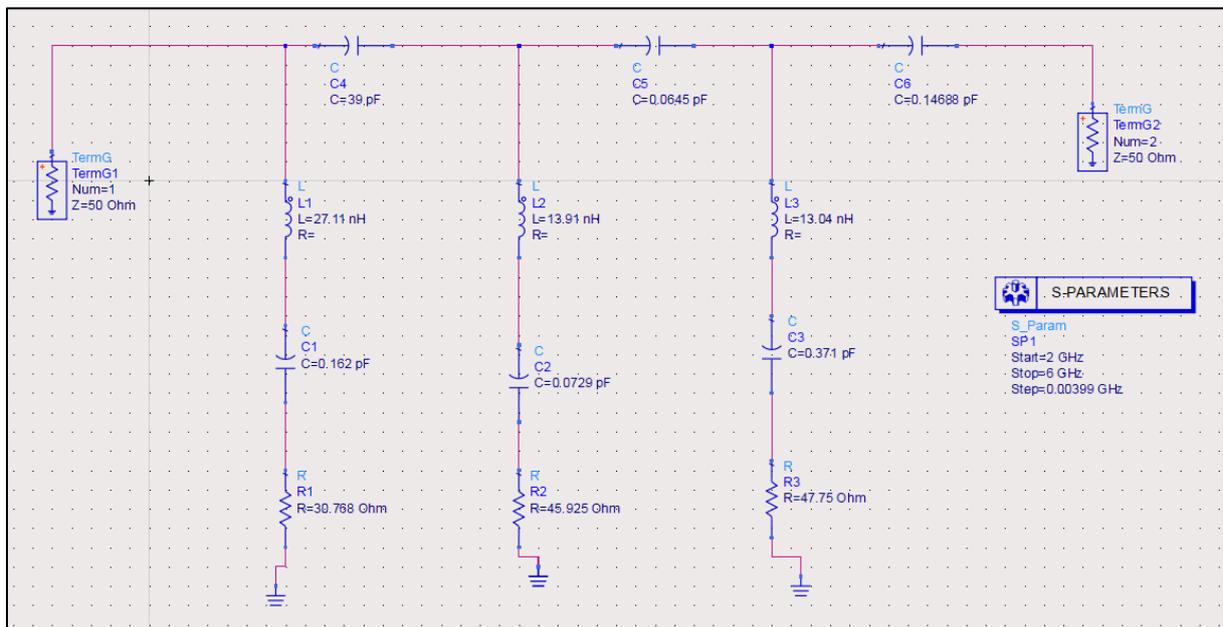


Figure III.5 : Circuit équivalent de la cellule unitaire de l'absorbant.

La première ligne de transmission, L1-C1-R1, représente la fréquence de résonance inférieure (2,4 GHz) sur la figure III.5. La deuxième ligne, L2-C2-R2, fonctionne pour une fréquence de résonance plus élevée (5 GHz) avec la troisième ligne L3-C3-R3, qui sort du plan de masse. Ces lignes de transmission parallèles segmentées ne peuvent assurer des résonances distinctes à 2,4 GHz et 5 GHz puisqu'il devrait y avoir un certain couplage mutuel entre elles. Pour réduire ces couplages, aucun élément inductif ne peut être ajouté entre les lignes voisines car il dévierait les fréquences de résonance en raison des valeurs ajoutées. Ainsi, des éléments capacitifs ont été introduits en série entre des lignes de transmission voisines parallèles, et cela peut être justifié par les

écarts capacitifs dus aux surfaces non métalliques délimitées par les anneaux fendus, comme illustré à la figure III.4. C4 a été introduit entre la première et la deuxième ligne ; de même, C5 entre la deuxième et la troisième ligne figure III.5. Comme les absorbants de métamatériaux sont considérés comme des structures périodiques, le couplage électromagnétique peut se produire en raison d'éléments inductifs et capacitifs dans le circuit, qui peuvent être éliminés en introduisant des capacités en série (comme C6) dans le circuit, comme le montre la figure III.5. Les éléments inductifs à la place de C6 ne peuvent pas être ajoutés dans le circuit, car les éléments inductifs seront en série avec la ligne de transmission au sol (L3-C3-R3) qui dévierait les fréquences de résonance en raison de l'inductance ajoutée et échouerait donc l'intention de la conception.

### **III.4 RESULTAS DE LA SIMULATION**

#### **III.4.1 S paramètres**

A partir de la simulation, le coefficient de réflexion  $S_{11}$  et le coefficient de transmission  $S_{21}$  sont atteints dans la gamme de fréquence de 2 à 6 GHz. Pour vérifier si la conception est parfaitement adaptée, ou si elle absorbe parfaitement l'onde, les coefficients de réflexion  $S_{11}$  et de transmission  $S_{21}$  peuvent être utilisés pour le calcul de coefficient d'absorption :

$$A = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 \quad (\text{III. 3})$$

Les ondes réfléchies par l'absorbant doivent être proches du zéro, donc le coefficient d'absorbant :

$$A = 1 - |S_{11}|^2 \quad (\text{III. 4})$$

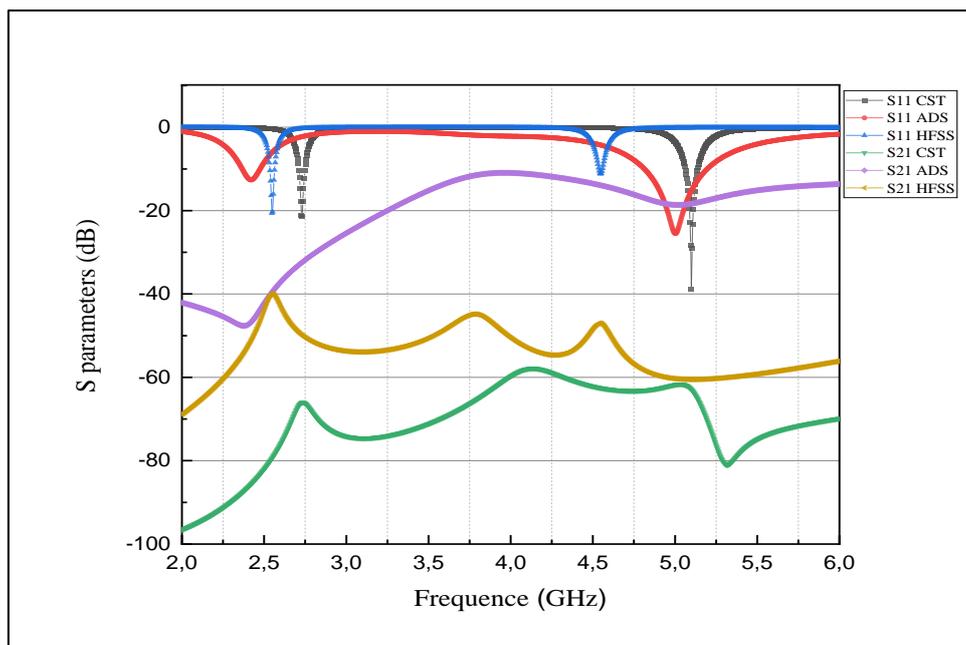


Figure III.6 : S paramètres (dB) (Coefficient de réflexion (S11) et Coefficient transmission(S21) de la cellule unitaire).

La mesure du coefficient de réflexion de cellule montre une bonne corrélation avec la simulation, La figure III.6 compare les résultats obtenus par les simulateurs HFSS, CST et ADS à la mesure. Le coefficient de réflexion est inférieure ou égale à -10dB sur toute la bande mesurée allant de 2 GHz jusqu'à 6GHz.

### III.4.2 L'absorption de la cellule unitaire

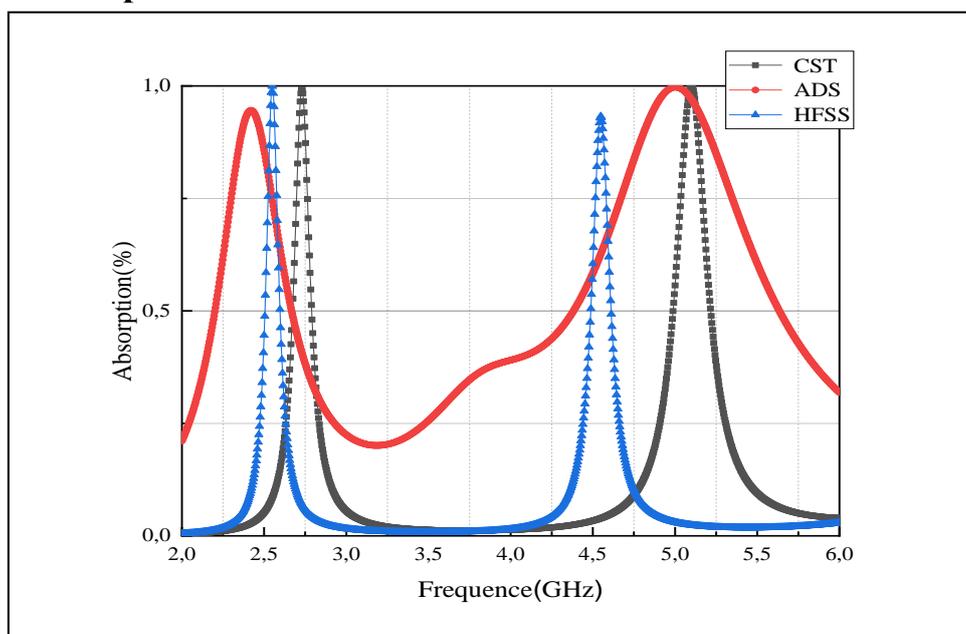


Figure III.7 : L'absorption de la cellule unitaire

La figure III.7 présente la production des principaux pics d'absorption à 2.4 ,2.6 ,2.7 et 4.5, 5 et 5.1GHz avec une absorption parfaite et les résultats obtenus par les simulateurs HFSS, CST et ADS.

### III.4.3 Influence d'angle d'incidence sur l'absorption

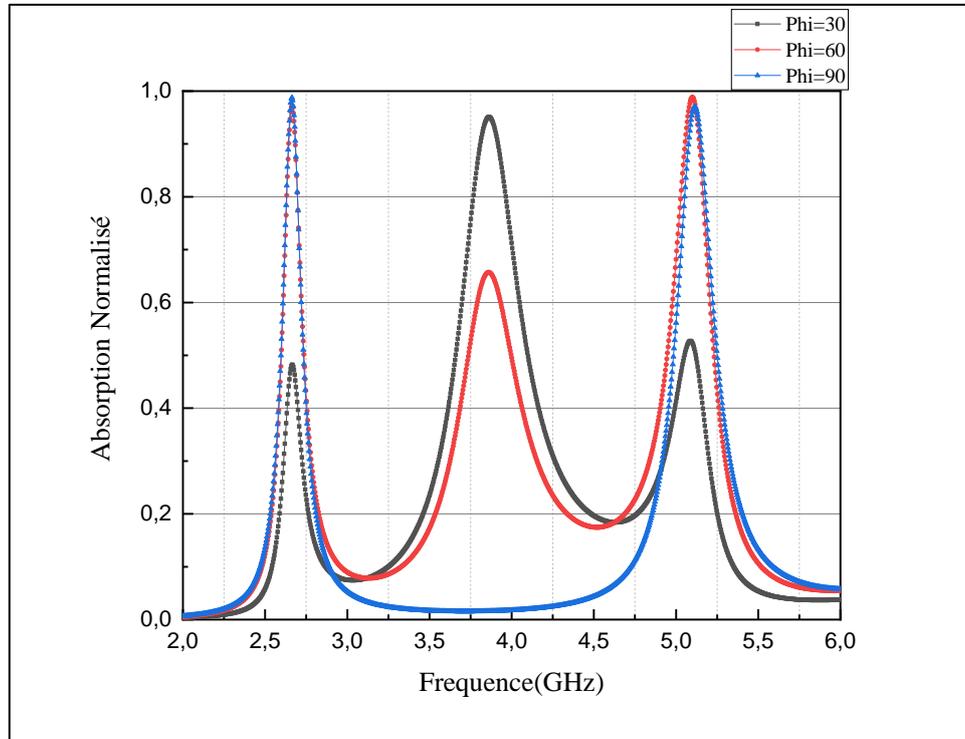


Figure III.8 : Influence de l'angle d'incidence ( $\phi$ ) sur le coefficient d'absorption de la structure.

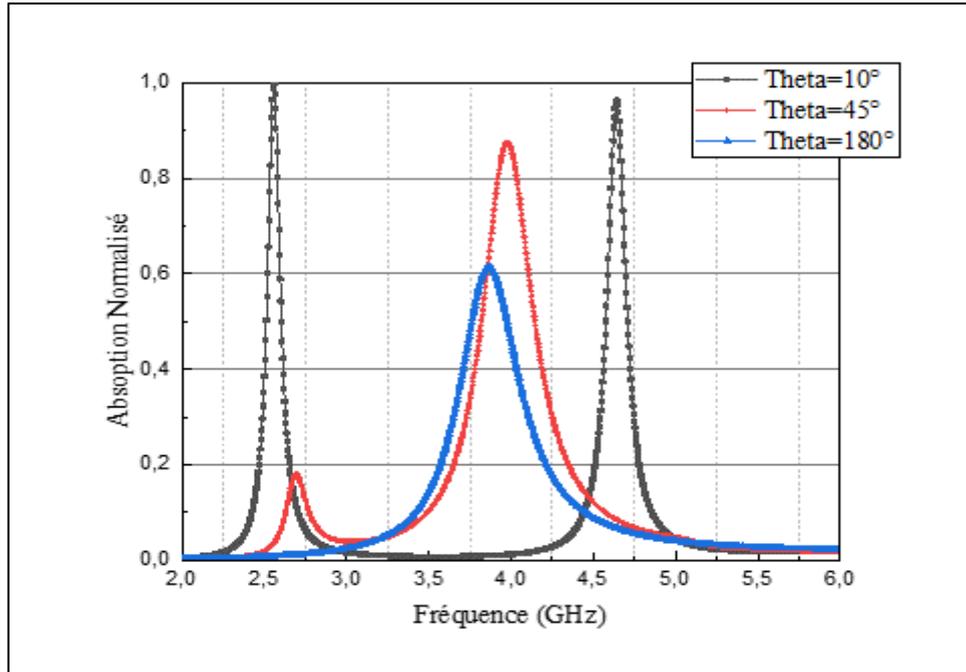


Figure III .9 : Influence de l'angle d'incidence (thêta) sur le coefficient d'absorption de la structure.

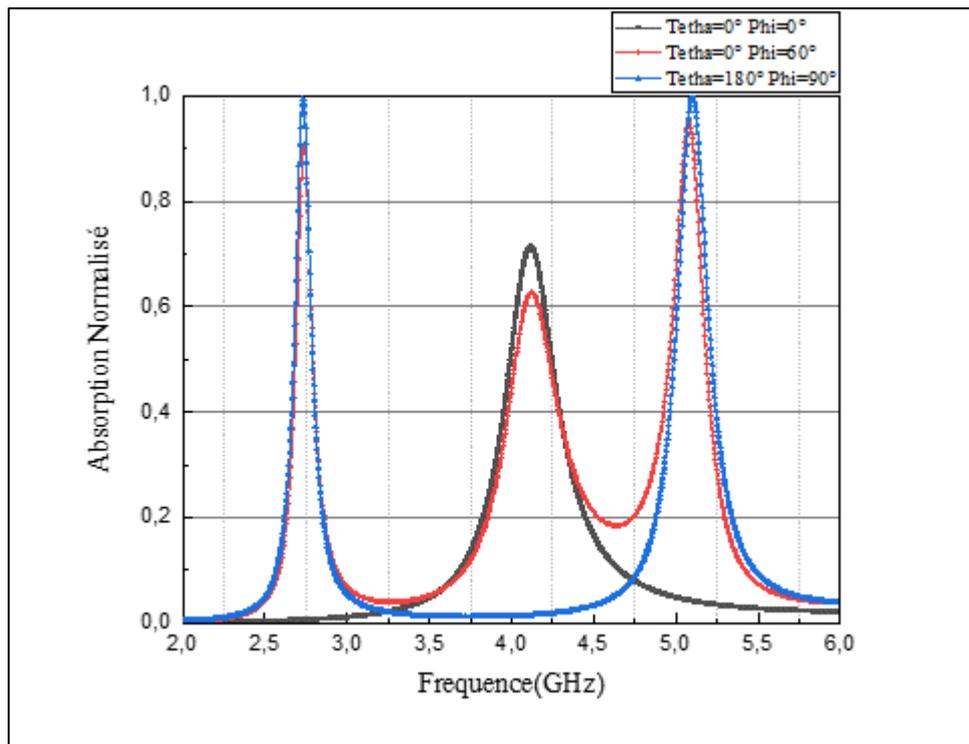


Figure III.10 : Influence de l'angle d'incidence (phi et thêta) sur le coefficient D'absorption de la structure.

Dans la figure III.8 on remarque que le niveau d'absorption s'augmente dans les deux fréquences 2.7GHz et 5.1GHz ,et dans la figure III.9 la structure proposée a fourni une

réponse en fréquence 2.5 GHz et 5.1GHz qui est presque insensible à l'angle 135° et 180° et dans la figure III.10 ont une absorption parfait a fréquence de 2.7 GHz et 5.1GHz pour l'angle  $\theta=180^\circ$  et l'angle  $\phi=90^\circ$

### III.5 INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DU SUBSTRAT SUR LE COEFFICIENT DE RÉFLEXION

Les caractéristiques d'absorption de l'absorbant sont également fortement affectées par l'épaisseur du dessous de l'épaisseur prévue, la structure proposée ne fonctionne pas comme un absorbant. Ainsi, l'épaisseur optimisée du substrat est de 1,6 mm selon l'analyse paramétrique substrat (Hs). Par conséquent, l'épaisseur du substrat varie de 1 mm à 2 mm avec un pas de 0,2 mm pour vérifier l'effet de l'épaisseur du substrat.

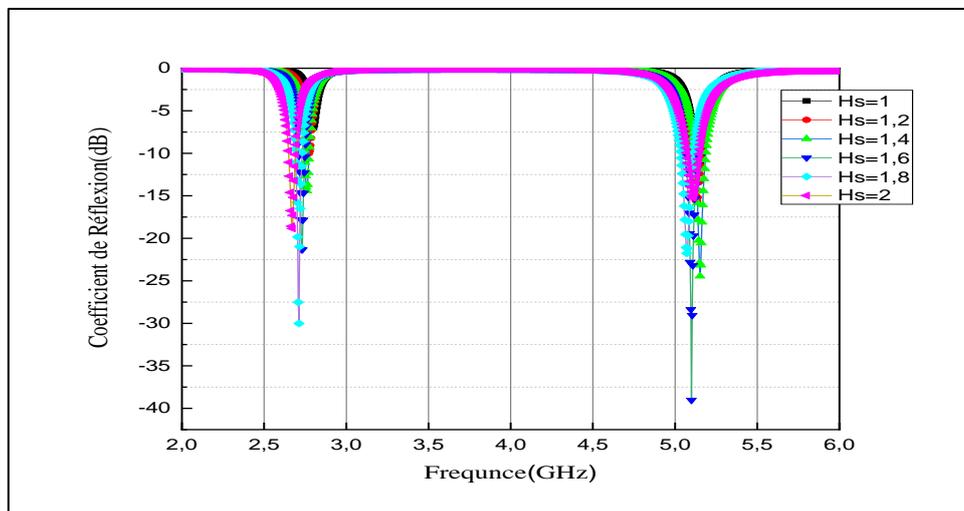


Figure III.11 : Variation du coefficient de réflexion en changeant l'épaisseur du substrat de 1 mm à 2 mm

D'après la figure III.11, on observe également que 1,6 mm est l'épaisseur de substrat appropriée pour laquelle une absorption suffisante a été obtenue pour la bande de fréquence [2 ; 5] GHz

### III.6 INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DE LA MASSE HG

#### III.6.1 Influence de l'épaisseur de la masse Hg sur le coefficient de réflexion

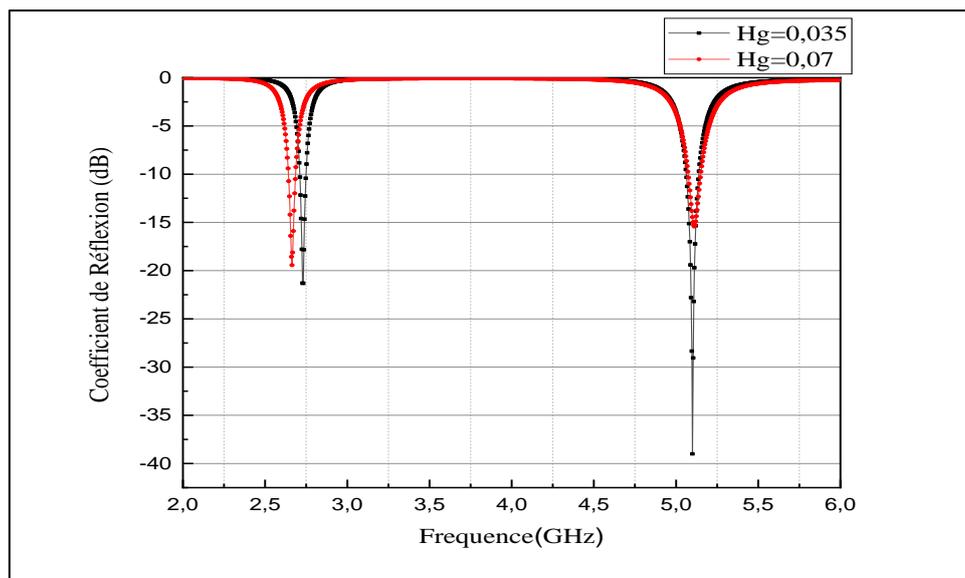


Figure III.12 : Variation du coefficient de réflexion en changeant l'épaisseur de la masse Hg de 0.035 mm et 0.07 mm

La figure III.12 présente la variation du coefficient de réflexion en changeant l'épaisseur du masse Hg, D'après cette figure III.4 on remarque que si l'épaisseur du masse Hg est élevé, l'absorption va diminuer dans la bande de fréquence [2 ; 6] GHz

### III.6.2 Influence de l'épaisseur de la masse Hg sur Le coefficient d'absorption

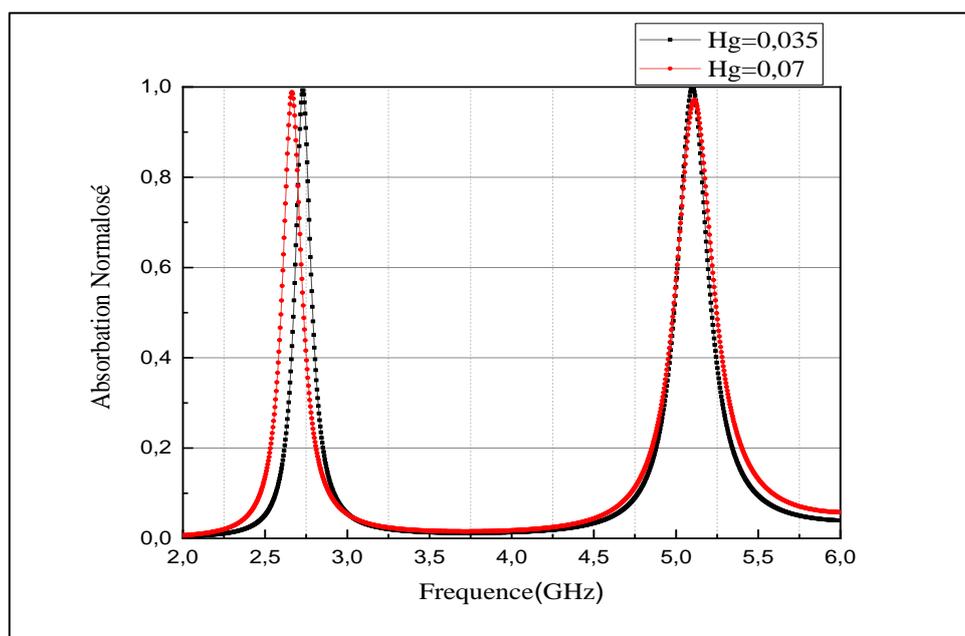


Figure III.13 : Variation du coefficient d'absorption en changeant l'épaisseur de la masse Hg de 0.035 mm et 0.07 mm

D'après la figure III.13, on remarque qu'on a des résultats similaires et une absorption parfaite plus de 90 % pour l'épaisseur du masse Hg 0.035 mm et 0.07 mm

### **III.7 ANALYSE DE PERFORMANCES DE LA CELLULE UNITAIRE FINALISÉE**

La conception finale de la cellule unitaire montre des résultats prometteurs aux fréquences de résonance souhaitées par simulation CST, comme le montrent les fig. III.14 et III.15. Les champs électriques et champs magnétiques correspondants montrent que les deux SRR agissent simultanément et séparément pour les deux fréquences souhaitées. Le SRR circonférentiel agit pour la résonance inférieure (2,7 GHz) et le SRR central agit pour la résonance supérieure (5,1 GHz). Une vue plus claire peut être vue depuis le courant de surface.

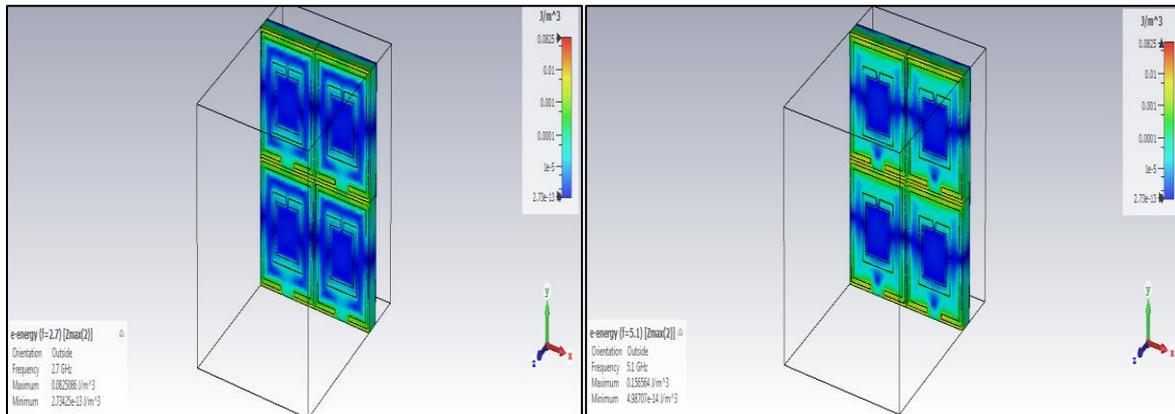
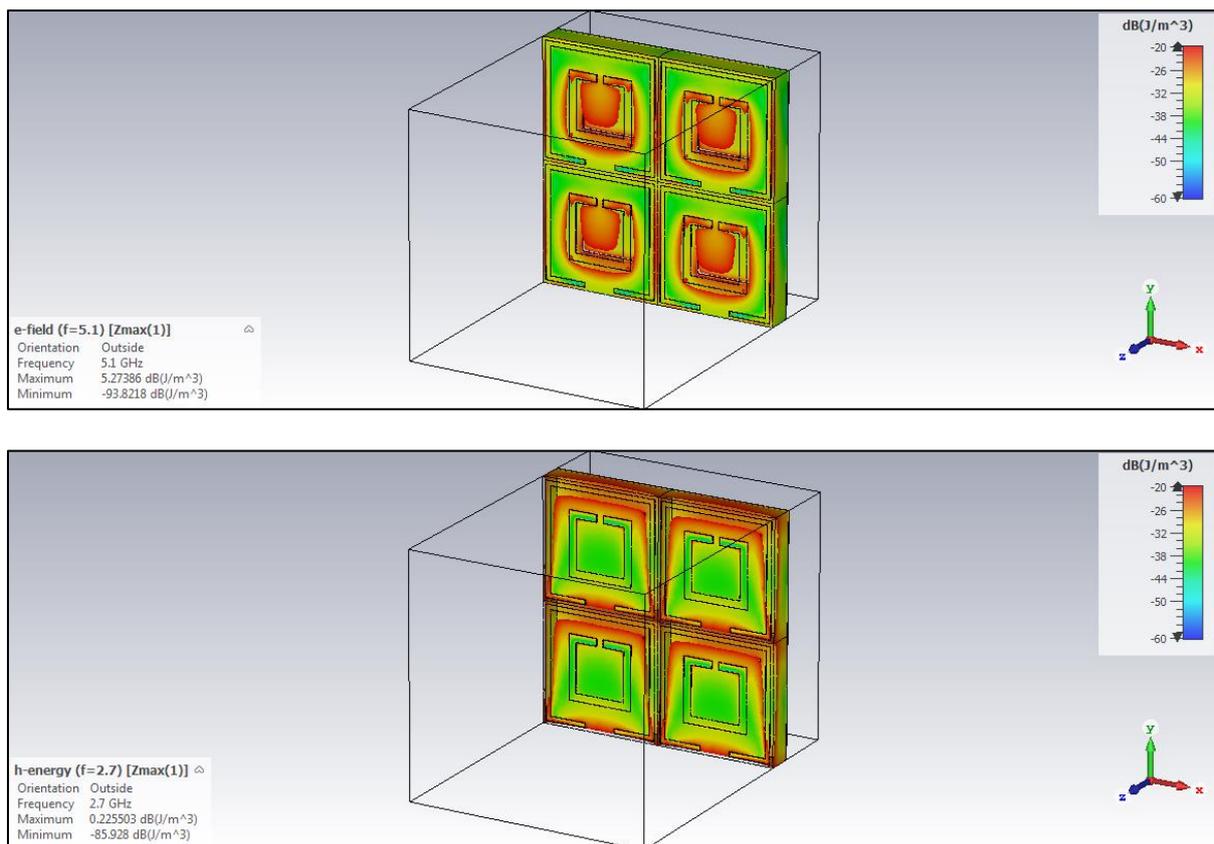


Figure III.14 : Répartition du champ électrique à 2,7 GHz et 5.1 GHz sur la cellule unitaire.



FigureIII.15 : Répartition du champ magnétique à 2,7 GHz et 5.1GHz sur la cellule unitaire MM.

Aux fréquences de résonance, La permittivité, la perméabilité et l'indice de réfraction sont illustrés à la figIII.16.

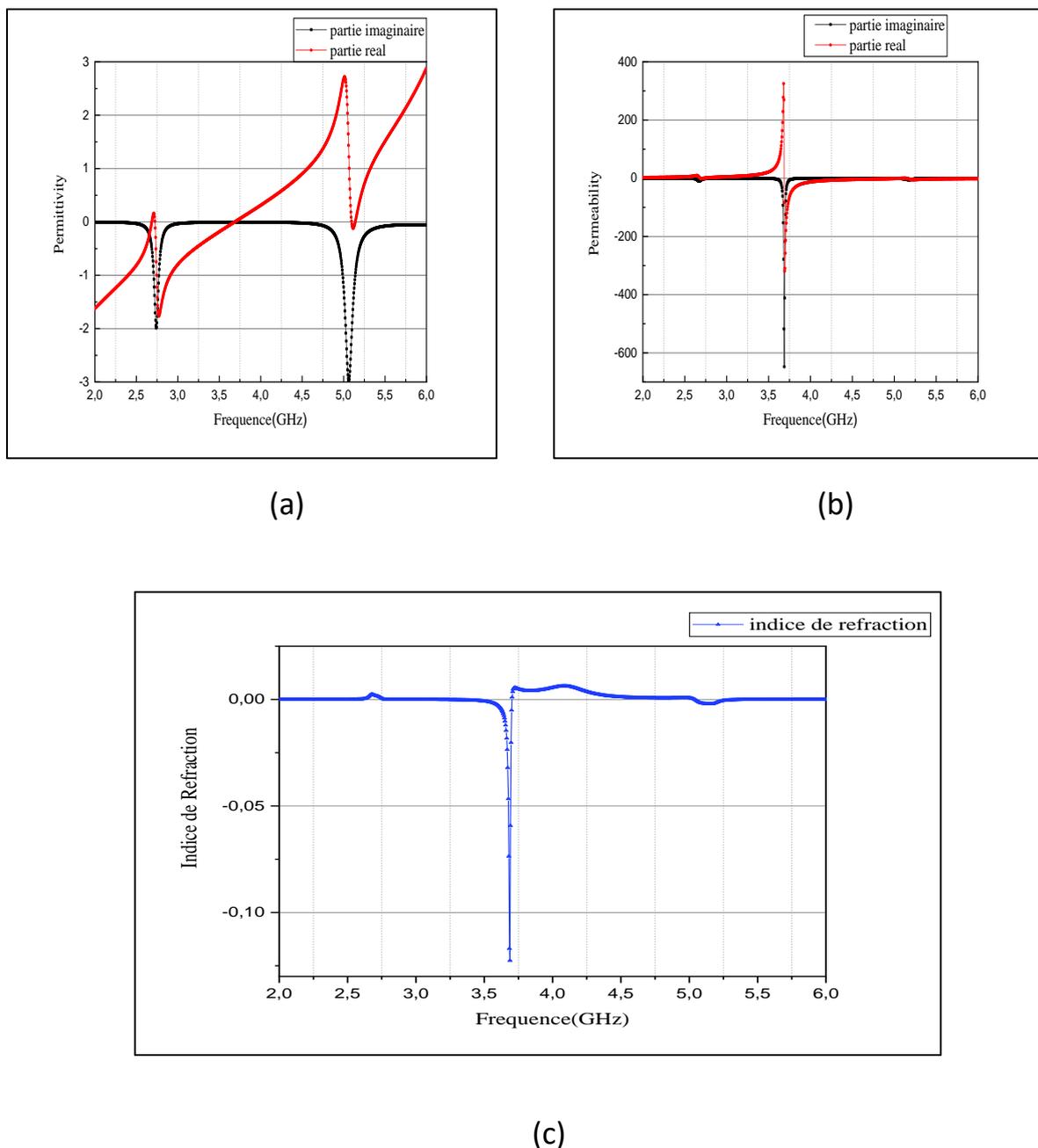
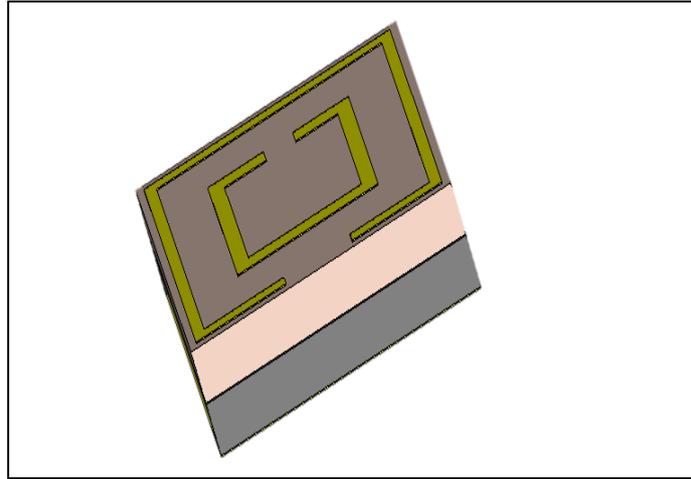


Figure III.16 : (a) permittivité, (b) perméabilité, et (c) indice de réfraction aux fréquences de fonctionnement

### III.8 ABSORBANT DE MÉTAMATÉRIAU POUR LES APPLICATIONS DANS LA BANDES DE 2 GHz A 22 GHz

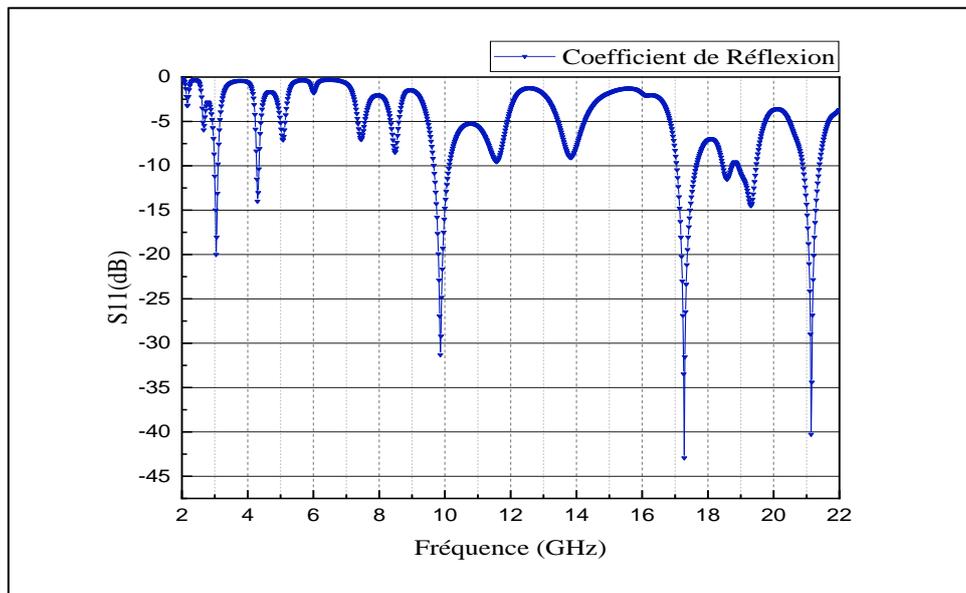
Pour améliorer les performances d'absorption, on propose un absorbant MMA à double couche, la cellule unitaire de base est la même structure qu'il présente dans la figure (III.1) ; la cellule unitaire est présentée dans la figure (III.5).



FigureIII.17 : La cellule unitaire

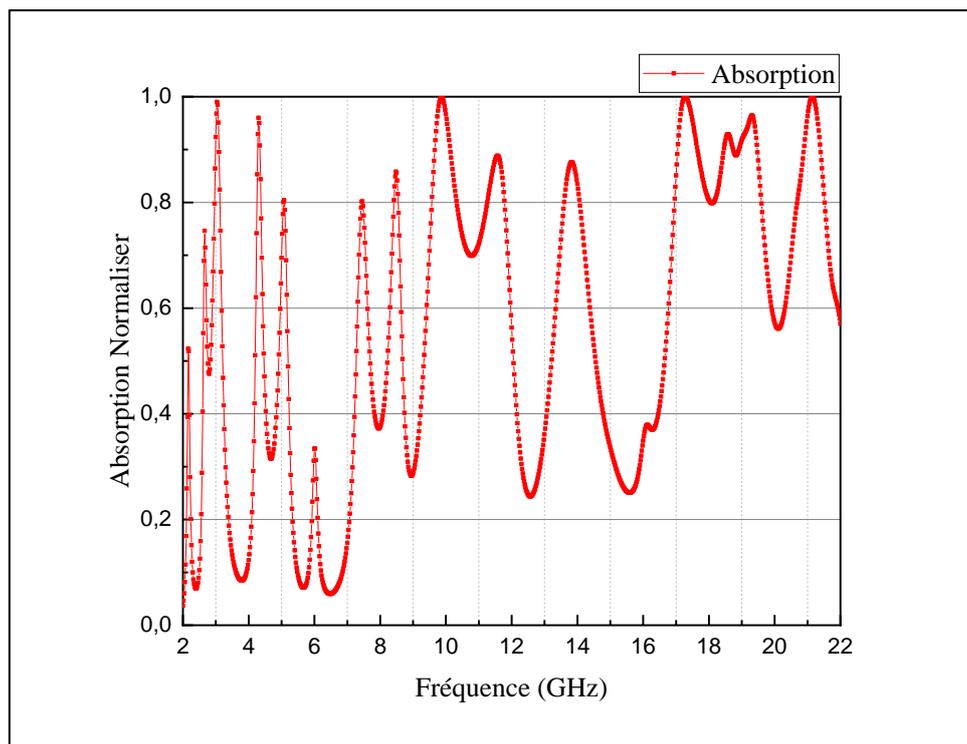
Les résultats obtenu du le coefficient de réflexion  $S_{11}$  et le coefficient d'absorption présenter comme suite :

### III.8.1 Le coefficient de réflexion $S_{11}$



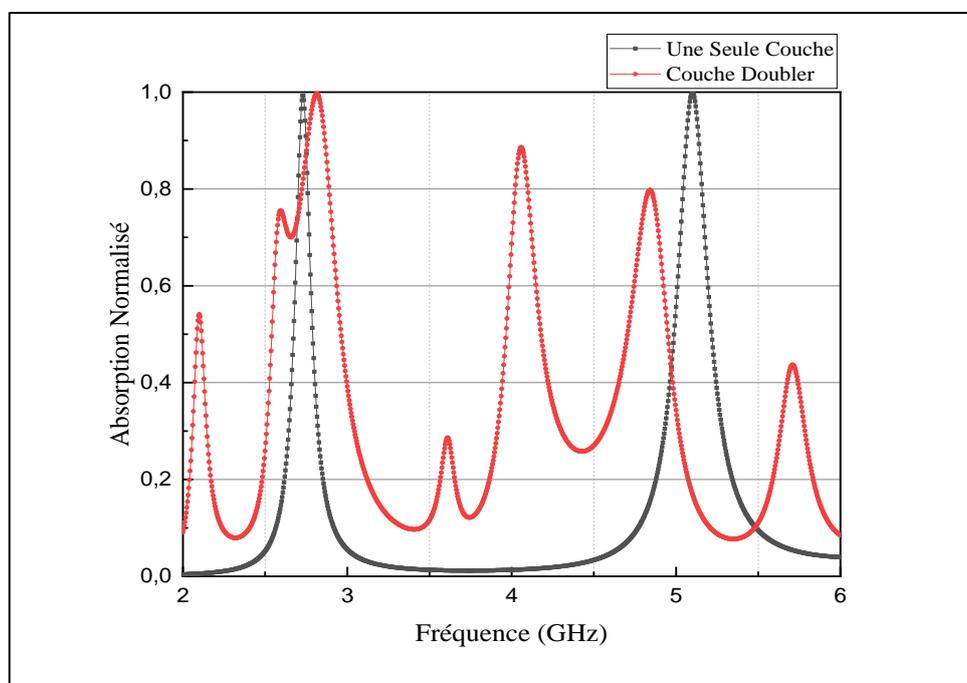
FigureIII.18 : Le coefficient de réflexion  $S_{11}$

### III.8.2 Le coefficient de d'absorption



FigureIII.19 : Le coefficient d'absorption

### III.8.3 Comparaison



FigureIII.20 : le coefficient d'absorption d'une seule couche et double couche dans la bande de fréquence [2 ; 6] GHz

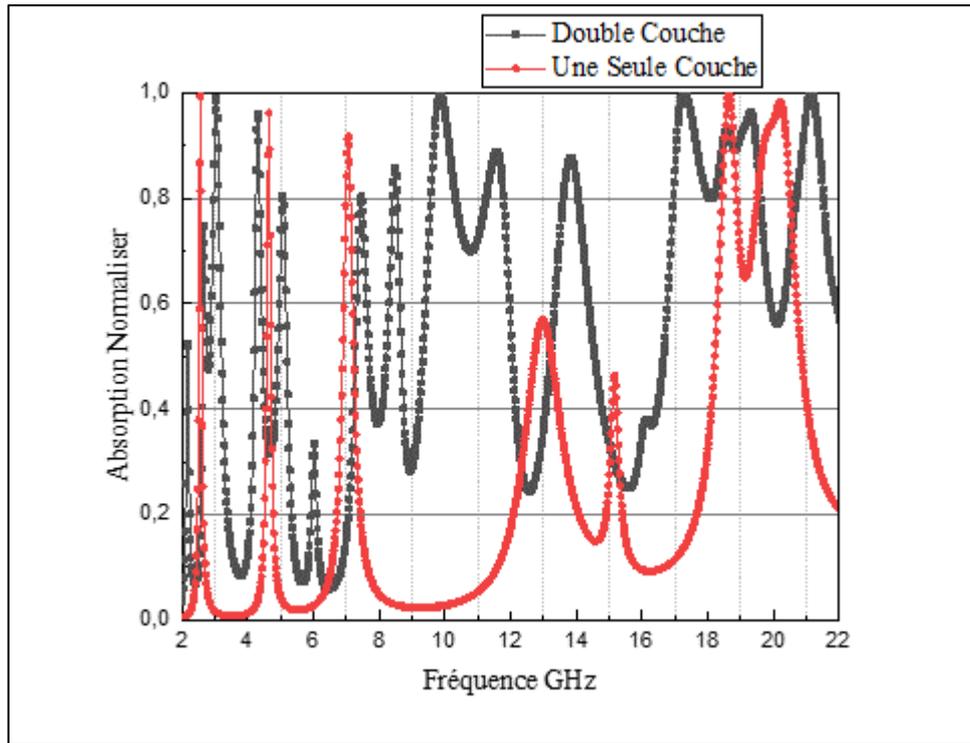


Figure III.21 : le coefficient d'absorption d'une seule couche et double couche dans la bande de fréquence [2 ; 22] GHz

A partir de la simulation, on peut dire que la combinaison de plusieurs couches permet d'obtenir une absorption large bande et à haut rendement.

#### III.8.4 Influence de multiplier les dimensions de la structure double couche par un facteur :

Pour bien adapter l'absorption de la structure on multiplie les dimensions des surfaces métalliques supérieure et intermédiaire avec un facteur constant. Les résultats présentés dans les figures III.22 et III.23.

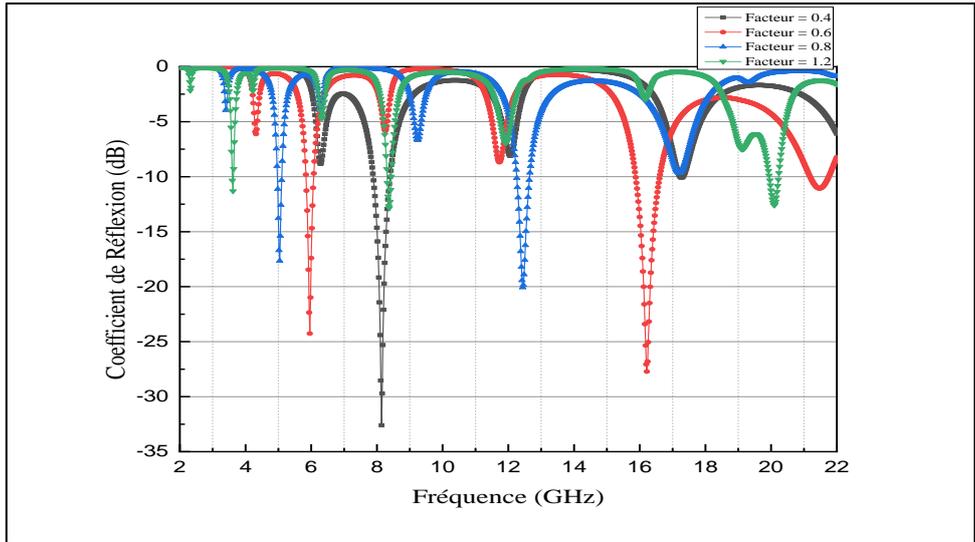


Figure III.22 : Le coefficient de réflexion  $S_{11}$  de la structure double couche dans la bande de fréquence [2-22] GHz

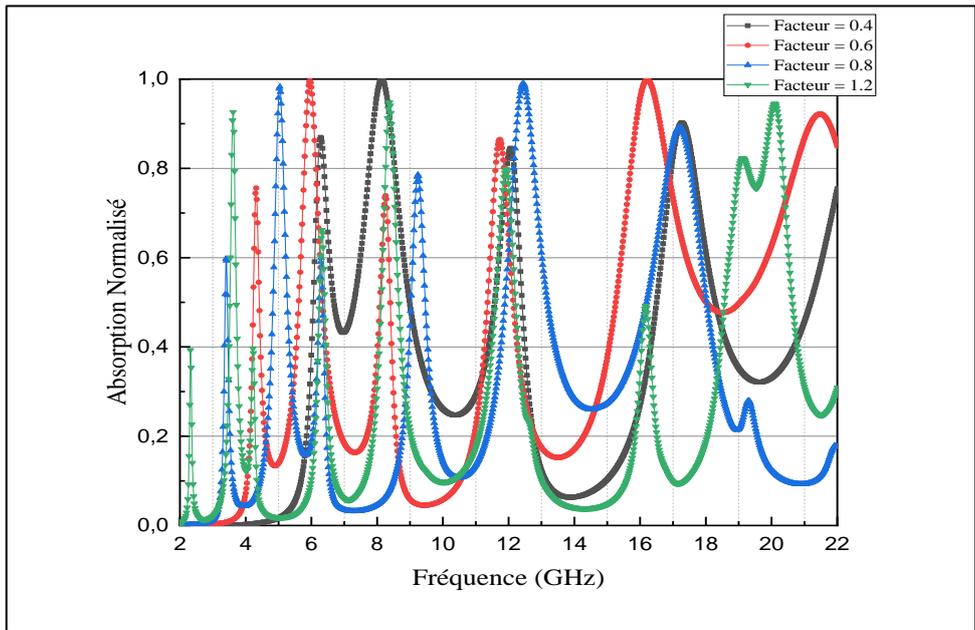


Figure III.23 : Le coefficient d'absorption de la structure double couche dans la bande de fréquence [2-22] GHz

### III.8.5 Effet d'ajouter des résistances :

Pour élargir encore la largeur de bande d'absorption, deux résistances sont chargées avec les SSR sur la couche métallique supérieure de valeur  $R = 240 \text{ Ohm}$ , comme la présente dans la figure III.24.

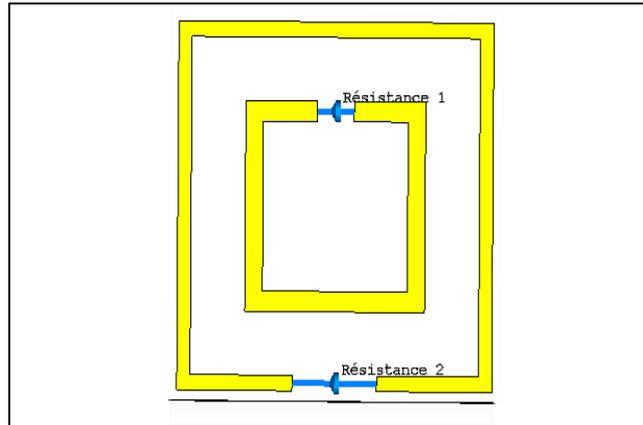


Figure III.24 : La cellule unitaire avec les résistances

Les résultats de la simulation du coefficient de réflexion  $S_{11}$  et le coefficient d'absorption illustrer dans les figures III.25 et III.26.

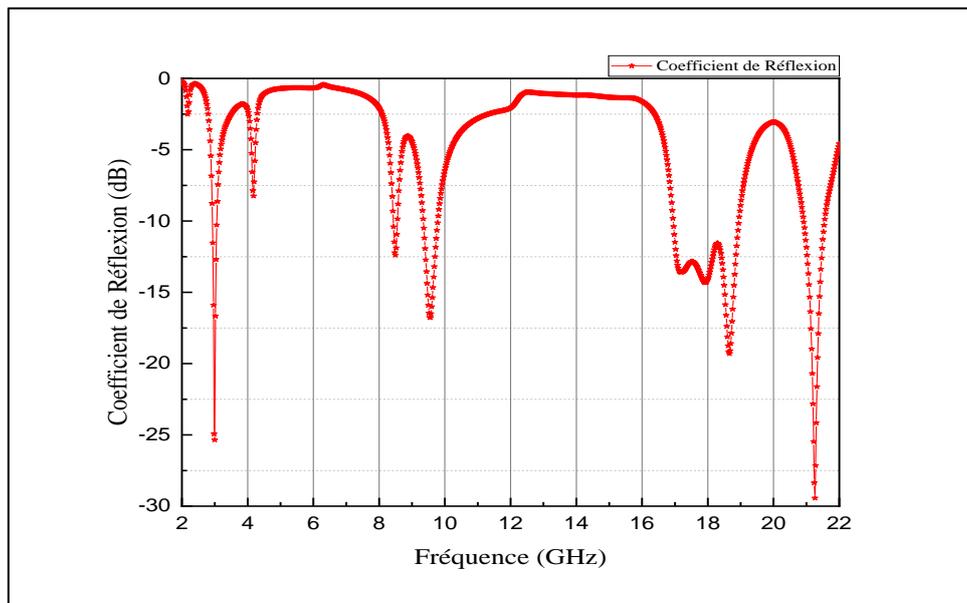


Figure III.25 : Le coefficient de réflexion  $S_{11}$

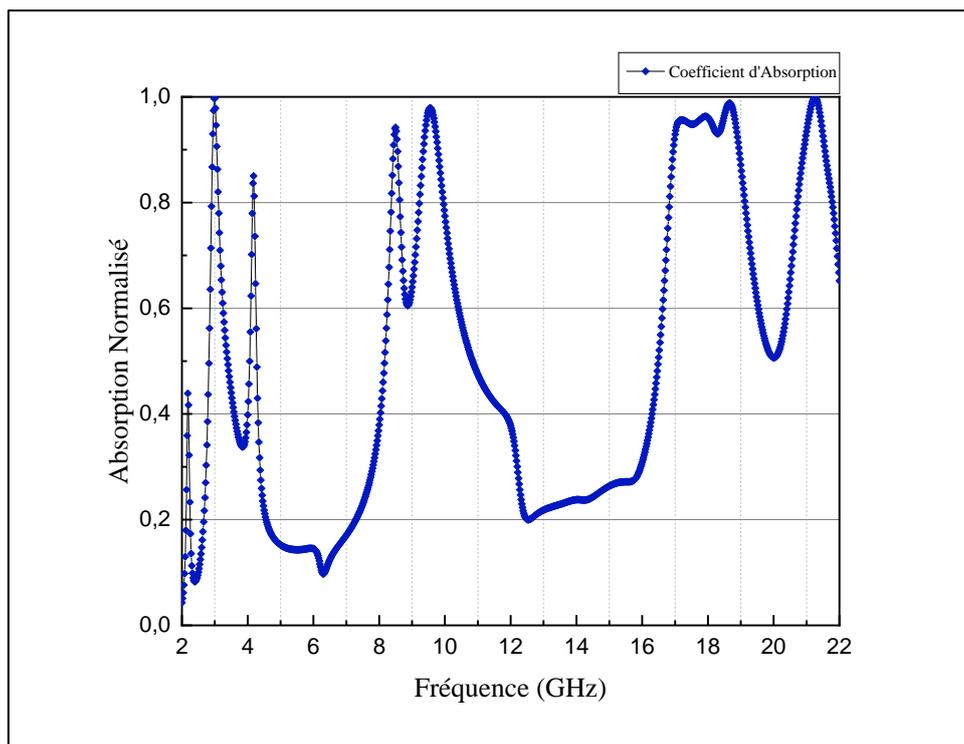


Figure III.26 : Le coefficient d'absorption

A partir le résultat de la simulation illustrer dans les figures III.25 et III.26 on peut dire que on a une absorption à bande ultra-large est obtenu dans la bande 8 ~ 12 GHz et 16 ~ 22 GHz avec une absorption supérieure de 90%.

Pour équilibrer les performances d'absorption dans les bandes de fréquences basses et hautes on multiplie encore une fois les dimensions des surfaces métalliques supérieure et intermédiaire avec un facteur constant. Les résultats illustrés dans les figures III.27 et III.28.

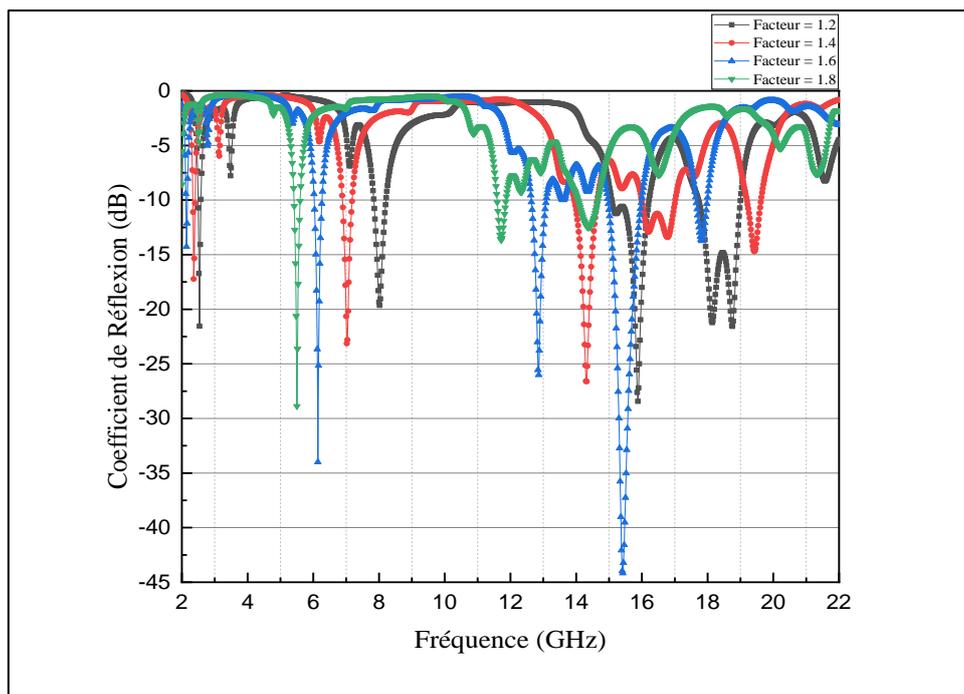


Figure III.27 : Le coefficient de réflexion  $S_{11}$

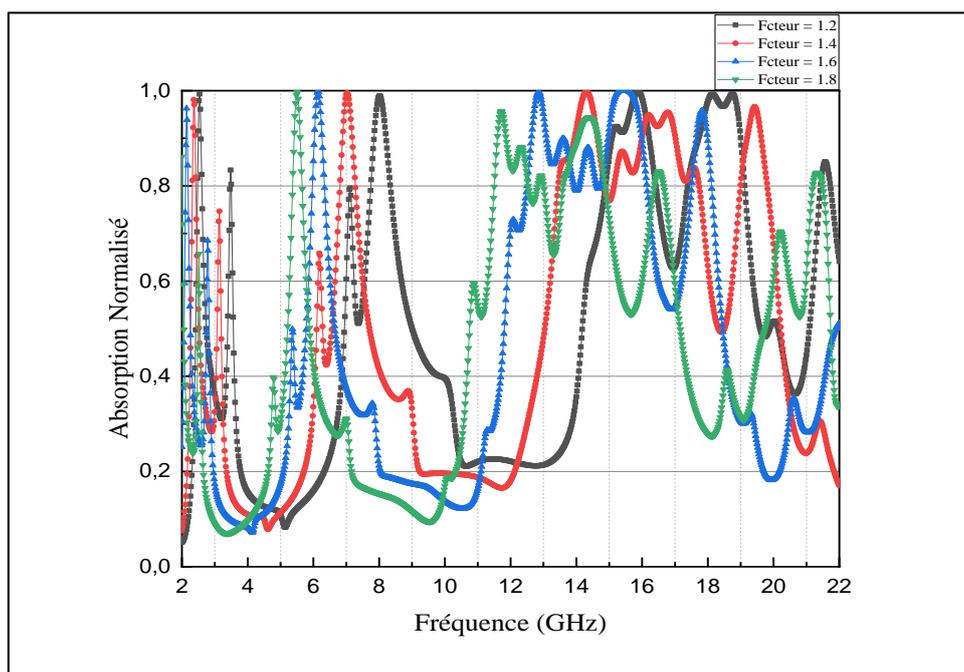


Figure III.28 : Le coefficient d'absorption

A partir des simulations obtenue avant au-dessus ; on peut résumer les résultats dans la figure III.29

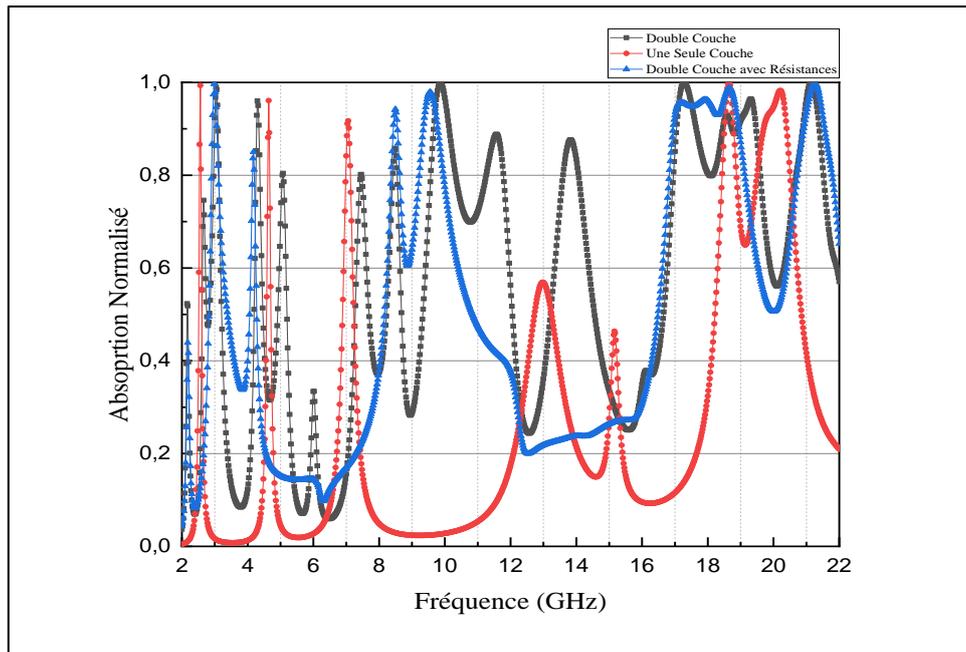


Figure III.29 : Comparaison d'absorption de la cellule unitaire

### III.8.6 Interprétation du Résultats :

Pour améliorer et équilibrer les performances d'absorption de notre absorbant MMA dans les bandes de fréquences basses et hautes ; on a l' :

Effet de multiplier les couches métalliques ; A partir de résultat de la simulation dans les figures III.18 et III.19, on peut avoir que la combinaison de plusieurs couches permet d'obtenir une absorption large bande et à haut rendement.

Effet de multiplier les dimensions des surfaces métalliques supérieure et intermédiaire avec un facteur constante : la caractéristique du MMA sans résistances est étudiée comme le montre dans la Figure III.25 est évident que la fréquence des pics d'absorption situés dans la bande de fréquence relativement basse (spécifiée en 2~ 6 GHz) diminue lorsque le facteur augmente. L'absorptivité correspondante du premier pic d'absorption augmente avec le facteur d'échelle jusqu'à 1.8, tandis que celle du deuxième pic d'absorption reste pratiquement inchangée. En outre, un nouveau pic d'absorption apparaît dans les bandes 8~14 GHz et 16~22 GHz à mesure que le facteur augmente. Alors que la fréquence du nouveau pic d'absorption diminue avec l'augmentation du facteur.

Effet d'ajouter des résistances : pour améliorer encore les performances d'absorbance et faciliter la fabrication, deux résistances sont ajoutées sur la surface métallique

supérieure avec une valeur  $R=240$  Ohm, comme illustré dans la figure III.24 l'influence des valeurs de résistances sur la propriété d'absorption est illustrée à la figure III.25 et III.26.

Il convient de souligner qu'en réalisant une synthèse des trois facteurs mentionnés ci-dessus, nous pouvons atteindre plus facilement les performances d'absorption souhaitées avec un rendement élevé.

### **III.9 CONCLUSION**

Dans ce chapitre, on a étudié une seule structure d'absorbant fonctionnant dans deux plages de fréquences différentes. Les résultats simulés permis de vérifier que l'absorbant MMA proposé est capable d'absorber des signaux à bande ultra-large, ce qui en fait un bon candidat pour les applications RF.

### **Conclusion générale**

Tout long de la préparation de notre projet fin d'études, nous avons essayé de mettre en pratique les connaissances acquises durant nos études universitaires et cela dans le but d'étudier la collecte d'énergie radio fréquence par un absorbant métamatériau parfait.

la collecte d'énergie à partir des ondes radiofréquences en utilisant un absorbant métamatériau parfait est un domaine prometteur, mais encore en développement. Il offre des possibilités d'alimentation sans fil à partir de l'énergie environnante, mais des recherches supplémentaires sont nécessaires pour surmonter les défis techniques et réaliser pleinement cette technologie.

Tout d'abord, nous avons donné la définition et l'histoire du métamatériau. Puis ; les travaux fondamentaux comme les travaux de Veselago qui commence en 1964, et nous avons fourni un aperçu sur métamatériau à indice négative, et sur l'absorbant métamatériau et les applications de ce dernier.

Nous avons aussi parlons sur l'énergie radio fréquence et comment le récupérer et puis les sources d'énergie RF ainsi donner les avantages de la récupération.

Aussi bien que, le troisième chapitre est consacré de la Conception d'un absorbant pour la collecte d'énergie RF à base de métamatériaux (MTM).

En conclusion, la collecte d'énergie radiofréquence par un absorbant métamatériau parfait offre des perspectives prometteuses pour l'avenir de l'énergie sans fil. Avec une recherche continue et des développements technologiques, il est possible que cette technologie contribue à créer un avenir où la collecte d'énergie à partir de l'environnement électromagnétique ambiant devienne une réalité pratique et courante.

- [1] S. Gomez, P. Quéfféle, A. Chevalier, « Methode De Caracterisation Electromagnetique Large Bande Des Métamateriaux », article de l'université de Bretagne Occidentale, Mars 2001.
- [2] V. G. Veselago, “The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of Epsilon and Mu,” *Soviet Physics Uspekhi*, vol. 10, no. 4, pp. 509–514, 1968.
- [3] Olivier Acher, “Copper vs. iron: Microwave magnetism in the metamaterial age”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* (2008).
- [4] Mun (BA) ”Frequency selective surfaces –Theory and design”.
- [5] S. Brûlé, E. H. Javelaud, S. Enoch et S. Guenneau, « Experiments on Seismic Metamaterials : Molding Surface Waves », *Physical Review Letters*, vol. 112, 31 mars 2014, p. 133901
- [6] V. Veselago, “Electrodynamics of substances with simultaneously negative electrical and magnetic permeabilities,” *Sov. Phys. Usp*, vol. 10, no. 4, pp. 509–514, 1968.
- [7] J. Pendry, A. Holden, D. Robbins, and W. Stewart, “Low frequency plasmons in thin-wire structures,” *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 10, p. 4785, 1998.
- [8] J. Pendry, A. Holden, D. Robbins, and W. Stewart, “Low frequency plasmons in thin-wire structures,” *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 10, p. 4785, 1998.

- [9] J. Pendry, A. Holden, D. Robbins, and W. Stewart, "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena," *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, vol. 47, no. 11, pp. 2075–2084, 1999.
- [10] R. A. Shelby, D. R. Smith, and S. Schultz, "Experimental verification of a negative index of refraction," *Science*, vol. 292, pp. 77–9, Apr. 2001.
- [11] C. Caloz and T. Itoh, "Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications" (Wiley, 2005).
- [12] V. G. Veselago, "The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of Epsilon and Mu," *Soviet Physics Uspekhi*, vol. 10, no. 4, pp. 509–514, 1968.
- [13] Romain SIRAGUSA, Étude de nouvelles fonctions radiofréquences à base d'antennes à onde de fuite composite main droite/gauche, thèse de doctorat Grenoble INP, 2009.
- [14] Thierry lucas, la « superlentille » s'affranchir de la limite de la diffraction. L'usine nouvelle n=°2964, 19 mai 2005.
- [15] Mohammed El amine CHAIB, "Modélisation et caractérisation de fonctions électroniques générées par des dispositifs à métamatériaux", Mémoire de Magister en Systèmes des Réseaux de Télécommunication, 2012.
- [16] Sébastien Guenneau, Stefan Enoch et Ross McPhedran, " Les ondes sous l'emprise des métamatériaux ", magazine "pour la science ", no.409, pp.60-61, Novembre 2011.
- [17] Shah Nawaz BUROKUR, " Mise en œuvre de métamatériaux en vue d'application aux circuits microonde et aux antennes ", Thèse Doctorat, Novembre 2005.

- [18] Engheta, N., "Thin absorbing screens using metamaterial surfaces", Antennas and Propagation Society International Symposium, 2002, IEEE, vol.2, no., pp. 392- 395 vol.2, 2002.
- [19] Capaccioli, S., Lucchesi, M., Rolla, P. A., et al., "Dielectric response analysis of a conducting polymer dominated by the hopping charge transport", Journal of Physics: Condensed Matter, 1998, vol. 10, no 25, p. 5595.
- [20] Tanner, H. A., US Patent 2977591. 1961
- [21] C. W. Seitz, "Industrial battery technologies and markets ", IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol. 9, no. 5, pp. 10–15, 1994
- [22] E. M. Turner, "Spiral slot antenna", PhD. Dissertation, Wright Air Development Centre, Dayton, OH Tech, June 1995, wCLR-55-8.
- [23] J.D. Dyson, "The equiangular spiral antenna ", IRE Transactions on Antennas and Propagation, vol. AP-7, pp. 181-187, April 1959.
- [24] <https://www.ic.gc.ca/eic/site/smt-gst.nsf/fra/sf11467.html> Consulté le : 10/07/2021.
- [25] A. D. Joseph, "Energy harvesting projects ", IEEE Pervasive Computing, vol. 4, no. 1, pp. 69–71, 2005.
- [26] D. Brunelli, C. Moser, L. Thiele, and L. Benini, "Design of a solar-harvesting circuit for batteryless embedded systems ", IEEE Transactions on Circuits and Systems I, vol. 56, no. 11, pp. 2519–2528, 2009.
- [27] <http://cea.fr/comprendre/Pages/physique-chimie/essentiel-sur-ondes-electromagnetiques-communication.aspx/>

- [28] Basé sur l'entrée "interference" de The Concise Oxford English Dictionary, 11th edition, online
- [29] Sue M.K., « Radio frequency interference at the geostationary orbit » [archive] [PDF], sur Nasa, 15 juin 1981.
- [30] Swings, Transactions of the International Astronomical Union - vol. XIXB - Proceedings of the XIXth General Assembly, Dehli, 2012 (1re éd. 1985)
- [31] Dyson, Chiang, Egan et Ghazi, « Radio-Frequency Interference at the McGill Arctic Research Station », Journal of Astronomical Instrumentation, vol. 10, no 2, juin 2021, p. 2150007.
- [32] Charoy, Guide pratique de la CEM - 3e éd. Les sources de perturbations. Les techniques de protection., Dunod, 2017.
- [33] Cisco Blogs, Cisco, 10 juillet 2014 (consulté le 4 décembre 2019) : « The FCC ruling is re-opening the Terminal Doppler Weather Radar (TDWR) band (channels 120, 124, 128) with new test requirements for DFS protection.
- [34] Saltikoff, « The Threat to Weather Radars by Wireless Technology », *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 97, n° 7, 2016, p. 1159–1167.
- [35] Decision ERC/DEC/(99)23 adds 5250–5350MHz and 5470–5725MHz with more Tx power but with the added caveat that DFS was required to protect legacy users (Military Radar and Satellite uplinks)”1167

- [36] Tristant, « C-band meteorological radars – Threats related to RLAN 5 GHz » [archive], EUMETNET, 23–24 october 2017 (consulté le 5 décembre 2019)
- [37] C.Valenta.G.Durgin” Harvesting Wireless Power: Survey of EnergyHarvesterConversionEfficiency in Far-Field, Wireless Power Transfer Systems.” Article in IEEE Microwave Magazine, Vol.15, No.4, pp.108-120, Jun2014
- [38] <https://www.rapport-gratuit.com/technologie-ultra-large-bande-uw/b/>
- [39] L. Huang and H. Chen. Multiple band and polarization insensitive metamaterial absorber. Prog. Electromagn. Res., 113(2011)103-110.
- [40] B. Zhu, Z. Wang, C. Huang, Y. Feng, J. Zhao, and T. Jiang. Polarization insensitive
- [41] Landy, N. I., et al., "Perfect metamaterial absorber," Physical Review Letters 100 , 207402 (2008)
- [42] Lewis, R. M. et al. Measuring changes in inductance with microstrip resonators. IEEE Trans. Appl. Supercond. 29, 1–4 (2019).
- [43] Leferink, F. B. in Proceedings of international symposium on electromagnetic compatibility. 16–22 (IEEE) (1999).