

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 des télécommunications

**Par** :

Boudjema lotfi et Zouhiri Ilyes

**Sujet**

Etude d'antennes ULB à bandes rejetées en utilisant des résonateurs métamatériaux

Soutenu publiquement, le Septembre 2021, devant le jury composé de :

<b>BENOSMANE Hayet</b>	MCB	Univ. Tlemcen	Président
<b>BOUSALAH Faiza</b>	MCB	Univ. Tlemcen	Examineur
<b>BOUKLI HACENE Nouredine</b>	Professeur	Univ. Tlemcen	Encadreur
<b>NACER Abdelghani</b>	MCB	USTHB	Co-Encadreur

# Dédicace

Je dédie cet ouvrage

A mes parents qui m'ont soutenu et encouragé durant ces années  
d'études.

Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.

A mes frères Anes & Aberrahim, A mes sœurs Nawel, Manel, Siham,  
Bouchra et la précieuse Anfeel, mes porches et Ceux qui ont partagé  
avec moi tout les moments d'émotion lors de la réalisation de ce  
travail. Ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au  
long de mon parcours.

A ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de  
la vivacité.

A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite  
plus de succès.

A tous ceux que j'aime

*Lotfi boudjema*

# Dédicace

*Je dédie ce travail :*

*A mes chers parents,*

*Qui n'ont jamais cessé de formuler des prières à mon égard,  
de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre  
mes objectifs. Je vous aime.*

*A mes frères, Mohamed, Yacine, Imad et Farouk*

*A ma sœur Nawel et mon beau frère Djilali,*

*Pour leurs soutiens moraux et inconditionnels, et pour leurs  
conseils précieux tout au long de mes études.*

*A toute ma famille.*

*Ilyes zouhiri*

# Remerciements

*Nous remercions Allah le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer de terminer ce mémoire.*

*Tout d'abord ce travail ne serait pas aussi riche sans l'aide et l'encadrement de monsieur **Boukli-hacen Nouredine** et monsieur **Nacer Abdelghani**, on les remercie pour la qualité de leur encadrement exceptionnel, pour leur patience, leur rigueur et leur disponibilité durant la préparation de ce mémoire.*

*Nos remerciements s'adressent également aux membres De jury Madame **Benosmane** et Madame **Bousalah** pour avoir accepté d'examiner et de juger  
Notre travail.*

*Et en fin à toute personne qui a participé de près  
Ou de loin à l'accomplissement de ce mémoire.*

# Table des matières

INTRODUCTION GENERALE .....	01
<b>Chapitre1 : Les métamatériaux et leurs applications</b>	
I .INTRODUCTION.....	03
I.1.Historique.....	03
I.1.1 Propagation d'une onde dans une structure périodique.....	03
I.1.2. Domaine micro-ondes.....	04
II. LES METAMATERIAUX.....	05
II.1Caractéristiques des métamatériaux.....	05
II.2. Origine et développement des métamatériaux .....	05
III MATERIAUX A INDICE NEGATIFS .....	07
III.1. Approche de Veselago.....	08
III.2 Permittivité et perméabilité négatives.....	09
III.2.1 Perméabilité négative .....	10
III.2.2 Résonateur en Anneau Fendu Complémentaire « RAFC ».....	11
III.2.3 Permittivité négative.....	15
III.2.4 Indice de réfraction négatif .....	16
IV Conclusion.....	19
V Références bibliographiques .....	20
<b>Chapitre 2 : Contexte général sur l'ultra large bande</b>	
I INTRODUCTION.....	23
II LA TECHNOLOGIE ULTRA LARGE BANDE.....	23
II.1 Le rôle d'une antenne.....	24
III LA TECHNOLOGIE ULTRA LARGE BANDE.....	25

III.1 Réglementation de l'ULB dans le monde.....	26
III.2 Techniques de transmission pour l'ULB (standardisation) .....	26
III.3 Différents types d'applications de l'ultra large bande.....	26
III.4 Avantages et inconvénients de l'Ultra Large Bande.....	27
IV LES ANTENNES IMPRIME POUR APPLICATION ULB.....	28
IV.1 Caractéristiques des antennes.....	28
IV.1.1.Caractéristique électrique .....	28
IV.1.1.1 Impédance d'entrée.....	28
IV.1.1.2 Le facteur de qualité.....	28
IV.1.1.3 Bande d'utilisation.....	29
IV.1.1.4 Rendement.....	29
IV.2 Caractéristiques de rayonnement.....	29
IV.2.1.Diagramme de rayonnement.....	29
VI.2.2.Directivité.....	29
IV.2.3 Gain.....	30
IV.2.4 Résistance de rayonnement.....	30
VI.2.5 Polarisation.....	30
IV.3 Etude de l'antenne patch : .....	30
V.1 Types d'alimentation.....	31
V.2 Alimentation directe par une ligne micro ruban .....	31
V.3 Les antennes Ultra Large Bande.....	32
V.4 L'antenne spirale conique.....	32
V.5 Emploi de structures métamatériaux.....	33
V.5.1 Antenne ULB active.....	34
V.5.2 Antenne ULB à plusieurs bandes de fréquences rejetées.....	35
VI CONCLUSION.....	37
VII Références bibliographique .....	38

## Chapitre 3 : Simulation d'antenne ULB avec CST

I INTRODUCTION .....	40
II PRESENTATION DE LOGICIEL DE SIMULATION CST .....	40
II.1 Définition .....	40
II.2 Etapes de simulation .....	40
II.3 Présentation de la fenêtre du logiciel CST .....	40
II.3.1 création de projets.....	41
II.3.2 création d'une structure.....	41
II.3.3 déroulement d'un projet.....	42
II.4 Configuration de l'antenne.....	43
III Antenne ULB à bandes rejetées.....	45
III.1 Analyse des caractéristiques de rejection du RAFC.....	45
III. 2 Antenne ULB à bande rejetée (5 – 6 GHz).....	48
III.2.1 Influence de rayon .....	49
III.2.2 Influence de l'emplacement de la fente.....	50
III.3 Antenne ULB à double bande rejetée.....	50
III.4 Antenne à triple bandes rejetées .....	52
III.4.1 Variation des dimensions du résonateur .....	53
III.4.2 Effet de déplacement du résonateur .....	53
III.5 Antenne ULB final à triple bande rejetée.....	54
III.6 COMPARAISON DES PERFORMANCES .....	55
IV Conclusion.....	57
V Annexe et bibliographie.....	58
<b>Conclusion général .....</b>	<b>59</b>

## Liste des figures

Figure I.1. – Diagramme $\epsilon - \mu$ [5] .....	07
Figure I.2. Représentation d'une onde plane pour un milieu (a) « main droite » (b) « main gauche » [6].....	08
Figure I.3. Trièdre indirect caractérisé par la règle de la main gauche. [5].....	09
FIGURE I.4 Evolution des fréquences de fonctionnement des métamatériaux à perméabilité négative (triangles vides) et à indice négatif (triangles pleins) [8].....	10
Figure I.5. Représentation et dimensions d'une unité de cellule d'un RAF carré [11].....	12
Figure I.6 Comparaison entre géométrie du RAF et du RAFC [11].....	12
Figure I.7 RAF avec anneaux [11]. .....	13
Figure I.8 Rouleau suisse introduit par Pendry [12]. .....	14
Figure I.9 Perméabilité calculée et mesurée pour un rouleau suisse de 35-tours [12].....	15
Figure I.10 Structures présentant une permittivité négative. (a) Résonateur en c proposé par O'Brien. (b) Tige métallique. [13] .....	17
Figure I.11 Matériaux à indice de réfraction négatif. (a) à base de réseau de fils métalliques et des RAFC circulaires. (b) à base de réseau de fils métalliques et des RAF carrés [13].....	18
Figure II. 1 Rayonnement d'une antenne [3].....	23
Figure II. 2 Schéma de principe d'un système de communication radio [7].....	24
Figure II. 3 Applications de l'ULB en fonction des débits possible et de la distance.....	26
Figure II.4 Applications et domaines de l'ULB [4].. .....	27
Figure II.5. Structure d'une antenne imprimée. ....	30
Figure II.6 Alimentation par ligne micro ruban à travers un bord rayonnant.....	31
Figure II.7 Alimentation par ligne micro ruban à travers un bord non rayonnant.....	32
Figure II.8 Antenne spirale conique. (a) Configuration, (b) Vue de coté et de dessus (c)exemple de réalisation. ....	33
Figure II.9. Antennes ULB à fréquences rejetées utilisant la structure SRR.....	34
Figure II.10 Antennes ULB actives. ....	34
Figure II.11. Antennes ULB à double bandes rejetées avec des fentes. ....	36
Figure II.12 Antennes ULB à multibande de fréquences rejetées.....	36
Figure III. 1:Interface principale et les différents modules de CST.....	41
Figure III.2 : Modules de CST.....	41
Figure III.3 : Operations booléen et de transformations.....	42
Figure III.4 : Définition de port.....	43

Figure III. 5: Conditions aux limites de l'antenne. ....	43
Figure III. 6: Etapes de conception de l'antenne.....	44
Figure III.7: variation du coefficient de réflexion pour les différentes longueurs de la fente (Lf) en fonction de la fréquence.....	45
Figure III. 8 Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence pour Lf=1.6.....	45
Figure III. 9: Topologie du (a) RAF unique, (b) RAFC unique (les régions métalliques sont représentées en gris). ....	46
Figure III.10 : La ligne microruban chargée RAFC et son modèle de circuit équivalent circulaire et rectangulaire. ....	47
Figure III.11 : Antenne avec résonateur en anneau fendu complémentaire circulaire.....	48
Figure III.12 : Coefficient de réflexion de l'antenne ULB à bande rejetée en fonction de la fréquence. ....	49
Figure III. 13: variation du rayon en fonction de la fréquence.....	49
Figure III.14: variation du rayon en fonction de la fréquence. ....	50
Figure III. 15: Antenne avec deux résonateurs en anneau fendu complémentaire circulaire (Co-directionnels). ....	51
Figure III. 16: Variation du coefficient de réflexion pour les deux résonateurs en fonction de la fréquence. ....	51
Figure III. 17: Variation du gain en fonction de la fréquence.....	51
Figure III. 18: Diagramme de rayonnement pour différentes fréquences (3.1 GHz ; 4.5 GHz, 8.5 GHz et 14 GHz). ....	52
Figure III. 19: Antenne avec deux résonateurs en anneau fendu complémentaire circulaire (Co-directionnels) et un résonateur carré. ....	53
Figure III. 20 : Variation du coefficient de réflexion pour les différentes dimensions du résonateur en fonction de la fréquence.....	53
Figure III. 21: Variation du coefficient de réflexion pour les différents déplacements du résonateur en fonction de la fréquence. ....	54
Figure III. 22: Variation du coefficient de réflexion de l'antenne à triple bande rejetée en fonction de la fréquence. ....	54
Figure III. 23: Variation du gain en fonction de la fréquence.....	55

### **Liste des tableaux**

Tableau III.1 : Dimensions de l'antenne. ....	44
Tableau III.3 : variation de fréquence (FZ) en fonction des paramètres du RAFC [3].....	48
Tableau III.2 : Comparaison des performances des antennes. ....	56

# Glossaire

**CSRR** : (complementary split-ring resonator.

**DNI** : Double index material

**ETSI** : European Technical Standard Institute.

**FCC** : Federal Communication Commission. Le fluorure de fer.

**CST** : Computer Simulation Technology.

**IEEE**: L'institut pour les ingénieurs électriques et électroniques.

**LHM** : Left Handed Materials

**RAF** : résonateur en anneau fendu .

**RAFC** : résonateur en anneau fendu complémentaire .

**RAFCC** : résonateur en anneau fendu complémentaire circulaire .

**SRR** : split ring resonator.

**SNI** : Single Negative index Material.

## Glossaire des symboles

$\mu$  : Perméabilité

$\epsilon$ : Permittivité : Célérité de la lumière

$\lambda$ : Longueur d'onde

$\mathbf{K}$  : vecteur d'onde

$\mathbf{E}$  : Vecteur champ électrique

$\mathbf{H}$  : Vecteur champ magnétique

$n$  : Indice de réfraction

**TE** : transverse Electrique

$\Gamma$  L'amortissement de la résonance

## Résumé

La technologie ULB est présentée comme une solution très intéressante et innovatrice pour un grand nombre d'applications. L'essor récent des communications Ultra large bande a nécessité des antennes spécialement adaptées à cette technologie. Les antennes patches sont la meilleure solution, puisque ces antennes présentent des caractéristiques très avantageuses par rapport aux antennes classiques. Dans le cadre de notre travail, nous avons proposé une géométrie d'antennes imprimées pour des applications ultra large bande (ULB). Nous avons inséré plusieurs fentes de formes différentes dans l'élément rayonnant et dans le plan de masse partiel. L'antenne est réalisée à l'aide du logiciel CST MWS. Les performances obtenues de l'antenne conçue : gain, coefficient de réflexion, bande passante ainsi que les diagrammes de rayonnement, démontrent que les résultats obtenus sont en bon accord avec les exigences demandées.

**Mots clés :** métamatériau, perméabilité négative, permittivité négative, indice de réfraction négatif, antenne, RAF, RAFC..

## Abstract

UWB technology is presented as a very interesting and innovative solution for many applications. The recent rise in Ultra-wide band communications has required specially adapted antennas for this technology. Patch antennas are the best solution, because they have very advantageous characteristics compared to the conventional antennas. As part of our work, we have proposed a printed antenna geometry for Ultra Wideband applications. We have embedded several slots of different shapes in the radiating element and in the partial ground plane. The antenna is made by using the CST MWS software. The performance obtained antenna's designed: gain, return loss, bandwidth and radiation patterns demonstrate

**Keywords:** metamaterial, negative permeability, negative permittivity, negative refractive index, antenna, RAF, RAFC.

## المخلص

يتم تقديم تقنية **ULB** كحل مبتكر و مثير للاهتمام لعدد كبير من التطبيقات التكنولوجية. و نظرا لرواجها الأخير في اتصالات النطاق الترددي بالغ الاتساع في الهوائيات المُكيّفة خصيصًا لهذه التقنية. وطبعًا هاته الأخيرة تعد الحل الأفضل لأن هذه الهوائيات لها خصائص مفيدة للغاية مقارنةً بالهوائيات التقليدية.

كجزء من عملنا وباستخدام برنامج **CST MVS** اقترحنا هندسة الهوائيات المطبوعة في تطبيقات النطاق العريض للغاية و قمنا بإدخال عدة شقوق بأشكال مختلفة في العنصر المشع وفي مستوى قاعدة الأرضية، و نظرا ان الأداء الذي تم الحصول عليه من الهوائيات المصممة **ULB** هو الكسب الجيد و معامل الانعكاس معتبر و مجال الترددات كبير و هذا ما قد بين ان النتائج التي تحصلنا عليها ملائمة الى حد كبير مع المقاييس المطلوبة في هذا المجال .

**كلمات البحث:**المادة الخارقة, نفاذية السلبية السماحية السلبية, الهوائي, معامل الانكسار السليبي, RAFC, RAF.

## INTRODUCTION GENERALE

La dernière décennie de recherche en électromagnétisme a été marquée par l'émergence de composites innovants destinés à fournir un indice de réfraction négatif. Les propriétés de structures possédant cette propriété ont été décrites dans un article de V.G. Veselago devenu la base de toute une communauté scientifique. Les métamatériaux sont issus de travaux visant à obtenir un indice de réfraction négatif. Ce terme recouvre désormais une très large gamme d'objets et d'applications, auxquelles il faut ajouter les circuits planaires à base de résonateurs capacitifs et inductifs. Les premiers échantillons réalisés pour obtenir un indice de réfraction négatif étaient constitués d'éléments rayonnants de petite taille arrangés périodiquement. C'est la réponse dipolaire électrique ou magnétique de ces éléments rayonnants qui donne les propriétés de permittivité et de perméabilité de ce type de métamatériau. Or, depuis 1999, un nouvel élément artificiel a été mis au point pour ses caractéristiques de bande interdite dans la propagation. Cet élément est connu sous l'appellation de Résonateur en Anneau Fendu (RAF) et crée en plus de sa résonance, une perméabilité effective négative dans une bande étroite de fréquence autour de sa résonance. Un autre avantage de ce résonateur est son faible encombrement ; en effet, les dimensions les plus grandes de ce résonateur sont de l'ordre de  $\lambda/10$ . L'objectif de ce mémoire est de comprendre et de mettre en évidence les propriétés intéressantes de ce RAF en vue d'applications aux antennes et aux circuits microondes. Il s'agit aussi de réaliser des éléments de faible encombrement et de performances élevées qui s'intègrent facilement aux systèmes de télécommunications.

Ce manuscrit se divise en trois chapitres : Dans le premier chapitre, nous présentons un état de l'art sur les applications de ce type de structures dans le domaine de micro onde. Nous nous sommes limités aux applications potentiellement exploitables dans le cadre de ce mémoire. Ensuite, nous donnons une vue globale des métamatériaux composites présentant un indice de réfraction négatif dits aussi métamatériaux main gauche, en passant par l'étude des résonateurs permettant d'obtenir une perméabilité négative et celle des éléments permettant d'obtenir une permittivité négative. Dans le second chapitre, nous donnons un contexte général sur les antennes ULB . Dans un premier temps, nous présentons les règlementation de ULB dans le monde, ensuite, les techniques de transmission pour l'ULB et les différents type d'application, enfin, les caractérisation des antennes imprimés pour application ULB, et l'utilisation du RAF et du RAFC dans les antennes.

Le troisième chapitre est consacré à l'application du RAF et du RAFC. A l'aide du logiciel de simulation CST Microwave Studio, une antenne ULB (primitive) sera étudiée. Ensuite nous nous intéresserons aux antennes ULB à bande rejetées (une, deux et trois bandes rejetées). Nous clôturons ce chapitre avec une valorisation de ce travail effectué. Cette dernière se présentera

sous forme d'une comparaison avec d'autres études. Celle-ci montrera la satisfaction des résultats obtenus au cours de cette étude.

## I. INTRODUCTION

Les propriétés physiques les plus intéressantes des matériaux gauches se résument en un indice de réfraction négatif. Dans les matériaux ordinaires, la constante diélectrique et la perméabilité sont positives en même temps, tandis que dans le matériau main gauche le constant diélectrique ou la perméabilité est négative, ou les deux sont négatives en même temps.

Enfin l'indice de réfraction est inférieur à zéro. Le concept expérimental pour fabriquer des matériaux à permittivité négative à partir de fils métalliques a été proposé par Pendry et al. en 1998. En 1999, le groupe de Pendry a proposé de profiter de la réponse inductive du mouvement collectif (résonance) des électrons dans les éléments conducteurs non magnétiques sous forme de Résonateur en Anneau Fendu (RAF) pour avoir une perméabilité négative. En se basant sur de nombreux travaux de Pendry, plusieurs publications ont étudié des nouvelles structures et ont analysé le comportement main gauche de ces structures. Par suite de la démonstration de l'indice de réfraction négatif dans le domaine des hyperfréquences, il y a eu un effort continu pour pousser la fréquence de fonctionnement des métamatériaux aux fréquences terahertz et optiques. Une stratégie plutôt évidente à cet égard est de profiter de la linéarité de l'électromagnétisme et d'étudier les paramètres géométriques. La fabrication des matériaux main gauche à des fréquences infrarouges et optiques nécessite la photolithographie de plus haute résolution ainsi que des substrats diélectriques, ou encore l'utilisation d'un seul substrat couplé avec un traitement multicouche dans le cas des dimensions extrêmement réduites tel que requis pour les fréquences optiques.

### I.1. Historique

#### I.1 Propagation des ondes dans des milieux périodiques

Les milieux périodiques apparaissent dans un grand nombre d'applications (matériaux composites ou à fibres en mécanique et les cristaux photoniques en micro- et nanotechnologies). Ces milieux périodiques présentent des propriétés très intéressantes. Par exemple, en optique dans les cristaux photoniques qui sont appelés également des matériaux à bandes interdites de photons, des ondes électromagnétiques monochromatiques à certaines fréquences ne peuvent pas se propager dans de tels milieux. Il existe même des intervalles entiers de fréquences dites interdites. Ces milieux peuvent ainsi être utilisés par exemple dans la réalisation de filtres ou d'antennes.

Ces problèmes nécessitent des outils mathématiques un peu plus sophistiqués que dans le cas des milieux homogènes mais on pourra mener une analyse assez poussée qui exploite au mieux la structure périodique des milieux.

On étudiera essentiellement des milieux 1D pour lesquels les outils et les idées peuvent être exposés simplement[1].

## **I.2 Domaine micro-ondes**

Dans le domaine des micro-ondes, la thématique des métamatériaux peut être reliée à la notion d'« ondes rétro propagées » dont elle est une généralisation aux trois dimensions de l'espace. Depuis fort longtemps, il est reconnu en théorie des lignes que dans le cas de filtres passe-haut, de type mise en cascade de cellules « capacité en série – inductance en parallèle », l'onde supportée est dite rétro propagée, ce qui correspond à une vitesse de phase opposée à la vitesse de groupe. Ici encore, des modèles permettent de remonter à des valeurs négatives de permittivité et de perméabilité effectives[2].

Sur la base de ces études anciennes et de la nouveauté apportée par les motifs de type résonateurs en anneau, de multiples propositions pour application au filtrage ont été proposées aussi bien en ligne micro-ruban, en ligne coplanaire, en guide d'ondes que sur des dispositifs de type ligne ailette (finline)[2].

D'un point de vue applicatif, tous les auteurs mettent en exergue la compacité accrue à performances équivalentes des designs proposés par rapport aux concepts classiques de routage et filtrage. Bien évidemment, la notion de guidage de l'onde électromagnétique et son confinement au sein ou autour d'un support de propagation permettent de simplifier les études et de revenir à des systèmes unidimensionnels. Illustrons cette démarche dans le cas d'une ligne de transmission « main gauche » de type ligne à ailette. Il s'agit d'insérer au milieu d'un guide d'onde métallique un substrat diélectrique. Sur l'une des faces, une ligne à fente est déposée, son adaptation avec le guide est assurée par des zones de transition optimisées. Le milieu à permittivité négative est obtenu en court-circuitant périodiquement la ligne à fente, tandis que la perméabilité négative est obtenue en déposant des motifs métalliques en anneau fendu sur l'autre face du substrat diélectrique en les centrant par rapport à la ligne à fente. Alors que, pris indépendamment, les deux sous-réseaux bloquent la propagation de la ligne à ailette dans la gamme d'études, une transmission très élevée est recouverte entre 11,5 et 12,5 GHz. Le caractère « rétro propagé » ou « main gauche » avec une représentation de la différence de phase obtenue à partir du paramètre de transmission sur deux lignes de longueurs différentes. Celle-ci est

incontestablement positive dans la même bande de fréquence, véritable signature d'une avance de phase et donc d'une onde rétro propagée [2].

## II. LES METAMATERIAUX

En physique, en électromagnétisme, le terme métamatériau désigne un matériau composite artificiel qui présente des propriétés électromagnétiques qu'on ne retrouve pas dans un matériau naturel. Il s'agit en général de structures périodiques, diélectriques ou métalliques, qui se comportent comme un matériau homogène n'existant pas à l'état naturel. Il existe plusieurs types de métamatériaux en électromagnétisme, les plus connus étant ceux susceptibles de présenter à la fois une permittivité et une perméabilité négatives.

Mais il en existe d'autres : milieux d'impédance infinie, milieu à permittivité relative inférieure à 1, etc. En réalité les métamatériaux sont très anciens, puisqu'on peut considérer par exemple les verres colorés utilisés dans les vitraux des cathédrales comme des métamatériaux optiques. De même on peut considérer les cristaux photoniques comme des métamatériaux.

C'est aujourd'hui un domaine de recherche très actif [3].

### II.1. Caractéristiques des métamatériaux

Le terme « métamatériau » comprend tous les matériaux artificiels telle la structure périodique avec des propriétés électromagnétiques spéciales. Néanmoins, ce nom est principalement utilisé pour les structures à indice de réfraction négatif. La périodicité est inférieure au nombre de  $\lambda / 10$ . Le matériau à indice de réfraction négatif est un matériau qui a une réfraction négative à l'interface avec des matériaux conventionnels. On peut citer deux particularités

Le vecteur forme un trièdre indirect :

- La direction du vecteur d'onde est opposée au vecteur de Poynting.
- Le diagramme schématique sera fourni à Précisez cette particularité.

### II.2. Origine et développement des métamatériaux

Le terme métamatériau a été synthétisé par Rodger M. Walser, université du Texas à Austin, en 1999, qui a été à l'origine de sa définition en tant que "composés macroscopiques réalisant une architecture cellulaire synthétique, tridimensionnelle, périodique pour produire une combinaison optimisée, non disponible dans la nature".

En outre, les métamatériaux sont définies comme "matériaux qui gagnent leurs propriétés de leurs structures plutôt que directement de leurs compositions[4].

Les définitions ci-dessus reflètent certaines propriétés des métamatériaux, mais pas tous. En fait, les métamatériaux sont des composés macroscopiques d'une structure périodique ou non-périodique, dont la fonction est due à l'architecture cellulaire et à la composition chimique. Si le métamatériau est considéré comme un milieu efficace, il a une condition additionnelle est que la taille de la cellule est plus petite ou égale à la longueur d'onde. En électromagnétisme, ce nom a été popularisé par les deux articles fondateurs de J.B. Pendry, qui a introduit de manière théorique les deux classes de matériaux à permittivité négative et perméabilité négative.

Le premier type a été proposé par Notomi et utilise les propriétés d'anisotropie des cristaux photoniques. Dans ce cas, une réfraction négative est obtenue même quand l'indice de réfraction de matériau de base est positif. Le deuxième type est obtenu par une perméabilité et une permittivité simultanément négative et a été proposé d'après une étude théorique de Veselago en 1967. Il revient à D.R. Smith le mérite d'avoir associé les deux concepts dans un seul matériau à indice négatif testé expérimentalement pour la première fois en 2000[4].

Ces premiers travaux ont excité l'imagination des chercheurs du monde entier et une floraison de publications en a suivi. Il faut dire que, en optique, l'enjeu est de taille puisqu'on est allé jusqu'à prédire la naissance d'une nouvelle optique où la résolution des lentilles et des instruments optiques ne serait plus limitée par la diffraction. Cette prédiction a été tempérée depuis, mais elle reste encore valable, étant donné les progrès des technologies. Des métamatériaux opérant à des longueurs d'onde de 1 et 2  $\mu\text{m}$  ont été proposés. Ils ne correspondent pas encore à l'idéal.

Mais ils montrent qu'en peu de temps des dispositifs extrêmement performants ont pu être réalisés et testés. Cela est d'autant plus remarquable que, dans ces structures périodiques, la cellule élémentaire doit être de l'ordre du dixième de la longueur d'onde.

Ce qui signifie qu'à 1  $\mu\text{m}$ , la cellule a une dimension typique de 100 nm, avec des détails de l'ordre de la dizaine de nanomètres. On est donc dans le domaine des nanotechnologies et les laboratoires susceptibles de réaliser ce type de structure sont peu nombreux, aussi bien en Europe qu'aux États-Unis ou en Asie.

En micro-ondes, l'enjeu est différent. Les applications en télécommunications et en compatibilité électromagnétique dominant, d'où des démarches différentes et une créativité plus grande, car les contraintes technologiques sont moins fortes. Les études se sont focalisées très vite sur le développement d'applications dans le domaine des filtres, des déphaseurs et des antennes avec une comparaison systématique aux technologies existantes.

### III. MATERIAUX A INDICE NEGATIFS

Les métamatériaux sont des matériaux artificiels qui n'existent pas dans la nature et qui sont synthétisés par enrobage spécifique.

Jusqu'à ce moment, il n'existe pas de matériaux possédant à la fois une permittivité et une perméabilité négative. Les propriétés électriques et magnétiques des métamatériaux sont déterminées par deux paramètres importants du matériau, la permittivité diélectrique qu'on peut obtenir par un réseau de fils métalliques et la perméabilité magnétique qui peut être obtenue par des résonateurs en anneau fendu.

La perméabilité «  $\mu$  » et la permittivité «  $\varepsilon$  » permettent de déterminer la réponse du matériau à un champ électromagnétique. En règle générale,  $\varepsilon$  et  $\mu$  sont à la fois positifs dans des matériaux ordinaires. Toutefois, pour certaines structures, qui sont appelés matériaux gauche (LHM), la permittivité effective,  $\varepsilon_{\text{eff}}$  et la perméabilité,  $\mu_{\text{eff}}$  possèdent des valeurs négatives. Dans tels matériaux l'indice de réfraction,  $n$ , est inférieur à zéro, et on peut l'obtenir par un assemblage de réseau de fils métalliques et résonateurs en anneau fendu [5].

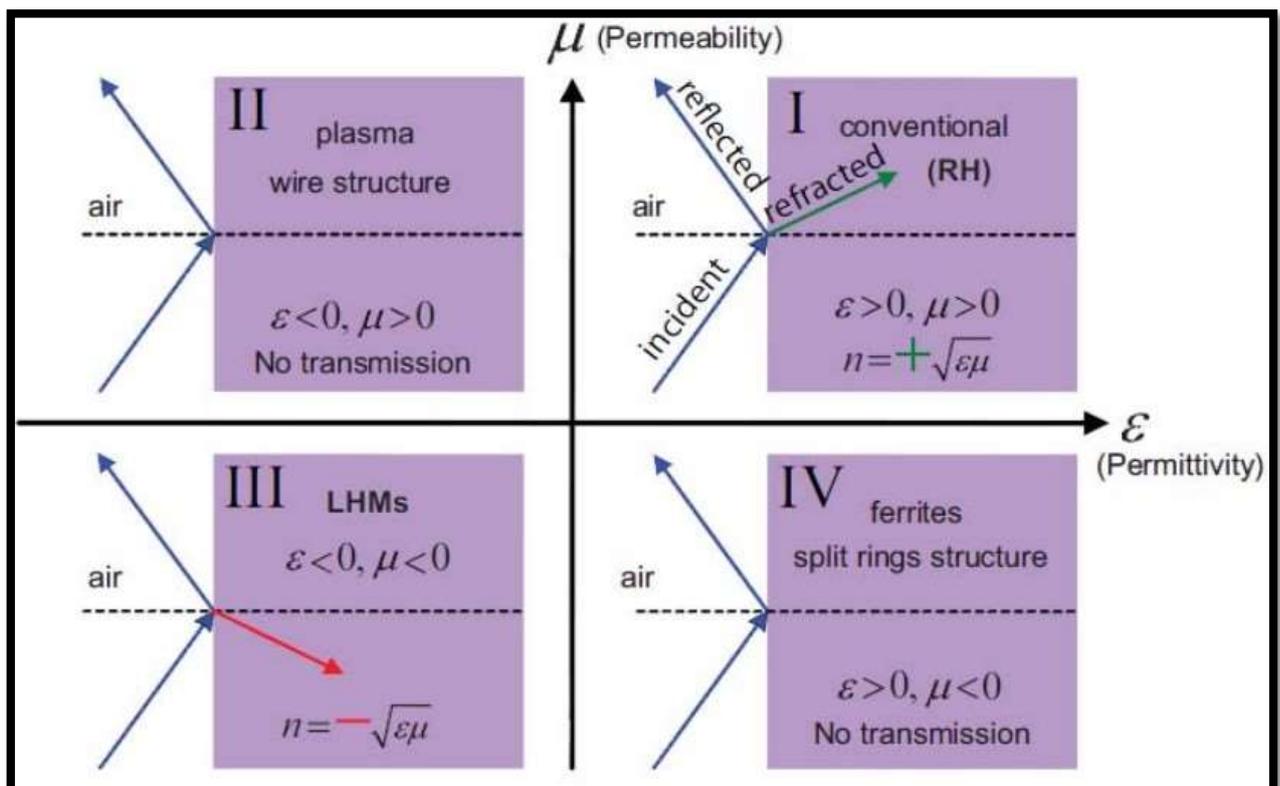


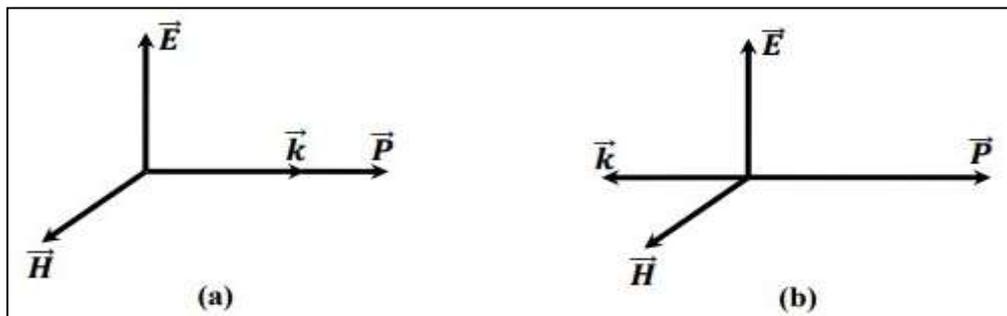
Figure I.1. – Diagramme  $\varepsilon - \mu$  [5].

### III.1. Approche de Veselago

Une analyse de la propagation d'une onde électromagnétique dans un milieu possédant simultanément une permittivité ( $\epsilon_{eff}$ ) et une perméabilité ( $\mu_{eff}$ ) effectives négatives a été faite à l'origine par le physicien russe Victor Veselago.

Dans son article paru à l'origine en U.R.S.S en 1967 puis traduit en anglais en 1968, il évoque la possibilité de la propagation d'une onde électromagnétique dans un milieu linéaire, homogène et isotrope (l, h, i) et possédant simultanément une permittivité et une perméabilité négatives.

Ces matériaux ont été qualifiés comme Main Gauche (MG) ou (Left-Handed Materials LHM) par la suite. Ce terme vient du fait que le champ électrique, le champ magnétique  $H$  et le vecteur d'onde  $k$  forment un trièdre indirecte caractérisé par la règle de la main gauche, le trièdre indirect peut être facilement vérifié en écrivant les équations de Maxwell pour une onde plane.



**Figure I.2.** Représentation d'une onde plane pour un milieu (a) « main droite » (b) « main gauche » [6].

$$\vec{k} \times \vec{E} = \omega \mu \vec{H} \quad (\text{I.1})$$

$$\vec{k} \times \vec{H} = -\omega \epsilon \vec{E} \quad (\text{I.2})$$

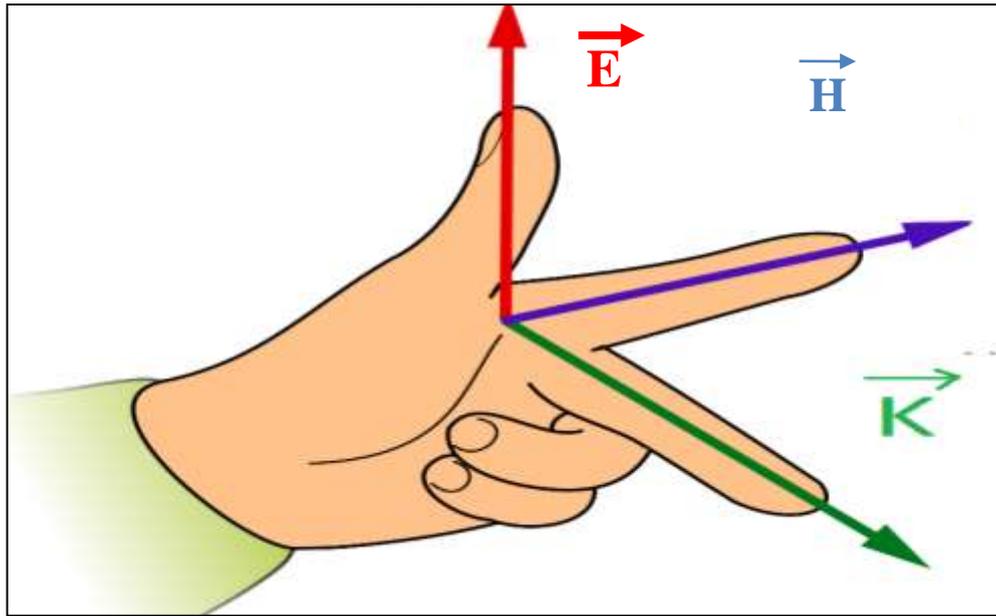
Veselago avait ainsi mis en avant les propriétés physiques d'un milieu « main gauche » :

Le vecteur de Poynting,  $P$  donné par l'égalité :

$$\vec{P} = 1/2 (\vec{E} \times \vec{H}^*) \quad (\text{I.3})$$

Le vecteur de Poynting se trouve opposé à la direction du vecteur d'onde  $\vec{k}$ . La vitesse de phase  $v\varphi$  et la vitesse de groupe  $v_g$  d'une onde électromagnétique sont dans des directions opposées.

Ces différentes propriétés donnent naissance à des phénomènes physiques nouveaux, décrits par Veselago. Il avait prédit que ce type de milieu posséderait des propriétés uniques (optiques et électromagnétiques) [6].



**Figure I.3.** Trièdre indirect caractérisé par la règle de la main gauche [5].

Veselago avait aussi insisté sur le fait que la permittivité et la perméabilité du matériau main gauche devaient dépendre de la fréquence du champ électromagnétique, sinon la densité d'énergie électromagnétique donnée par :

$$W = \frac{1}{2\pi} \int \left[ \frac{\partial(\omega\varepsilon)}{\partial\omega} |\vec{E}|^2 + \frac{\partial(\omega\mu)}{\partial\omega} |\vec{H}|^2 \right] d\omega \quad (\text{I.4})$$

Serait négative. Dans l'équation (4) la permittivité et la perméabilité sont négatives, ses parties imaginaires sont différentes de zéro dans le matériau main gauche. Ainsi, les pertes d'insertion sont inévitables dans ce type de matériau. Théoriquement, le calcul des pertes est assez difficile et conduit à la conclusion que les matériaux main gauche ne sont pas transparents, mais les expériences ont confirmé que les pertes dans une structure main gauche pouvaient être aussi faibles que dans un matériau conventionnel

### III.2 Permittivité et perméabilité négatives

L'indice de réfraction positif ( $n = n_r + in_i$ ) est le paramètre clé dans l'interaction de la lumière avec la matière. Un matériau avec une partie réelle négative de sa perméabilité et sa permittivité effective simultanément ( $\varepsilon_r < 0$  et  $\mu_r < 0$ ) a toujours une partie réelle négative de son indice de réfraction. Toutefois  $\varepsilon_r < 0$  et  $\mu_r < 0$  est une condition suffisante, mais pas une condition nécessaire. Un matériau peut avoir un

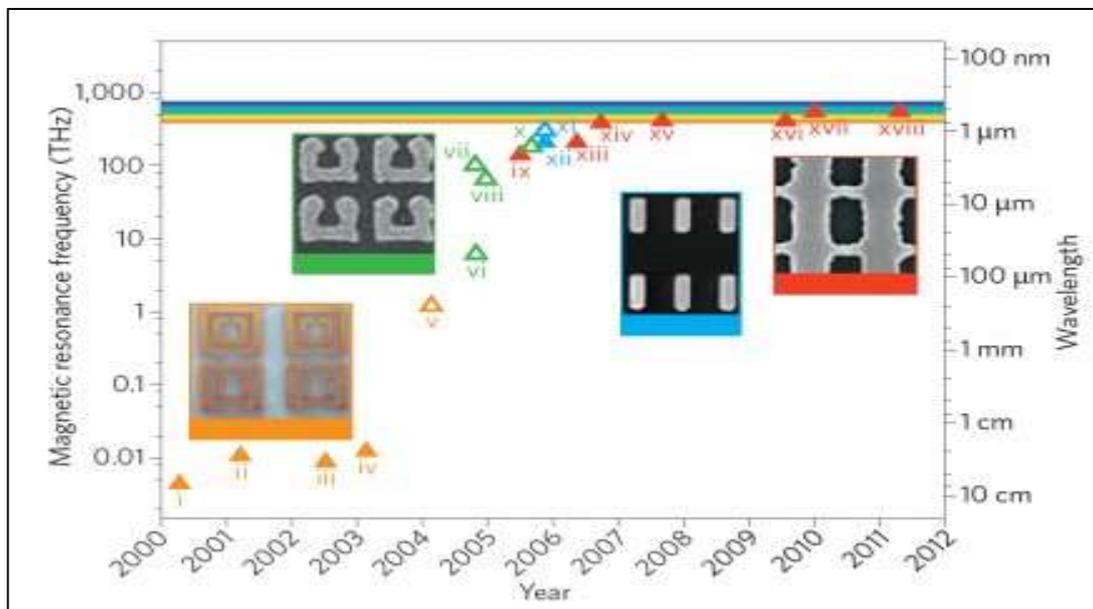
indice de réfraction négatif si sa perméabilité et sa permittivité effectives peuvent satisfaire la condition nécessaire suivante,  $(\epsilon_r \mu_i + \epsilon_i \mu_r) < 0$ .

Ainsi, son indice de réfraction peut être négatif même si la perméabilité seulement (ou permittivité) a une partie réelle négative, à condition que la partie imaginaire de la permittivité (ou perméabilité) est assez grande pour rendre  $(\epsilon_r \mu_i + \epsilon_i \mu_r)$  négatif.

De la discussion ci-dessus il s'ensuit qu'il ya deux types de métamatériaux : matériau à double indice négatif (Double index matériel « DNI ») qui présente à la fois une partie réelle négative de la permittivité et de la perméabilité. En revanche, un matériau à indice négatif unique (Single Negative index Material « SNI ») est un matériau qui a un indice de réfraction négatif avec soit  $\epsilon_r$  ou  $\mu_r$  (mais pas les deux) négative. Dans tous les matériaux optiques SNI rapportés dans la littérature, la partie réelle de la permittivité est négative, alors que, la partie réelle de la perméabilité est positive ( $\epsilon_r > 0$  et  $\mu_r > 0$ ) [7].

### III.2 Perméabilité négative

Veselago avait déjà pointé dans sa publication le fait qu'aucun matériau ne possède naturellement de perméabilité négative à haute fréquence.



**Figure I.4** Evolution des fréquences de fonctionnement des métamatériaux à perméabilité négative (triangles vides) et à indice négatif (triangles pleins) [8].

En 1981 des structures métalliques en forme d'anneau coupé ("split-ring" en anglais) fonctionnent dans le domaine de micro-onde et dont les courants induits donnent naissance à une forte réponse magnétique.

Pendry reprit et améliora ces structures, pour montrer en 1999 qu'elles pouvaient donner naissance à une perméabilité négative dans la gamme micro-onde.

Avec l'émergence des métamatériaux et des moyens technologiques de miniaturisation par lithographie, plusieurs groupes étendirent ces structures de "splitringresonators" (SRR) pour les faire fonctionner jusque dans le proche infrarouge. Le principal inconvénient de ces structures planes est leur anisotropie, mais il existe cependant des moyens de les rendre isotropes [8, 9, 10].

### **III.2.2 Résonateur en Anneau Fendu Complémentaire « RAFC »**

Le Résonateur en Anneau Fendu Complémentaire est un élément, de dimensions très inférieures à la longueur d'onde, dérivé du RAF introduit par Pendry. Le RAF, quand il est illuminé par une onde plane avec une polarisation appropriée, est capable de créer une bande interdite de propagation aux alentours de sa fréquence de résonance sur le signal transmis.

Cette polarisation appropriée est telle que le champ magnétique  $H$  doit être perpendiculaire au plan du RAF, c'est-à-dire que le champ  $H$  doit pénétrer à travers le RAF. Le phénomène coupe-bande observé sur le signal transmis est expliqué par la résonance de l'élément due aux propriétés propres du RAF.

Donc, par rapport à la nature du RAF, si l'on veut modéliser des structures planaires basées sur l'utilisation des lignes micro-rubans et, des Rafs comme plan de masse, nous ne pourrions pas les exciter correctement car le champ  $H$  fait une boucle autour du ruban dans le cas du mode fondamental (figure I.5).

Pour ce type de structure planaire, un nouvel élément a été mis au point appelé Résonateur en Anneau Fendu Complémentaire « RAFC » (figure I.6).

Le RAFC est donc le complémentaire du RAF. Au lieu d'avoir deux anneaux interrompus concentriques en métal gravés sur un support diélectrique dans le cas du RAF, On a dans le cas du RAFC deux fentes en forme d'anneaux interrompus concentriques faites dans le plan conducteur (en cuivre) d'un substrat [11].

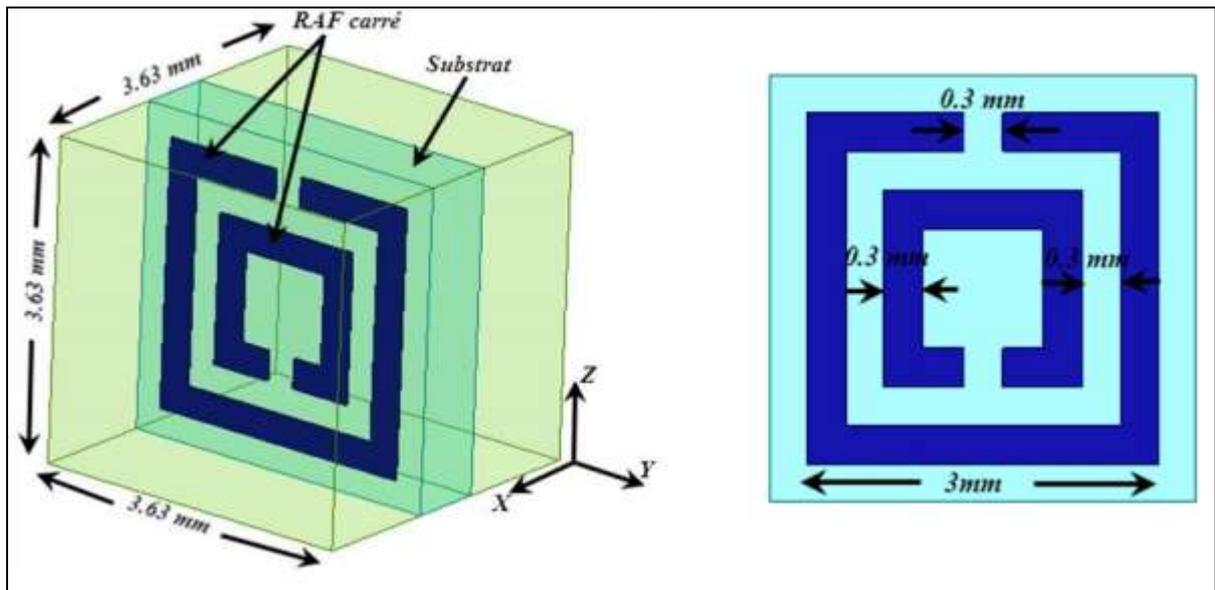


Figure I.5. Représentation et dimensions d'une unité de cellule d'un RAFC carré [11].

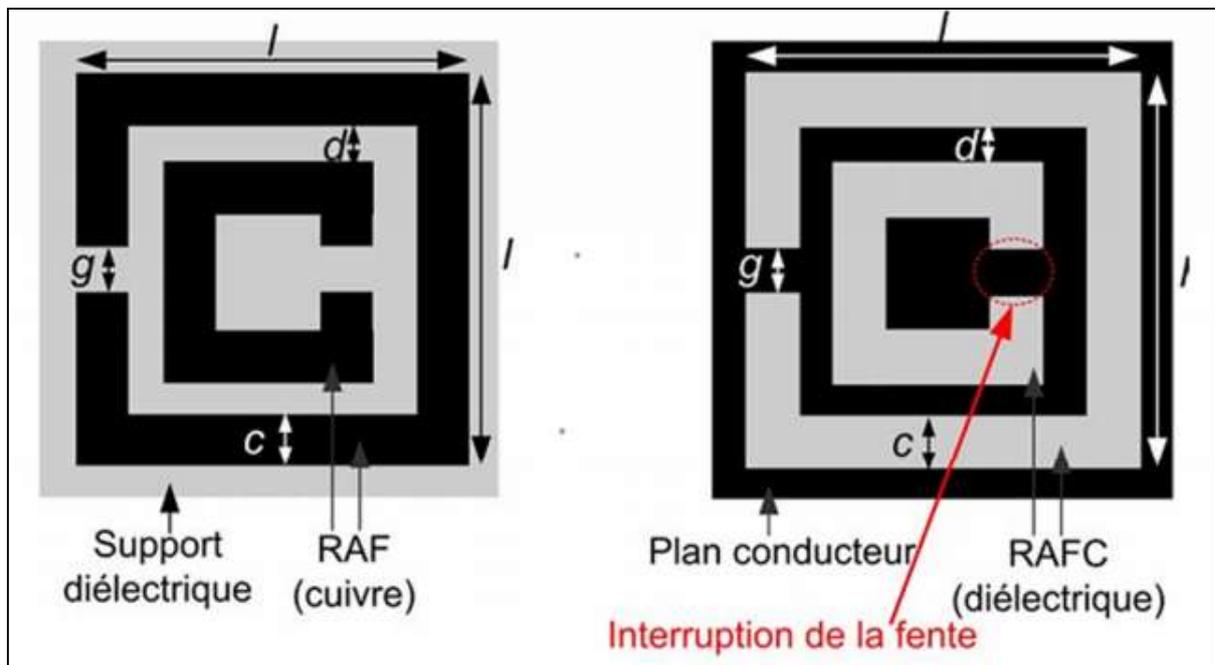
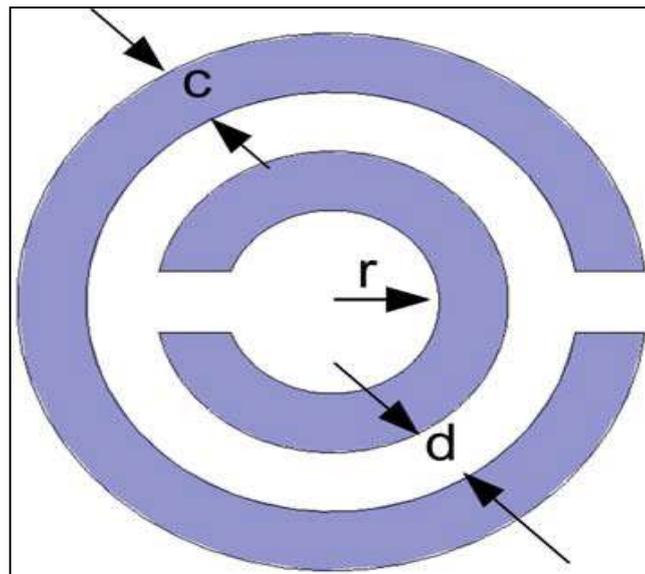


Figure I.6 Comparaison entre géométrie du RAFC et du RAFC [11].

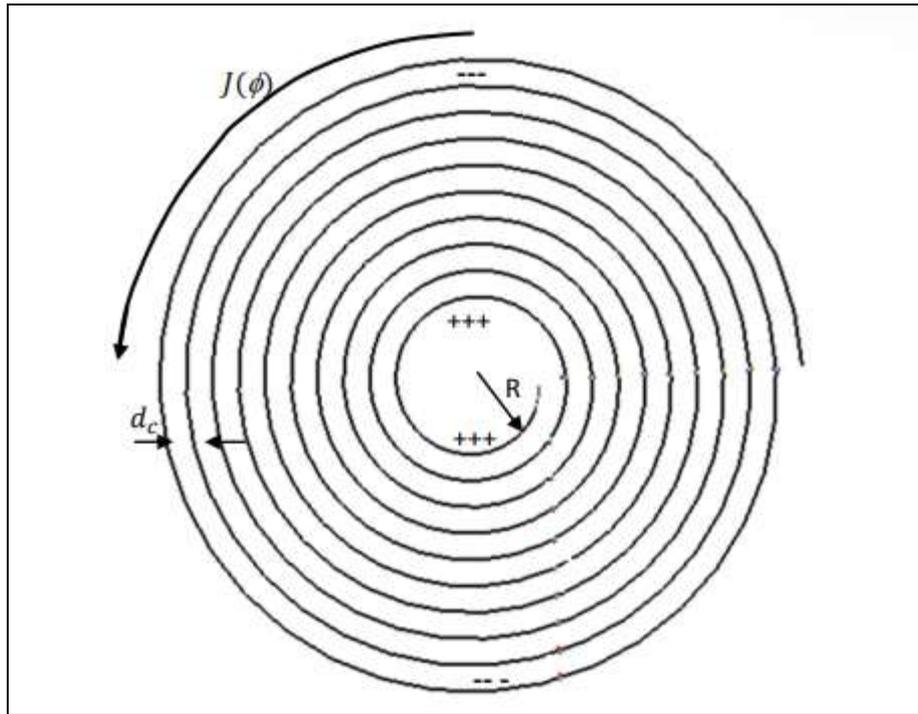
La figure I.7 représente le résonateur en anneau fendu de forme circulaire.



**Figure I.7** RAF avec anneauxcirculaire [11].

En 1999, Pendry introduisit une nouvelle structure permettant de créer des milieux non magnétiques avec une réponse magnétique, la nouvelle structure est le rouleau suisse «suiss-roll» présenté dans la figure I.8. Le rouleau suisse est un ensemble de spirales, chaque spirale est enroulée sur un cylindre de rayon  $R$ . Les spirales conductrices sont isolées de tours et les tours sont espacés par un espacement noté. La structure du rouleau suisse est une structure artificielle métallique qui est caractérisée par une réponse magnétique en absence de composant magnétique.

En effet, lorsqu'on applique un champ magnétique selon l'axe du cylindre, un courant est induit dans le conducteur, par conséquent, une capacité complète est créée d'où le circuit résonne et fait circuler un courant.



**Figure I.8** Rouleau suisse introduit par Pendry [12].

La perméabilité effective d'une telle structure, peut être déterminée en se basant sur les travaux de Pendry[12] :

$$\mu_{eff} = 1 - \frac{F}{1 + \frac{2\sigma i}{\omega R \mu_0} - \frac{d_c c_0^2}{2\pi^2 R^3 (N-1) \omega^2}} \quad (I.5)$$

Avec  $C_0$  c'est la vitesse de la lumière dans le vide et  $\sigma$  la pulsation angulaire est la conductivité de la spirale, l'isolant entre les couches conductrices présente une permittivité  $\epsilon$ .

$F$  représente le taux de remplissage de matériau actif.

Par conséquent, la perméabilité est donnée par la relation suivante :

$$\mu_{eff} = 1 - \frac{F \omega^2}{\omega^2 - \omega_0^2 + i\Gamma \omega} \quad (I.6)$$

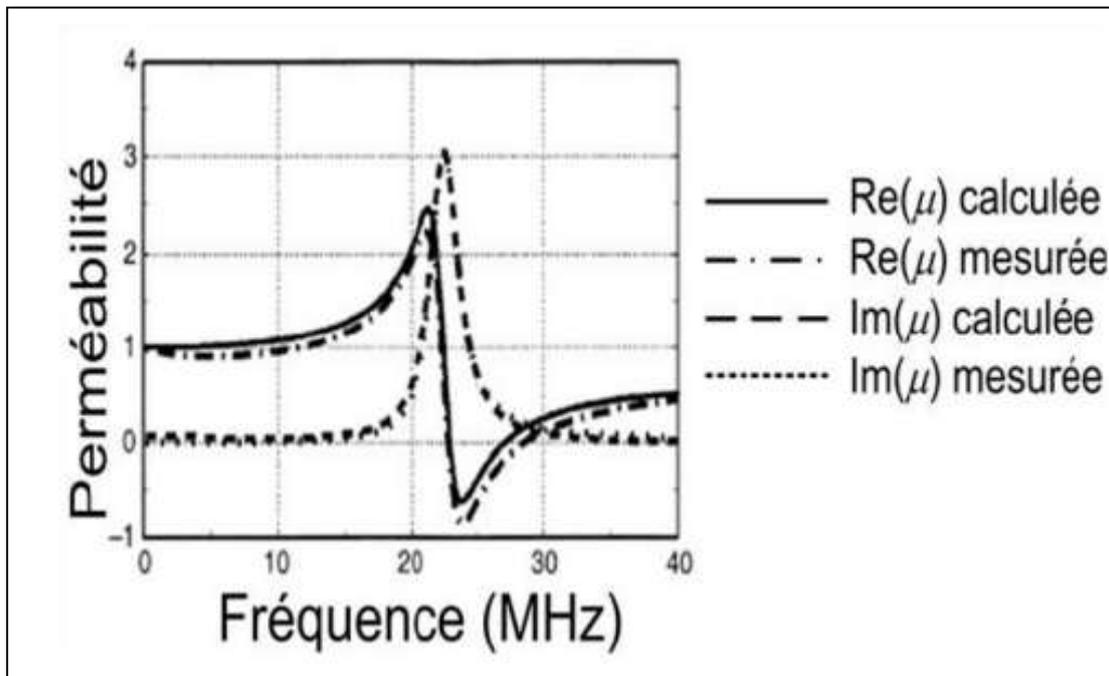
Où la pulsation de résonance est donnée par :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{d_c c_0^2}{2\pi^2 R^3 (N-1)}} \quad (I.7)$$

L'amortissement de la résonance est donné par la relation suivante :

$$\Gamma = \frac{2\sigma}{\omega R \mu_0 (N-1)} \quad (I.8)$$

Les résultats de mesure et de simulation de la perméabilité effective de la structure du rouleau suisse sont illustrés dans la figure I.9.



**Figure I.9** Perméabilité calculée et mesurée pour un rouleau suisse de 35-tours [12].

Le rouleau suisse présente une résonance seulement pour un champ magnétique appliqué selon l'axe du rouleau et présente une partie réelle de la perméabilité négative dans une bande de fréquence autour de  $\sim 23$  GHz.

De plus, lorsque le champ électrique est parallèle aux cylindres, la structure du rouleau présente une absorption pour les ondes transverses incidentes [12].

### III.2.3 Permittivité négative

Plusieurs travaux dans le domaine optique, infrarouge et électromagnétique ont abordé des milieux présentant une permittivité effective négative, une caractéristique qui a été largement inspirée par la physique des plasmas. Pendry et son équipe ont montré qu'un réseau de tiges métalliques orientés parallèlement, de rayon  $r$  et de périodicité  $a$  présente une réponse électromagnétique similaire à celle d'un plasma de faible densité. Ce comportement se traduit par plusieurs facteurs, tels que, la masse et la charge des électrons qui se présentent dans des structures métalliques à très haute fréquence. L'application d'un champ agit comme une force de

rappel sur les charges et qui conduit à la création d'un phénomène d'oscillation obtenu lorsque la fréquence d'excitation est égale à la fréquence plasma définie par[13]:

$$f_p^2 = \frac{nq^2}{4\pi^2 \epsilon_0 m_{eff}} \quad (I.9)$$

Où  $q$  représente la charge élémentaire de chaque électron,  $n$  est la densité des électrons dans le milieu, la masse effective des électrons et est la permittivité du vide. Notons que la permittivité du plasma ne peut être déterminée que pour des valeurs de fréquence en dessous de celle de la fréquence plasma. La dispersion de la permittivité du plasma est donnée par la relation suivante :

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (I.10)$$

Où la pulsation de plasma est donnée par la relation(9) :

$$\omega_p^2 = \frac{ne^2}{\epsilon_0 m_{eff}} \quad (I.11)$$

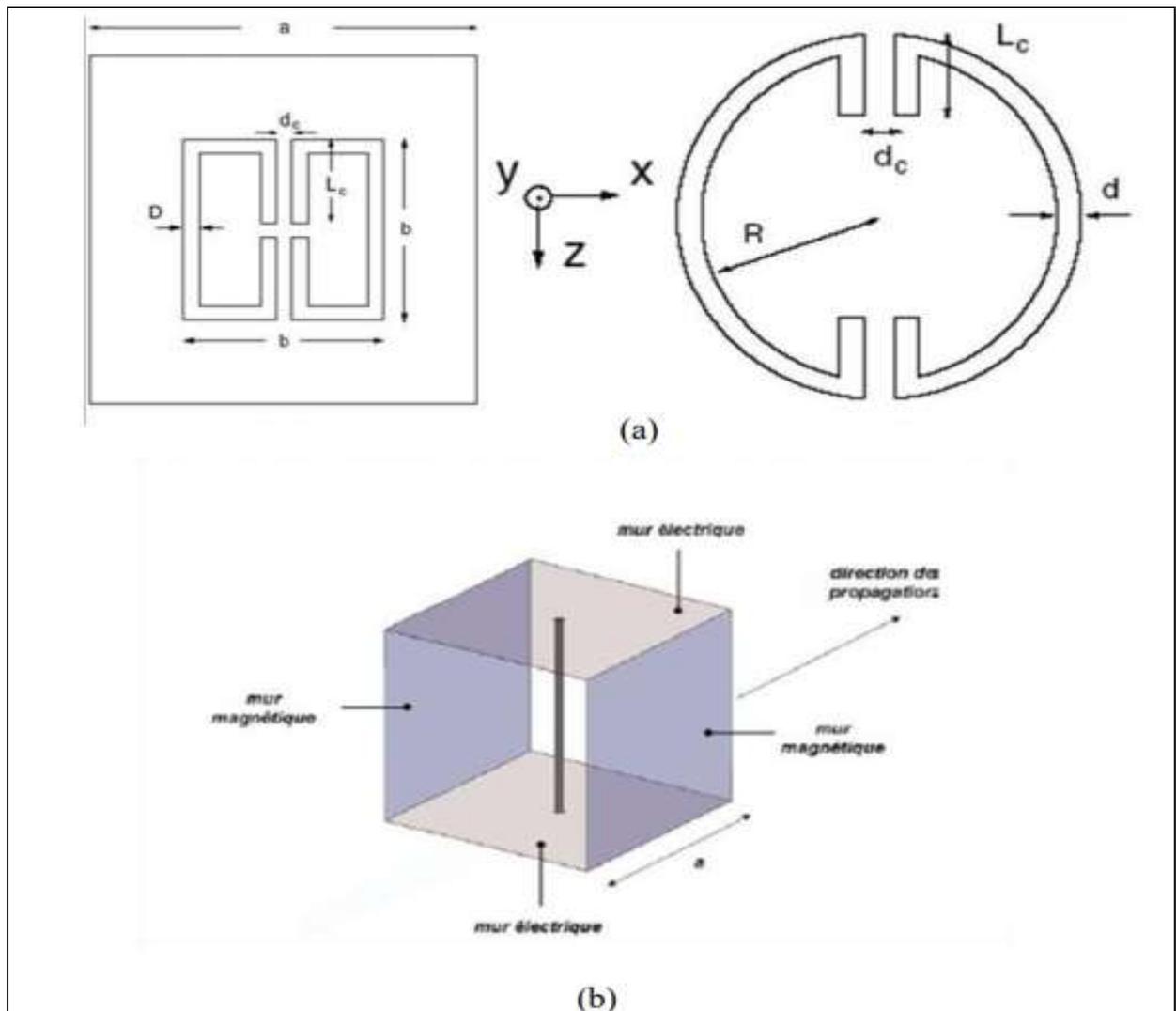
Avec la charge de l'électron et est la masse effective de l'électron.

La figure I.5 présente quelques exemples de structures présentant une permittivité négative.

### III.2.4 Indice de réfraction négatif

Les métamatériaux sont des matériaux artificiels conçus pour avoir des propriétés qui ne peuvent pas être trouvées dans la nature. La recherche primaire dans les métamatériaux étudie des matériaux à indice de réfraction négatif. Les matériaux à indice de réfraction négatif peuvent être utilisés pour concevoir des lentilles à haute résolution « superlentille ».

Dans une autre application, une forme de « l'invisibilité » a été démontrée au moins sur une bande d'ondes étroite avec des matériaux à gradient d'indice. Les applications potentielles des métamatériaux sont diverses et comprennent les applications aérospatiales à distance, la détection et la surveillance des infrastructures, la gestion intelligente de l'énergie solaire, la sécurité publique les radômes à haute fréquence, les lentilles, les antennes à gain élevé, l'amélioration des capteurs à ultrasons, etc [13].



**Figure I.10** Structures présentant une permittivité négative. (a) Résonateur en c proposé par O'Brien. (b) Tige métallique [13].

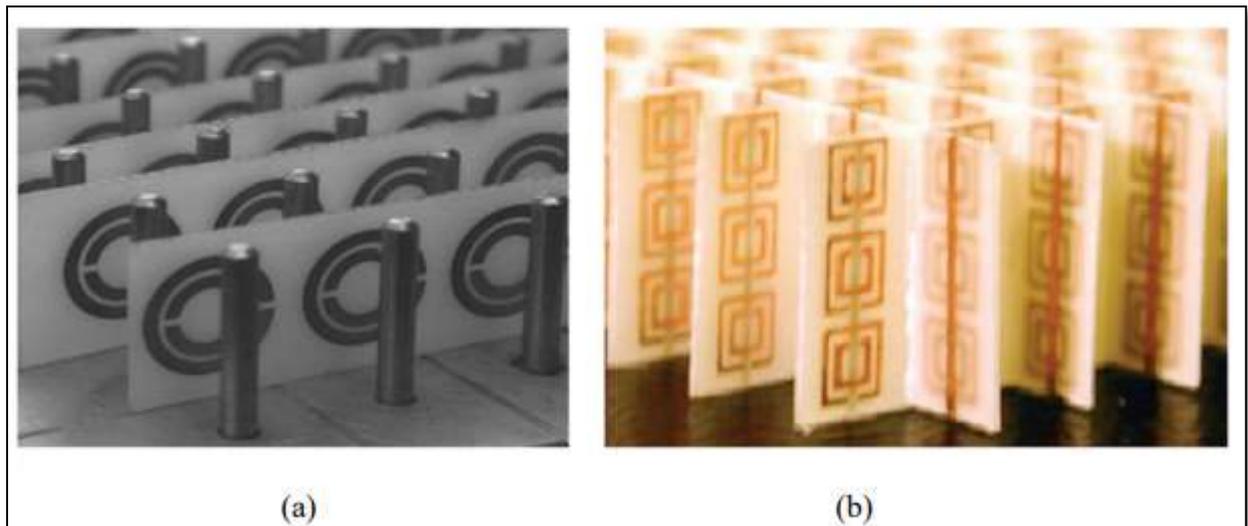
La recherche en métamatériaux est interdisciplinaire et implique des domaines tels que le génie électrique, l'électromagnétisme, la physique des solides, les micro-ondes, optoélectronique, l'optique classique, sciences des matériaux, les semi-conducteurs, les nanosciences.

Le plus grand potentiel de métamatériaux est la possibilité de créer une structure avec un indice de réfraction négatif, puisque cette propriété n'est pas trouvée dans tout matériau non synthétique. Presque tous les matériaux rencontrés dans l'optique, comme le verre ou l'eau, ont des valeurs positives de la permittivité  $\epsilon$  et la perméabilité  $\mu$  à la fois. De nombreux métaux (comme l'argent et l'or) ont une  $\epsilon$  négative aux longueurs d'onde visibles. Un matériau ayant soit (mais pas les deux)  $\mu$  ou  $\epsilon$  négative est opaque au rayonnement électromagnétique. Bien que les

propriétés optiques d'un matériau transparent soient entièrement spécifiées par les paramètres  $\epsilon$  et  $\mu$ , l'indice de réfraction  $n$  peut être déterminé à partir de la relation suivante:  $n = \pm\sqrt{\epsilon\mu}$ .

Dans de telles circonstances, il est nécessaire de prendre la racine carrée négative pour  $n$ .

Les structures qui peuvent présenter un indice de réfraction négatif peuvent être obtenues par la combinaison d'un réseau de fils métalliques et des résonateurs de formes géométriques de différentes comme le montre la figure I.11.



**Figure I.11** Matériaux à indice de réfraction négatif. (a) à base de réseau de fils métalliques et des RAFS circulaires. (b) à base de réseau de fils métalliques et des RAF carrés [13].

## **IV Conclusion**

Dans ce chapitre, nous présentons brièvement les métamatériaux et les structures périodiques. Ce sont des matériaux artificiels avec des structures périodiques avec une permittivité et / ou une perméabilité négative.

Les caractéristiques de base et les applications potentielles de ces structures sont présentées. Dans les chapitres suivants, nous étudierons les antennes utilisées dans le domaine de l'ultra large bande.

## V Références bibliographiques

- [1] [https://perso.enstaparis.fr/~fliss/Sonia\\_Fliss\\_web\\_page/Enseignement/Entries/2018/2/5\\_Master\\_AMSTA03\\_Propagation\\_des\\_ondes\\_dans\\_des\\_milieux\\_periodiques.html#:~:text=Ces%20milieux%20p%C3%A9riodiques%20pr%C3%A9sentent%20des,propager%20dans%20de%20tels%20milieux.Sonia Fliss Patrick Joly](https://perso.enstaparis.fr/~fliss/Sonia_Fliss_web_page/Enseignement/Entries/2018/2/5_Master_AMSTA03_Propagation_des_ondes_dans_des_milieux_periodiques.html#:~:text=Ces%20milieux%20p%C3%A9riodiques%20pr%C3%A9sentent%20des,propager%20dans%20de%20tels%20milieux.Sonia%20Fliss%20Patrick%20Joly)
- [2] R. A. Shelby, D. R. Smith, S. C. Nemat-Nasser and S. Schultz, “Microwave transmission through a two-dimensional, isotropic, left-handed meta-material”, *Applied Physics Letters*, 82(15), 2535-2537, 2001.
- [3] V.G.Veselago, « The Electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$  », *Soviet Physics Uspekhi*, Vol. 10, No. 4, janvier-février 1968.
- [4] NACER Abdelghani, ‘Etude de structures a base de métamatériaux pour applications aux circuits micro-ondes et antennes’ : Cas du résonateur en anneau fendu Thèse de doctorat université de Tlemcen 2018.
- [5] J.B. Pendry, A.J. Holden, W.J. Stewart, and I. Youngs. “Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures”. *Physical Review Letters*, 76(25) :4773–4776, 1996
- [6] M. N. Legenkiy and A. Y. Butrym, "Method of mode matching in time domain", *Progress in Electromagnetics Research*, pp. 257–283, 2010.
- [7] C. M. Soukoulis and M. Wegener, “Past achievements and future challenges in the development of three-dimensional photonic metamaterials,” *Nat Photon*, vol. advance online publication, July 2011.
- [8] S. Linden, C. Enkrich, M. Wegener, J. Zhou, T. Koschny, and C. Soukoulis, “Magnetic response of metamaterials at 100 terahertz,” *Science*, vol. 306, no. 5700, p. 1351, 2004.
- [9] C. Enkrich, M. Wegener, S. Linden, S. Burger, L. Zschiedrich, F. Schmidt, J. Zhou, T. Koschny, and C. Soukoulis, “Magnetic metamaterials at telecommunication and visible frequencies,” *Physical review letters*, vol. 95, no. 20, p. 203901, 2005.
- [10] S. Zhang, W. Fan, B. Minhas, A. Frauenglass, K. Malloy, and S. Brueck, “Midinfrared resonant magnetic nanostructures exhibiting a negative permeability,” *Physical review letters*, vol. 94, no. 3, p. 37402, 2005.

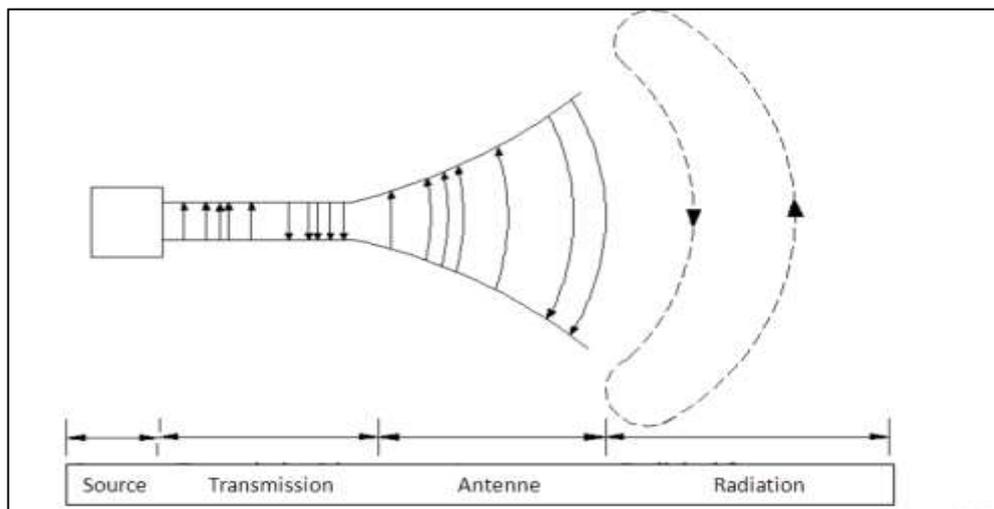
- [11] L.Thourel, “Calcul et conception des dispositifs en ondes centimétriques et millimétriques”, vol.2 - Les Antennes, Cepadues, 1990.
- [12] . J. B. Pendry, D. J. Robbins, and W. J. Stewart. “Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena”. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 47(11) :2075–2084, 1999.
- [13] Z. Jiangfeng, K. Thomas, and C. M. Soukoulis. “Magnetic and electric excitations in split ring resonators”. EM. Express, Vol. 15, No. 26, pp. 17881-17890, 2007.

## I. INTRODUCTION

L'antenne joue deux rôles mutuels: la transmission et la réception. C'est donc toujours le premier de la chaîne de communication sans fil. Il existe de nombreuses techniques différentes pour fabriquer des antennes, et chaque technique à ses propres caractéristiques et sert des applications spécifiques. La technologie ultra-large bande (ULB) est une technologie sans fil qui peut fonctionner à très faible densité de puissance et communiquer à un débit de données. Il comprend l'utilisation de signaux dispersés spectralement. Les bandes de fréquences dont nous parlons souvent vont de 500 MHz à quelques GHz. La technologie ULB a été développée à l'origine pour des applications militaires, puis elle a été étendue à des applications civiles et cela suscite l'intérêt croissant du public dans la science et l'industrie des télécommunications. Dans ce chapitre, nous présenterons la technologie ULB ainsi que les antennes ULB.

## II GENERALITES SUR LES ANTENNES

Les antennes sont des dispositifs permettant de rayonner ou de capter les ondes électromagnétiques, ou, en d'autres termes une structure de transition entre espace libre et onde guidée. L'antenne d'émission transforme le courant modulé d'excitation en ondes électromagnétiques capables de se déplacer dans l'atmosphère. Tandis que l'antenne de réception convertit les ondes électromagnétiques reçues en courant susceptible d'être traité par le récepteur [1,2].



**Figure II. 1** Rayonnement d'une antenne [3].

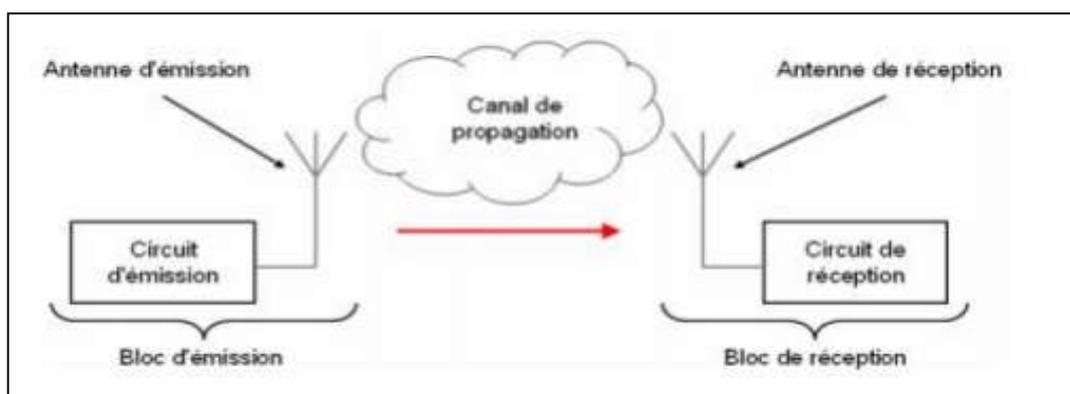
L'antenne peut être utilisée (en particulier dans un système de communication) pour diriger l'énergie du rayonnement dans une direction, et de la réduire ou l'annuler dans d'autres

directions selon les fréquences. Ceci dit, l'antenne n'est plus seulement un outil de transmission, mais également un dispositif de transition. En conséquence la forme d'une antenne est commandée par un besoin particulier. C'est pourquoi, les antennes prennent tantôt les formes d'ouverture, de patch, de réflecteurs, de lentilles, d'ensemble d'éléments, etc. Une bonne conception de l'antenne peut assouplir les exigences du système et améliorer la performance globale du système [4] Le rôle d'une antenne est de convertir l'énergie électrique d'un signal en énergie électromagnétique transportée par une onde électromagnétique (ou inversement). Les antennes sont utilisées sur une large gamme de fréquence (ou de longueur d'onde) pour un grand nombre d'applications différentes [5].

## II.1 Le rôle d'une antenne

L'antenne a plusieurs rôles dont les principaux sont les suivants :

- Permettre une adaptation correcte entre l'équipement radioélectrique et le milieu de propagation.
- Assurer la transmission ou la réception de l'énergie dans des directions privilégiées
- Transmettre le plus fidèlement possible une information [6]. Si nous considérons un système de communication sans fil le plus simple qui soit, celui-ci serait composé d'un bloc d'émission et d'un bloc de réception. Ces deux blocs seraient séparés par un canal de propagation dans lequel le signal émis transite avant d'être reçu comme le montre la figure II.2 :



**Figure II. 2** Schéma de principe d'un système de communication radio [7].

### III LA TECHNOLOGIE ULTRA LARGE BANDE

L'ultra wideband (UWB), ou Ultra Large Bande en français (ULB) est une technique de modulation radio qui est basée sur la transmission d'impulsions de très courte durée, souvent inférieure à la nanoseconde, et sur un large spectre de fréquence. Ainsi, la bande passante peut atteindre de très grandes valeurs. On utilise principalement les méthodes de modulation d'impulsion suivantes : la modulation en position d'impulsions (PPM pour Pulse Position Modulation), la modulation OOK (« On Off Keying », ou « tout ou rien ») et la modulation bi-phase : modulation à deux états de phase, similaire à la BPSK mais en mode impulsif.

On considère généralement que l'UWB doit avoir un rapport largeur de bande sur fréquence centrale d'au moins 20 %, ou une largeur de bande de 250 MHz ou plus. Aux États-Unis, la FCC restreint l'UWB à un rapport largeur de bande sur fréquence centrale de 20 % ou plus, ou des largeurs de bande de 500 MHz ou plus (et non pas 250 MHz). La technologie utilisant une bande très large, les émissions se font à faible ou très faible puissance. En Europe, la technologie UWB est soumise aux règles de l'ETSI (European Telecommunications Standards Institute) qui définit notamment les niveaux maximum de puissance d'émission (plus exactement la densité spectrale maximale d'émission) autorisés suivant la plage de fréquence.

Le gain de codage de l'UWB, défini comme étant le rapport de la largeur de bande occupée sur la largeur de bande de la modulation, est similaire à celui de l'étalement de spectre. Cependant, l'UWB ne peut bénéficier d'un gain de codage que pendant la transmission. La réception de l'UWB est généralement basée sur une corrélation temporelle des impulsions, et les améliorations à la réception du gain de codage possibles avec les systèmes à étalement de spectre ne sont généralement pas atteintes en pratique.

Un signal est dit ultra large bande si :

Sa bande passante est au minimum de 500 MHz (à -10 dB) et sa bande passante relative est supérieure à 0.2: [1]

$$BP_{\text{relative}} = 2 \cdot \frac{f_h - f_l}{f_h + f_l} > 0.2 \quad (\text{II.1})$$

La plupart des concepteurs de systèmes ULB adoptent une autre définition, à savoir de bande passante à -10 dB supérieure à 1,5 GHz (ou une bande passante fractionnelle supérieure à 0.25 par rapport à la fréquence centrale du système). Un exemple pratique est un système radio centré à 2 GHz, de bande passante, à -10 dB, de 1.6 GHz [1]. Depuis février 2002, la FCC a attribué le spectre 3,1-10,6 GHz à ULB sans licence.

### III.1 Réglementation de l'ULB dans le monde

Les systèmes ULB opèrent sur une largeur de bande très grande (quelques GHz). Cette grande largeur de bande coexiste avec d'autres utilisateurs et d'autres systèmes de communications. Bien que la puissance d'émission de ces signaux soit très faible, l'ULB doit tout de même respecter la réglementation. De plus l'une des principales particularités de l'ULB est l'absence de licence pour accéder à la bande ULB, ce qui permet de produire et d'accéder au contenu librement et à moindre coût. Néanmoins les réglementations prises autour des signaux ULB varient d'une zone géographique à une autre.

### III.2 Techniques de transmission pour l'ULB (standardisation)

L'Institut des ingénieurs électriciens et électroniciens (IEEE) contribue à la standardisation des standards tels que le Wifi et Firewire (Produits électroniques pour les masses). En 2002, aux États-Unis fait partie de la norme IEEE 802.15.3a et du processus réglementaire. IEEE a créé un groupe de recherche 802.15.3a pour définir un nouveau concept de couche physique, adapté aux applications à haut débit et à courte distance.

### III.3 Différents types d'applications de l'ultra large bande

En février 2002, la FCC a défini trois types d'applications pour l'ULB [7], à savoir Les fréquences de ces applications sont indiquées à la Figure II.3:

- Bande de fréquence <1 GHz: radar GPR et radar «transparent».
- Bande 1,99-10,6 GHz: applications médicales (imagerie).
- Bande 3.1-10.6 GHz: Système de communications sans fil et applications liées à la localisation.
- Bande de fréquences 24 - 77 GHz : applications liées aux véhicules.

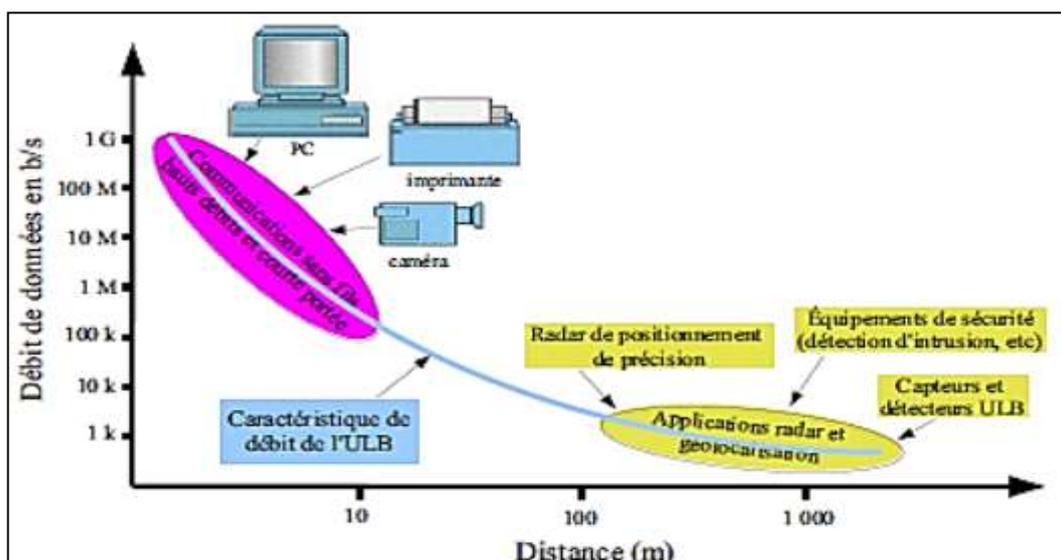


Figure II. 3 Applications de l'ULB en fonction des débits possible et de la distance.



- Débit important pour le WLAN

Inconvénient:

- La possibilité d'existence des interférences est vue comme un inconvénient car l'utilisation des fréquences est fréquemment employée par d'autres Systems.

## IV ANTENNES IMPRIMÉES POUR APPLICATION ULB

### IV.1 Caractéristiques des antennes

Les différents paramètres de caractérisation des antennes sont divisés en deux groupes : Le premier est à propos des propriétés de rayonnement et le deuxième groupe caractérise l'antenne comme un élément de circuit électrique.

#### IV.1.1. Caractéristique électrique

##### IV.1.1.1. Impédance d'entrée

C'est l'impédance du côté de la ligne d'alimentation au niveau de l'antenne, elle est donnée par:

$$Z_{in} = Z_0 \left( \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}} \right) \quad (\text{II. 2})$$

$Z_0$  : impédance caractéristique de la ligne d'alimentation.

$S_{11}$  : le coefficient de réflexion.

##### IV.1.1.2 facteur de qualité

Les pertes liées à l'antenne sont représentées par le facteur de qualité, et un grand facteur implique une largeur de bande étroite et un rendement faible, et ce dernier est donné par la formule suivante :

$$\frac{1}{Q_T} = \frac{1}{Q_{rad}} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_{sw}} \quad (\text{II.3})$$

$Q_T$  : Facteur de qualité total.

$Q_{rad}$  : Facteur de qualité due au rayonnement.

$Q_c$  : Facteur de pertes ohmiques.

$Q_d$  : Facteur de pertes diélectrique.

$Q_{sw}$  : Facteur de pertes par onde de surface

#### IV.1.1.3 Bande d'utilisation

La bande d'utilisation est définie par ce qui suit :

- Le diagramme de rayonnement dépend de la fréquence.
- Son facteur de qualité total  $Q_T$ .
- La variation du gain de l'antenne.
- Le rapport d'onde stationnaire ROS maximal admissible.

Définition de la largeur de bande :

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{Q_t} \quad (\text{II.4})$$

$f_0$ : La fréquence de résonance.

#### IV.1.1.4 Rendement

Le rapport entre l'énergie rayonnée par une antenne et celle obtenue par l'alimentation est ce qu'on appelle le rendement, et ce dernier s'exprime en fonction des facteurs de qualité comme suit :

$$N = \frac{\frac{1}{Q_{rad}}}{\frac{1}{Q_T}} = \frac{Q_T}{Q_{rad}} \quad (\text{II.5})$$

### IV.1.2 Caractéristiques de rayonnement

#### IV.1.2.1. Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement est la représentation de l'intensité de rayonnement en fonction des angles de déviation dans l'espace.

#### IV.1.2.2. Directivité

Le quotient de l'intensité de rayonnement suivant une direction quelconque, et la valeur moyenne des intensités de rayonnement est appelé Directivité.

$$D = \frac{\text{maximum radiation la de Intensité}}{\text{moyenne radiation la de Intensité}} = \frac{u_{\max}}{u_0} \quad (\text{II.6})$$

Quelque soit la direction, une antenne isotrope rayonne uniformément à la même densité de puissance.

### IV.2.3 Gain

On obtient le gain d'une antenne en divisant l'intensité de rayonnement par celle d'une antenne isotrope.

$$G = 4\pi \left( \frac{\text{Intensité de rayonnement}}{\text{Puissance total à l'entrée}} \right) = 4\pi \left( \frac{U(\theta, \varphi)}{p_n} \right) \quad (\text{II.7})$$

### IV.2.4 Résistance de rayonnement

Nous définissons la résistance de rayonnement en un point Q par :

$$R_Q = \frac{2P_r}{I^2_Q} \quad (\text{II.8})$$

$P_r$  : La puissance active rayonnée par une antenne.

$I_Q$  : Le courant en un point Q de cette antenne.

### IV.2.5 Polarisation

La polarisation du champ électromagnétique est donnée par la direction du champ électrique E lors de la propagation.

## IV.3 Etude de l'antenne patch:

### Définition

Une antenne imprimée aussi appelée Patch est constitué d'une ou plusieurs plaques métalliques de fine épaisseur de forme géométrique appropriée (carré, rectangle, disque ou d'autres formes plus complexes) formant l'élément rayonnant, déposée sur une face d'un substrat diélectrique tandis que l'autre face est déposée sur une métallisation complète constituant le plan de masse.

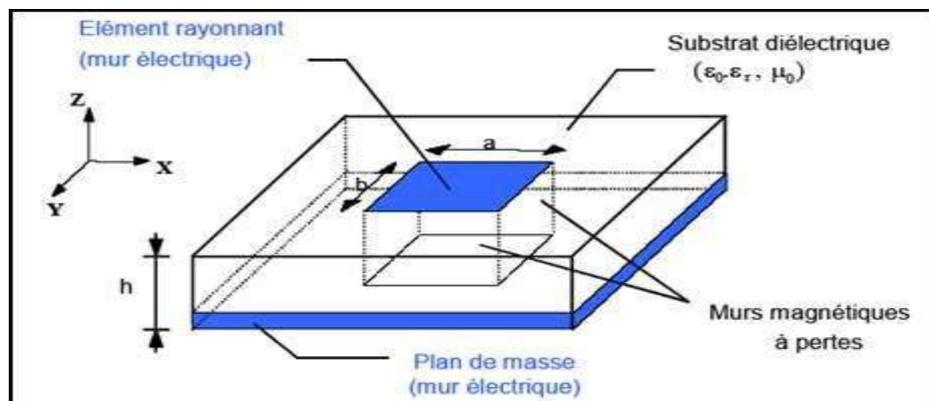


Figure II.5. Structure d'une antenne imprimée.

L'emploi d'antennes `patches' s'est quasiment généralisé dans tous les systèmes de communication mobile. Ces antennes sont légères, peu encombrantes et peu coûteuses. Selon l'utilisation, nous trouvons de différentes formes d'éléments rayonnants, de multiples types de substrats ou encore de plusieurs types d'alimentation. Une antenne à éléments rayonnants imprimés est constituée d'un plan de masse, d'un ou plusieurs couches de substrats diélectriques et d'un ou plusieurs motifs conducteurs rayonnants de forme quelconque. [6]

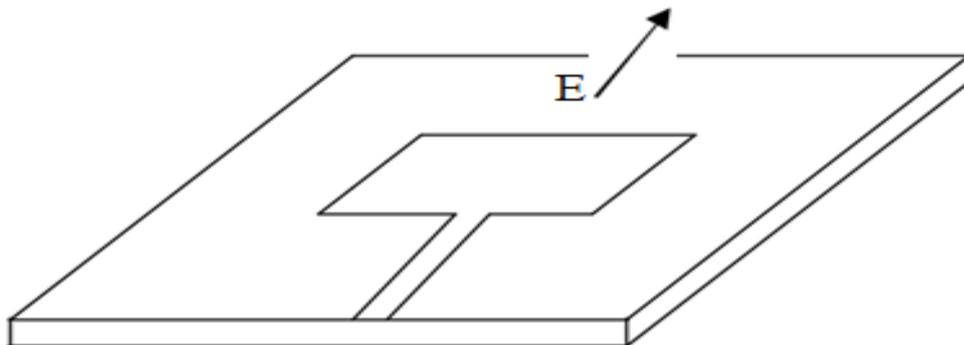
## V.1 Types d'alimentation

L'excitation est un point très important en étudiant des antennes imprimées. En effet, l'énergie est fournie à l'élément rayonnant d'une manière où on peut influencer directement sur son rayonnement et modifier ses performances. L'alimentation de l'antenne dépend de la manière dont l'antenne est intégrée dans le dispositif. Les méthodes d'alimentation des antennes plaques peuvent être classées en deux catégories : Les alimentations par contact (par sonde ou ligne micro ruban) et les alimentations par proximité (couplage électromagnétique par ligne ou fente)[7].

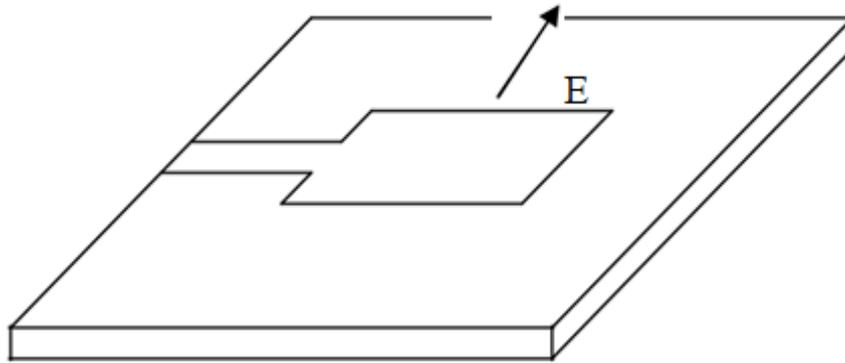
## V.2 Alimentation directe par une ligne micro ruban

Dans ce type d'alimentation, une ligne micro-ruban est reliée directement au bord du patch de micro ruban. La bande de conduite est plus petite dans la largeur par rapport au patch [7]. L'avantage de ce type d'alimentation est qu'elle peut être gravée sur la même face de l'antenne, elle est facile à fabriquer, et simple à adapter à la résonance [8]. C'est l'une des techniques les plus utilisées dans les antennes imprimées, elle a l'inconvénient de générer un rayonnement parasite.

On peut distinguer trois types [8]:



**Figure II.6** Alimentation par ligne micro ruban à travers un bord rayonnant.



**Figure II.7**Alimentation par ligne micro ruban à travers un bord non rayonnant.

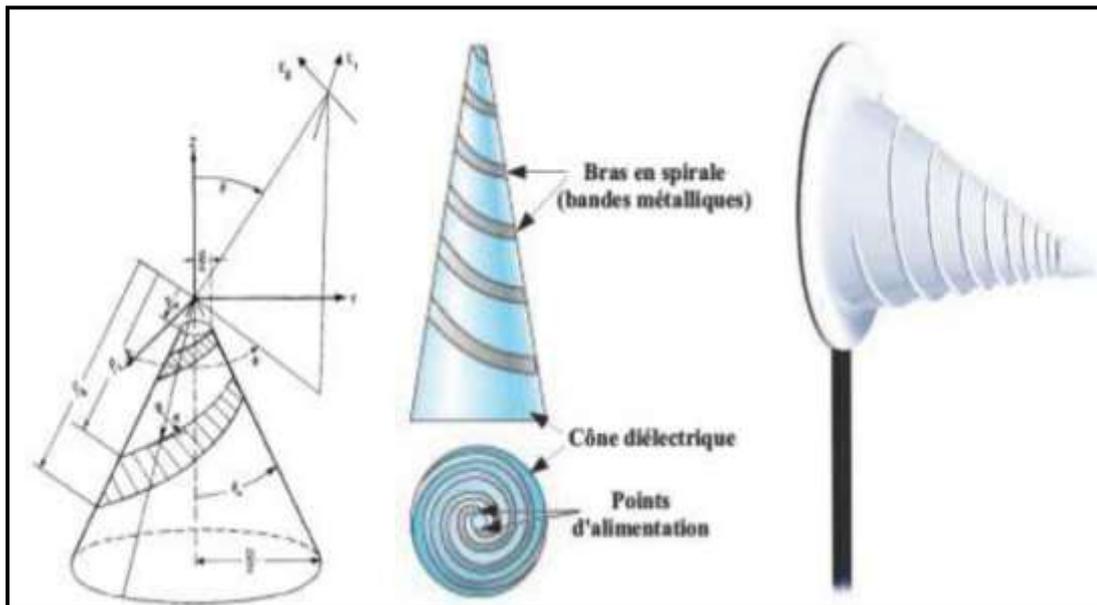
La résistance d'entrée d'une antenne patch rectangulaire conventionnelle dépend toujours de l'alimentation soit avec une sonde coaxiale, ou bien par une ligne microstrip. Pour une bonne adaptation de l'antenne, certaines études ont montré que le contact entre la ligne micro-ruban ou le câble coaxial doit être à une distance d'un tiers sur l'axe de l'antenne [9].

### V.3 Les antennes Ultra Large Bande

Dans cette partie, on va présenter les différents types d'antennes ULB qui sont beaucoup employées. Ces antennes ont été classées selon certaines propriétés: particularités géométriques ou spécificité du diagramme de rayonnement (antenne omnidirectionnelle ou directive). Toutes ces antennes possèdent des caractéristiques d'adaptation sur de très larges bandes de fréquences [11].

### V.4 L'antenne spirale conique

L'antenne spirale conique est la représentation de l'antenne logarithmique en 3D. Le substrat diélectrique qui a une forme conique est celui sur lequel les spirales formant l'antenne sont imprimées. L'antenne est dimensionnée sur une très large bande de fréquence, et le principe de fonctionnement équiangulaire reste le même. La configuration de l'antenne spirale conique ainsi qu'un exemple de réalisation de cette antenne est représenté dans la figure II.8.



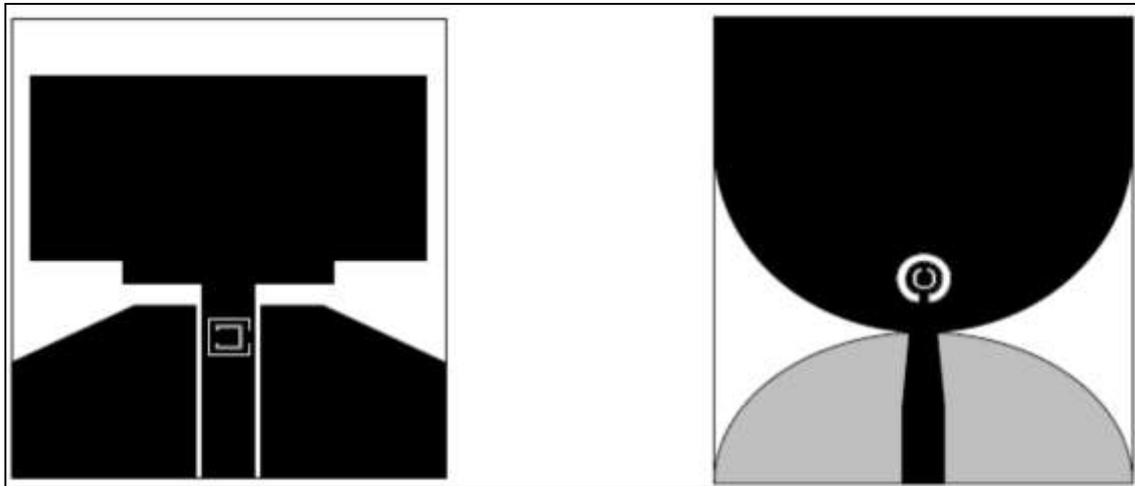
**Figure II.8** Antenne spirale conique. (a) Configuration, (b) Vue de coté et de dessus, (c) exemple de réalisation.

La largeur de bande passante est limitée uniquement par les dimensions des rayons extrêmes de la spirale. De même que pour la structure plane, à chaque fréquence, seule la partie des bras dont la distance par rapport au point d'alimentation équivaut à une longueur d'onde devient une région active. Ainsi le centre de phase de l'antenne change de position pour chaque fréquence. Lorsque la fréquence à rayonner diminue, le centre de phase se déplace fortement le long de l'axe du cône et se rapproche de sa base. On n'obtient donc pas de très bonnes performances en gain et en niveau de lobes secondaires, mais il y a des cas où la largeur de bande de fonctionnement est l'impératif majeur [12].

### V.5 Emploi de structures métamatériaux

Pour arrêter certaines bandes de fréquence de propriétés non ordinaire, on utilise des structures métamatériaux, CSRR (complementary split-ring resonator) ou bien le SRR (split ring resonator). la polarisation de champ électrique est gardée le long de l'axe  $y$  et la polarisation du champ magnétique est gardée le long de l'axe  $z$  quand les ondes électromagnétiques se propagent sur les SRR le long de la direction. Cette propriété est donc la raison pour laquelle les ondes EM sont parfaitement réfléchies par ces structures. Cheolbok Kim et al et J. Kim et al. Ont inséré la

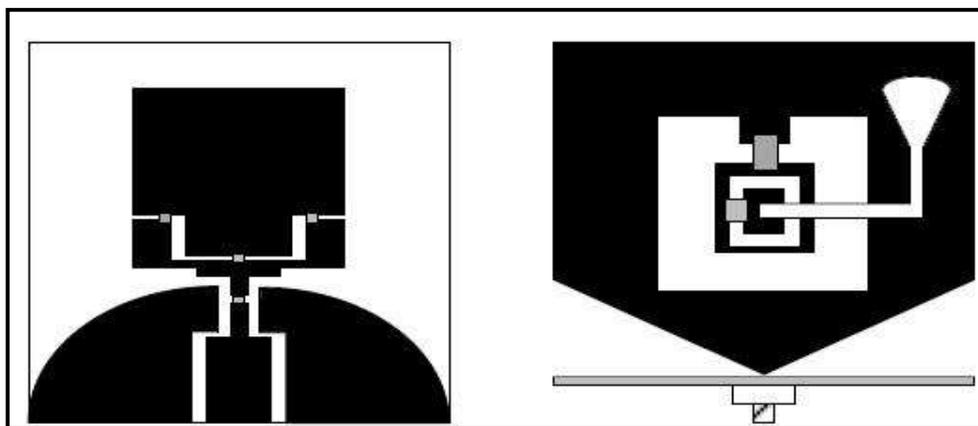
structure SRR sur l'élément rayonnant et la ligne d'alimentation CPW pour obtenir la fonction stop bande dans l'antenne ULB. Cette méthode est présentée sur la figure II.7 [13].



**Figure II.9.** Antennes ULB à fréquences rejetées utilisant la structure SRR.

### V.5.1 Antenne ULB active

Des antennes ULB actives avec un comportement stop band commutable ou réglable sont conçues à l'aide de l'emploi de diodes PIN ou bien varicap comme le montre la figure II.8, cette conception est basée sur les techniques précédentes afin de rejeter une bande de fréquence quel conque. La figure II.1 représente une antenne à bande rejetée commutable en plaçant la diode à l'état on ou off et la fréquence rejetée est commandé par le changement de la valeur de la capacité de la diode varicap. [14].



**Figure II.10**Antennes ULB actives.

### V.5.2 Antenne ULB à plusieurs bandes de fréquences rejetées

Actuellement, il existe plusieurs services sans fil, WLAN (2.4-5.8 GHz), WiMAX (3.3-3.7 GHz), la bande C (3.7-4.2 GHz), HIPERLAN (5.1-5.3 GHz). Par conséquent, les antennes ULB doivent également stopper une large bande ou des bandes multiples pour éviter d'interférer avec eux. Les figures II.7 et II.8 montrent des structures d'antennes ULB à multibande rejetées. Wang-Sang Lee et al. ont présenté des antennes ULB à double bandes rejetées en insérant plusieurs fentes sur l'élément rayonnant de plusieurs façons comme représenté sur la figure II.14. La figure II.15(a) a une caractéristique stop bande large bande avec une fonction double bandes rejetées en insérant des fentes sur le patch et la ligne d'alimentation. Dans la figure II.15 (b), la caractéristique à double bandes rejetée est obtenue avec l'insertion d'une fente sur l'élément rayonnant et une fente en forme U près de l'élément rayonnant. D'autres antennes ULB sur les figures II.15 (c), (d) et (e) ont eu la fonction à bande rejetées multiple en employant plusieurs techniques telles que des structures métamatériaux, résonateur à saut d'impédance échelonnée (SIR), filtre stop band de type L et branches L sur l'élément rayonnant [15].

Les antennes ULB doivent également stopper une large bande ou des bandes multiples pour éviter d'interférer avec plusieurs services sans fil, WLAN (2.4-5.8 GHz), WiMAX (3.3-3.7 GHz), la bande C (3.7-4.2 GHz), HIPERLAN (5.1-5.3 GHz). Les figures II.14 et 15 montrent des structures d'antennes ULB à multibande rejetées. Comme représenté sur la figure II.10, des antennes ULB à double bandes rejetées en insérant plusieurs fentes sur l'élément rayonnant de plusieurs façons ont été présentées par Wang-Sang Lee et al. La figure II.11(a) a une caractéristique stop bande large bande avec une fonction double bandes rejetées en insérant des fentes sur le patch et la ligne d'alimentation. L'insertion d'une fente sur l'élément rayonnant et une fente en forme U près de l'élément rayonnant est ce qui nous permet d'obtenir la caractéristique à double bandes rejetée représentée dans la figure II.12 (b). D'autres antennes ULB sur les figures II.12 (c), (d) et (e) ont eu la fonction multibande rejetées en employant plusieurs techniques telles que l'emploi de structures métamatériaux résonateur à saut d'impédance échelonnée (SIR), filtre stop band de type L et branches L sur l'élément rayonnant [11].

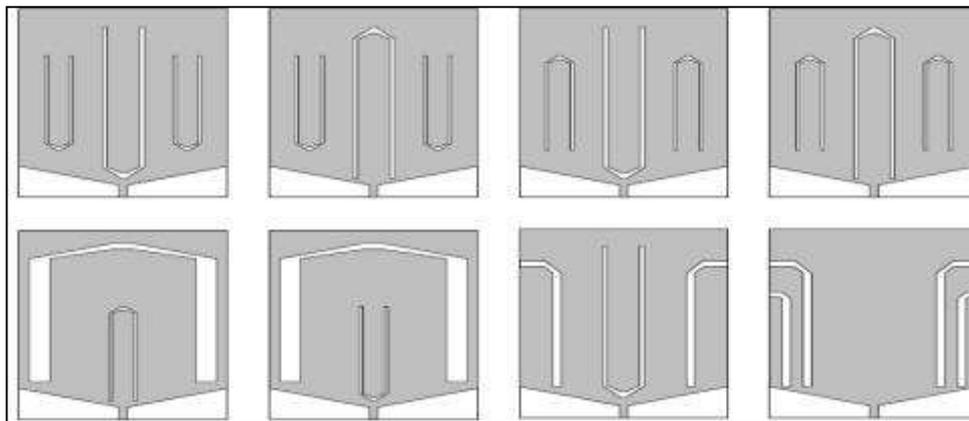


Figure II.11. Antennes ULB à double bandes rejetées avec des fentes.

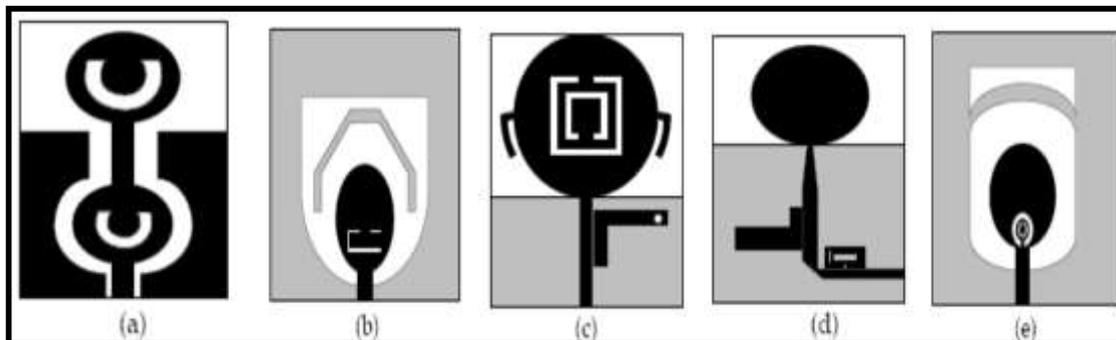


Figure II.12 Antennes ULB à multibande de fréquences rejetées.

## V.I CONCLUSION

Dans ce deuxième chapitre nous avons présenté le concept global de l'ultra large bande, et ceci a été divisé en deux parties. Dans la première partie, nous nous sommes intéressés aux généralités sur l'origine de l'ULB et les réglementations mondiales puis les techniques de transmission et en fin les différents types d'application pour l'ULB. Tandis que dans la deuxième partie, nous avons cité les différentes caractéristiques des antennes imprimées et nous avons terminé par quelques types d'antennes employées en ULB, et puis, celles utilisant des structures métamatériaux. Dans le chapitre suivant, nous allons présenter les résultats de simulations pour ce dernier type d'antennes.

## V.II References bibliographiques

- [1] IEEE standard definitions of terms for antennas .IEEE std 145-1993.IEEE press,1993
- [2] CA.Balanis,Modern Antenna Handbook. John Wiley and Sons,2008.
- [3] Constantine A. Balanis, “Antenna Theory Analysis and Design”, 2005,John Wiley & Sons, INC.
- [4] A. Kamil, Conception d’une antenne patch ultra-large bande (3.1 GHz-10.6 GHz), grade du Maitre ès sciences (M.Sc), Université du Québec, 2011.
- [5] Mme. Asmaa BOULAKAKEZ Mme. Mme. Zineb OGGAD, Dimensionnement et planification des liens de transmission dans les réseaux de téléphonie mobile, Université de Ain Témouchent Belhadj Bouchaib, 2016.
- [6] Md. Ashikur Rahman, Moinul Hossain, IbnulSanjid Iqbal, Syed Sobhan, ” Design and Performance Analysis of A Dual-band Microstrip Patch Antenna for Mobile WiMAX, WLAN, Wi-Fi and Bluetooth Applications”, 3rd international conference on informatics, electronics & vision 2014.
- [7] MADOUN AMINA Etude et simulation d’un antenne SIW, Universite de Saida -- Dr Moulay Tahar, 2017 .
- [8] L. Bennett G.F. Ross, "Time domain electromagnetics and its applications", Proceedings of the IEEE, Vol. 66, issue 3, pp. 299-318, March 1978
- [9] L. Bennett G.F. Ross, "Time domain electromagnetics and its applications", Proceedings of the IEEE, Vol. 66, issue 3, pp. 299-318, March 1978.
- [10] **Yazid Hmeydi** réalisation et mise en point d’un système de brouillage GSM 900 – 1800
- [11]Chouti LeilaContribution à l'étude d'antennes imprimées rectangulaires double bande et multi bandes tenant compte de l'effet de couplage, UNIVERSITE MENTOURI-CONSTANTINE , 2009.
- [12]A. K. Bhattacharyya , "Long rectangular patch antenna with a single feed ," IEEE Transactions on Antennas and Propagations, Vol. 38 , N°. 7, pp. 987-993, July 1990.
- [8]C. A. Balanis, "Antenna theory analysis and design," 2<sup>eme</sup> edition John Wiley and Sons, 1997.
- [13]D. M. Pozar, and S. M. Voda , " A rigorous analysis of a microstripline fed patch antenna," IEEE Transactions on Antennas and Propagations, Vol. AP-35, N°. 12, pp. 1343-1350, December 1987.
- [14] Chouti LeilaContribution à l'étude d'antennes imprimées rectangulaires double bande et multi bandes tenant compte de l'effet de couplage, UNIVERSITE MENTOURI-CONSTANTINE, 2009.

[15] OUKEBDANE Mohamed et BELKACEM Mohamed , PFE Master université de Tlemcen , 2017 .Etude des antennes ULB à bande de rejection en utilisant le résonateur en anneau fendu et son complémentaire

[16] ZITOUNI Ahmed, “Etude et conceptiond’antennes ULB standards et à bandes Rejetées ”. Thèse de doctorat télécommunication, Université de Abou bakr Belkaid-Tlemcen,2014.

### I INTRODUCTION

Avec le développement de la technologie de communication sans fil moderne, les systèmes ULB ont attiré beaucoup d'attention récemment en raison de leurs caractéristiques attrayantes, telles que l'ultra large bande (3.1-10.6GHz), une configuration simple, un faible coût. En tant que partie essentielle du système ULB, les antennes ULB ont été développées largement et rapidement, et de nombreux articles ont été publiés. Dans ce chapitre, on va étudier une antenne ULB (primitive) en utilisant le logiciel de simulation CST Microwave Studio. Nous entamerons par la suite les antennes ULB à bande rejetées (une, deux ou trois bandes rejetées).

### II PRESENTATION DU LOGICIEL DE SIMULATION CST:

#### II.1 Définition

CST Microwave Studio est un logiciel de simulation (en 3D) basée sur la résolution des équations de Maxwell dédiée à la conception, à l'analyse et à l'optimisation des composants et systèmes électromagnétiques (EM)[1].

#### II.2 Etapes de simulation

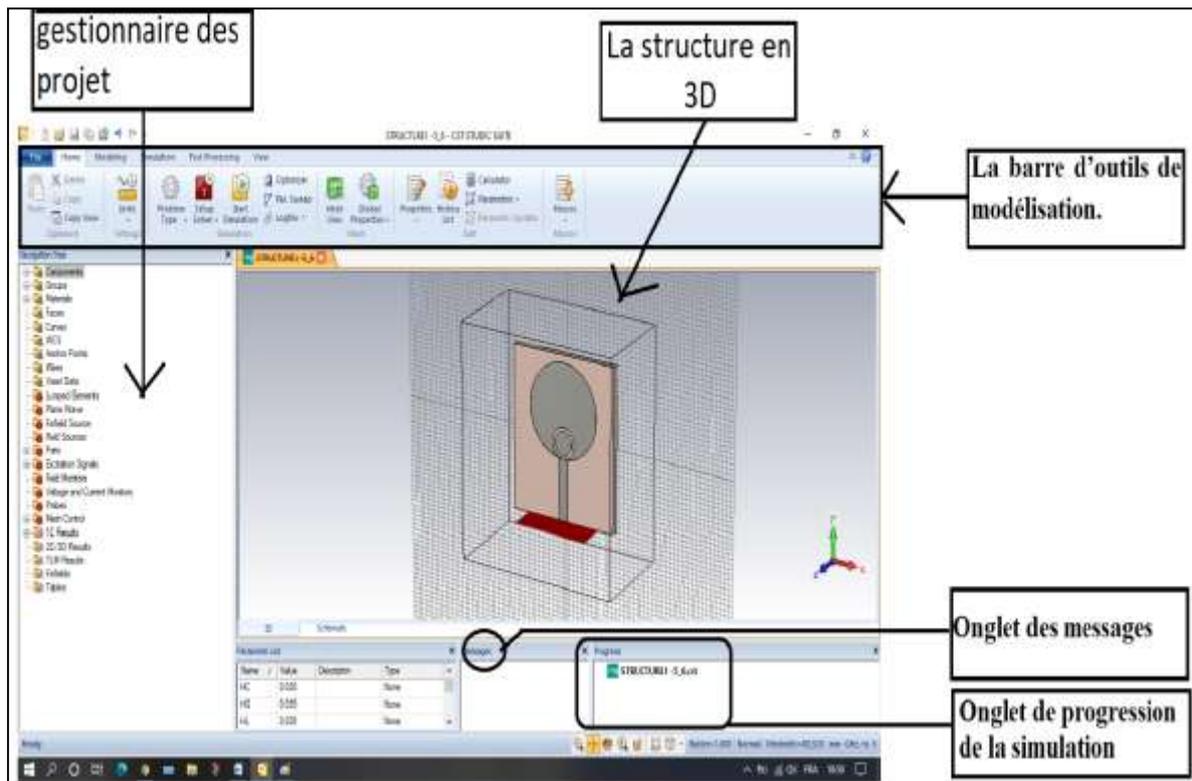
Les étapes nécessaires pour faire une simulation sont décrites ci-dessous:

- Définition des unités.
- Définition des matériaux de base.
- Modélisation de la structure.
- Définition de la gamme de fréquence.
- Définition des ports et des conditions aux limites.
- Début de la simulation. Après avoir la définition de ces paramètres.

#### II.3 Présentation de la fenêtre du logiciel CST

La fenêtre CST est constituée de:

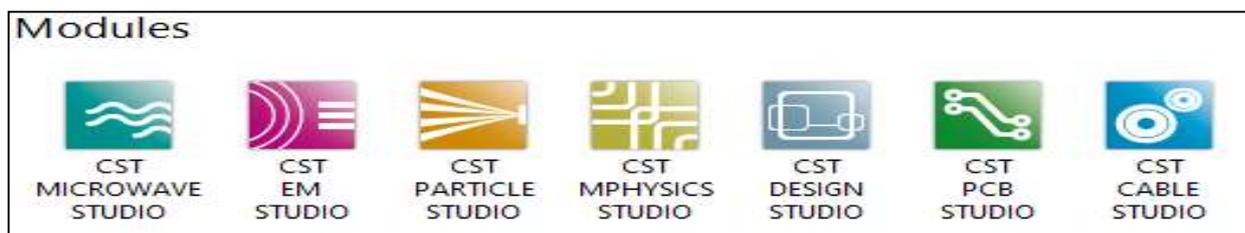
- Gestionnaire de projet : contient une arborescence de conception qui permet de lister les éléments constituant la structures et les différentes étapes de la simulation.
- Gestionnaire de message : permet de voir tout les messages d'erreurs et des avertissements.
- Onglet de progression de simulation : montre le progrès de la simulation [2].



**Figure III. 1:**Interface principale et les différents modules de CST.

### II.3.1 création de projets

CST Microwave Studio utilise des projets pour organiser et stocker les données générées lors de la création, de la simulation et de l'analyse de modèles ou de structures sous CST. Il propose aussi plusieurs modules de simulations, ces modules définissent les dimensions et les conditions aux limites à respecter durant la conception et la simulation des structures (figure III.1).



**Figure III.2 :** Modules de CST.

### II.3.2 création d'une structure

La bibliothèque des modèles CST fournit les outils de Conception de toute structure dans tous les domaines de recherche .Pour créer un projet, on utilise le menu File→New and recent →create a new project. On spécifie le nom du projet. Pour l'enregistrer, On utilise le menu:

File→Save ou File→Save As. Pour ouvrir un projet enregistré précédemment, on utilise la commande : Open dans le menu « File ».

### II.3.3 Déroulement d'un projet

Après le lancement du CST, il faut suivre les étapes suivantes :

#### ❖ Unités

Définir les unités des dimensions, fréquences, temps, etc.

#### ❖ Dessin de la structure

Pour la conception du model 3D de la structure, un certain nombre d'outils de conception géométrique existe en se basant sur des géométries typiques telles que les cubes, les cylindres les sphères. On peut faire l'assemblage, la soustraction et l'intersection de ces formes géométriques à l'aide des opérateurs booléens pour construire des formes plus complexes. De plus, on peut déplacer, faire une rotation et dupliquer les éléments.

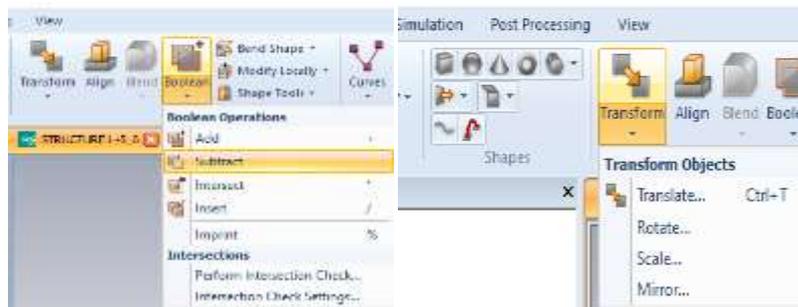


Figure III.3 : Operations booléen et de transformations.

#### ❖ Bande de fréquences de fonctionnement

Pour spécifier la bande de fréquence, on choisit « frequency » dans l'onglet Simulation.

#### ❖ Excitation de la structure

La structure est alimentée par une excitation avec des ondes électromagnétiques. Plusieurs possibilités pour définir un port d'excitations (« waveguide port », «Discrete port », «Plane wave ») sont présentées dans l'onglet Simulation. La figure monte l'alimentation d'une antenne par une excitation de type « waveguide port ».

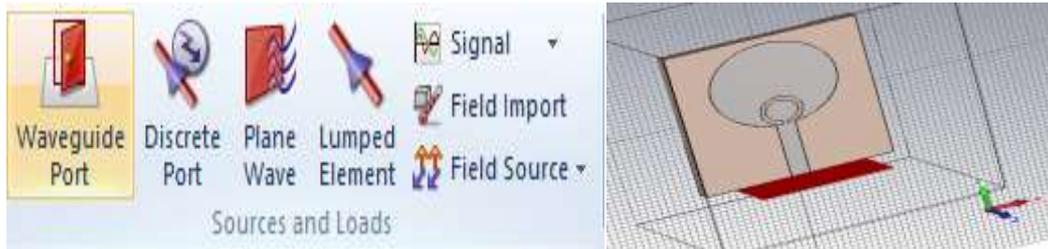


Figure III.4 : Définition de port.

### ❖ Conditions aux limites

Dans l'onglet « simulation », On choisit « boundaries » afin de pouvoir définir les conditions aux limites d'un plan quelconque ou pour tous les plans. Ensuite nous aurons plus qu'à choisir les paramètres qui conviennent à notre structure étudiée, comme « Electric  $E_t=0$  » « Magnetic  $H_t=0$  », « open »

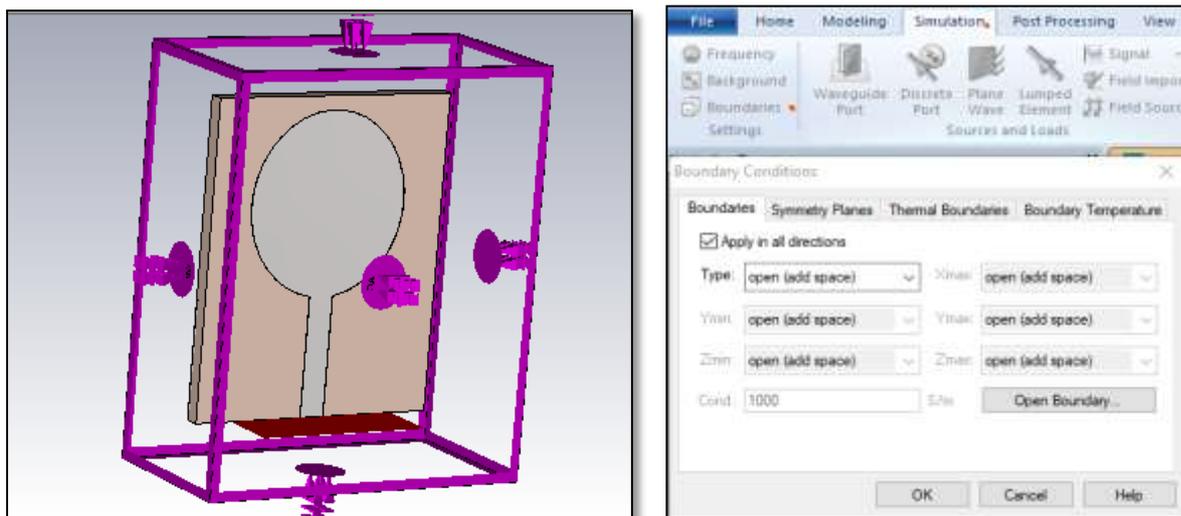
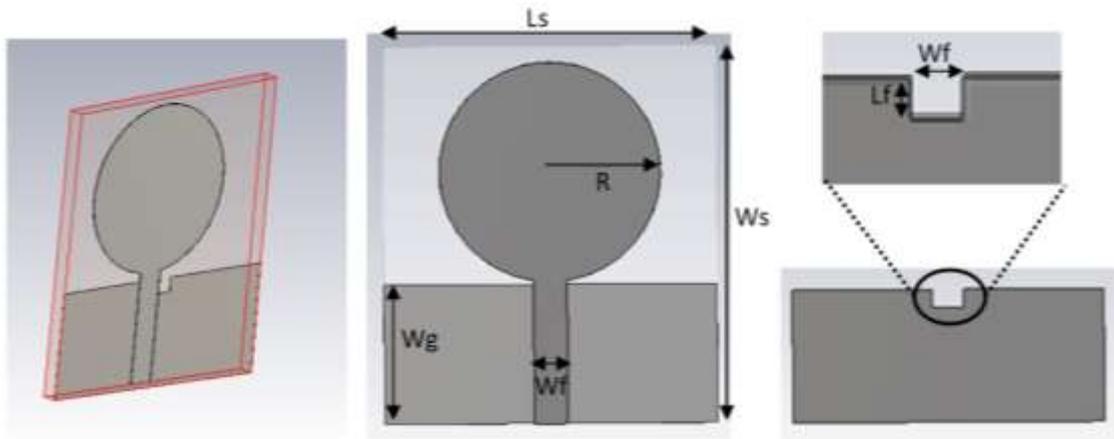


Figure III. 5: Conditions aux limites de l'antenne.

## II.4 Configuration de l'antenne

L'antenne proposée (primitive) est imprimée sur un substrat FR4-époxy,  $L \times W \times H_{mm3}$ , avec une constante diélectrique de 4.4 et une tangente de perte de 0.02. Un patch circulaire de rayon  $R$  et une ligne de transmission d'une largeur  $w_f$ , afin d'avoir une impédance d'entrée de  $50 \Omega$ , sont imprimés sur le plan supérieur du substrat. Sur la face inférieure, un plan de masse partiel est initialement imprimé. Pour une meilleure adaptation et pour améliorer la bande passante, le plan de masse est modifié par gravure d'une fente rectangulaire ( $3.8 \times 3.5$  mm) au centre de la partie supérieure. La figure III.6 montre les étapes de conception de l'antenne primitive.



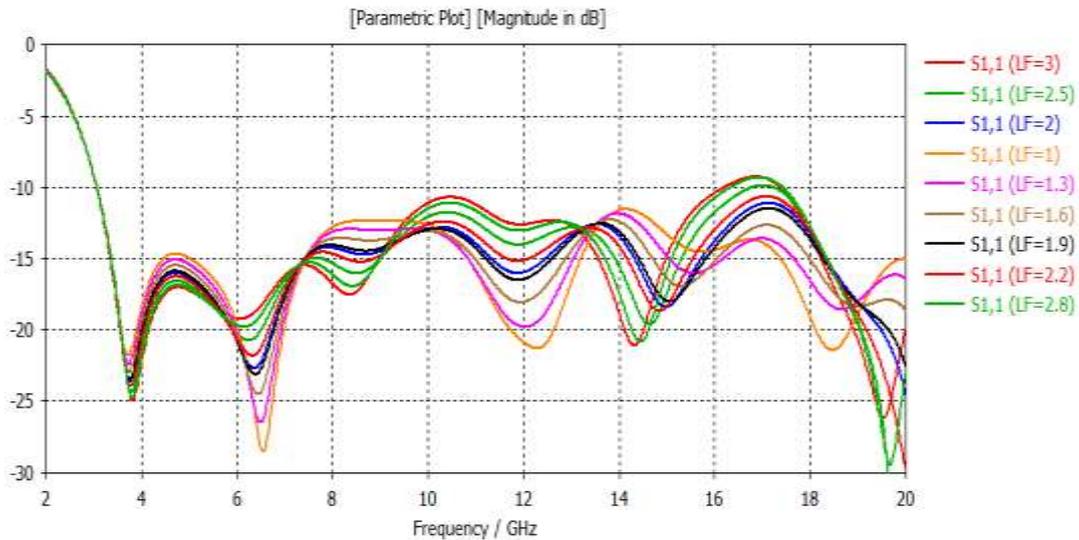
**Figure III. 6:** Etapes de conception de l'antenne.

La structure de l'antenne est conçue avec les dimensions présentées dans le tableau suivant :

PARAMÈTRES	DIMENSIONS (MM)
HC= HG= HL	0.035
HS	1.7
LF	1.6
LG	11.8
LS	32
R	9.3
WL	2.8
WS	28

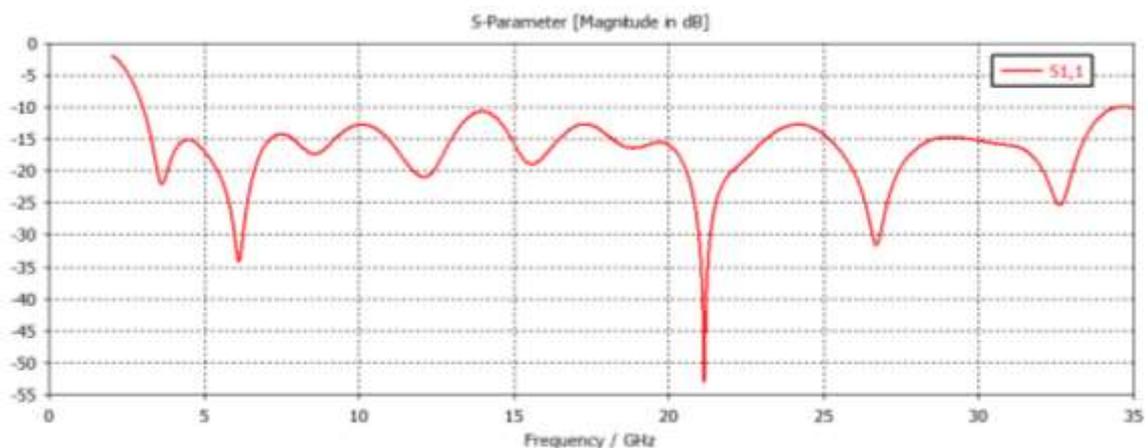
**Tableau III.1 :** Dimensions de l'antenne.

Afin de pouvoir constater l'influence sur l'adaptation de l'antenne, on va faire une variation dans le plan de masse en ajoutant une fente. Nous modifions la longueur de la fente ( $L_f$ ) tout en maintenant les autres paramètres constants. La figure III.7 montre la variation des différents coefficients de réflexion en fonction de ( $L_f$ ).



**Figure III.7:** variation du coefficient de réflexion pour les différentes longueurs de la fente ( $L_f$ ) en fonction de la fréquence.

On peut clairement visualiser que le coefficient de réflexion varie en fonction de la longueur de la fente ( $L_f$ ). Lorsqu'on atteint des valeurs de  $L_f$  supérieures à 1.6 mm, on observe une dégradation de coefficient de réflexion. Par conséquent, la valeur optimale de  $L_f$  pour obtenir un coefficient de réflexion ( $S_{11}$  en dB) meilleur est lorsque  $L_f = 1.6$ . La figure III.8 présente le coefficient de réflexion pour  $L_f = 1.6$ . L'antenne fonctionne dans une bande de fréquence allant de 3.02 GHz à 34.39 GHz, ce qui représente un avantage majeur pour les applications ultra large bande.



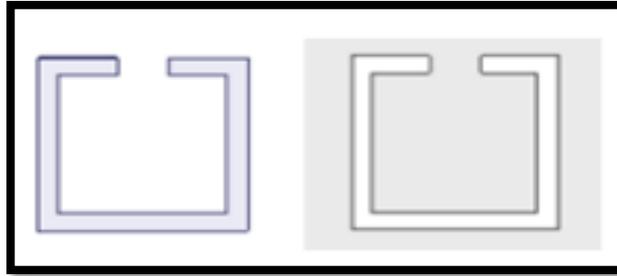
**Figure III.8** Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence pour  $L_f = 1.6$ .

### III ANTENNE ULB A BANDES REJETEES

#### III.1 Analyse des caractéristiques de rejection du RAFC

Les ondes qui se propagent dans un milieu de perméabilité négative sont des ondes évanescentes qui font de ce milieu un bon candidat pour satisfaire le but souhaité (rejection des

bandes de fréquences indésirables). Comme image négative des résonateurs en anneaux fendus, les résonateurs en anneaux fendus complémentaires ont été récemment proposés et appliqués à la synthèse des lignes de transmission (les topologies de RAF et de RAFC rectangulaires sont illustrées dans la figure III.9).



**Figure III. 9:**Topologie du (a) RAF unique, (b) RAFC unique (les régions métalliques sont représentées en gris).

Il a été démontré que le RAFC gravé dans le plan de masse ou dans la bande conductrice des lignes de transmission planaires (microstrip ou CPW) fournit une perméabilité effective négative à la structure et la propagation du signal est exclue (comportement stopbande) à proximité de la fréquence résonante [1]. Un RAFC rectangulaire associé à une ligne de transmission a été étudié pour voir l'effet des paramètres géométriques sur la fréquence de résonance. La structure du RAFC avec la ligne de transmission est illustrée dans la figure III.9.

Le résonateur en anneau fendu, est dimensionné dans ce travail pour qu'il fonctionne dans la bande de fréquence [5 GHz; 6 GHz].

Le substrat utilisé pour la simulation est le FR4-epoxy qui présente une permittivité relative de 4.4, des pertes tangentielles de l'ordre de 0,002 et une épaisseur de 1.6mm. Ce substrat sera aussi utilisé pour toutes les autres simulations. La fréquence de résonance ( $f_r$ ) de la ligne micro-ruban chargée de résonateur en anneau fendu complémentaire RAFC est définie comme étant :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_c(C_c+C)}} \quad (\text{III. 1})$$

Où « C » est la capacité de couplage entre la ligne et le RAFC, le RAFC est modélisé comme un circuit LC en parallèle formé par la capacité  $C_c$  et l'inductance  $L_c$ . Dans cette étude, une ligne de transmission d'impédance caractéristique  $50\Omega$  et un RAFC gravé dans le plan de masse sont déposés au dessus et en dessous d'un substrat de type époxy FR4 ( $\epsilon_r = 4,4$ , tangente de perte de 0,02) respectivement.

Pour créer l'effet stop bande du RAFC à la fréquence ( $f_r$ ), la longueur totale du RAFC,  $L_{\text{total}}$ , généralement égal à la moitié de la longueur d'onde à cette fréquence :

$$L_{\text{Total}} \approx \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \quad (\text{III. 2})$$

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{(\epsilon_r + 1)}{2} + \frac{(\epsilon_r - 1)}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{w}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (\text{III. 3})$$

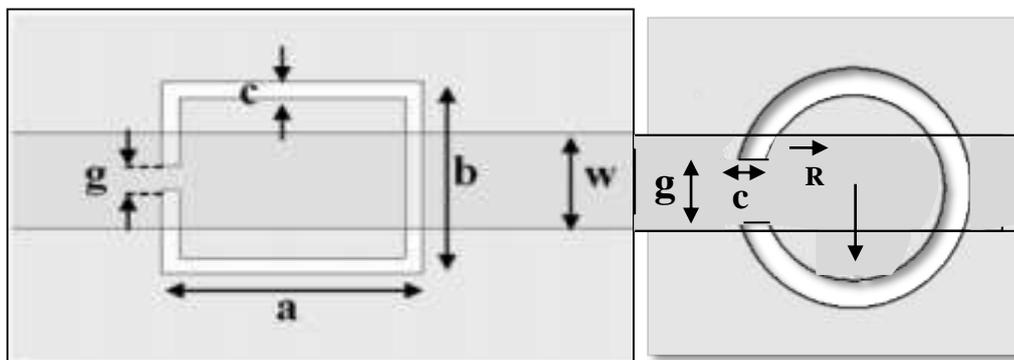
C'est la vitesse de la lumière dans le vide,  $w$  est la largeur de la ligne de transmission,  $h$  et  $\epsilon_r$  sont respectivement la hauteur et la constante diélectrique du substrat. Dans le cas d'un résonateur circulaire, le rayon est calculé par  $L_{\text{Total}}$ , qui représente dans ce cas, on utilise la circonférence du cercle :

$$L_{\text{Total}} \approx 2\pi r \quad (\text{III. 4})$$

$$r \approx \frac{L_{\text{Total}}}{2\pi} \quad (\text{III. 5})$$

Cette longueur approximative,  $L_{\text{Total}}$ , est utilisée au début de la conception, puis une étude paramétrique est effectuée pour l'ajuster. Ceci nous a conduit à faire une étude des différents paramètres qui agissent sur la fréquence de transmission à la résonance.

Dans chaque simulation, un paramètre est varié tandis que d'autres sont maintenus constants. Les dimensions initiales du RAFC sont :  $a=7$  mm,  $b=6$  mm,  $c = 0,4$  mm,  $g = 0,4$  mm[3].



**Figure III.10 :** La ligne microruban chargée RAFC et son modèle de circuit équivalent circulaire et rectangulaire.

A partir des résultats obtenus, la fréquence de transmission zéro ( $f_r$ ) varie clairement en faisant varier les paramètres géométriques  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $w$ . Il peut être montré clairement à partir de l'équation (III.1), que la valeur de capacité  $C_c$  et l'inductance  $L_c$  affectent la fréquence  $f_r$  (la variation de l'inductance  $L_c$  est négligeable), tandis qu'un RAFC plus grand (augmentation de la longueur et de la largeur correspond à une plus grande capacité (diminution  $f_r$ )). D'autre part, l'augmentation de  $f_r$  est proportionnelle à l'augmentation de la largeur de la fente et la largeur ( $c$ ), la diminution de la capacité  $C_c$  est induite par le fait qu'une plus grande valeur de  $g$  empêche

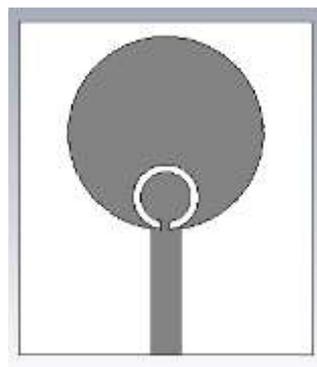
le courant de circuler autour de l'anneau. Le tableau III.1 résume les variations de la bande de fréquence de rejet en fonction des paramètres géométriques de RAFC.

Paramètres	La fréquence
<b>a</b> ↗	↘
<b>b</b> ↗	↘
<b>R</b> ↗	↘
<b>g</b> ↗	↗
<b>c</b> ↗	↗

**TABLEAU III.3** : variation de fréquence (FZ) en fonction des paramètres du RAFC [3].

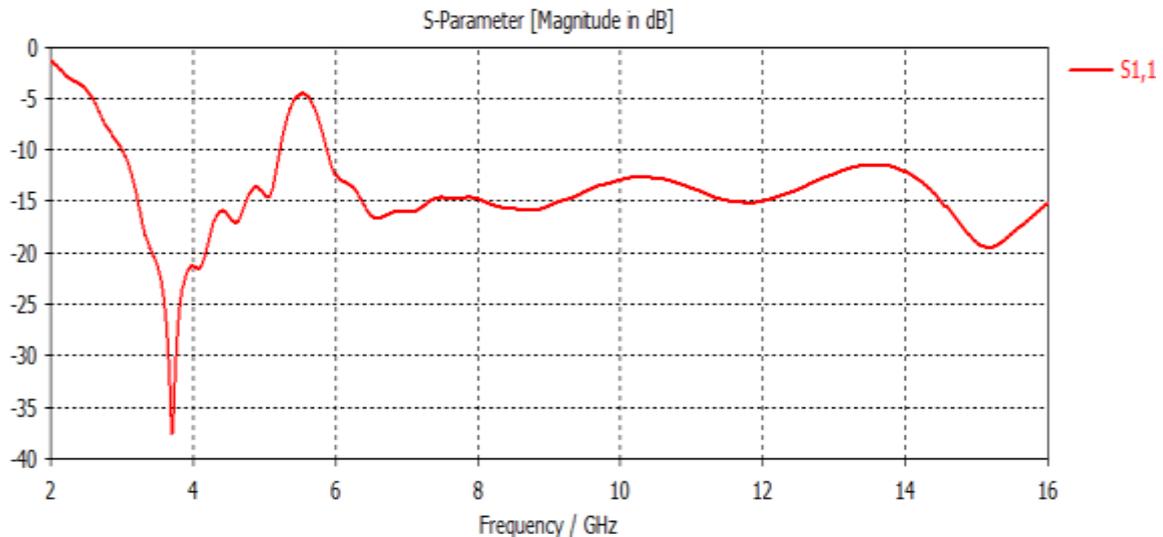
### III.2 Antenne ULB à bande rejetée (5 – 6 GHz)

On va étudier dans cette section une antenne ULB à bande rejetée en utilisant un résonateur en anneau fendu circulaire, il est dimensionné dans ce travail pour qu'il fonctionne dans la bande de fréquence [5 GHz; 6 GHz]. Les dimensions du RAFC sont :  $r=3.15$  mm,  $c = 0,75$  mm,  $g = 0,8$  mm.



**Figure III.11** : Antenne avec résonateur en anneau fendu complémentaire circulaire.

La figure présente le coefficient de réflexion de l'antenne ULB à bande rejetée en fonction de la fréquence.

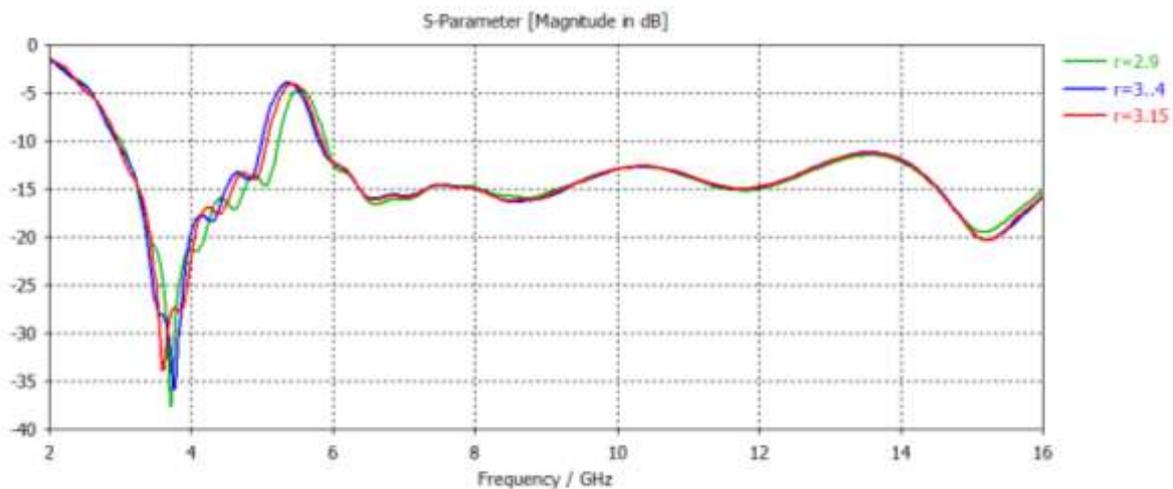


**Figure III.12 :** Coefficient de réflexion de l'antenne ULB à bande rejetée en fonction de la fréquence.

On remarque qu'on a une rejection de signal dans la bande allant de 5.06 à 5.83 Ghz, et donc le résonateur (RAFC) permet de filtrer le signal dans cette bande.

### III.2.1 Influence de rayon

On va varier le rayon extérieur du résonateur en anneau fendu complémentaire afin de voir l'influence sur la bande de fréquence à filtrer. La figure III.13 présente la variation du rayon en fonction de la fréquence.

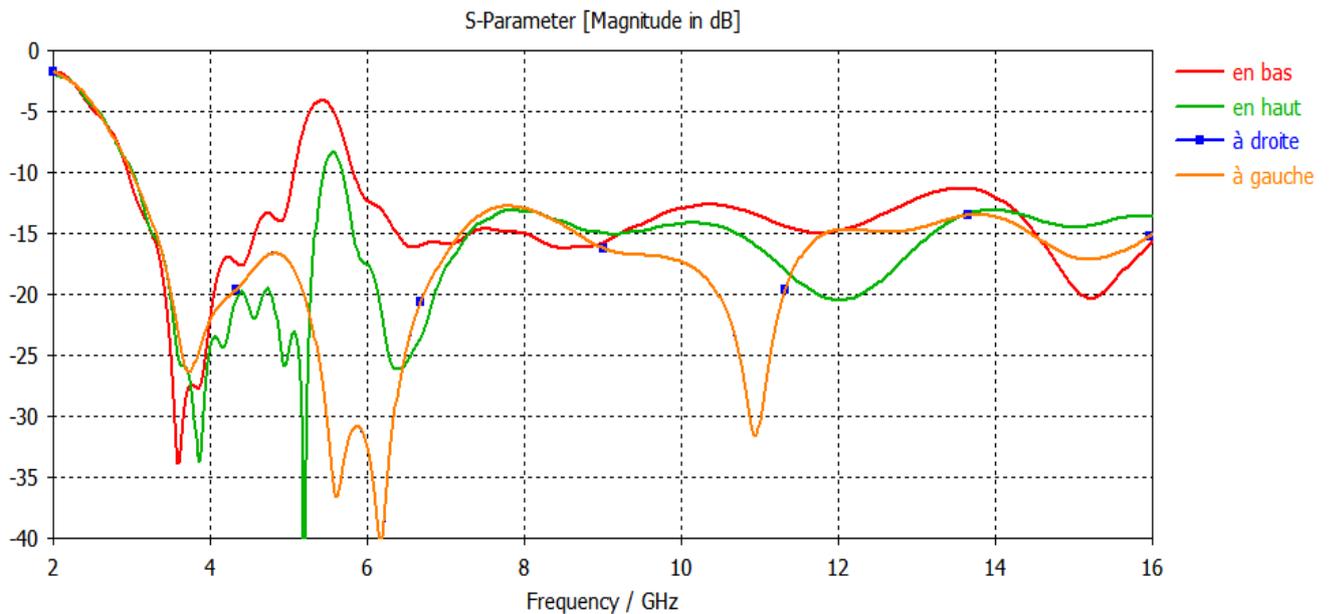


**Figure III. 13:**variation du rayon en fonction de la fréquence

On remarque qu'en augmentant le rayon du résonateur en anneau fendu complémentaire (r), la bande fréquence de rejection diminue.

### III.2.2 Influence de l'emplacement de la fente

On va varier la position de la fente du résonateur en anneau (gauche, droite, haut et bas) afin de voir l'influence sur la bande de fréquence à filtrer. La figure III.14 présente la variation de l'emplacement de la fente en fonction de la fréquence.

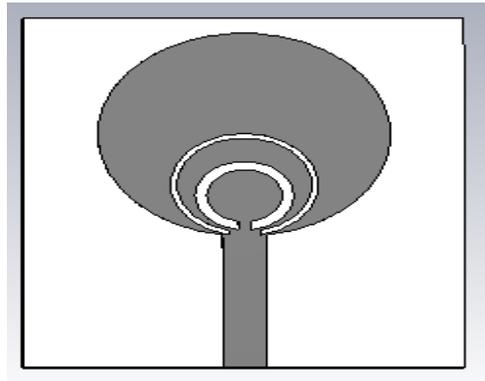


**Figure III.14:** variation du rayonnement en fonction de la fréquence.

On constate que la rejection du signal est meilleure dans le cas où la fente est orientée vers le bas par rapport aux autres positions.

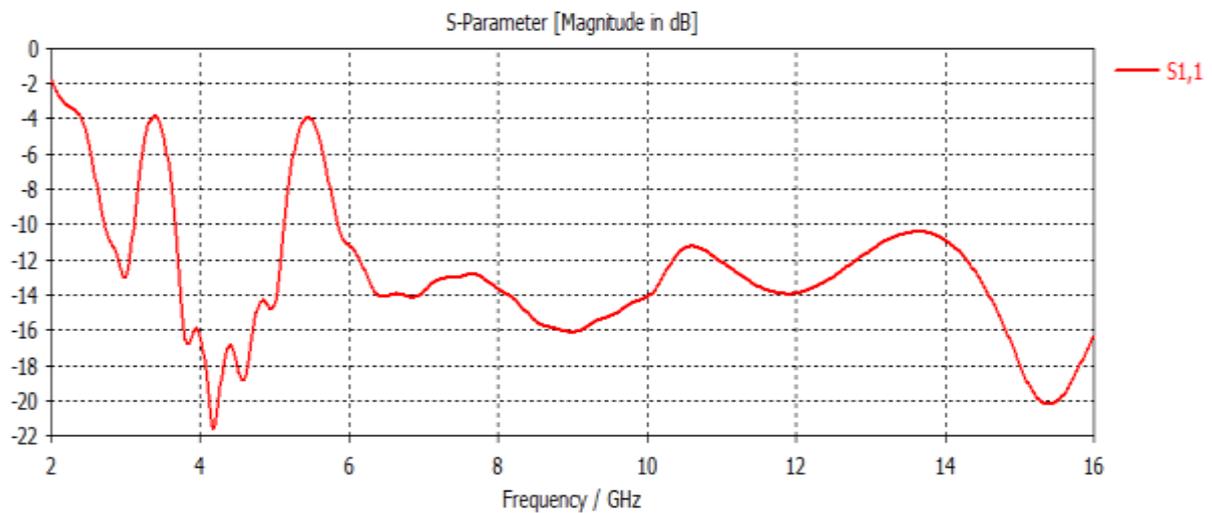
### III.3 Antenne ULB à double bande rejetée

Afin de créer une deuxième bande de rejection (3,3-4,2 GHz) et d'éliminer les fréquences indésirables, une structure supplémentaire (RAFC circulaire) est introduite dans l'élément rayonnant de l'antenne sans avoir besoin de structures complexes ou de dimensions agrandies. Les dimensions du RAFC sont :  $r=4.7\text{mm}$ ,  $c = 0,4\text{ mm}$ ,  $g = 2\text{ mm}$  (Figure III.15).



**Figure III. 15:** Antenne avec deux résonateurs en anneau fendu complémentaire circulaire (Co-directionnels).

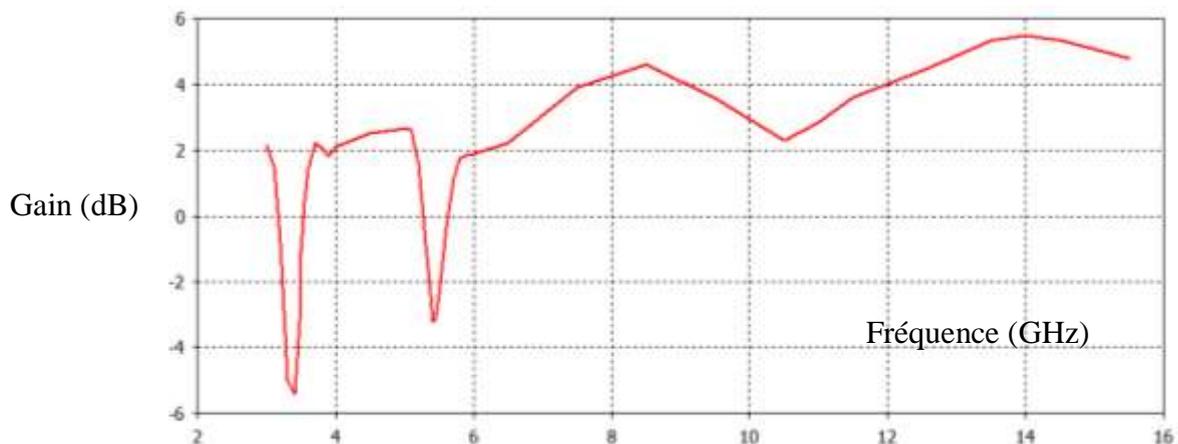
La figure III.16 présente le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence pour l'antenne à double bandes rejetées.



**Figure III. 16:** Variation du coefficient de réflexion pour les deux résonateurs en fonction de la fréquence.

On remarque qu'on a obtenu une deuxième bande de rejection allant de 3.11 GHz à 3.66 GHz en plus de celle de 5 à 6 GHz.

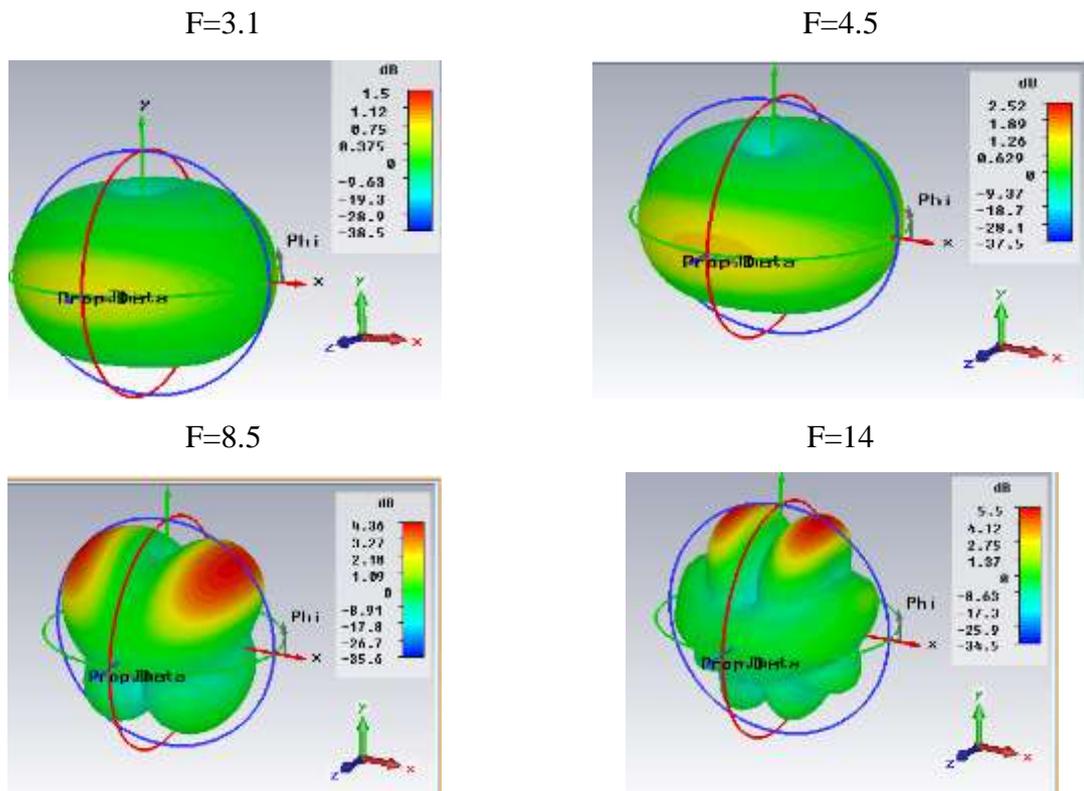
La figure III.17 représente la variation de gain en fonction de la fréquence.



**Figure III. 17:** Variation du gain en fonction de la fréquence.

On remarque une légère variation de gain mis à part la bande allant de 3.11 à 3.66 GHz et la bande allant de 5.06 à 5.83 GHz ou on a une chute importante de gain à cause des deux résonateurs implémentés dans l'élément rayonnant.

Sur la figure III.18 nous avons représenté les diagrammes de rayonnement en 3D pour différentes fréquences (3.1 ; 4.5 ; 8.5 et 14 GHz)

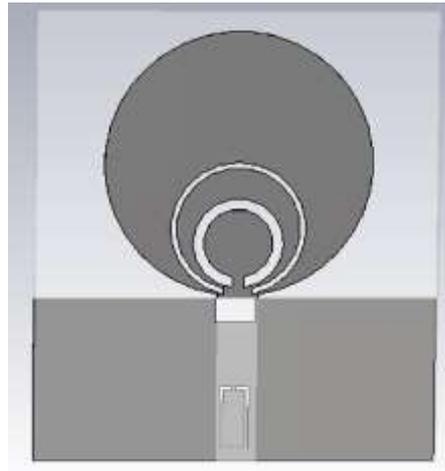


**Figure III. 18:**Diagramme de rayonnement pour différentes fréquences (3.1 GHz ; 4.5 GHz , 8.5 GHz et 14 GHz).

On remarque que le diagramme de rayonnement est dipolaire dans les fréquences basses (3.1 GHz et 4.5 GHz) et qui prend des allures directives en fréquences hautes (8.5 GHz et 14 GHz).

### III.4 Antenne à triple bandes rejetées

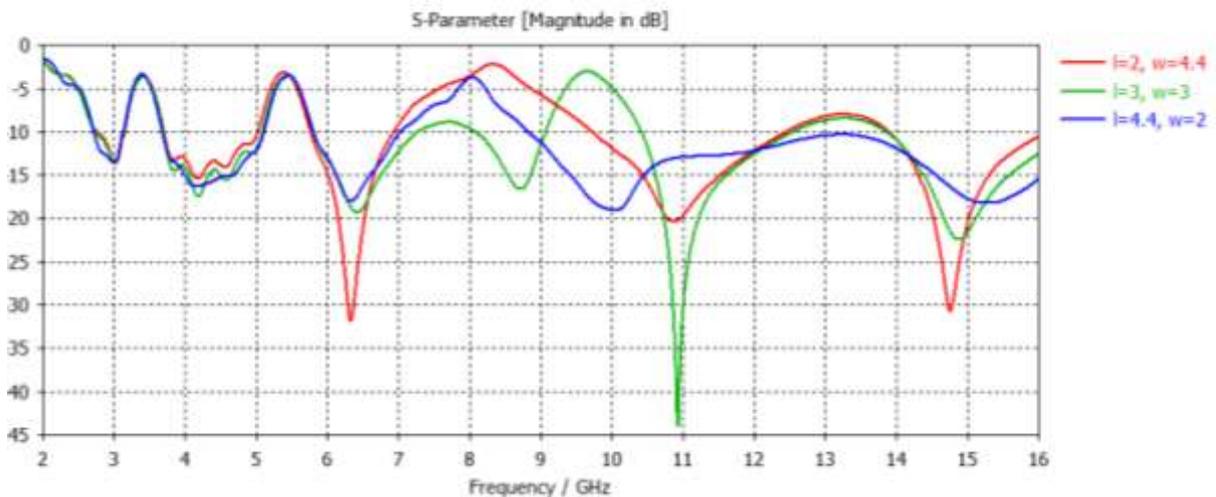
Afin de créer une troisième bande de rejection (7.25 GHz -8.4 GHz), une structure supplémentaire (RAFC carré) est introduite dans le plan de masse de l'antenne (figure III.19).



**Figure III. 19:** Antenne avec deux résonateurs en anneau fendu complémentaire circulaire (Co-directionnels) et un résonateur carré.

### III.4.1 Variation des dimensions du résonateur

La figure (III.20) représente le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence en changeant les dimensions du résonateur tout en gardant la largeur totale constante ( $L_{\text{totale}} = 11.9$  mm).

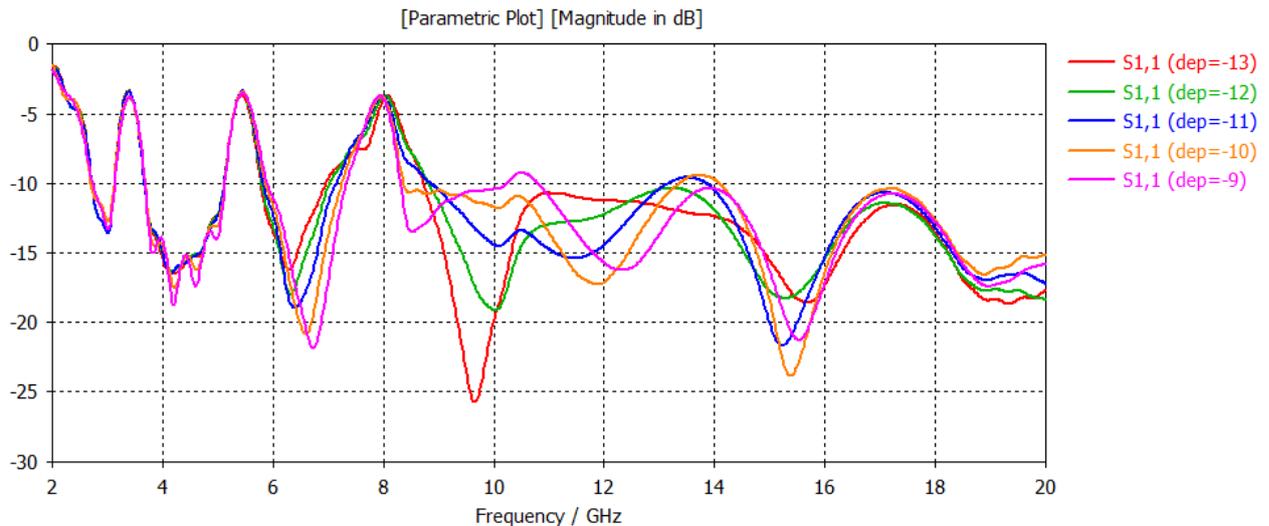


**Figure III. 20 :** Variation du coefficient de réflexion pour les différentes dimensions du résonateur en fonction de la fréquence.

On constate que pour les dimensions ( $L=4.4$ mm,  $w=2$ mm), on aura une rejection meilleure en terme de bande de fréquence rejetée. Alors que pour les autres dimensions, on obtient des bandes de fréquence plus larges, ce qui va consommer plus de bande utile.

### III.4.2 Effet de déplacement du résonateur

La figure (III.21) représente le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence pour les différentes valeurs de déplacement de résonateur (dep).

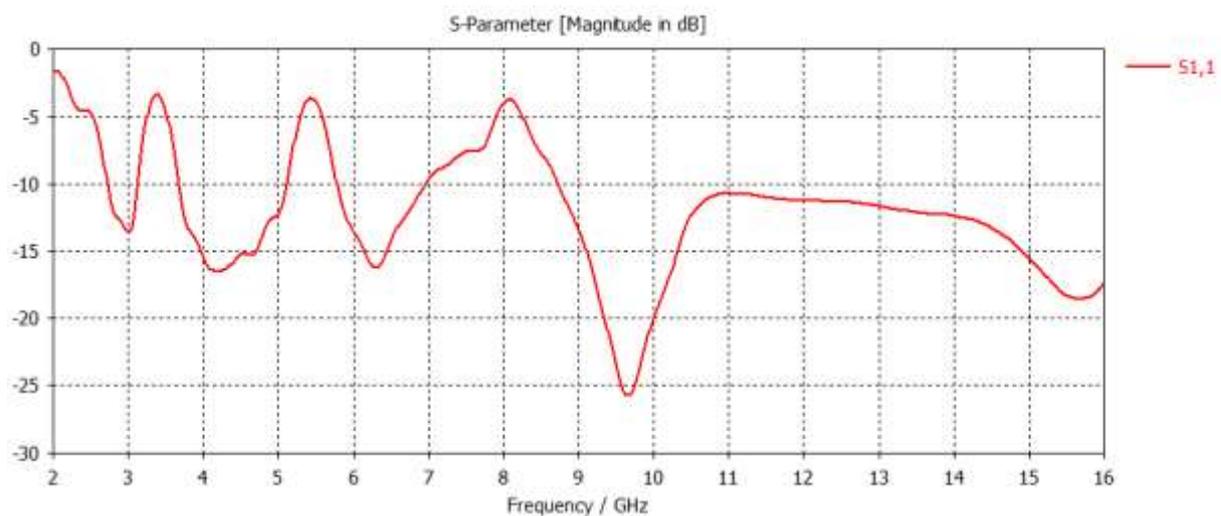


**Figure III. 21:** Variation du coefficient de réflexion pour les différents déplacements du résonateur en fonction de la fréquence.

On constate que les courbes de déplacement ( -9, -10, -11) sont au dessus de -10dB , ce qui veut dire qu'une partie de la bande utile sera rejetée. Pour les déplacements (-12, -13) on a obtenu quasiment les mêmes caractéristiques avec une légère augmentation dans le niveau de rejection pour la courbe en rouge (dep= -13).

### III.5 Antenne ULB finale à triple bande rejetée

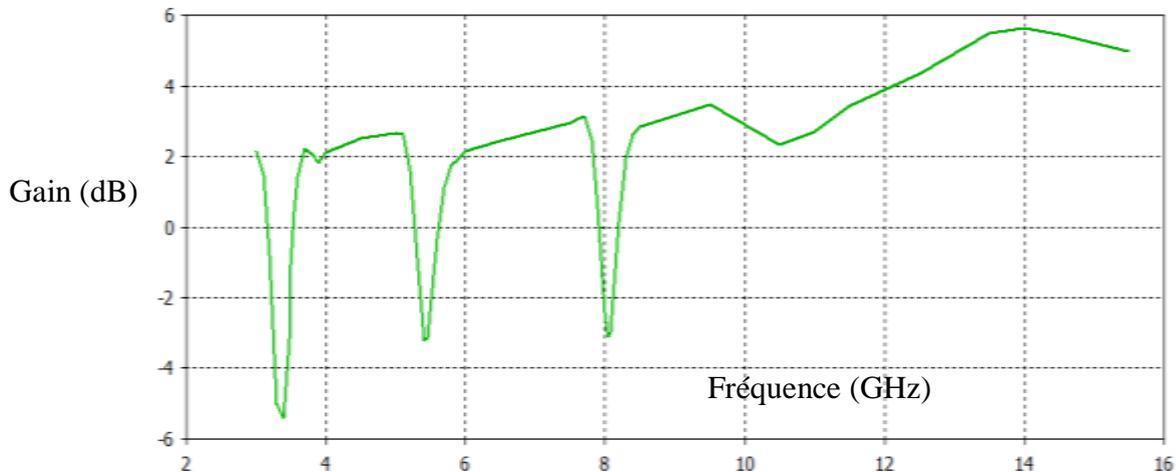
La figure III.22 présente le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence pour l'antenne à triple bandes rejetées dont les dimensions du RAFC sont :  $L=4.4$  mm,  $w=2$ mm,  $c = 0,4$  mm,  $g = 2$  mm.



**Figure III. 22:** Variation du coefficient de réflexion de l'antenne à triple bande rejetée en fonction de la fréquence.

On remarque qu'on a obtenu trois bandes de rejection allant respectivement de 3.11 GHz à 3.66GHz, de 5.11Ghz à 5.77 GHzet de 7 GHz à 8.7 GHz.

La figure III.23 représente la variation de gain en fonction de la fréquence.



**Figure III. 23:** Variation du gain en fonction de la fréquence.

On remarque une légère variation de gain mis à part la bande allant de 3.11 à 3.66 GHz et la bande allant de 5.06 à 5.77 GHz et la bande allant de 7 GHz à 8.7 GHz ou on a une chute importante de gain à cause des résonateurs introduits soit dans l'élément rayonnant et dans le plan de masse.

On a obtenu quasiment les mêmes diagrammes de rayonnement que celle de l'antenne à double bandes rejetées.

### III.6 COMPARAISON DES PERFORMANCES

En Comparant les antennes simulées à d'autres antennes ULB rapportées dans la littérature (présentées dans le tableau III. 2), les antennes proposées ont le privilège d'être de taille plus petite et d'avoir un couplage minimisé en plaçant les RAFCs dans des plans différents. Davantage, le nombre de RAFC utilisées est généralement moins pour créer deux ou trois bandes de rejet. Ainsi que les bandes rejetées sont facilement contrôlées en ajustant les paramètres géométriques, l'orientation et l'emplacement des RAFC.

Références	Dimensions de l'antenne (mm <sup>3</sup> )	Techniques utilisées	bande de rejection (GHz)
[4]	28x52x1.6	1 fente-U	5.1-5.92
[5]	30x36x0.4	1 fente-L	4.85-6.04
[6]	30x35x1	2 fentes-S	4.91-5.9
[7]	30x40x1.2	2 Forme en L	3.3-3.7 5.2-6
[8]	35.3x32 x1.6	1 EBG 1 fente en anneau	3.3-3.7 4.9-6.0 7.7-8.6
[9]	30x40x1.6	4 RAFC	5-6
[10]	30x34x1	2 RAFC	3.4-3.6 5.1-5.9
[11]	32x34 x1.6	3 RAFC 1 RAF	3.7-4.3 5.15-6.2 7.3-8.7
[12]	35x35 x1.6	1co- RAFC 2 RAF	2.95-3.72 5.12-6.07 8.04-8.65
Antenne à double bandes rejetées	28x32 x1.6	1 co-RAFC	3.11-3.66 5.11-5.83
Antenne à triple bandes rejetées	28x32 x1.6	1 RAFC 1co- RAFC	3.11-3.66 5.11-5.77 7-8.7

**Tableau III.2 :** Comparaison des performances des antennes.

### IV. Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons présenté la phase de conception des structures par le logiciel de simulation CST Microwave Studio. Ensuite dans la deuxième partie du chapitre, nous avons commencé avec l'étude d'une antenne ULB avec l'emploi d'une ligne micro ruban et d'un résonateur en anneau fendu complémentaire. Puis nous sommes passés à l'étude des différents paramètres géométriques puisqu'ils ont une influence sur les performances de notre antenne. On a déduit à partir d'une étude paramétrique qu'en diminuant la largeur du substrat, l'antenne devient plus miniature et c'est ce qui la rend moins encombrante. Dans la troisième partie de ce chapitre nous nous sommes consacrés aux résonateurs en anneaux fendus complémentaires (RAFC) circulaire et rectangulaire. Ce qui nous a permis d'étudier l'antenne ULB à une, double et triple bande rejetées qui nous donnera le dernier modèle de notre antenne optimisée qui fonctionne en dehors des trois bandes suivantes : wifi, radar et la bande satellitaire.

### V références bibliographiques

- [1] www.cst.com
- [2] Falcone, F., T. Lopetegi, J. D. Baena, R. Marques, F. Martin, and M. Sorolla, “Effective negative- $\epsilon$  stop-band microstrip lines based on complementary split ring resonators,” *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 14, no. 6, pp.280–282, Jul. 2004.
- [3] NACER Abdelghani, “ Etude de structures à base de métamatériaux pour applications aux circuits micro-ondes et antennes : Cas du résonateur en anneau fendu, thèse de doctorat , Tlemcen pp.13,2018.
- [4] T. Mandal, and S. Das, “Ultra wideband-printed hexagonal monopole antennas with WLAN band rejection,” *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 54, no.6, pp.1520-1525, 2012.
- [5] C. Yoon et al., “Compact band-notched ultra-wideband printed antenna using inverted L-slit,” *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 54, no.1, pp. 143–144, 2012.
- [6] B. Li et al., “Switched Band-Notched ULB/Dual-Band WLAN Slot Antenna with Inverted S-Shaped Slots,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 11, pp. 572-575, 2012.
- [7] X. L. Liu et al., “A CPW-fed dual band-notched ULB antenna with a pair of bended dual-l-shape parasitic branches”, *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 136, pp. 623-634, 2013.
- [8] Pandey et al., “Design and analysis of multiband notched pitcher-shaped ULB antenna,” *Int. J. RF and Microwave Comp. Aid. Eng.*, vol. 25, no. 9, pp.795–806, 2015.
- [9] G. Mishra and S. Sahu, “Compact circular patch ULB antenna with WLAN band notch characteristics,” *Microw. Opt. Technol. Lett.* vol. 58, no. 5, pp. 1068–1073, 2016.
- [10] H.-Y. Lai et al., “ULB antenna with dual band rejection for WLAN/WIMAX Bands using CSRRs,” *Progress In Electromagnetics Research Letters*, vol. 26, pp. 69-78, 2011.
- [11] Minyeong Yoo and Sungjoon Lim, “SRR- and CSRR-loaded ultra-wideband (ULB) antenna with tri-band notch capability,” *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 27, no. 17, pp. 2190– 2197, 2013.
- [12] D. Sarkar, et al., “A compact microstrip-fed triple band-notched ULB monopole antenna,” *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol.13, pp. 396–399, 2014.

## Conclusion général

Nous avons eu pour but dans ce mémoire d'étudier les métamatériaux ainsi que leurs applications aux antennes. Nous avons donc initié le premier chapitre avec des généralités sur les ondes, les métamatériaux (Les caractéristiques de base et les applications potentielles de ces structures). Ensuite nous sommes passés à la permittivité et la perméabilité négatives dans les métamatériaux et dans les résonateurs en anneau fendu. En employant le résonateur en anneau fendu, nous avons conçu une antenne ultra large bande. Le spectre UWB entier dans lequel celle-ci fonctionne s'étend de 3.5 à 20 GHz. ensuite en effectuant une étude paramétrique après avoir utilisé un RAFC, un nouveau résultat a été obtenu. ce filtrage sera indispensable pour supprimer des signaux a deux ou a trois bandes de fréquence afin d'éviter des interférence avec des systèmes qui opèrent dans la même bande de fréquence . Toutes les simulations faites ont été réalisées avec le logiciel CST. Nous avons commencé le troisième chapitre avec une introduction au CST Microwave Studio, le logiciel de simulation avec lequel nous avons effectué toutes nos simulations. Ensuite nous avons procéder avec la conception de notre antenne a une, puis a deux et en fin a trois bandes rejetées. Nous avons utilisé dans cette antenne les résonateurs en anneau fendu complémentaire circulaire et carré. Finalement on termine par une comparaison qui prouvera par la fin la qualité de notre antenne par rapport à d'autres études effectuées.

