

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

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

جامعة سعد دحلب البليدة  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Master

Mention Électronique  
Spécialité Réseaux & Télécommunications

présenté par

BOUSSADA Mohamed Lamine

&

RAHICHE Billel

# Etude et simulation d'un méta-substrat pour la réalisation des antennes patch

Proposé par : Dr. DJEBARI Mustapha

Année Universitaire 2016-2017

---

## ملخص:

نماذج من هوائيات ذات الشريط الدقيق المعتمدة على رنانات حلقات مفتوحة ( مواد مصطنعة ) تم اقتراحهم في هذا العمل. التدخل في هذا الميدان سمح بإدماج ، تطبيق و محاكاة مختلف الهوائيات ذات الشريط الدقيق. مقارنات مع نتائج البحوث و الأطروحات و قياسات قد تم إجراؤها للتحقق من نتائجنا. النتائج المحصل عليها كانت متقاربة و مقنعة. سمح التدخل في هذا الميدان بمعرفة هيكل و طبيعة هذه المواد و التحكم في التصميم إنطلاقا من هذا النوع من المواد.

**كلمات المفاتيح:** هوائيات ، الشريط الدقيق، رنانات الحلقات المفتوحة.

---

## Résumé :

Des antennes prototypes de technologie micro-ruban a base de résonateurs en anneau fendu (métamatériaux) ont été proposées dans ce travail. cette investigation dans le domaine des métamatériaux a permit l'intégration, la simulation de différentes antennes patch. Des comparaisons avec des résultats de publications mondiales et des mesures ont été faite pour la validation de nos résultats.

**Mots clés :** Antenne ; Micro ruban ; Resonateur en anneau fendu.

---

## Abstract :

A prototypes antennas of microstrip technology based on split ring resonators (metamaterials) have been proposed in this work. This investigations in the field of metamaterials allowed the implementation, simulation of differents patch antennas. Comparaisons with results from international publications have been made for the validation of ours results.

**Keywords :** Antenna ; Split ring resonator ; Microstrip.

---

## Remerciements

---

Tout d'abord on adresse nos remerciements en premier lieu à Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé, le courage et la patience qui nous a donné pour mener ce travail à terme.

Nous tenons à remercier tout particulièrement nos parents qui ont toujours été là pour nous.

Nos remerciements à Mr. **DJEBARI Mustapha**, qui n'a épargné aucun effort pour le bon déroulement de ce travail. Ses remarques et consignes ont été pour nous d'un grand apport.

Nos remerciements à l'ensemble des jurys qui ont participé à l'évaluation de notre modeste travail.

Nos remerciements pour les techniciens de laboratoire des circuits imprimés qui ont participé à la réalisation d'antennes.

Enfin, nous exprimons notre gratitude à tous ceux qui sont directement ou indirectement impliqués dans la réussite de ce travail.

*Dédicace*

*Je dédie ce travail*

*A*

*"Ma Famille"*

*" Mon père & ma mère pour leurs soutien "*

*"La personne qui m'a encouragé pour faire le Master"*

*"tous ceux qui m'ont aidé afin de réaliser ce travail"*

*Lamine*

## Listes des acronymes et abréviations

BW	Bande width
CSRR	Compliment Split Ring Resonator.
CRAF	Complément résonateur en anneau fendu.
DPS	Double Positive.
DNG	Double Négative.
ENG	Electrical Negative.
EM	Electromagnétique.
FEM	Finite Element Model.
GNSS	Global Navigation Satellite System.
GPS	Global Positionning System.
HFSS	High Frequency System Simulator.
MNG	Magnétic Négative.
MMG	Matériaux Main Gauche.
MMT	Méta-matériaux.
PPS	Precise Positionning system.
RF	Radiofréquence.
RAF	Résonateur en anneau fendu.
SRR	Split Ring Resonator.
SPS	Standard Positionning system.
SA	Selective Aviavbility.
TOS	Taux d'ondes stationnaire.
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio.

## Symboles

$\Delta f$	Largeur de bande passante.
$\theta$	Thêta.
$\Phi$	Phi.
$\varepsilon_r$	La permittivité relative du substrat diélectrique.
$\lambda$	Longueur d'onde dans le vide.
$C$	Vélocité de la lumière.
$E$	Champ électrique.
$H$	Champ magnétique.
$h$	Epaisseur du substrat diélectrique.
$P_a$	Puissance d'alimentation.
$P_r$	Puissance rayonné.
$Z_{in}$	Impédance d'entrée d'antenne.
$Z_0$	Impédance caractéristique de la ligne .
$R_{in}$	Résistance d'antenne.
$X_{in}$	Réactance de l'antenne.
$B_r$	Largeur de bande relative.
dB	Décibel.

# Table des matières

Remerciements

Listes des acronymes et abréviations

Symboles

Introduction Générale .....1

**Chapitre 1 Généralités sur les antennes.....3**

1.1 Introduction.....3

1.2 Généralités sur les antennes.....3

1.2.1 Définition d'une antenne.....3

1.3 Les caractéristiques d'antenne.....4

1.3.1 Caractéristiques électriques.....4

1.3.2 Caractéristiques électromagnétiques.....8

1.4 Les antennes Patch.....12

1.4.1 Composition d'antenne Patch.....13

1.4.2 Avantages d'antenne Patch.....13

1.4.3 Inconvénients.....13

1.4.4 Types d'antenne patch.....14

1.4.5 Choix du substrat et conducteur pour la conception.....14

1.5 Principe de fonctionnement du système GPS.....14

1.5.1 Les segments GPS.....14

1.5.2 Les sources d'erreurs .....16

1.6 Les systèmes GPS.....17

1.6.1 Propriétés.....17

1.6.2 Applications du système GPS.....18

1.7 Conclusion.....19

**Chapitre 2 Métamatériaux .....20**

2.1 Introduction.....20

2.2 Définition des métamatériaux.....20

2.3 Classification des métamatériaux.....22

2.3.1 Les matériaux doublement positifs.....22

2.3.2	Les matériaux à perméabilité négative.....	23
2.3.3	Les matériaux à permittivité négative.....	27
2.3.4	Les matériaux doublement négatifs.....	28
2.4	Application des métamatériaux.....	29
2.5	Les résonateurs.....	29
2.5.1	Types des résonateurs .....	30
2.6	Application du métamatériau dans l'environnement antenne.....	40
2.6.1	Etude de l'antenne patch circulaire.....	40
2.6.2	Etude de l'effet de métamatériau sur l'antenne.....	43
2.7	Vérification de l'outil HFSS .....	45
2.8	Conclusion.....	46
<b>Chapitre 3</b>	<b>Conception, simulation et réalisation.....</b>	<b>47</b>
3.1	Introduction.....	47
3.2	Spécification techniques.....	47
3.3	Choix de l'outil de simulation.....	47
3.4	Excitation d'antenne.....	48
3.5	La conception d'une antenne circulaire par une alimentation micro ruban .....	49
3.5.1	Dimensions de l'antenne initiale.....	49
3.5.2	Etape secondaire du conception.....	51
3.5.3	3eme étape du conception.....	53
3.5.4	L'étape finale du conception.....	54
3.6	Coefficient de réflexion, gain , directivité.....	56
3.6.1	Coefficient de réflexion.....	56
3.6.2	Le gain total.....	56
3.6.3	La directivité.....	57
3.7	Conception d'une deuxième antenne circulaire.....	57
3.7.1	Dimensions.....	57
3.7.1	Coefficient de réflexion de deuxième antenne.....	58
3.8	Réalisation et mesure de coefficient de réflexion.....	59
3.8.1	Réalisation.....	59
3.8.2	Mesure du coefficient de réflexion.....	60



3.8.3	Interprétation des résultats.....	61
3.9	Conclusion.....	61
	<b>Conclusion Générale.....</b>	<b>63</b>

## Liste des figures

<i>Figure 1.1:</i> Modèle d'impédance complexe d'une antenne.....	4
<i>Figure 1.2:</i> Représentation en quadripôle. ....	5
<i>Figure 1.3:</i> Bande passante et coefficient de réflexion. ....	7
<i>Figure 1.4:</i> Diagramme de rayonnement. ....	8
<i>Figure 1.5:</i> Angle d'ouverture. ....	9
<i>Figure 1.6:</i> Polarisation d'antenne. ....	9
<i>Figure 1.7:</i> Différentes types de la polarisation. ....	10
<i>Figure 1.8:</i> Antenne patch.....	13
<i>Figure 1.9:</i> Répartition des satellites du système GPS.....	15
<i>Figure 1.10:</i> Localisation du segment terrestre.....	15
<i>Figure 1.11:</i> La géo-localisation par principe de triangulation. ....	16
<i>Figure 2.1:</i> Classement des matériaux en fonction du signe de leur permittivité $\epsilon$ et de leur perméabilité $\mu$ .....	21
<i>Figure 2.2:</i> Classes de Matériaux en fonction du signe de la permittivité et la perméabilité..	22
<i>Figure 2.3:</i> (a) Le rouleau suisse (Swiss-Roll) de Pendry (b) la variation de la perméabilité effective réelle et imaginaire en fonction de la fréquence.....	23
<i>Figure 2.4:</i> Configuration du Métamatériau <i>MNG</i> à base des <i>SRR</i> proposée par J.Pendry.....	24
<i>Figure 2.5:</i> Représentation de la perméabilité effective en fonction de la fréquence selon l'équation 2.7.....	26
<i>Figure 2.6:</i> (a) Premier Prototype Métamatériau proposé par l'équipe de D.R.Smith (b) prototype amélioré.....	26
<i>Figure 2.7:</i> Métamatériau ENG forme par un réseau de tige métallique.....	28
<i>Figure 2.8:</i> (a) cellule <i>DNG</i> - " <i>SRR+Tige</i> " (b) perméabilité et permittivité de la cellule " <i>SRR+Tige</i> ".....	28
<i>Figure 2.9:</i> Cellule <i>DNG</i> sous forme de « $\Omega$ ».....	29
<i>Figure 2.10:</i> Réfraction dans un matériau d'indice négatif (métamatériau).....	30
<i>Figure 2.11:</i> Représentation d'un résonateur en anneau fendu ( <i>SRR</i> ) et son circuit équivalent.....	30
<i>Figure 2.12:</i> Géométries de <i>SRR</i> pour réaliser des matériaux magnétiques artificiels.....	31
<i>Figure 2.13:</i> Représentation et dimensions d'une cellule <i>RAF</i> circulaire.....	31

<i>Figure 2.14:</i> un réseau RAF circulaire.....	32
<i>Figure 2.15:</i> Coefficient de réflexion d'un réseau RAF circulaire.....	32
<i>Figure 2.16 :</i> Représentation d'un complémentaire résonateur en anneau fendu (CSRR) et son modèle de circuit équivalent.....	33
<i>Figure 2.17:</i> Un réseau de C-RAF circulaire.....	34
<i>Figure 2.18:</i> Coefficient de réflexion d'un réseau C-RAF circulaire .....	34
<i>Figure 2.19:</i> Représentation et dimensions d'une unité de cellule du RAF carré.....	35
<i>Figure 2.20:</i> Un réseau de cellules RAF carrés.....	36
<i>Figure 2.21:</i> Coefficient de réflexion d'un réseau RAF carré.....	36
<i>Figure 2.22:</i> Représentation d'un complémentaire résonateur en anneau fendu (CSRR) carré et son modèle de circuit équivalent.....	37
<i>Figure 2.23:</i> Un réseau CSRRs carrés.....	38
<i>Figure 2.24:</i> Coefficient de réflexion d'un réseau C-RAF carré.....	38
<i>Figure 2.25:</i> Représentation et dimensions d'une unité de cellule d'un RAF en double C.....	39
<i>Figure 2.26:</i> Un réseau de RAF en double C.....	39
<i>Figure 2.27:</i> Coefficient de réflexion d'un réseau RAF en double C.....	40
<i>Figure 2.28:</i> Antenne patch circulaire.....	42
<i>Figure 2.29:</i> Antenne patch seule: (a) paramètre $s_{11}$ . (b) diagramme de gain en 3D .....	42
<i>Figure 2.30:</i> Diagrammes de rayonnements en 2D.....	43
<i>Figure 2.31:</i> Antenne patch circulaire en présence de métamatériau.....	43
<i>Figure 2.32:</i> Antenne patch : (a) paramètre $s_{11}$ . (b) diagramme de gain en 3D en présence de métamatériau.....	44
<i>Figure 2.33:</i> Diagrammes de rayonnements en 2D en présence de métamatériau.....	45
<i>Figure 2.34:</i> L'antenne simulée en anneau fendu.....	45
<i>Figure 2.35:</i> Coefficients de réflexion pour les deux simulations.....	46
<i>Figure 3.1:</i> RAF circulaire.....	49
<i>Figure 3.2:</i> Antenne initiale.....	49
<i>Figure 3.3:</i> Coefficient de réflexion de l'antenne initiale.....	50
<i>Figure 3.4:</i> L'antenne avec un deuxième anneau.....	51
<i>Figure 3.5:</i> Le coefficient de réflexion après l'insertion du deuxième anneau.....	51

<i>Figure 3.6:</i> Antenne avec insertion du troisième anneau.....	52
<i>Figure 3.7:</i> Le coefficient de réflexion avec insertion du troisième anneau.....	52
<i>Figure 3.8:</i> La 3ème étape de la conception d'antenne circulaire à fentes.....	53
<i>Figure 3.9:</i> Coefficient de réflexion de la 3ème conception.....	54
<i>Figure 3.10:</i> La conception finale de l'antenne.....	54
<i>Figure 3.11:</i> Dimensions de l'élément rayonnant.....	55
<i>Figure 3.12:</i> Dimensions de la masse réduite.....	55
<i>Figure 3.13:</i> Coefficient de réflexion de la conception finale.....	56
<i>Figure 3.14:</i> Le gain total (a) le gain totale en 3D (b).....	56
<i>Figure 3.15:</i> Diagramme de la directivité totale de la conception finale.....	57
<i>Figure 3.16:</i> L'élément rayonnant de la 2eme antenne.....	57
<i>Figure 3.17:</i> La masse réduite de la 2eme antenne.....	58
<i>Figure 3.18:</i> Coefficient de réflexion de la 2eme antenne.....	59
<i>Figure 3.19:</i> Typons de l'antenne à réaliser .....	59
<i>Figure 3.20:</i> L'antenne réalisée.....	60
<i>Figure 3.21:</i> Mesure en utilisant l'analyseur de réseau.....	60
<i>Figure 3.22:</i> Comparaison de coefficient de réflexion de deuxième antenne.....	61

## Liste des tableaux

<i>Tableau1.1</i> Les bandes de fréquence du système GPS.....	18
<i>Tableau3.1</i> Les résultats de $s_{11}$ pour les fréquences GPS .....	50
<i>Tableau3.2</i> Les résultats de $s_{11}$ pour les fréquences GPS de la 2eme étape.....	53
<i>Tableau3.3</i> Les résultats de $s_{11}$ pour les fréquences GPS de la 3eme étape.....	54
<i>Tableau3.4</i> Tableau des dimensions d'antenne finale.....	55
<i>Tableau3.5</i> Les dimensions de l'élément rayonnant du 2eme antenne.....	58
<i>Tableau3.6</i> Les dimensions de La masse réduite de la 2eme antenne.....	58

# Introduction générale

---

La dernière décennie a connu un développement important et une grande demande à la technologie. Une forte demande de la population et de l'industrie de solutions innovantes et à faible coût. Les antennes sont considérées comme des éléments clés de la technologie moderne, car elles assurent la communication, l'émission et la réception des informations à travers les différents types de technologie (Wifi, Bluetooth, Radiocommunication mobile ou internet des objets).

Pour répondre aux besoins technologiques, les constructeurs en hyperfréquences sont engagés à concevoir des systèmes à base d'antennes micro ruban. Ces derniers présentent plusieurs avantages : coût de fabrication relativement faible, simple profil, compatibilité avec les circuits intégrés. Les antennes micro ruban sont utilisées pour une large gamme d'applications, telles que les communications par satellites ou mobiles grâce à la miniaturisation des dispositifs.

La réduction de la taille d'antenne permet une meilleure intégration dans les systèmes de télécommunications tels que les systèmes de localisations. Cette miniaturisation est limitée par l'affaiblissement des performances d'antennes (une adaptation qui répond pas aux normes, un gain très faible).

Pour affronter ces difficultés, une nouvelle technologie apparaitre, c'est la technologie des métamatériaux. Ces métaux sont des structures artificiels qui n'existent pas dans la nature. Cette révolution a permit de réaliser des antennes plus petites allons jusqu'à 1/10 du taille normale et avec des performances très élevées. L'étude et la conception d'antennes en utilisant les métamatériaux est le sujet d'actualité.

Ce projet est organisé comme suit:

- Dans le premier chapitre, nous allons décrire en général les antennes et leurs caractéristiques et en particulier les antennes patch, et Les systèmes GPS.
- Dans le deuxième chapitre, on s'intéresse aux métamatériaux, leurs types et leurs caractéristiques. Puis nous définirons les types des résonateurs et nous finirons par l'impact des métamatériaux sur les antennes.
- Le troisième chapitre est consacré pour la conception, simulation d'une antenne circulaire GPS par une alimentation micro ruban à base de résonateurs en anneau fendu, et une deuxième conception, simulation et réalisation d'une antenne circulaire avec une masse réduite à base de Complément résonateur en anneau fendu en C, est proposée.

Le simulateur HFSS est utilisé pour la conception et la simulation de ces deux antennes.

# Chapitre 1 Généralités sur les antennes

---

## 1.1 Introduction

L'antenne est un élément important dans le domaine de la communication pour émettre ou recevoir des informations sous la forme d'onde électromagnétique, elle est également utilisée dans plusieurs domaines tels que les systèmes de détection, de satellites et d'avions de surveillance, des réseaux de communications et GPS automobiles et de communications par satellite.

Les systèmes de réception sont devenus portables et les antennes se sont miniaturisées. L'utilisation d'antennes imprimées est devenue usuelle dans ces systèmes de radiocommunications. Le concept de ces antennes patch a été proposé dès 1953 mais il n'a été possible de réaliser efficacement qu'à partir 1970 grâce à l'arrivée sur le marché de diélectrique à faible pertes [1].

## 1.2 Généralités sur les antennes

### 1.2.1 Définition d'une antenne

Une antenne est un dispositif qui assure la transmission ou la réception de l'énergie sous forme d'onde électromagnétique. L'antenne est un élément fondamental dans un système radioélectrique et ses caractéristiques de rendement, gain, diagramme de rayonnement influencent directement les performances de qualité et de portée du système. Les principaux rôles d'antenne sont [2] :



- Permettre une adaptation correcte entre l'équipement radioélectrique et le milieu de propagation.
- Assure le transfert (émission - réception) de l'énergie dans des directions privilégiées.
- Transmettre le plus fidèlement possible une information.

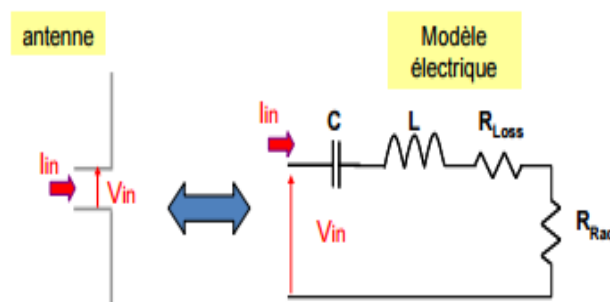
### 1.3 Les caractéristiques d'antenne

Pour décrire les performances & caractéristiques d'antennes, plusieurs paramètres sont utilisés. Ces paramètres sont classés en deux groupes :

- Un groupe qui caractérise l'antenne comme un élément de circuit électrique et qui représente son impédance d'entrée &  $S_{11}$  qui représente le coefficient de réflexion.
- Un 2eme groupe s'intéresse à ces propriétés de rayonnement: gain, diagramme de rayonnement, directivité.

#### 1.3.1 Caractéristiques électriques

On peut résumer le comportement de l'antenne passive (qui présente un comportement linéaire) ainsi : une antenne stocke des charges (comportement capacitif = stockage sous forme d'énergie électrique), s'oppose aux variations des courants qui y circulent (comportement inductif = stockage sous forme d'énergie magnétique) et dissipe une partie de l'énergie (pertes ohmiques et par rayonnement). D'un point de vue électrique, une antenne passive peut donc être modélisée par un circuit équivalent RLC [2].



**Figure 1.1.** Modèle d'impédance complexe d'une antenne[2].

### **a Impédance d'entrée**

L'impédance d'antenne est présentée comme le rapport de la tension sur le courant aux bornes de l'antenne. Afin d'obtenir un transfert d'énergie maximum  $Z_{in}$  doit correspondre exactement à l'impédance caractéristique de la ligne de transmission. Si la correspondance n'est pas respectée, une onde réfléchie sera générée de l'antenne vers la source d'énergie. Cette réflexion se traduit par une réduction du rendement global de l'antenne.

$$Z_{in} = R_{in} + j.X_{in} \quad 1.1$$

Avec :

$Z_{in}$ : Impédance d'entrée (ohms).

$R_{in}$  : Résistance d'antenne (ohms).

La partie active:

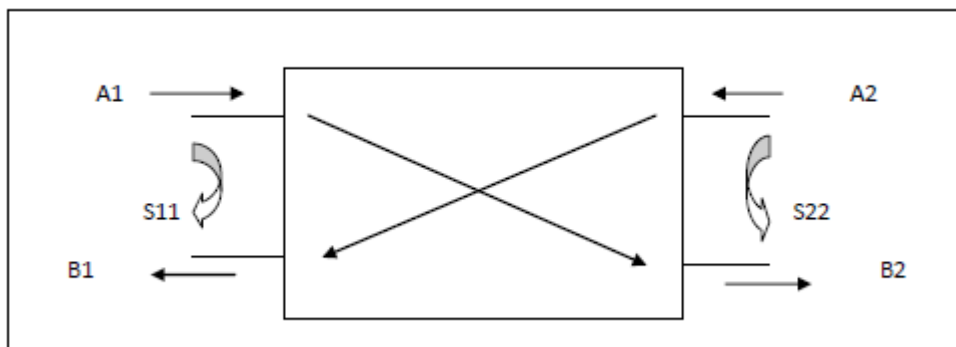
$R_{in} = R_{Ray} + R_p$  Où  $R_{Ray}$ : Résistance de rayonnement,

$R_p$ : Résistance des pertes.

$X_{in}$ : Réactance de l'antenne (ohms).

### **b Représentation en quadripôle**

Une antenne peut être représentée comme un quadripôle, défini par les paramètres S [1]:



**Figure 1.2.** Représentation en quadripôle.

$A_1, A_2, B_1$  &  $B_2$  sont des ondes de puissance.

$$B_1 = S_{11} \times A_1 + S_{12} \times A_2 \quad 1.2$$

$$B_2 = S_{21} \times A_1 + S_{22} \times A_2 \quad 1.3$$

- Le coefficient  $S_{11}$  correspond à la réflexion en entrée des quadripôles lorsque  $A_2=0$ .
- Le coefficient  $S_{12}$  représente la transmission de la puissance entrant en sortie vers l'entrée lorsque  $A_1=0$ .
- Le coefficient  $S_{21}$  est le gain du quadripôle lorsque  $A_2=0$ .
- Le coefficient  $S_{22}$  est la réflexion en sortie du quadripôle lorsque  $A_1=0$ .

### ***b.1 Coefficient de réflexion $S_{11}$***

Le coefficient de réflexion  $S_{11}$  met en évidence l'absorption de l'énergie par l'antenne. C'est sur ce paramètre que l'on se base lors de l'optimisation.

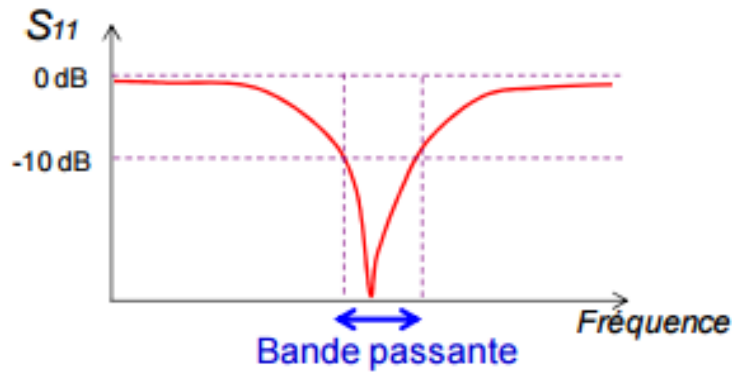
Si l'impédance caractéristique de la ligne est  $Z_0$  et l'impédance d'entrée est  $Z_{in}$ , le signal se réfléchit à l'entrée de l'antenne avec un coefficient  $\Gamma$  dont l'expression est :

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad 1.4$$

Donc on vise la réflexion minimale à l'entrée de l'antenne. Cela correspond à un coefficient de réflexion  $S_{11}$  proche de 0 (valeur linéaires). Une bonne adaptation est obtenu lorsque  $\Gamma$  est inférieur à -10dB (rapport d'onde stationnaires VSWR).

### ***c Bande passante***

La bande passante d'une antenne correspond à la bande de fréquence où le transfert d'énergie de l'alimentation vers l'antenne (ou de l'antenne vers le récepteur) est maximale. La bande passante peut être définie en fonction du coefficient de réflexion, à condition que le diagramme de rayonnement ne change pas sur cette bande. Il n'y a pas de critères précis pour la limite du coefficient de réflexion. Un critère typique est d'avoir un coefficient de réflexion inférieure à -10 dB sur la bande passante.



**Figure 1.3.** Bande passante et coefficient de réflexion.

La bande de fréquence  $\Delta f$  [1] est définie par la différence entre ces deux fréquences

$$\Delta f = f_2 - f_1 \quad 1.4$$

La largeur relative de la bande B est un pourcentage qui exprime le rapport de la bande à la fréquence central  $f_{Res}$ .

$$B_r = \frac{f_2 - f_1}{f_{Res}} \quad 1.5$$

D'un point de vue électrique, nous avons vu que l'antenne pouvait être vue comme un circuit résonant RLC. La bande passante BW (bande passante à 3 dB de la valeur du champ) est liée au facteur de qualité Q du circuit RLC à la fréquence de résonance  $f_{Res}$ . Le facteur de qualité représente la quantité de résistance présente lors de la résonance.

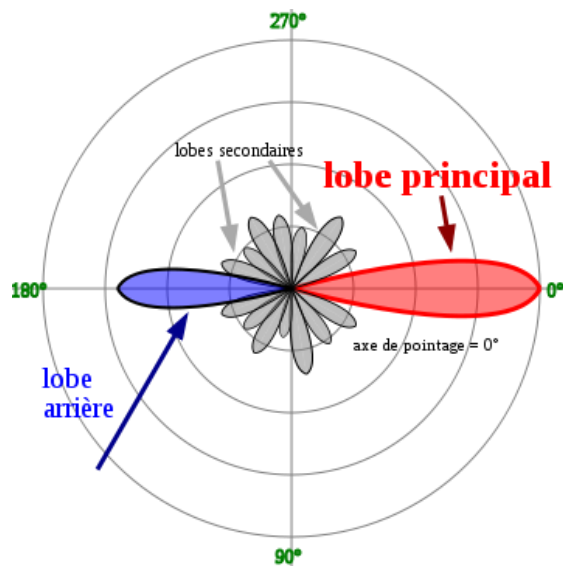
$$Q = \frac{f_{Res}}{B_r} \quad 1.6$$

Une antenne avec un fort facteur de qualité rayonne très efficacement à la fréquence de rayonnement sur une bande de fréquence très étroite, ce qui peut limiter les interférences hors bande. Cependant, si la bande passante est trop étroite, tout signal émis ou reçu près des bornes de la bande de fréquence de fonctionnement sera atténué. Une antenne avec un faible facteur de qualité est large bande mais collecte le bruit présent sur la bande de fonctionnement, dégradant ainsi la qualité du signal reçu[2].

## 1.3.2 Les caractéristiques électromagnétiques

### a Diagramme de rayonnement

Si l'antenne apparaît comme un circuit passif à deux bornes ayant une impédance d'entrée, elle est caractérisée dans l'espace par les diagrammes de rayonnement impliquant les champs électromagnétiques rayonnés. Les diagrammes de rayonnement montrent en coordonnées tridimensionnelles la variation des champs ou celle de la densité de puissance à une distance fixe  $r$  dans les directions  $(\theta, \Phi)$ . Cela revient à tracer la variation de l'intensité de rayonnement. Ainsi, les diagrammes sont et doivent être indépendants de la distance, mais ils dépendent uniquement de la direction  $\Psi = (\theta, \Phi)$  appelée direction d'observation [3].



**Figure 1.4.** Diagramme de rayonnement [4].

La fonction caractéristique de rayonnement  $(\theta, \Phi)$  de l'antenne permet d'avoir une vision globale du rayonnement. Elle est définie comme étant le rapport de la puissance transmise dans une direction donnée  $(\theta, \Phi)$  à la puissance  $P_{max}$  de la direction où le rayonnement est maximal [5].

$$P(\theta, \Phi) = \frac{P_a}{4\pi} \quad 1.7$$

### b Angle d'ouverture

Si  $G_m$  est le gain maximal d'une antenne donnée dans un plan bien déterminé, alors son ouverture dans ce plan est l'angle qui se trouve entre deux directions de ce plan ayant la moitié du gain maximal (gain à  $-3$  dB), soit  $G_m/2$ .

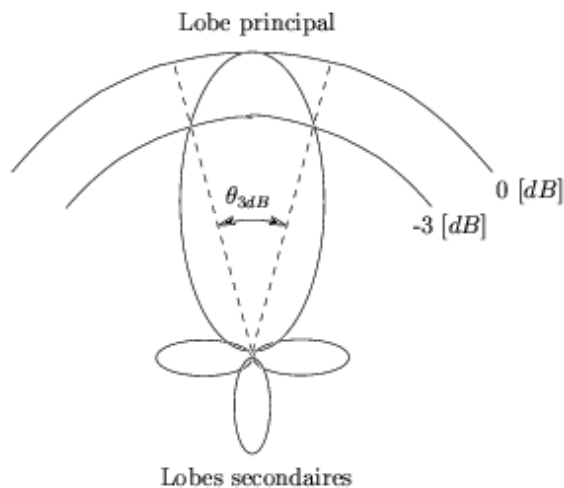


Figure 1.5. Angle d'ouverture[6].

### c Polarisation

La polarisation d'une antenne d'émission indique la direction du vecteur de son champ E par rapport au sol (la terre). La définition est étendue à l'antenne de réception, supposée émettrice. Si les distances sont suffisamment courtes pour que la terre puisse être considérée comme plate, et si les antennes ont la même polarisation, le plan de polarisation de l'antenne de réception coïncide avec le plan de polarisation de l'antenne émission. Comme montré en (A) sur la figure 1.6.

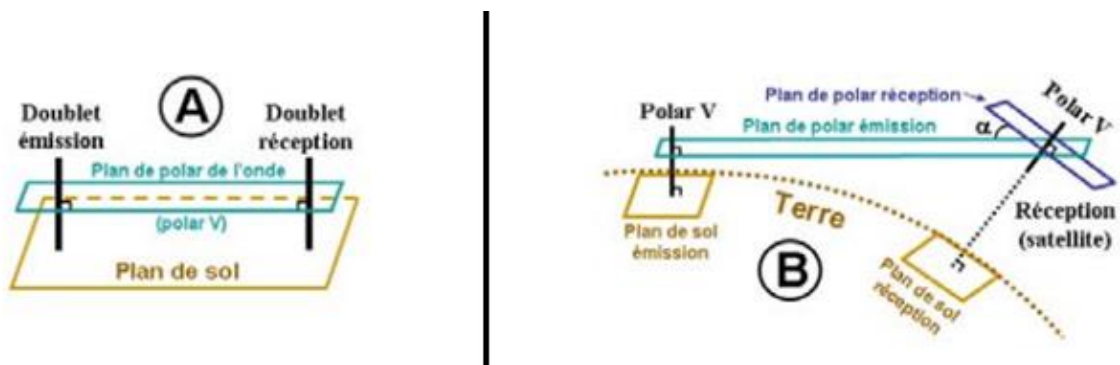


Figure 1.6. Polarisation d'antenne[7].

Pour des longues distances, ce n'est plus le cas, comme montré en (B). Ce cas correspond à une liaison satellite (la polar  $V$  est choisie pour faciliter le graphique). L'angle  $\alpha$  est l'angle de dépointage de l'antenne du satellite par rapport à la station au sol (qui n'a aucune possibilité de le réduire). Ce dépointage s'ajoute à celui occasionné par la mauvaise direction de l'antenne de la station au sol, mais il a moins d'influence sur le bilan de liaison, car l'antenne du satellite a une faible directivité.

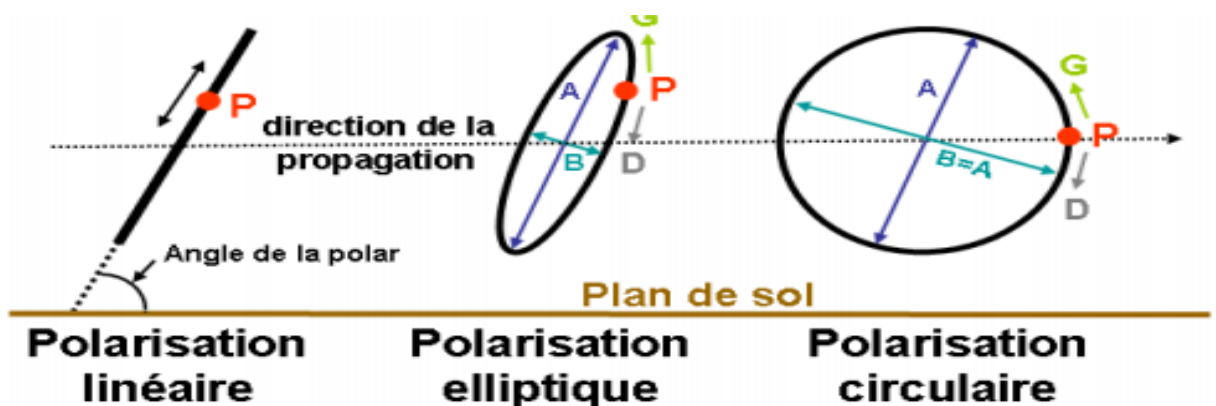
Les différents types de polarisations de l'onde électromagnétique [7]:

- Polarisation linéaire, si au cours de la propagation, le vecteur  $E$  ne change pas de direction avec la distance, nous disons que nous avons une polarisation linéaire.

- Polarisation elliptique Si au cours de la propagation, le vecteur  $E$  change de direction en synchronisme avec la longueur d'onde, nous disons que nous avons une polarisation "elliptique" (figure que décrit la direction du vecteur  $E$  sur une longueur d'onde). Si le petit axe de l'ellipse est égal à zéro, nous avons une polarisation linéaire. Si les deux axes sont égaux, nous avons une polarisation circulaire.

- Polarisation circulaire c'est un cas particulier de la polarisation elliptique lorsque les deux axes sont égaux.

La polarisation elliptique peut être "droite" ou "gauche" selon que les vecteurs tournent dans le sens négatif ou positif au cours de la propagation (en regardant l'onde s'enfuir). Tout ceci est résumé sur la figure 1.7.



**Figure 1.7.** Différentes types de la polarisation[7].

#### **d Intensité de rayonnement**

L'intensité du rayonnement d'une direction donnée est définie comme étant la puissance rayonnée d'une antenne par unité d'angle solide.

L'intensité de rayonnement est un paramètre dans le champ lointain, et elle peut être obtenue en multipliant la densité de rayonnement par le carré de la distance [8].

$$U = r^2 W_{rad} \quad 1.8$$

Avec:

- U: Intensité du rayonnement (W/unité d'angle solide).
- $W_{rad}$ : Densité de rayonnement (W/m<sup>2</sup>).
- r : Distance (m).

#### **e Directivité**

La directivité ( $\theta, \varphi$ ) d'une antenne dans une direction ( $\theta, \varphi$ ) est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée  $P(\theta, \varphi)$  et la puissance que rayonnerait une antenne isotrope [9] .

$$D(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_r/4\pi} = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_r} \quad 1.9$$

Avec:

- $P(\theta, \varphi)$ : Intensité de rayonnement(W/unité d'angle solide)
- $P_r$  : Intensité du rayonnement de la source isotrope (W/unité d'angle solide).

#### **f Gain**

Le gain est le résultat de deux effets : la directivité et les pertes.

Si G est le gain, alors :

$$G(\theta, \varphi) = \eta \times D(\theta, \varphi) \quad 1.10$$



Avec:

- $D(\theta, \varphi)$  : Directivité

- $\eta$  : Rendement de l'antenne

$$\eta = \frac{P_r}{P_f} \quad 1.11$$

Avec :

$P_r$  : Puissance rayonnée

$P_f$  : Puissance fournie.

### ***g* Axial ratio**

Le rapport axial ratio est un paramètre important qui permet de quantifier la polarisation d'une antenne.

- Le rapport axial ratio d'une onde polarisée elliptiquement est la relation entre les axes majeurs et mineurs de l'ellipse, et il peut prendre des valeurs entre un et l'infini.
- Pour une antenne ayant une polarisation linéaire pure, le rapport axial ratio tend vers l'infini, car une des composantes du champ électrique est nulle.
- Pour les antennes qui ont une polarisation circulaire parfaite, le rapport axial ratio est égale à 1 (0dB), car il faut des composantes de champ électrique du même ordre de grandeur, si elle est une antenne à polarisation elliptique, le rapport axial ratio est supérieur à 1 [5].

## **1.4 Les antennes Patch**

Le concept des antennes imprimées a été proposé dès 1953 par Deschamps mais il n'a été possible de les réaliser efficacement qu'à partir de 1970 (Howel et Muson) grâce à l'arrivée sur le marché de diélectrique à faibles pertes. Depuis, la recherche dans ce domaine n'a cessé de s'intensifier pour exploiter les nombreux avantages des antennes imprimées [10].

### 1.4.1 Composition d'antenne Patch

L'antenne patch est une antenne plane dont l'élément rayonnant est une surface conductrice généralement carrée, séparée d'un plan réflecteur conducteur par une lame diélectrique. Sa réalisation ressemble à un circuit imprimé double face, substrat, et est donc favorable à une production industrielle.

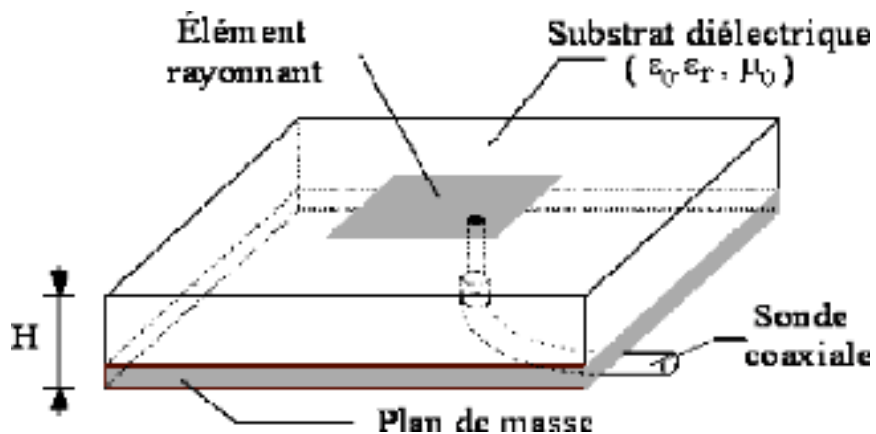


Figure 1.8. Antenne patch [11]

### 1.4.2 Avantages d'antenne Patch

- Faible poids.
- Faible volume et épaisseur réduite.
- Faible coût de fabrication.
- Compatibilité avec des circuits intégrés (antennes actives).
- Permet de réaliser des réseaux d'antennes.

### 1.4.3 Inconvénients

Ces antennes présentent malheureusement, également des désavantages :

- Largeur de bande étroite.
- Faible gain.

#### 1.4.4 Types d'antennes patch

Il existe plusieurs types d'antenne patch dont les antennes patch rectangulaire, circulaire, antenne patch à base de résonateur en anneau fendu. Ces différents types d'antennes jouent un rôle important dans la conception parce que ces derniers définissent la fréquence de résonance et la bande passante d'antenne.

#### 1.4.5 Choix du substrat et conducteur pour la conception

Le choix du substrat et du conducteur pour lesquels les caractéristiques à connaître sont :

- Pour le substrat :  $\epsilon_r$  sa permittivité relative,  $\tan \delta$  sa tangente de perte et sa hauteur  $h$ .
- Pour le conducteur : sa conductivité  $\sigma$  et son épaisseur  $t$ .

Pour la conception après le choix des caractéristiques techniques précédentes on doit:

- Définir la longueur et la largeur du patch (  $L$  et  $W$ ).
- Choisir la position et le type de l'alimentation (coaxial, micro-strip, fente).

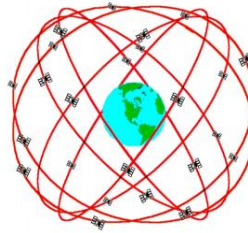
### 1.5 Principe de fonctionnement du système GPS

#### 1.5.1 Les segments GPS

Le GPS est le second système de navigation par satellite développé par les Etats-Unis, après Transit. Son développement commença dans les années 70 mais le système ne fut pleinement opérationnel que dans les années 90 lorsque la constellation initialement prévue fut atteinte. Le système GPS est composé de 3 parties distinctes, appelées encore segments [12]:

- a Le segment spatial:** est constituée actuellement d'une constellation de 31 satellites (24 initialement prévus). Ces satellites évoluent sur six plans orbitaux ayant une inclinaison d'environ 55, deux plans orbitaux étant séparés de 60. Ces orbites ont été choisies pour garantir qu'au moins six satellites soient toujours en vue de n'importe quel point du globe terrestre. Les satellites

suivent une orbite quasi circulaire de rayon orbital moyen 26560 km qu'ils parcourent en un demi jour sidéral, soit en 11h 58min 02s.



**Figure 1.9.** Répartition des satellites du système GPS[13].

**b Le segment de contrôle:** assure la surveillance de la constellation GPS a travers cinq stations réparties dans le monde (Hawaii, Kwajalein, Ascension Island, Diego Garcia, et Colorado Springs). Les données collectées sont alors centralisées à la station maitresse de Colorado Springs, où les corrections à apporter aux satellites (éphémérides, paramètres d'horloge) sont calculées. Les mises à jour sont alors transmises aux satellites via les différentes stations de contrôle.



**Figure 1.10.** Localisation du segment terrestre[13].

**c Le segment utilisateurs:** regroupe l'ensemble des récepteurs GPS qui réalisent le calcul de positionnement en temps réel. Le GPS propose deux types de services : le standard positioning system (SPS) accessible à tous et le précise positioning system (PPS) réservé à des utilisateurs habilités par le ministère de la défense américaine. Le troisième type de service consistait en la

dégradation volontaire du signal GPS, connu sous le nom de sélective availability (SA). Ce service fut interrompu le 1er Mai 2000.



**Figure1.11.** La géo-localisation par principe de triangulation[14].

## **1.5.2 Les sources d'erreurs**

En dehors de la dégradation volontaire du signal par les militaires américains, il existe des facteurs dits "naturels" qui limitent la précision du GPS. Nous pouvons citer dans l'ordre de leur influence sur la perte de précision: la réfraction dans l'ionosphère, la réfraction dans la troposphère, la précision du positionnement des satellites GPS et les phénomènes de multi-trajets [15].

### ***a La réfraction dans l'ionosphère***

L'onde porteuse du signal GPS doit pénétrer dans la couche d'ionosphère sur son trajet. Le fait que cette couche ne soit pas neutre, au niveau de sa charge, entraîne une perturbation de la vitesse de l'onde électromagnétique qui se propage. Le temps mis par l'onde GPS est modifié d'une durée inconnue, nommée délai ionosphérique. L'évaluation de la distance entre le satellite et la station sera faussée, la précision donc diminue par ce premier phénomène.

### ***b La réfraction dans le troposphère***

De la même façon, le temps de propagation de l'onde GPS est affecté par la teneur en vapeur d'eau de la couche basse de l'atmosphère (de 0 à 10 km d'altitude) : la troposphère.

### ***c La précision des orbites des satellites GPS***

Il est évident qu'il y a une erreur sur la position du satellite émetteur, cette erreur va se répercuter directement sur la position affichée par le récepteur. L'orbite des satellites GPS peut être calculée très précisément, mais elle est rendue publique par les militaires américains avec une précision de l'ordre de 200 m. Sur 20000 km cela donne une erreur de 10 cm sur une ligne de base de 10 km. Cette erreur est handicapante pour les domaines réclamant une grande précision, notamment dans le domaine de la surveillance de plaques tectoniques.

### ***d Les multitrajets***

Ces phénomènes sont parmi les plus difficiles à appréhender. Il est clair que tout objet réflecteur placé dans le voisinage de l'antenne de la station GPS, peut renvoyer une partie du signal provenant du satellite sur cette antenne. Le réflecteur crée une image de l'antenne GPS. C'est la position de cette antenne virtuelle que l'on risque alors de mesurer en lieu et place de la véritable antenne. Il n'y a pas vraiment de remèdes aux problèmes des multi trajets. Un "blindage" des antennes contre les réflexions parasites est utilisé.

## **1.6 Les systèmes GPS**

### **1.6.1 Propriétés**

- Le nombre d'utilisateurs du système est illimité (le système n'est jamais saturé).
- Les systèmes GPS permettent de se positionner très précisément à la fois dans l'espace par rapport à un modèle de référence terrestre et dans le temps par rapport à un temps de référence .
- En déployant un nombre suffisant de satellites, le service de positionnement offre une couverture mondiale.
- En optimisant la géométrie de la constellation (nombre et position des satellites en orbite), les performances offertes sont homogènes sur l'ensemble du globe.

Ces propriétés font de GPS l'un des systèmes de navigation dits « globaux », ou GNSS (Global Navigation Satellite System). Cela constitue une rupture technologique dans tous les domaines d'activité qui exploitent une information de positionnement ou qui peuvent se développer grâce à une information de positionnement globale.

La question de la compatibilité de système GPS, et en particulier de leurs références de positionnement et de temps. Dès maintenant, nous pouvons comprendre que ces systèmes établissent de fait, grâce aux signaux qu'ils délivrent à tous les usagers et à leur couverture globale, une norme et une référence universelle pour le positionnement dans l'espace et dans le temps [13].

### 1.6.2 Applications du système GPS

Quelques applications du GPS :

- La navigation, depuis les récepteurs portables, les navigateurs de véhicules, jusqu'aux centrales de navigation des aéronefs et navires.
- Télécommunications.
- La topographie, en constructions ou travaux publics.
- La géophysique, par exemple la surveillance des failles.
- La gestion de réseaux de transport, bus, remorques.
- La surveillance des zones de pêche [12].

Le tableau qui suit représente les bandes fréquences du système GPS :

Systeme	Bandes	Porteuses	$F_{min}$ (MHz)	$F_{max}$ (MHz)
GPS	L1	1575.42	1563	1587
	L2	1227.6	1215	1237
	L3	1176.45	1164	1191

**Tableau1.1** Les bandes de fréquence du système GPS.

## **1.7 Conclusion**

Dans ce chapitre, on a défini les antennes et leurs caractéristiques de base selon les deux modèles électrique et électromagnétique, puis nous avons présentés les antennes patch et leurs avantages et inconvénients. A la fin, on a cité les principes fondamentaux du système GPS et ces propriétés et différentes applications.



# Chapitre 2 Métamatériaux

---

## 2.1 Introduction

Depuis une décennie, on observe une activité scientifique croissante traitant de matériaux aux propriétés fabriquées non disponibles naturellement. Une part importante de ces travaux est notamment dédiée à la recherche de solutions de miniaturisation d'antenne pour des applications hyperfréquences. Les métamatériaux sont aujourd'hui devenus un domaine de recherche incontournable grâce à leurs propriétés singulières qui promettent de répondre aux besoins des applications microondes et optiques modernes. On entend par métamatériaux des structures composites complexes, avec en général une répétition périodique, dont le comportement macroscopique présente des caractéristiques inédites, parfois surprenantes, comme un indice de réfraction négatif. Si l'on combine deux ou plusieurs matériaux, par exemple des inclusions métalliques intégrées au sein d'une matrice diélectrique, le matériau résultant est un composite électromagnétique artificiel. Le nouveau matériau ainsi obtenu se comportant de façon différente est usuellement appelé métamatériau ou matériau composite artificiel. Ainsi, ces particularités peuvent fournir plus de degrés de liberté dans l'obtention des fonctionnalités désirées par un réarrangement adéquat de la composition du matériau. Même s'il s'agit généralement de structures périodiques, diélectriques ou métalliques, qui se comportent comme un matériau homogène n'existant pas à l'état naturel, cette classe de matériaux peut tout aussi bien inclure les composites contenant des inclusions ferromagnétiques que ferrimagnétiques. [16]

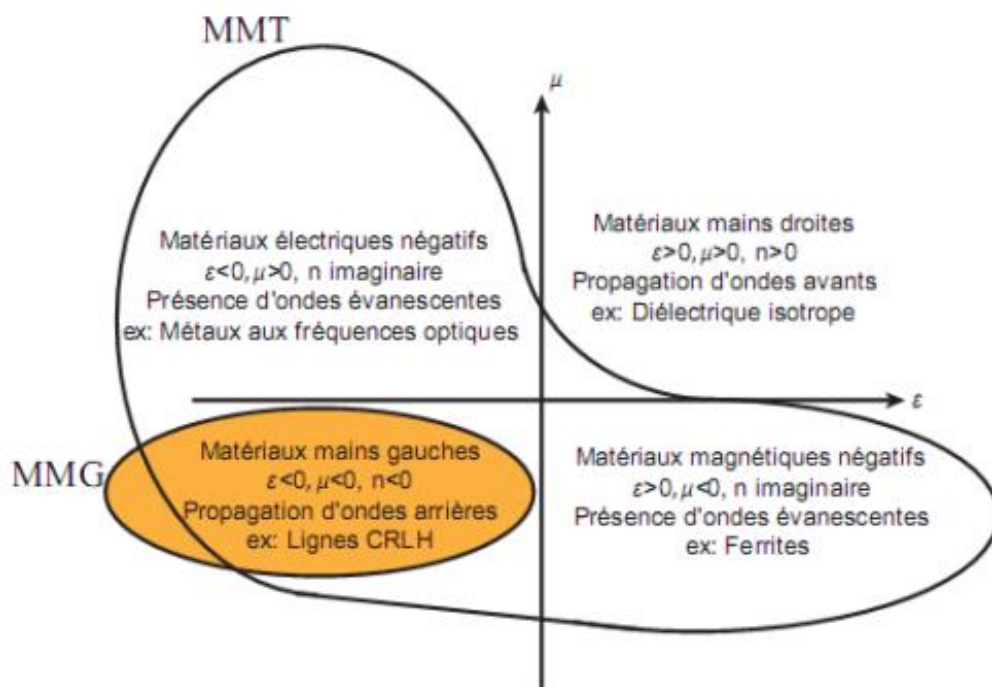
## 2.2 Définition des métamatériaux

Du point de vue sémantique, le préfixe "méta" signifie "au-delà de" en grec, le terme métamatériau désigne donc une classe de matériau dont les propriétés vont d'une certaine manière au-delà de celles des matériaux classiques. Plus précisément, on entend par cela des milieux dont la structure interne interagit avec une onde incidente (acoustique ou électromagnétique) de sorte à créer des propriétés macroscopiques dites "effectives" inhabituelles, voire inobservées dans les matériaux naturels. [17]

Il existe différents types de métamatériaux mais ils sont en général composés de deux parties : le substrat et les résonateurs.

La nature produit déjà plusieurs matériaux qui ont  $\varepsilon < 0$ , les plasmas et les métaux sont des exemples, mais  $\mu < 0$  ne se produit que dans des structures artificielles.

On peut alors chercher à représenter l'ensemble des matériaux dans un plan contenant toutes les valeurs (réelles) possibles de  $\mu$  et  $\varepsilon$ . Pour des fréquences supérieures à quelques dizaines de gigahertz, les matériaux naturels ont une perméabilité  $\mu$  très proche de 1, se rangeant autour de la ligne  $\mu = 1$ . On appelle diélectriques ceux de ces matériaux qui possèdent une permittivité  $\varepsilon$  positive et métaux ceux qui ont une permittivité négative (en-dessous d'une certaine fréquence plasma). En examinant cette figure, il apparaît clairement que les matériaux naturels ne représentent qu'une petite partie des valeurs possibles de  $\varepsilon$  et  $\mu$ . Les métamatériaux ont ainsi pour ambition, du moins dans le principe, d'explorer les propriétés des matériaux occupant le reste du plan  $(\mu, \varepsilon)$ . [17]



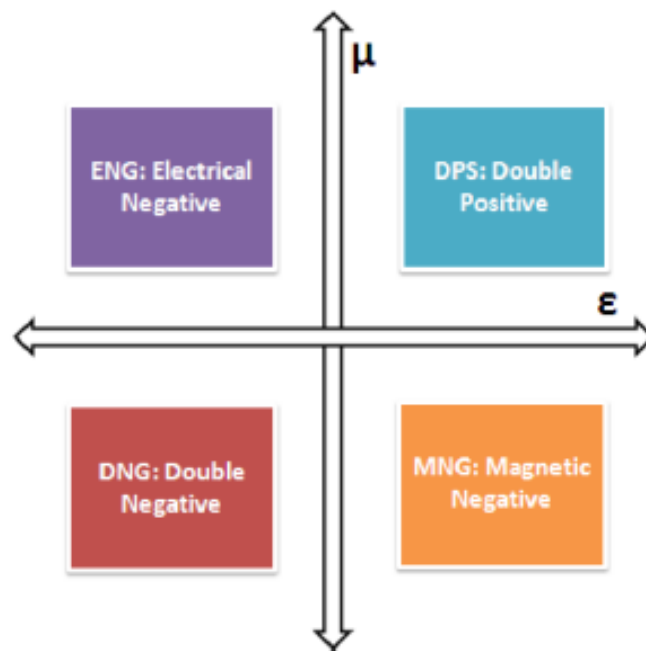
**Figure 2.1.** Classement des matériaux en fonction du signe de leur permittivité  $\varepsilon$  et de leur perméabilité  $\mu$ [17].

La figure 2.1 montre les quatre types de matériaux dont :

(+, -) correspond aux matériaux ferromagnétique sur certaines bandes de fréquences. (-, +) correspond aux plasmas ainsi qu'aux métaux à des fréquences optiques. La dernière configurations, (-, -), appartient à la classe des MMT dits main gauche (MMG).

## 2.3 Classification des Métamatériaux:

Nous distinguons dans le domaine des micro-ondes quatre catégories de matériaux et ceci selon le signe de leur permittivité et perméabilité. Dans le cadre de ce rapport, nous mettons l'accent sur la conception et le déploiement des matériaux de type MNG [18].



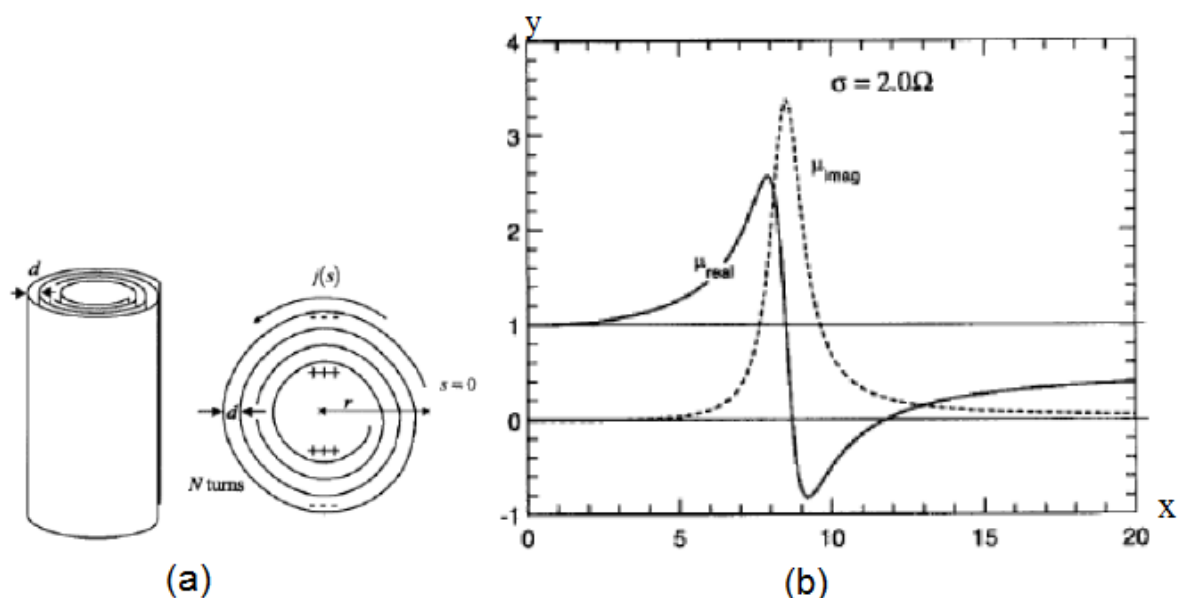
**Figure 2.2.** Classes de Matériaux en fonction du signe de la permittivité et la perméabilité.

### 2.3.1 Les Matériaux doublement positifs (DPS)

Les matériaux DPS (*Double Positive*) sont les matériaux qui présentent des paramètres intrinsèques positifs et non nuls ( $\epsilon > 0$  et  $\mu > 0$ ). Les matériaux diélectriques et magnétiques font partie de cette catégorie.

### 2.3.2 Les Matériaux à perméabilité négative (MNG):

L'idée innovante derrière la mise en place des matériaux à perméabilité négative réalisée par des matériaux ordinaires métallo-diélectrique n'ayant pas forcément une activité magnétique tels que les ferromagnétiques, est l'exploitation des courants de conduction générés à la surface des métaux lorsque ceux-ci sont soumis à une onde incidente émanant d'une source électromagnétique. Pour certaines configurations, les courants générés dans le conducteur peuvent être suffisamment importants pour assurer un phénomène Métamatériau même si la taille des motifs vérifie la condition d'homogénéité ( $\ll \lambda$ ). En 1999, J. Pendry a été le premier à exploiter l'idée en introduisant une configuration originale incluant un réseau de structures métalliques sous la forme d'un rouleau suisse (Swiss-Roll) figure 2.3. C'est une structure artificielle à résonance magnétique sans avoir recours à un matériau magnétique. L'axe des X représente l'axe des fréquence et l'axe des Y l'amplitude (valeur).



**Figure 2.3.** (a) Le rouleau suisse (Swiss-Roll) de Pendry (b) la variation de la perméabilité effective réelle et imaginaire en fonction de la fréquence[18].

Chaque élément unitaire est basé sur un cylindre de rayon  $R$  sur lequel est enroulée une spirale conductrice isolée de  $N$  tours. L'espacement entre deux tours consécutifs est noté  $d$ . Quand un champ magnétique excite la structure, un courant est induit dans le conducteur et une capacité équivalente est créée. La structure (Swiss-Roll) est

considérée comme un milieu homogène puisque la plus grande dimension de cette inclusion est très inférieure à la longueur d'onde d'excitation.

La relation de la perméabilité effective est donnée donc par :

$$\mu_{eff} = 1 - \frac{F}{1 + \frac{2\sigma i}{\omega R \mu_0 (N-1)} - \frac{dc_0^2}{2\pi^2 \omega^2 R^3 (N-1)}} \quad 2.1$$

Avec :

$c_0$  : Célérité de la lumière dans le vide ;

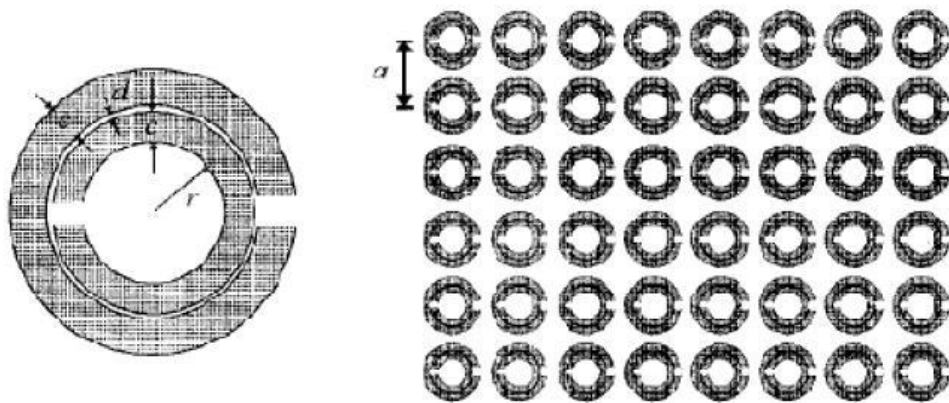
$\omega$  : Pulsation angulaire ;

$\sigma$  : Conductivité du métal de la spire ;

$\epsilon$  : Permittivité de la matière isolante entre les feuille conductrices de la spire ;

$\mu_0$  : Perméabilité du vide ;

$F$  : Volume de la structure.



**Figure 2.4.** Configuration du Métamatériau MNG à base des SRR proposée par J.Pendry[18].

Dans le but de remédier aux imperfections de la structure (Swiss-Roll) en termes d'absorption qui est liée au facteur de remplissage. Une optimisation de la structure a été ensuite proposée par la même équipe. Il s'agit de la structure SRR (*Split Ring Resonator*).

La structure SRR est composée de deux résonateurs en boucles métalliques imbriquées sous forme de la lettre C. Quand un champ magnétique  $\vec{H}$  est appliqué en parallèle à l'axe des boucles, selon les deux équations (2.3 et 2.4), un courant est ensuite induit sur les résonateurs et une activité magnétique apparaitre.

$$\vec{B} = \mu_{eff} \cdot \mu_0 \cdot \vec{H} \quad 2.2$$

$$\vec{D} = \varepsilon_{eff} \cdot \varepsilon_0 \cdot \vec{E} \quad 2.3$$

Après le calcul de la force électromotrice  $fem$  sur les mailles formées par chacune des deux boucles de la SRR l'expression de la perméabilité effective est donnée par :

$$\mu_{eff} = 1 - \frac{F}{1 + \frac{2\sigma i}{\omega R \mu_0} - \frac{3}{\pi^2 \mu_0 \omega^2 C r^3}} \quad 2.4$$

$F$  est le volume occupé par une cellule unitaire appartenant au réseau global,  $r$  est le rayon de l'anneau interne,  $a$  la périodicité du réseau et  $d$  est la distance entre deux cellules unitaires adjacentes.

Le volume  $F$  et la capacité  $C$  créée par le gap intra-cellules adjacentes s'écrivent sous les formes suivantes :

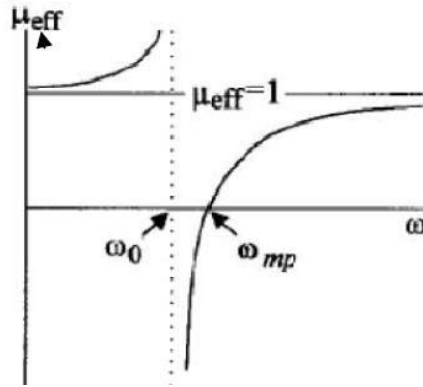
$$F = \frac{\pi r^2}{a^2} \quad 2.5$$

$$C = \frac{\varepsilon_0}{d} = \frac{1}{d \mu_0 c_0^2} \quad 2.6$$

Un développement de l'équation 2.5 conduit à une expression de la perméabilité effective simplifiée en fonction principalement de la pulsation de résonance  $\omega_0$  et la pulsation du plasma magnétique  $\omega_{pm}$  :

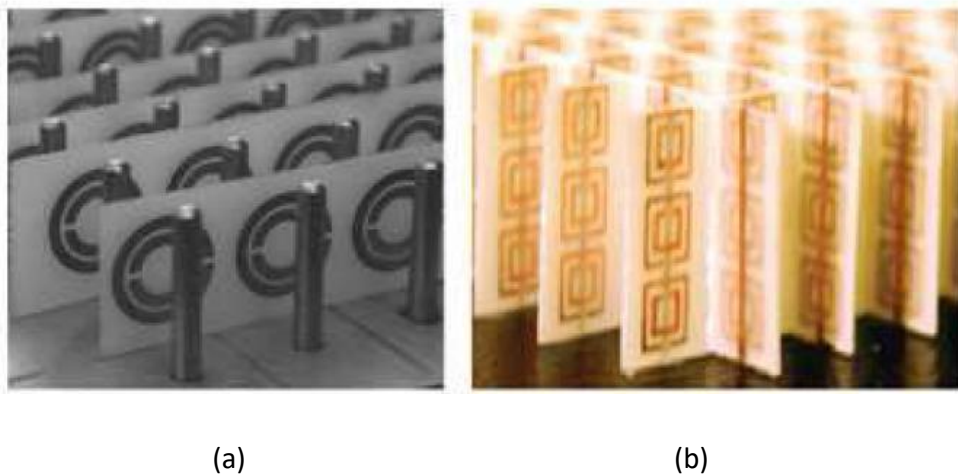
$$\mu_{eff} = 1 - \frac{F}{\omega^2 - \omega_0^2 + i\gamma\omega} \quad 2.7$$

Les Split Ring Resonator présentent au dessus de leurs fréquences de résonance une bande étroite pour laquelle la perméabilité passe en dessous de zéro (Figure 2.5). Le phénomène Métamateriau magnétique est observé entre la fréquence de résonance  $\omega_0$  et la fréquence du plasma magnétique  $\omega_{pm}$ .



**Figure 2.5.** Représentation de la perméabilité effective en fonction de la fréquence selon l'équation 2.7.

En se basant sur les structures originales de J.Pendry, les chercheurs ont espéré alors réaliser et caractériser expérimentalement ces matériaux mystérieux. Et ce n'est qu'en 2001 qu'une structure Métamatériau a vu le jour (Figure 2.6). L'équipe de D.R.Smith a réalisé une structure à base d'un réseau de SRR avec des tiges métalliques, elle a ensuite proposé une structure planaire améliorée fonctionnant dans le domaine des micro-ondes (Figure 2.6.b), pour proposer après une méthodologie de caractérisation expérimentale des propriétés de Métamatériau sur la base de la mesure des paramètres S [11].



**Figure 2.6.** (a) Premier Prototype Métamatériau proposé par l'équipe de D.R.Smith (b) prototype amélioré[18].

### 2.3.3 Les Matériaux à permittivité négative (ENG)

Selon le modèle de Drude, les métaux ne sont pas des milieux préparatifs à partir d'une certaine fréquence qui est la fréquence Plasma électrique ( $\omega_{pe}$ ). En fait, en dessous de cette fréquence les métaux présentent une permittivité négative.

$$\epsilon_{\text{eff}} = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2 + i\omega\omega_c} \quad 2.8$$

Avec :

$\omega_{pe}$  : Pulsation du plasma électrique

$\omega_c$  : Pulsation de collision

J.Pendry, proposa de réaliser un plasma artificiel en diluant le milieu métallique afin d'abaisser sa fréquence plasma et de satisfaire les conditions d'obtention d'une permittivité négative en dessous de l'ordinaire.

Sachant que la fréquence plasma électrique s'écrit sous la forme suivante :

$$\omega_{pe}^2 = \frac{\rho e^2}{\epsilon_0 m_{eff}} \quad 2.9$$

Avec :

$\rho$  : Densité des électrons ;

$e$  : Charge des électrons ;

$m_{eff}$  : Masse effective des électrons.

La démarche consistait à réaliser un réseau d'inclusions métalliques plus lourdes et ayant une densité d'électrons plus faible. La configuration retenue (Figure 2.7) se base sur un réseau de tiges métalliques de rayon  $r$ , avec un pas du réseau  $a$ . La fréquence de plasma pour cette configuration devient :

$$\omega_{pe}^2 = \frac{2\pi c_0^2}{a^2 \ln(a/r)} \quad 2.10$$



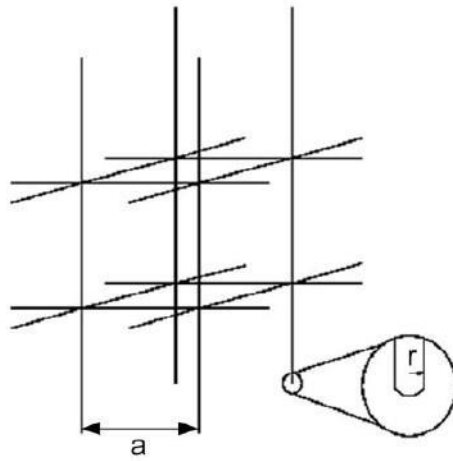


Figure 2.7. Métamatériau ENG forme par un réseau de tige métallique[18].

### 2.3.4 Les Matériaux doublement négatifs (DNG)

Les matériaux DNG sont les matériaux ayant simultanément une permittivité et une perméabilité négative, ces Métamatériaux peuvent être réalisés par des cellules "imbriquées" ou des cellules "combinées".

Le premier type imbrique deux cellules unitaires basiques : une cellule de type MNG, et une cellule de type ENG. A la résonance cette cellule composite montre un phénomène doublement négatif, comme exemple de ce type, la cellule (SRR+Tige) réalisée par l'équipe de D.R.Smith (Figure 2.8.a). Cette cellule imbrique deux cellules unitaires basiques : la SRR ayant une activité magnétique et le réseau de tiges responsable de l'activité électrique. A la résonance cette cellule composite montre un phénomène doublement négatif (Figure 2.8.b).

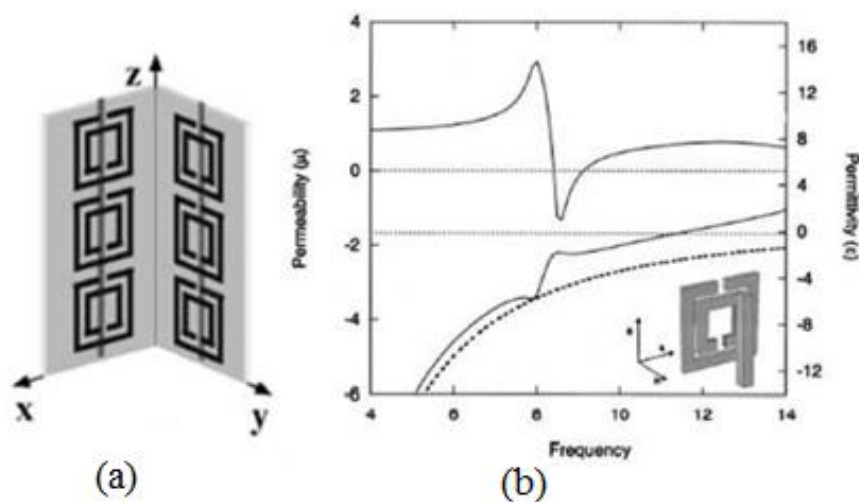
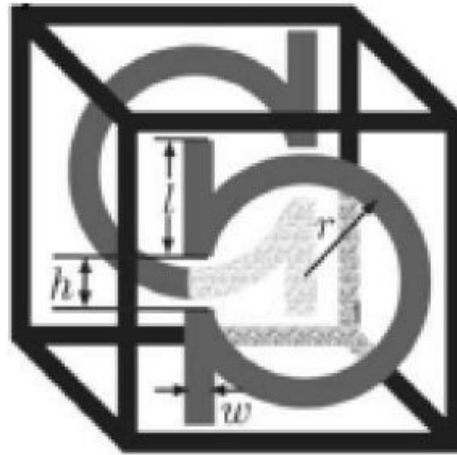


Figure 2.8. (a) cellule DNG- "SRR+Tige" (b) perméabilité et permittivité de la cellule "SRR+Tige"[18].

Le deuxième type est basé sur un seul motif responsable sur une double activité simultanément. Comme exemple, la cellule DNG ayant l'allure de la lettre grec «  $\Omega$  » a été introduite par l'équipe de N.Engeta (Figure 2.9), et repoussée par H.Griguer.



**Figure 2.9.** Cellule DNG sous forme de «  $\Omega$  »[18].

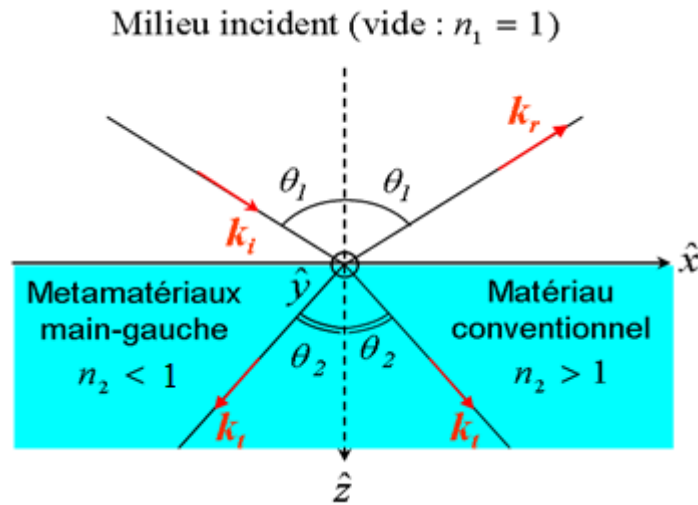
## 2.4 Applications des métamatériaux

Les métamatériaux ont trouvés des applications potentielles. Les supers lentilles utilisées pour la super-résolution en imagerie médicale, imagerie optique et la détection non destructives. Aussi ces métamatériaux sont appliqués dans le domaine des microondes et applications propres aux antennes. Des antennes résonantes miniaturisés peuvent être obtenues en utilisant les métamatériaux.

## 2.5 Les résonateurs

Nous consacrons cette partie à l'étude des métamatériaux qui ont un comportement magnétique constitué de boucles magnétiques. Les résonateurs peuvent être de taille et de géométries différentes suivant le type d'ondes étudié. Cependant, ils ont généralement une forme carrée ou circulaire et sont disposés périodiquement. Ces éléments, construits à partir de matériaux naturels tels que du cuivre ou du silicone, font en effet office de résonateurs et permettent ainsi de guider les ondes à travers le métamatériau comme voulu. Ces résonateurs sont en effet des dipôles électriques et magnétiques artificiels qui sont dotés d'une perméabilité  $\mu$  et d'une permittivité

$\epsilon$  négatives ce qui leur permet d'avoir un milieu se comportant comme si l'indice de réfraction était négatif  $n < 0$ .

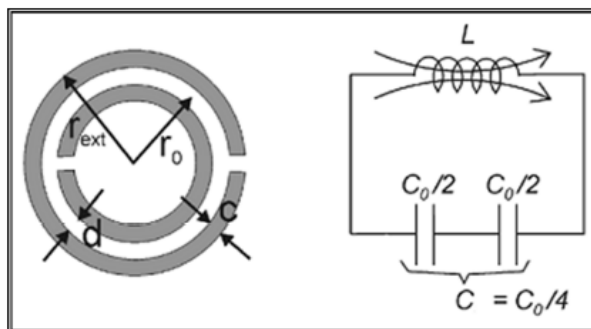


**Figure 2.10.** Réfraction dans un matériau d'indice négatif (métamatériau).

## 2.5.1 Types de résonateurs

### a Résonateur en anneau fendu circulaire (SPLIT RING RESONATOR)

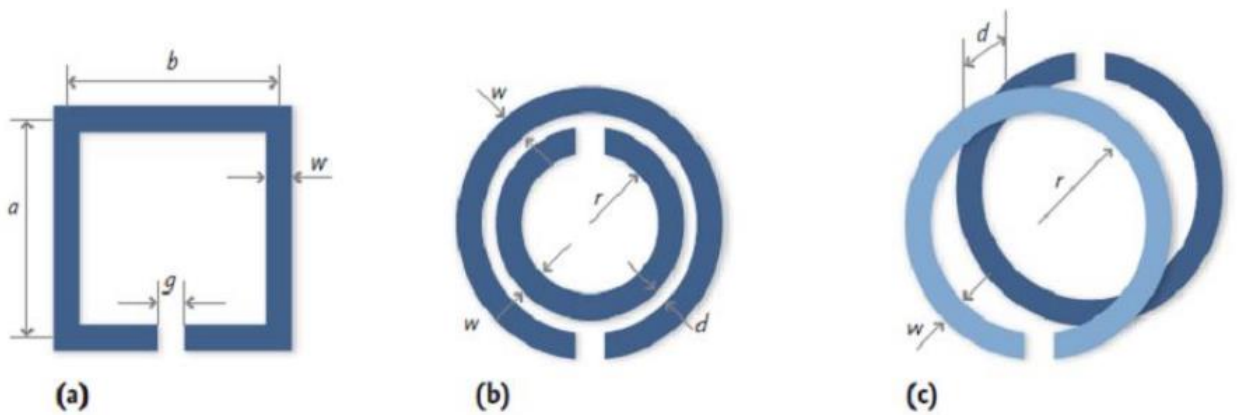
Le SRR est formé de deux anneaux métalliques concentriques ouverts (figure 2.11). Le résonateur peut être excité par un champ magnétique externe axial (direction  $z$ ) variant dans le temps, ce qui induit des courants dans les anneaux.



**Figure 2.11.** Représentation d'un résonateur en anneau fendu (SRR) et son circuit équivalent[19].

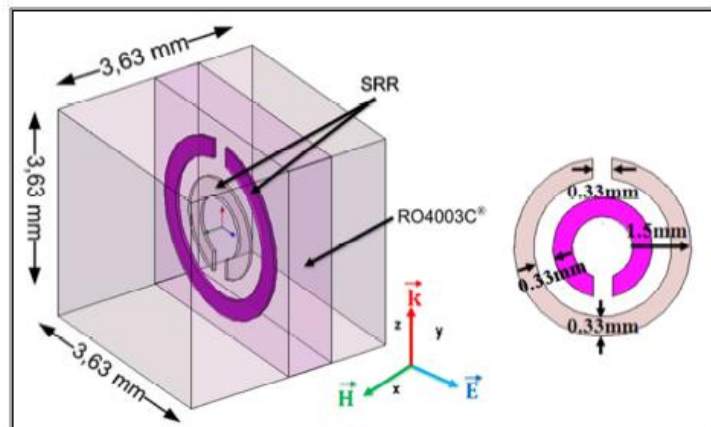
Les fentes présentes dans les anneaux des forces de passage du courant permettent le déplacement du courant entre eux. La boucle de courant est donc fermée à travers la distribution de la capacité qui apparaît entre l'intérieur et la bague extérieure (capacité

de bord). Le résonateur peut être modélisé comme le montre la figure 2.11.  $L$  est la self-inductance du résonateur et  $C_0/2$  est la capacité en relation avec chacune des deux moitiés SRR.  $C_0$  peut être obtenu tel que  $C_0 = 2\pi C_{pul}$ . Où  $C_{pul}$  représente la capacité par unité de longueur entre les anneaux qui forment le résonateur. En ce qui concerne  $L$ , il peut être rapproché de l'inductance d'un seul anneau avec le rayon moyen du résonateur et la largeur des anneaux,  $c$ . Il y a deux caractéristiques du SRR qui le rendent particulièrement intéressant. L'une d'eux est sa petite taille électrique. [20]



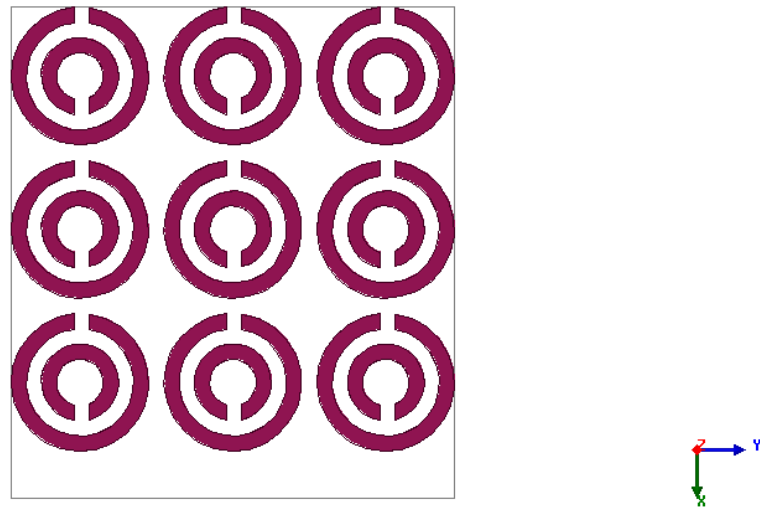
**Figure 2.12.** Géométries de SRR utilisés pour réaliser des matériaux magnétiques artificiels.

Dans cette section, nous considérons le résonateur en anneau fendu de forme circulaire et on le simule pour vérifier les fréquences de résonance. Donc on a créé un réseau de cellules circulaires avec les conditions de périodicités appliqués sur la cellule unitaire présentée dans la figure 2.13.



**Figure 2.13.** Représentation et dimensions d'une cellule RAF circulaire.

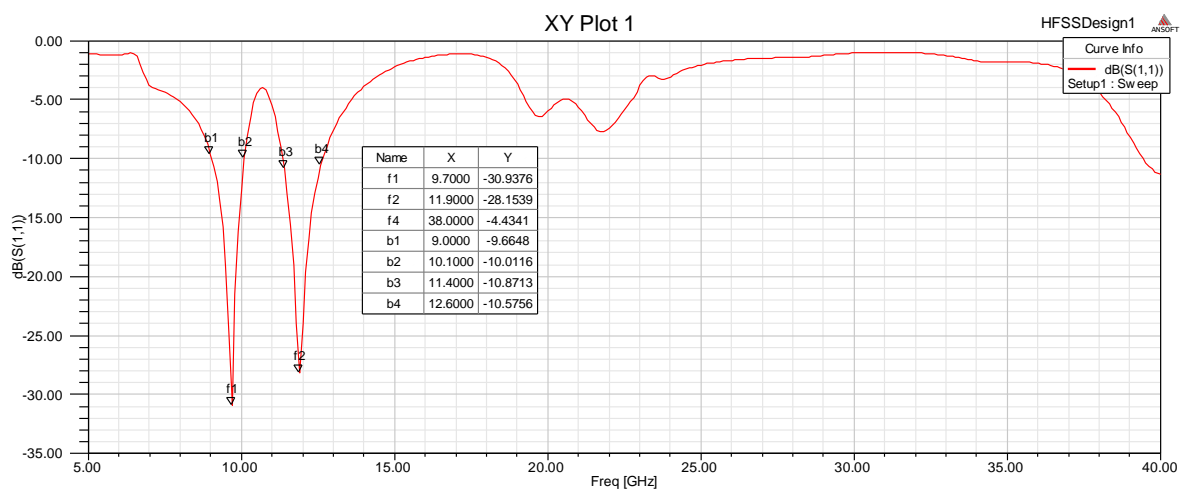
La figure 2.14 représente le réseau des résonateur en anneau fendu circulaire qui sera simulé pour vérifier la bande de fréquence de résonance.



**Figure 2.14.** Un réseau RAF circulaire.

Le réseau est composé de 9 cellules de résonateurs en anneau fendu circulaire (3x3). Les dimensions de la cellule unitaire sont représentés dans la figure 2.13. Ce réseau est excité par une ligne d'alimentation d'une longueur de 10mm et largeur de 1mm. Le substrat utilisé est le Epoxy-FR4 avec une épaisseur de 0.8mm. La simulation est faite avec l'outil HFSS.

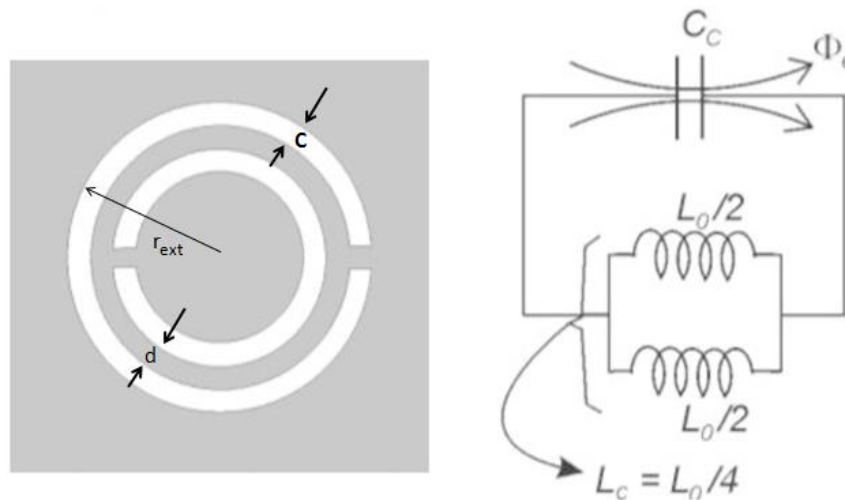
La figure 2.15 représente le coefficients de réflexion  $s_{11}$ .



**Figure 2.15.** Coefficient de réflexion d'un réseau RAF circulaire.

Cette figure (2.15) montre que le réseau fonctionne en bande X avec deux fréquences de résonance: 9.7GHz et 11.9GHz et cela vérifie les résultats de M.BUROKUR [21].

**b Complémentaire résonateur en anneau fendu circulaire**

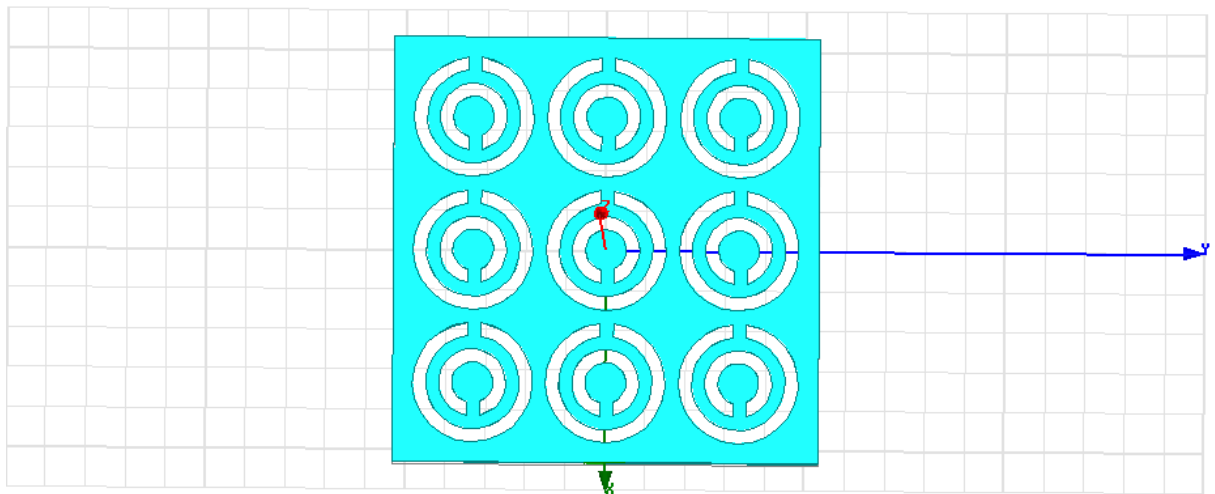


**Figure 2.16** Représentation d'un complémentaire résonateur en anneau fendu (CSRR) et son modèle de circuit équivalent [19].

Les CSRRs, une double contre partie du SRR ou parfois appelé «fente split-résonateur en anneau», sont constitués de fentes qui ont la même dimension que le SRR correspondant. Par le principe de la dualité, les propriétés du CSRRs sont en relation duelle avec les propriétés des SRR. Les SRR se comportent comme un dipôle magnétique ponctuel, alors que les CSRRs présentent un dipôle électrique ponctuel avec polarisation négative. Dans les CSRRs, le champ  $\vec{E}$  est appliqué parallèlement au plan des CSRRs afin de générer un fort dipôle électrique qui affecte la fréquence de résonance des CSRRs. Les CSRRs, comme le montre la figure 2.17, peuvent être utilisés pour obtenir la permittivité effective négative d'un milieu. Les deux SRR et CSRRs présentent approximativement la même fréquence de résonance en raison de leurs dimensions partagées. [20]

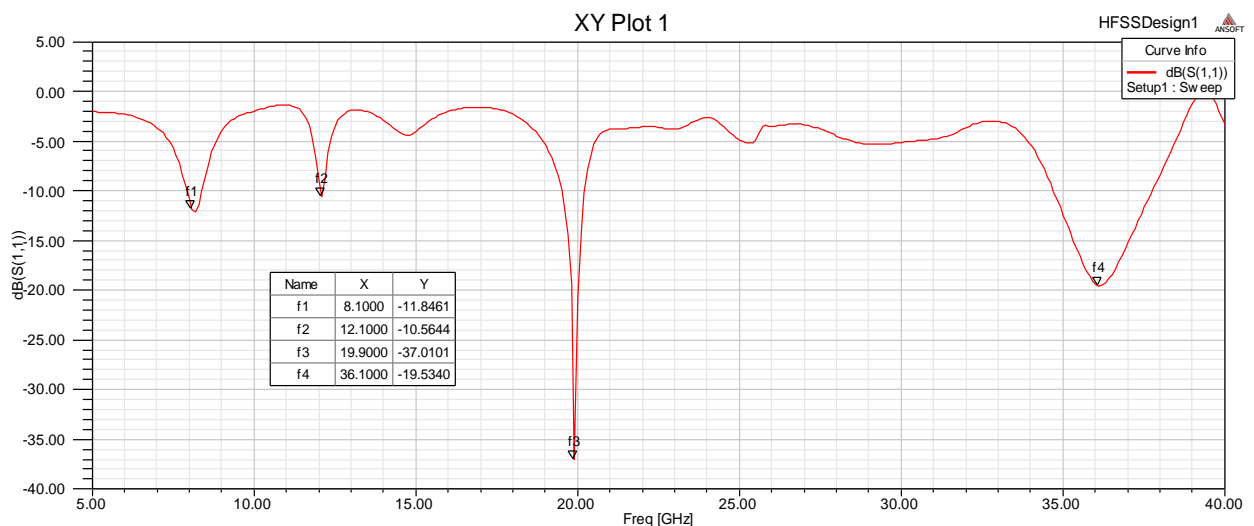
La figure 2.17 représente le réseau C-RAF qui sera simulé pour vérifier la bande de fréquence de résonance. Le réseau est composé de 9 cellules complémentaires résonateurs en anneau fendu circulaire (3x3). Ce réseau est excité par une ligne

d'alimentation d'une longueur de 10mm et largeur de 1mm. Le substrat utilisé est le Epoxy-FR4 avec une épaisseur de 0.8mm. La simulation est faite avec l'outil HFSS.



**Figure 2.17.** Un réseau de C-RAF circulaire.

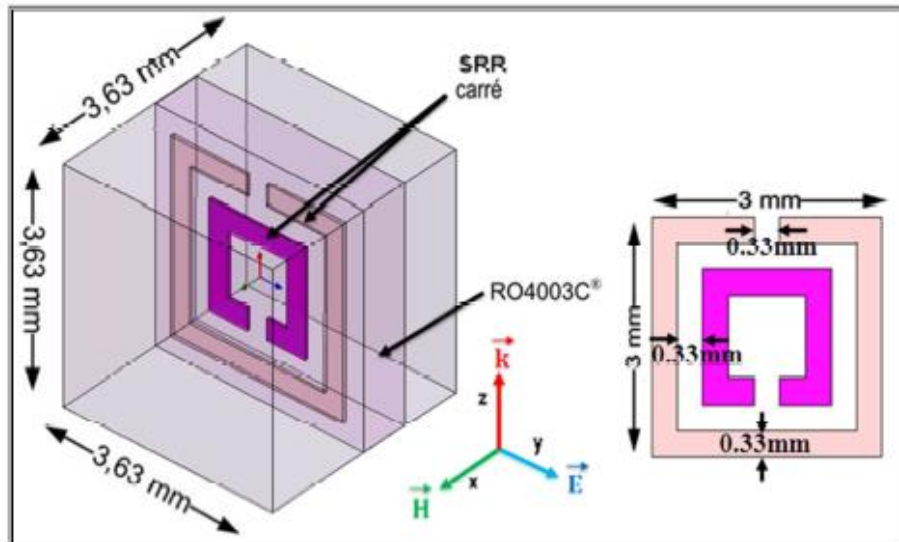
La figure 2.18 représente le coefficient de réflexion  $s_{11}$ . On observe que le réseau fonctionne en bande X avec deux fréquences de résonance: 8.1GHz et 12.1GHz et cela vérifie la théorie de M.BUROKUR. On a deux autres fréquences de résonance: 19.9GHz et 36.1GHz. Ces deux derniers sont des fréquences générées par rapport aux dimensions d'antenne est correspond à fonctionnement ordinaire de l'antenne.



**Figure 2.18.** Coefficient de réflexion d'un réseau C-RAF circulaire.

### c Résonateur en anneau fendu carré

Le SRR est formé de deux anneaux métalliques carrés concentriques ouverts (figure 2.19). La structure reste la même que dans la section précédente sauf la forme du RAF qui change. Les différentes dimensions du RAF carré pour un fonctionnement en bande X [8,2 GHz ; 12,4 GHz] sont données sur la figure 2.19 [21].

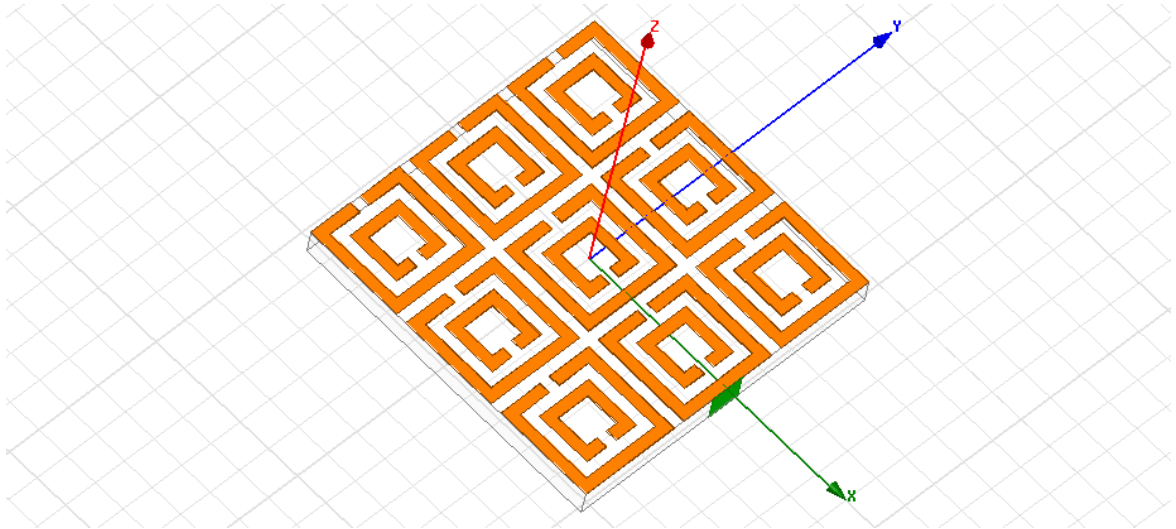


**Figure 2.19.** Représentation et dimensions d'une unité de cellule du RAF carré.

Dans cette section, nous considérons le RAF de forme carrée et on le simule pour vérifier les fréquences de résonance. Donc on a créé un réseau de cellules carrées avec les conditions de périodicités appliqués sur la cellule unitaire présentée dans la figure 2.19 et un vide entre les cellules de 0.33mm. Le réseau est composé de 9 cellules de résonateurs en anneau fendu carrés (3x3). Ce réseau est excité par une ligne d'alimentation d'une longueur de 10mm et largeur de 1mm. Le substrat utilisé est le Epoxy-FR4 avec une épaisseur de 0.8mm. La simulation est faite avec l'outil HFSS

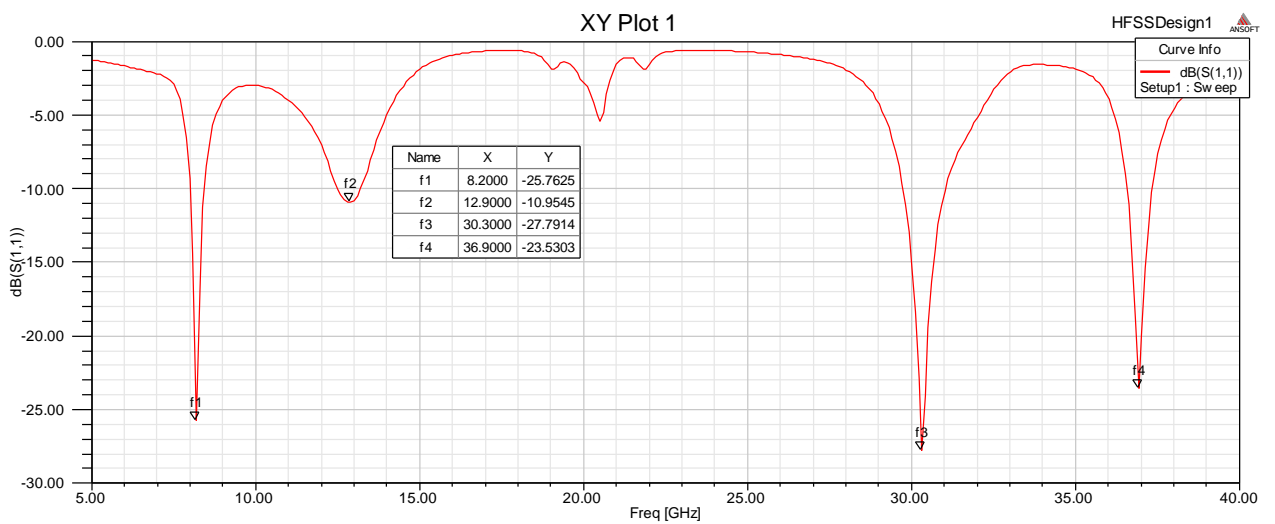
La figure 2.20 représente le réseau RAF qui sera simulé pour vérifier la bande de fréquence de résonance.





**Figure 2.20.** Un réseau de cellules RAF carrés.

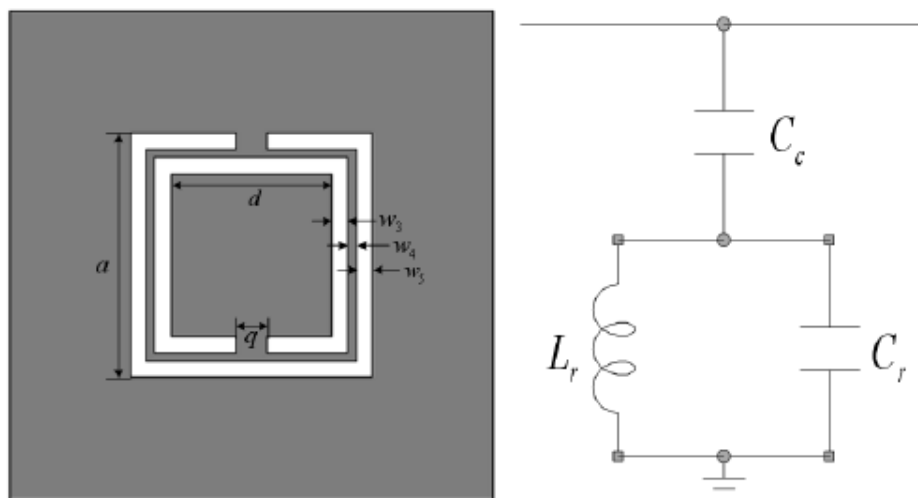
La figure 2.21 représente le coefficient de réflexion  $s_{11}$ .



**Figure 2.21.** Coefficient de réflexion d'un réseau RAF carré.

La figure 2.21 montre que le réseau fonctionne en bande X avec une seule fréquence de résonance, un coefficient de réflexion de -25.76dB pour cette fréquence. On a un coefficient de -10.295 dB à 12.9GHz. Il existe d'autres fréquences: 30GHz et 36.9 GHz. Ces deux derniers sont des fréquences générées par rapport aux dimensions d'antenne est correspond à fonctionnement ordinaire de l'antenne.

#### ***d Complémentaire résonateur en anneau fendu carré***

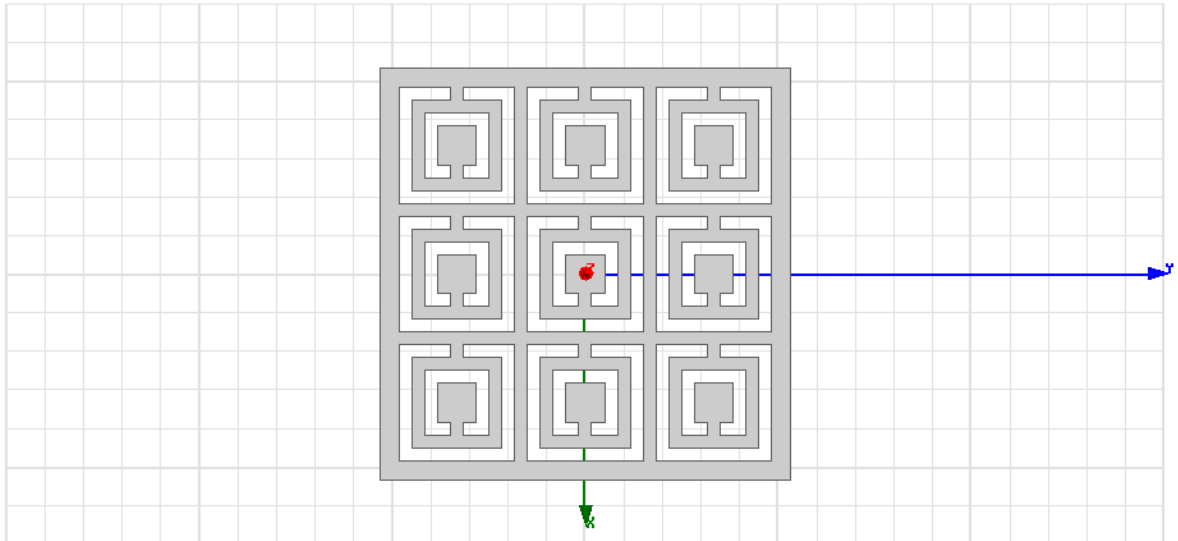


**Figure 2.22.** Représentation d'un complémentaire résonateur en anneau fendu (CSRR) carré et son modèle de circuit équivalent [19].

Les CSRRs, une double contre partie du SRR ou parfois appelé «fente split-résonateur en anneau», sont constitués de fentes qui ont la même dimension que le SRR correspondant. Par le principe de la dualité, les propriétés du CSRRs sont en relation duelle avec les propriétés des SRR. Les SRR se comportent comme un dipôle magnétique ponctuel, alors que les CSRRs présentent un dipôle électrique ponctuel avec polarisation négative.

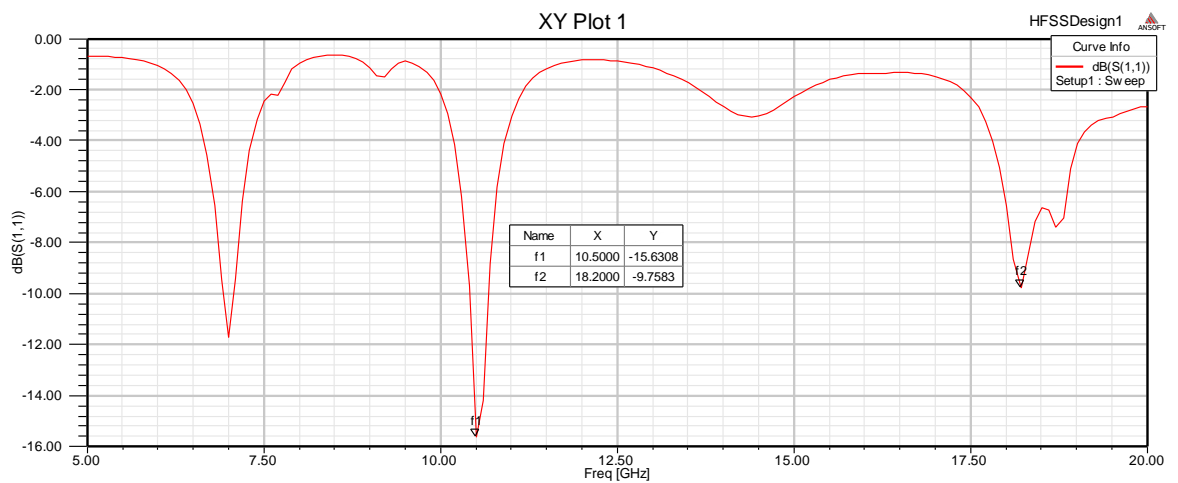
Les deux SRR et CSRRs présentent approximativement la même fréquence de résonance en raison de leurs dimensions partagées.

La figure 2.23 représente un réseau de CSRRs carrés qui sera simulé pour vérifier la bande de fréquence de résonance. Le réseau est composé de 9 cellules complémentaires résonateurs en anneau fendu carrés (3x3). Ce réseau est excité par une ligne d'alimentation d'une longueur de 10mm et largeur de 1mm. Le substrat utilisé est le Epoxy-FR4 avec une épaisseur de 0.8mm. La simulation est faite avec l'outil HFSS.



**Figure 2.23.** Un réseau CSRRs carrés.

La figure 2.24 représente le coefficient de réflexion  $s_{11}$ .

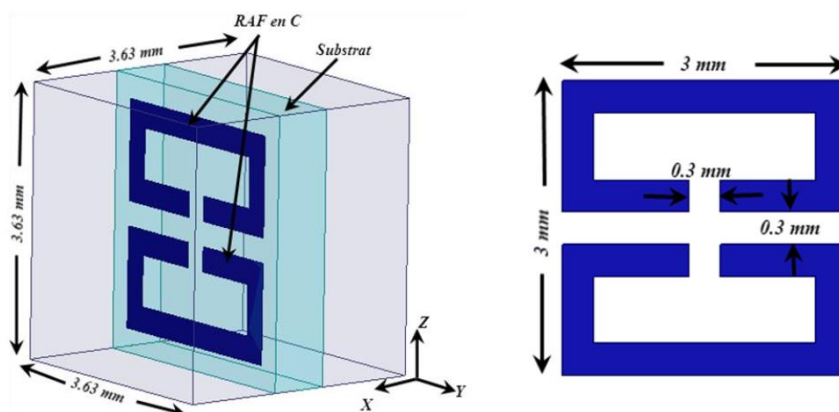


**Figure 2.24.** Coefficient de réflexion d'un réseau C-RAF carré.

La figure 2.24 montre que le réseau fonctionne en bande X avec une fréquence de résonance à 10.5 GHz. Il existe d'autres fréquences: une fréquence décalée aux alentours de 7GHz et une autre à 18.2GHz. On peut optimiser pour faire décalé la fréquence de 7GHz vers la bande X pour avoir deux bandes de fréquence en cette bande.

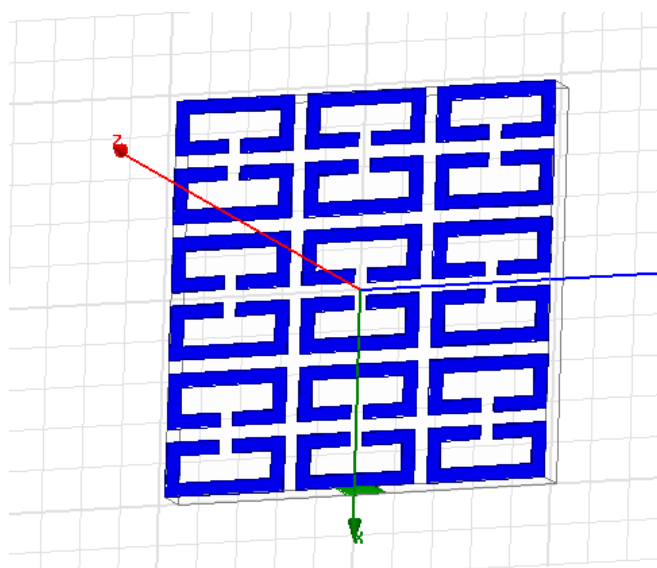
### e C-RAF

La nouvelle structure présentée est un RAF en C noté C-RAF ou C-SRR en anglais. Cette structure fonctionne dans la bande X. Comme dans les cas précédent, les conditions de périodicité sont appliquées. La structure est composée de deux RAFs en C déposés sur une face du substrat comme le montre la figure 2.25. [22]



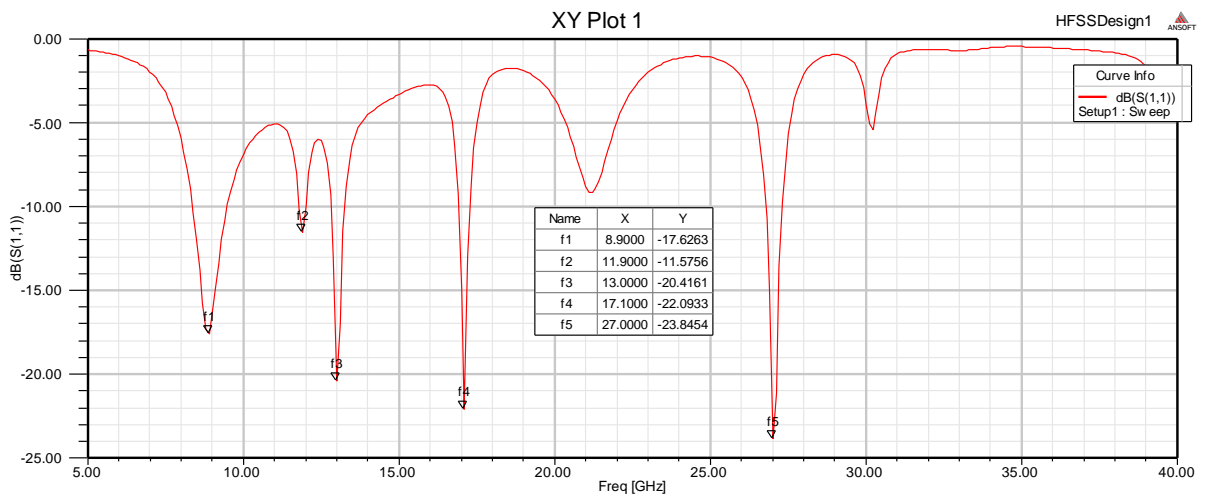
**Figure 2.25.** Représentation et dimensions d'une unité de cellule d'un RAF en double C.

La figure 2.26 représente un réseau de RAF en double C qui sera simulé pour vérifier la bande de fréquence de résonance. Le réseau est composé de 9 cellules de résonateurs en anneau fendu en double C (3x3). Ce réseau est excité par une ligne d'alimentation d'une longueur de 10mm et largeur de 1mm. Le substrat utilisé est le Epoxy-FR4 avec une épaisseur de 0.8mm. La simulation est faite avec l'outil HFSS.



**Figure 2.26.** Un réseau de RAF en double C.

La figure 2.27 représente le coefficient de réflexion  $s_{11}$ .



**Figure 2.27.** Coefficient de réflexion d'un réseau RAF en double C.

La figure 2.27 montre que le réseau en double C fonctionne en bande X avec des fréquences de résonances multiples : à 8.9 GHz, 11.9GHz. Il existe d'autres fréquences: une fréquence aux alentours de 13GHz et autres à 17.1GHz,27GHz. Ces derniers sont des fréquences générées par rapport au dimensions d'antenne et correspond à fonctionnement ordinaire de l'antenne.

## 2.6 Application du métamatériau dans l'environnement antenne

L'antenne que nous utilisons est une antenne patch de type circulaire. Dans un premier temps, une étude sur l'antenne toute seule est faite et nous présenterons ses différentes caractéristiques. Après, on va introduire le principe des métamatériaux à l'antenne pour étudier l'effet sur cette antenne. La modélisation de l'antenne dépend du métamatériau main gauche homogénéisé en terme de fréquence de résonance.

### 2.6.1 Etude de l'antenne patch circulaire

L'antenne micro ruban a été introduite dans les années 1950, mais jusqu'a la sortie de la technologie de fabrication de circuits imprimés en 1970 que de sérieux progrès ont été réalisés dans ce domaine. C'est une technologie à cout faible pour une production

de masse. Cette technologie est compatible avec l'intégration des composants électroniques.

Une antenne micro ruban est constituée d'une paire de couches conductrices parallèles séparées par un milieu diélectrique, le substrat. Suivant cette configuration, la couche conductrice supérieur appelée patch, est la source de rayonnement où l'énergie électromagnétique est rayonnée sur les bords du patch. Une partie est rayonnée vers le substrat et une autre vers l'espace libre. La couche inférieure ou plan de masse, agit comme un plan réflecteur parfait et réfléchit l'énergie dans le substrat et l'espace libre.

Concernant l'alimentation, il existe plusieurs techniques pour exciter l'antenne, les techniques les plus utilisés sont:

- La ligne de transmission.

- Le couplage par fente.

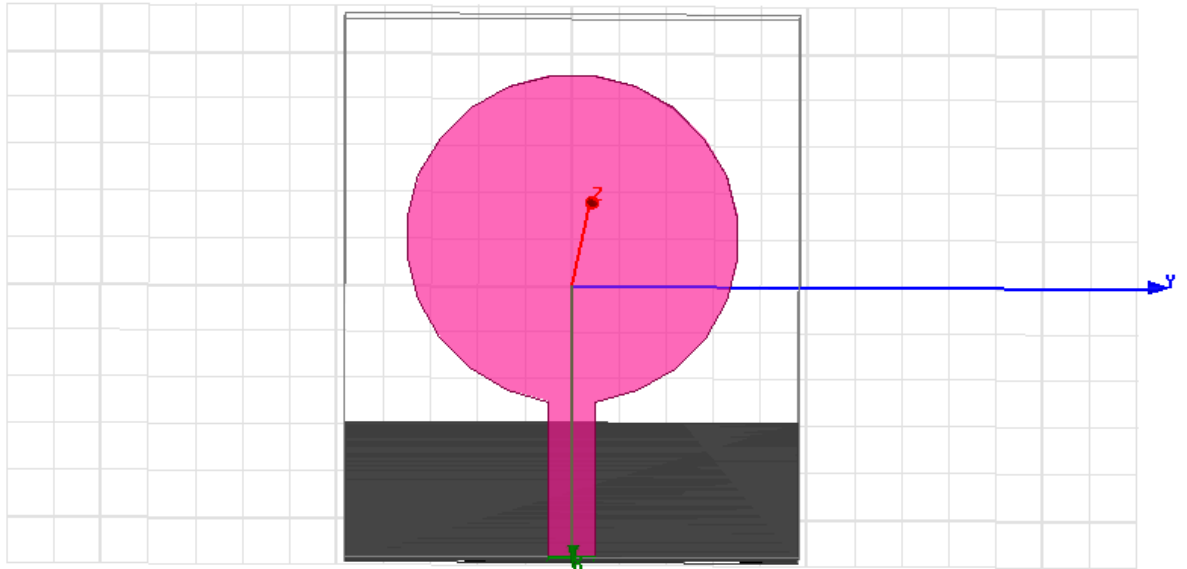
- Le couplage par proximité.

- La sonde coaxiale.

En réalisation, les techniques simples sont celles qui utilisent une ligne de transmission ou une sonde coaxiale. les deux techniques utilisent un contact direct avec le patch afin de l'exciter. A travers ce point de contact on peut contrôler l'adaptation de l'impédance entre l'alimentation et l'antenne.

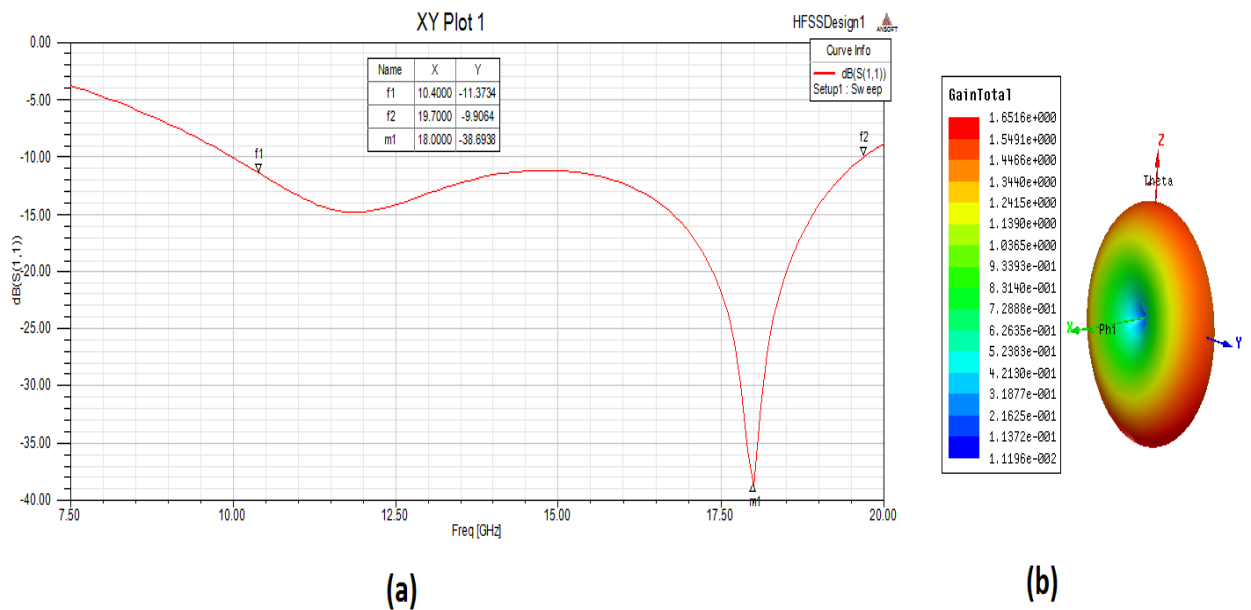
L'antenne présentée dans la figure 2.28 est une antenne patch circulaire avec une ligne d'excitation rectangulaire. La masse est une masse réduite, le diamètre d'antenne est 3.54mm qui fonctionne aux alentours de 10GHz [23].

Le substrat utilisé est FR-Epoxy avec une permittivité de 4.4. L'épaisseur du substrat est 0.8mm. Ce choix a été fait par rapport à la disponibilité du substrat Epoxy-FR4.



**Figure 2.28.** Antenne patch circulaire.

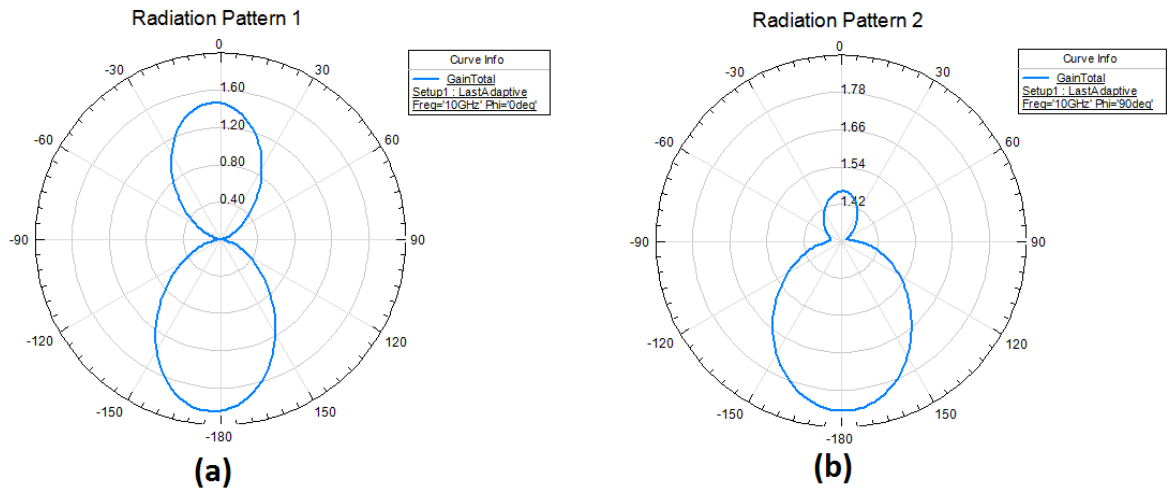
La figure 2.29 montre le coefficient de réflexion (2.29-a) et diagramme de gain de l'antenne (2.29-b) en 3D.



**Figure 2.29.** Antenne patch seule: (a) paramètre  $s_{11}$ . (b) diagramme de gain en 3D.

L'antenne simulée présente une adaptation entre [10 GHz -19.7 GHz]. Elle présente une adaptation de -11.37 dB à 10.4GHz. Le gain maximal de cette antenne est 1.65 dBi.

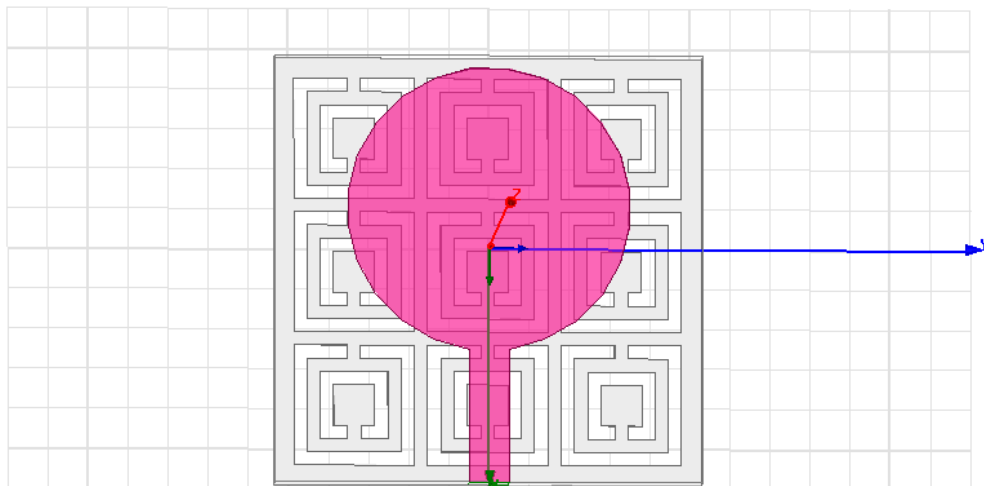
Les diagrammes de rayonnements en 2D sont présentés dans la figure 2.30. La figure 2.30-a lorsque  $\Phi=0^\circ$  (plan H), La figure 2.30-b lorsque  $\Phi=90^\circ$  (plan E).



**Figure 2.30.** Diagrammes de rayonnements en 2D.

### 2.6.2 Etude de l'effet de métamatériau sur l'antenne

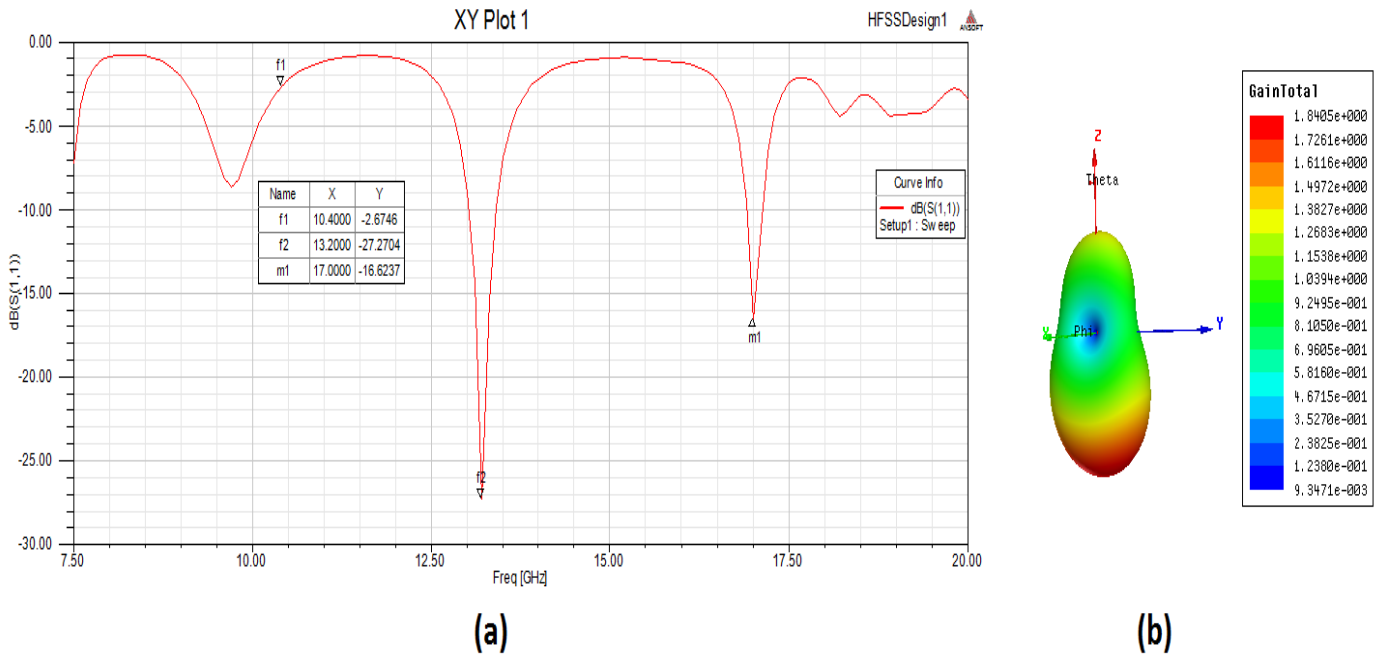
Dans cette partie nous ajouterons une masse composée de méta matériau, cette masse est composée d'un réseau de C-RAF carrés. La figure 2.31 montre le design utilisé dans les simulations qui suit.



**Figure 2.31.** Antenne patch circulaire en présence de métamatériau.



La figure 2.32 montre le coefficient de réflexion (2.32-a) et diagramme de gain de l'antenne en 3D (2.32-b).

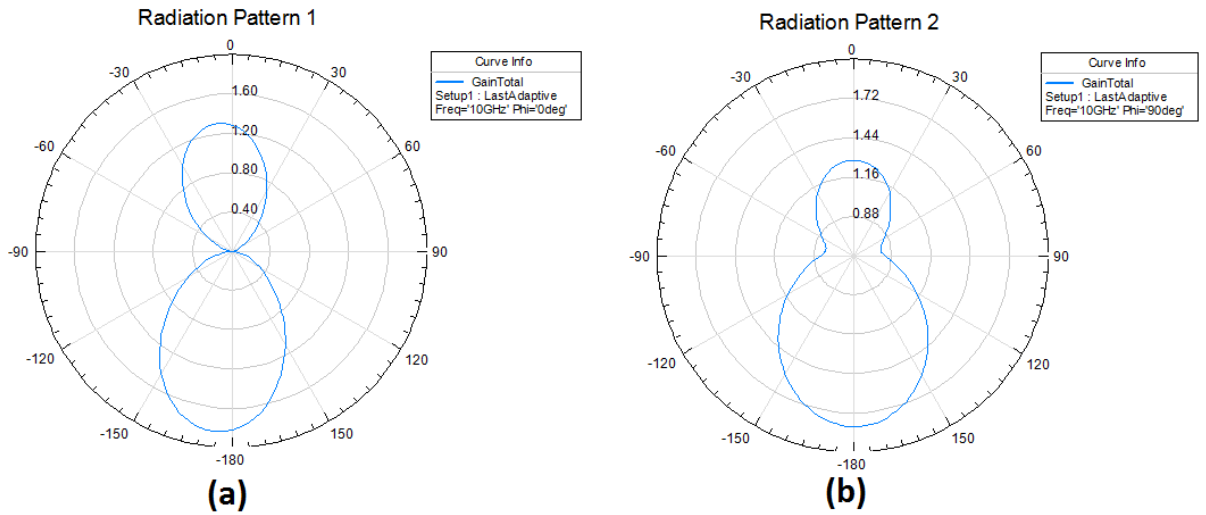


**Figure 2.32.** Antenne patch : (a) paramètre  $s_{11}$ . (b) diagramme de gain en 3D en présence de métamatériau.

Nous notons une dégradation de l'adaptation de l'antenne: au lieu de -11.37 dB dans le cas d'antenne seule, nous avons ici une amplitude de  $s_{11}$  égale à -2.57dB. Cette dégradation est temporaire, on peut optimiser en jouant sur les dimensions des résonateurs pour avoir un réseau qui fonctionne au alentours de 10GHz. Cela permet d'avoir une meilleure adaptation à la fréquence souhaitée. Le diagramme de gain montre un niveau proche de 1.85 dBi. Cette augmentation du gain est explicable par l'effet du métamatériau, il a permis de rendre l'antenne plus directive et cela a augmenté le gain.

Cette influence de métamatériau sur l'antenne patch peut être expliquée par une modification dans la représentation du champ rayonné.

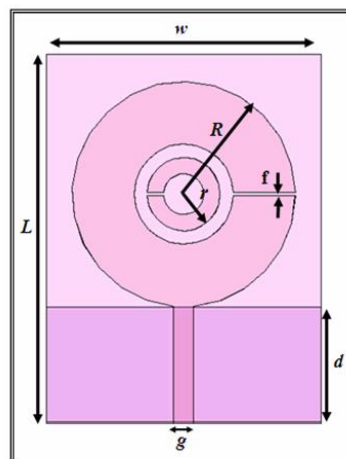
La figure 2.33 illustre les diagrammes de rayonnements en 2D. La figure 2.33-a lorsque  $\text{Phi}=0^\circ$  (Plan H), La figure 2.33-b lorsque  $\text{Phi}=90^\circ$  (Plan E).



**Figure 2.33.** Diagrammes de rayonnements en 2D en présence de métamatériau.

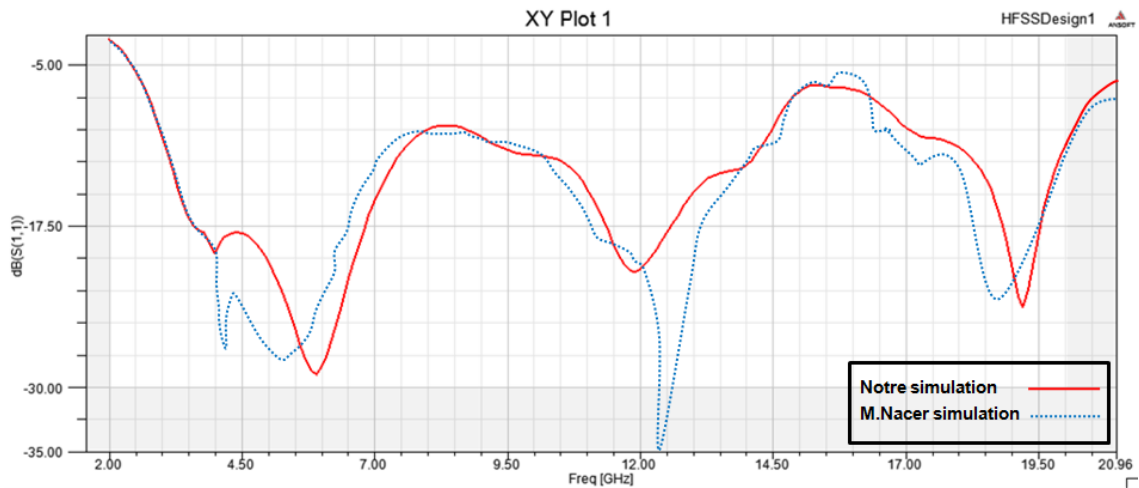
## 2.7 Vérification d'outil HFSS

Dans cette partie on a pris les résultats de simulations du référence [23] et on les a simulé pour vérifier le fonctionnement de l'outil HFSS. L'antenne est représenté dans la figure 2.34 et les résultats de la simulation dans la figure 2.36.



**Figure 2.34.** L'antenne simulée en anneau fendu.

Les dimensions sont mentionnés dans la référence [23] et la comparaison des coefficients de réflexion est dans la figure qui suit:



**Figure 2.35.** Coefficients de réflexion pour les deux simulations.

Les résultats sont comparables, acceptables et satisfaisantes. On a une antenne large bande de 2.97GHz à 14.4GHz et de 17.1GHz à 20GHz. Pour les résultats de M.Nacer c'est de 2.9GHz à 14.4GHz et de 16.4GHz à 19.6GHz. Pour des raisons du manque de données : M.Nacer n'a pas mentionné tout les dimensions d'antennes dans son travail. On a pas pu avoir exactement les mêmes résultats mais en général l'outil HFSS fonctionne correctement.

## 2.8 Conclusion

Dans ce chapitre on a cité les différents types des métamatériaux, les différents types de résonateurs utilisés dans la conception des antennes à des caractéristiques spéciaux. A la fin de ce chapitre on a simulé une antenne arbitraire puis on a attribué un métamatériau pour voir l'impact de ce dernier sur le comportement de l'antenne. Donc les métamatériaux permettent d'avoir des caractéristiques au delà de la nature du comportement des antennes.

# Chapitre 3 Conception, simulation et réalisation

---

## 3.1 Introduction

L'objectif de ce travail est de concevoir une antenne qui fonctionne dans les bandes du système GPS en utilisant les résonateurs en anneaux fendus et en minimisant les dimensions de cette antenne. Notre étude se compose de deux étapes, la première est la conception et simulation de l'antenne en utilisant différents modèles de SRRs pour atteindre le but souhaité. La deuxième étape est la réalisation de l'antenne.

Pour la procédure de la conception et simulation, le simulateur HFSS ( High Frequency Structural Simulator ) est proposé.

Les résultats simulés et mesurés sont discutés en termes de coefficient de réflexion, les diagrammes de rayonnement et le rapport axial.

## 3.2 Spécifications techniques

L'antenne conçue doit être capable de fonctionner dans la bande de fréquences GPS requise. Le coefficient de réflexion doit être inférieur à -10 dB, le rapport axial ratio doit être inférieur à 3 dB. Le substrat utilisé est le FR4 avec une constante diélectrique ( $\epsilon_r$ ) de 4.4 et une épaisseur de 0.8mm. Nous avons choisi FR4 en raison de sa disponibilité.

## 3.3 Choix de l'outil de la simulation

HFSS est un logiciel de simulation électromagnétique qui étudie des structures complexes en 3D en les simulant et en proposant des visualisations précises des résultats en 2D et 3D.

HFSS est utilisé essentiellement pour les expérimentations et les études des systèmes fonctionnant en hautes fréquences, il est exploité notamment pour calculer les paramètres S, les fréquences de résonances, les champs électromagnétiques, les diagrammes de rayonnement et les autres caractéristiques des antennes.

Le HFSS divise les structures géométriques complexes en des formes géométriques plus simple, précisément des tétraèdres sur lesquels le calcul mathématique sera plus faisable, d'où on commence à parler de la convergence qui est la persistance des résultats obtenus[24].

HFSS a des avantages et des inconvénients, on cite :

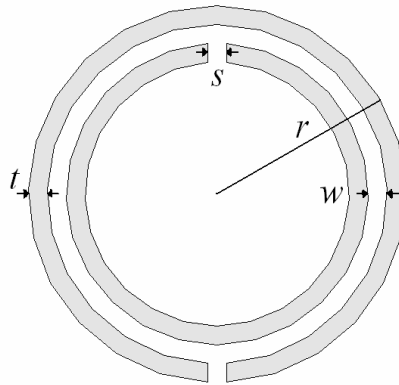
- Complexité de travail et de création des structures ayant des larges détails de conception.
- La nécessité d'avoir maîtrisé l'utilisation du logiciel, avant d'aborder le projet, parce qu'on est obligé de se servir des opérations booléennes parfois, pour dessiner des surfaces ou formes n'ayant pas une forme géométrique bien définie. En plus on doit faire attention aux frontières (boundaries), il ne faut pas avoir des conflits entre les surfaces de radiation.
- La simulation pourra prendre une durée de plusieurs heures aux plusieurs jours parfois, surtout dans le cas où le projet simulé a un volume relativement grand avec beaucoup de détails.

### **3.4 Excitation de l'antenne**

L'antenne est alimentée par une ligne de transmission, cette ligne est excitée avec un "waveguide port". Ce type de port d'excitation permet d'obtenir des informations sur la propagation des lignes du champ électromagnétique à cet endroit de la structure, contrairement au fonctionnement d'un port discret, qui lui n'est défini que par son impédance.

### 3.5 La conception d'une antenne circulaire par une alimentation micro ruban

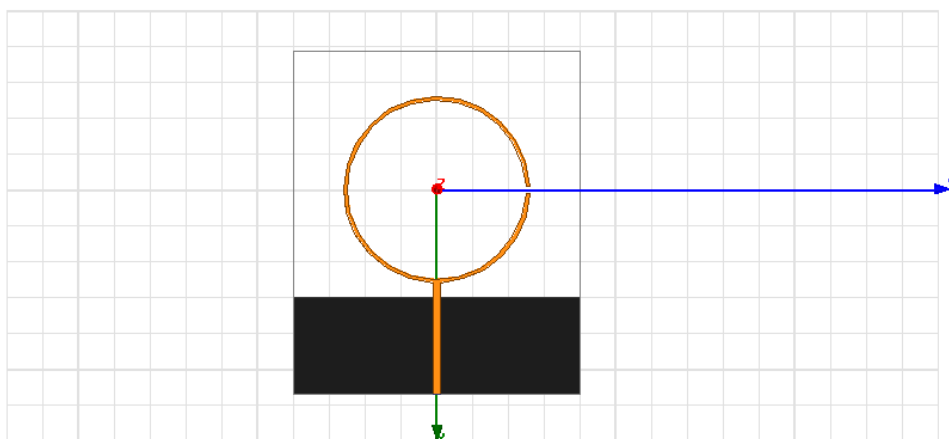
La conception d'antenne était basée sur les résonateurs en anneau fendu circulaire avec des ouvertures notées ( $s$ ), une largeur  $t$  et un vide entre les résonateurs  $w$ . la figure 3.2 montre le type de RAFs utilisés.



**Figure 3.1.** RAF circulaire.

#### 3.5.1 Dimensions de l'antenne initiale

L'antenne initiale est un RAF circulaire connecté avec une ligne d'alimentation micro ruban. La figure 3.2 montre le design initial :

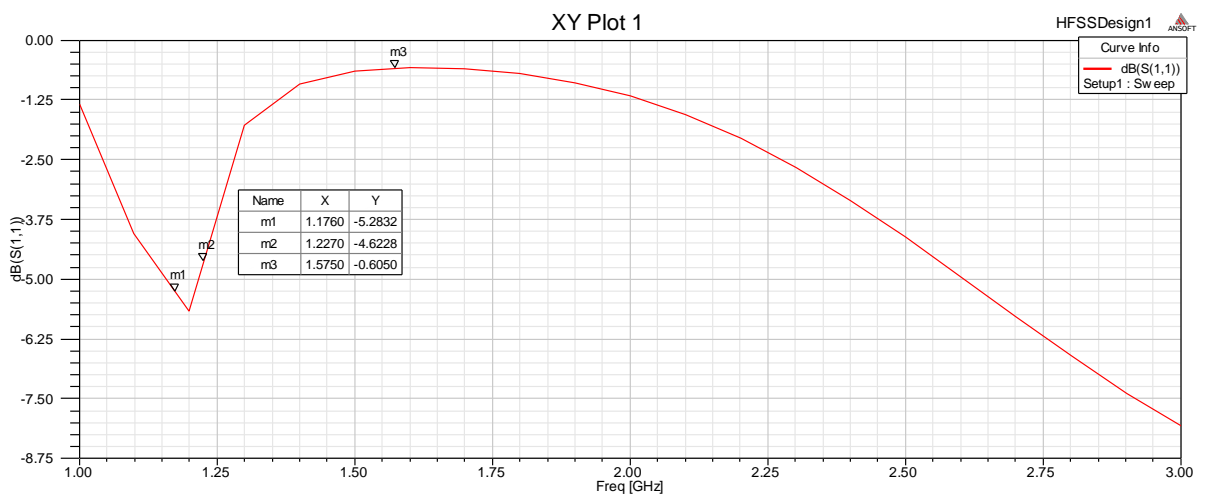


**Figure3.2.** Antenne initiale.

Les dimensions d'antenne présentée dans la figure 3.2 sont :

- $r=13.9\text{mm}$
- Une masse de largeur : 40mm et longueur 13.5mm.
- L'antenne est alimenté à l'aide d'une ligne micro ruban d'impédance caractéristique de 50 Ohms, wf est de 1mm x 13.5 mm x 0.8 mm.
- $L_s=74\text{mm}$ .

Le coefficient de réflexion est représenté dans la figure 3.3. On remarque qu'on a un pique aux alentours de 1.2GHz mais c'est pas adapté.



**Figure 3.3.** Coefficient de réflexion de l'antenne initiale.

Le tableau 3.1 représente les résultats pour les fréquences de GPS:

Fréquences GPS	Coeff.réflexion
1.176 GHz	-5.28 dB
1.227 GHz	-4.62 dB

**Tableau3.1** Les résultats de  $s_{11}$  pour les fréquences GPS.

On a un coefficient de réflexion de -5.28 dB pour 1.176 GHz et -4.62 dB pour 1.227 GHz. Ces deux coefficients de réflexion sont supérieurs au seuil d'adaptation qui est (-10dB). Donc, on doit renforcer la structure pour avoir des résultats acceptables.

### 3.5.2 Etape secondaire du conception

Dans cette étape nous ajouterons des anneaux pour renforcer le premier anneau dans le but d'avoir une adaptation meilleure pour le bon fonctionnement de notre antenne.

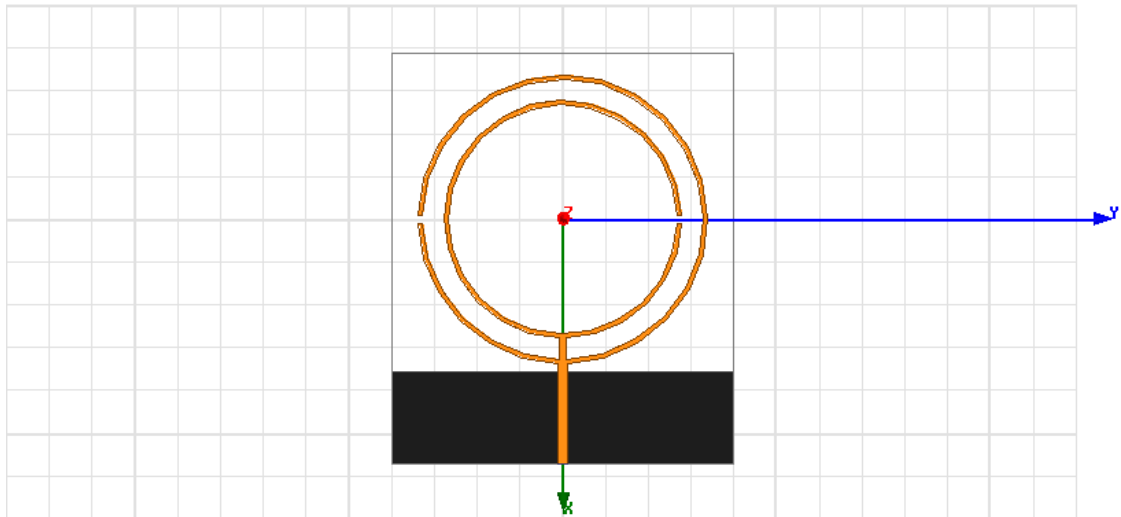


Figure 3.4. L'antenne avec un deuxième anneau.

Dans cette étape on a ajouté un anneau de même type que le premier avec une ouverture dans le sens contraire. Les résultats de cette conception sont affichés dans la figure si dessous. On remarque que la fréquence de résonance qui était à 1.2GHz a décalée vers le 1.4GHz et a cette fréquence on a une adaptation de -11.45 dB.

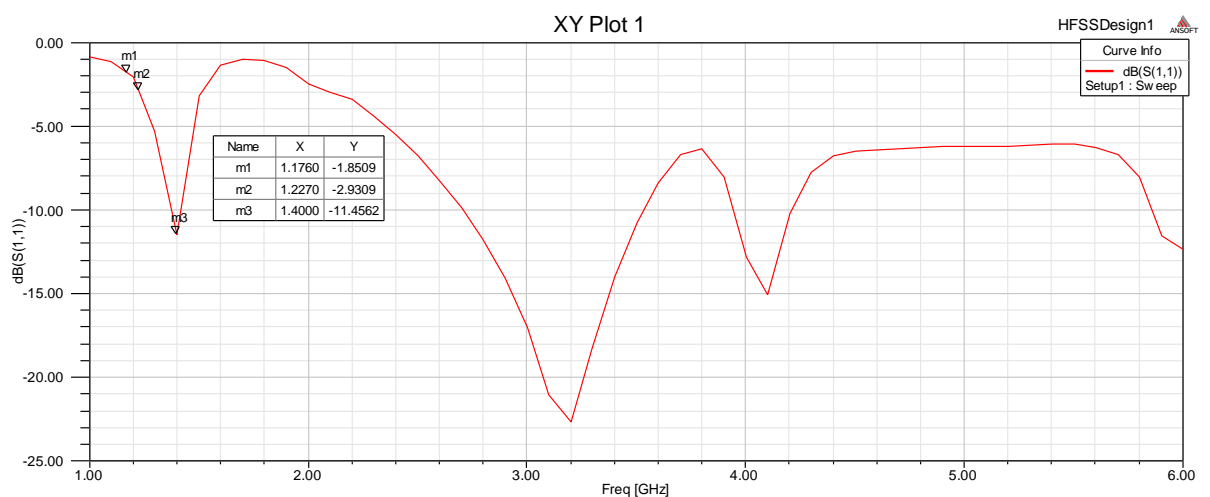
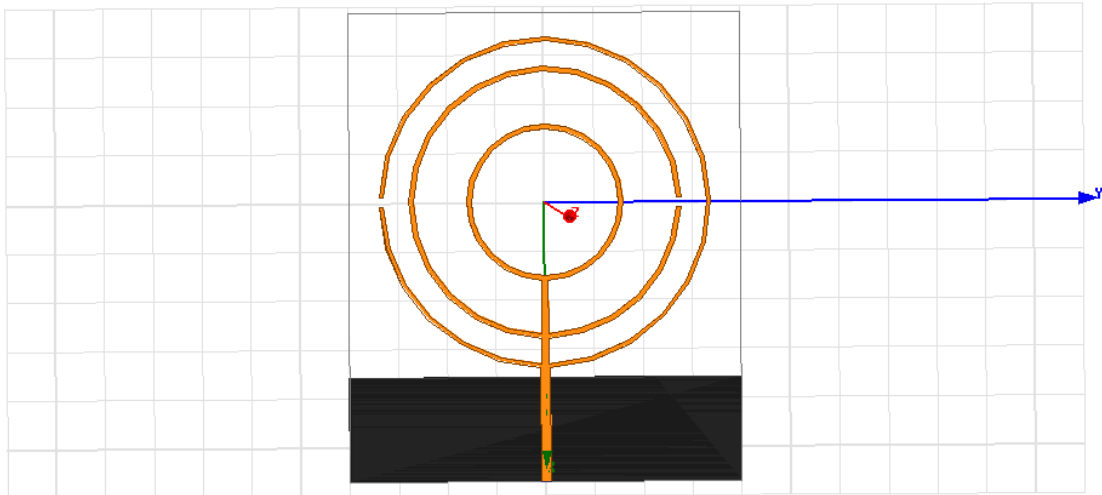


Figure 3.5. Le coefficient de réflexion après l'insertion du deuxième anneau.

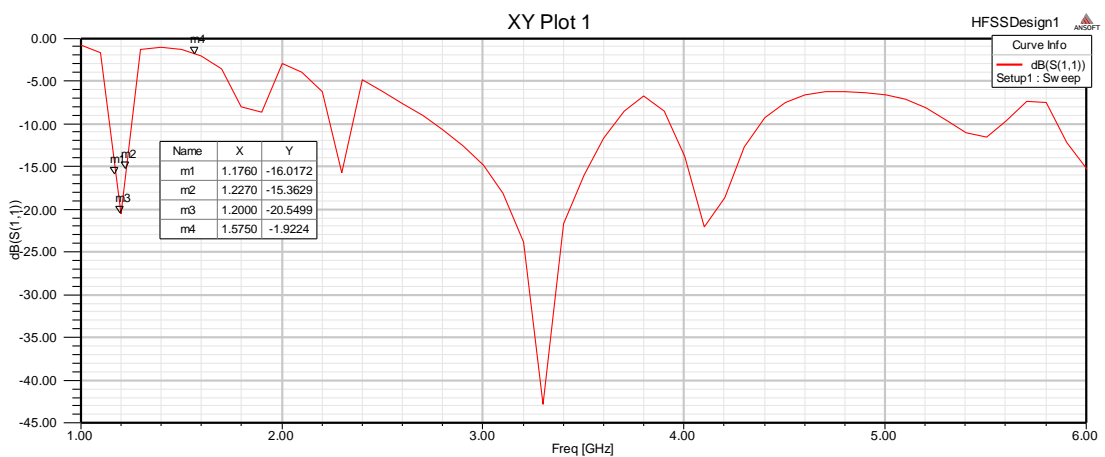


Pour revenir à la fréquence de 1.2GHz on essaiera de trouver l'anneau qui décale la fréquence de résonance. Cet anneau doit convient avec l'anneau ajouté pour que la superposition des deux anneaux donne une adaptation importante aux alentours de 1.2GHz.



**Figure 3.6.** Antenne avec insertion du troisième anneau.

Après l'insertion du troisième anneau dans le design et après plusieurs essayes. On a arrivé à trouver des résultats satisfaisants. La figure 3.7 montre le coefficient de réflexion pour les deux fréquences 1.227GHz et 1.176GHz qui sont adaptées.



**Figure 3.7.** Le coefficient de réflexion avec insertion du troisième anneau.

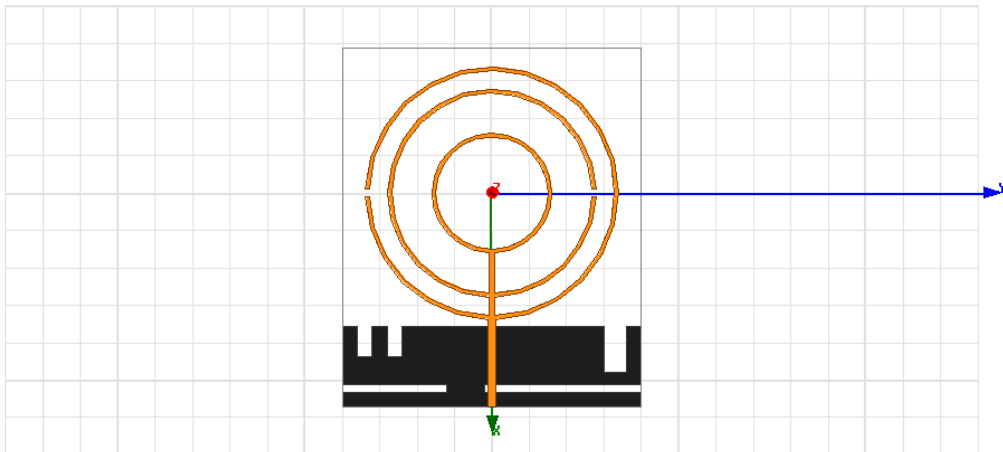
Le tableau 3.2 représente les résultats pour les fréquences de GPS:

Fréquences GPS	Coeff.réflexion
1.176 GHz	-16.01 dB
1.227 GHz	-15.36 dB

**Tableau3.2** Les résultats de  $s_{11}$  pour les fréquences GPS de la 2eme étape.

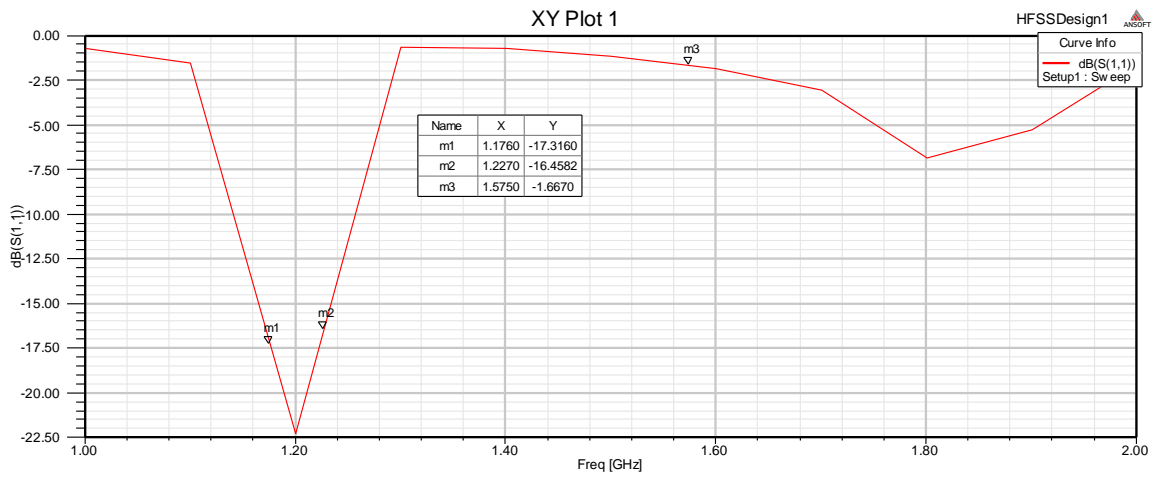
Le coefficient de réflexion descend à -16.01 dB, -15.36 dB respectivement pour les fréquences 1.176 GHz, 1.227 GHz. Cette adaptation est le résultat du renforcement de la structure qui a permis de créer une superposition.

### 3.5.3 3eme étape du conception



**Figure 3.8.** La 3ème étape de la conception d'antenne circulaire à fentes.

Dans cette étape on a essayé d'améliorer les caractéristiques de l'antenne en introduisant des fentes dans la masse réduite. Les fentes au niveau de la masse permet une amélioration du coefficient de réflexion. L'insertion des fentes est faite d'une manière manuelle. Après chaque insertion, on simule et on observe le comportement de l'antenne jusqu'à l'arriver aux résultats souhaités.



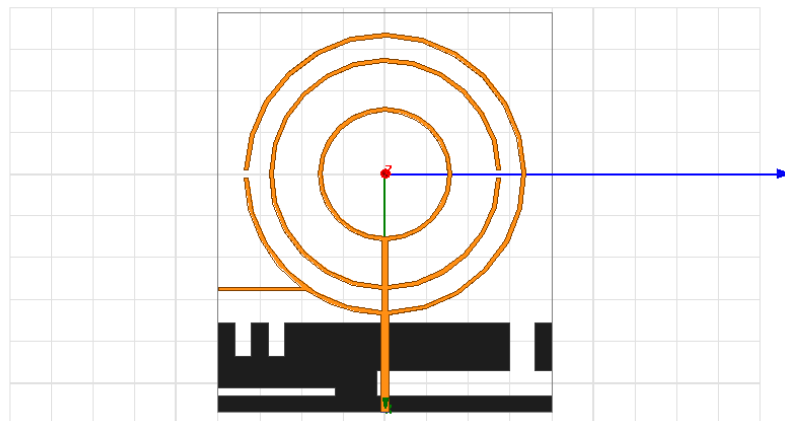
**Figure 3.9.** Coefficient de réflexion de la 3ème conception.

Fréquences GPS	Coeff. réflexion
1.176 GHz	-17.31 dB
1.227 GHz	-16.46 dB

**Tableau 3.3** Les résultats de  $s_{11}$  pour les fréquences GPS de la 3ème étape du conception.

Le tableau montre les coefficients de réflexion qui sont améliorés par rapport à l'étape précédente.

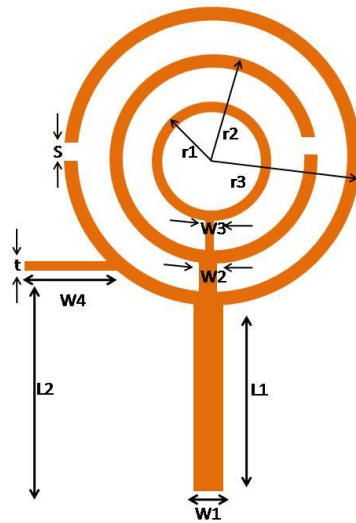
### 3.5.4 L'étape final du conception



**Figure 3.10.** La conception finale de l'antenne.

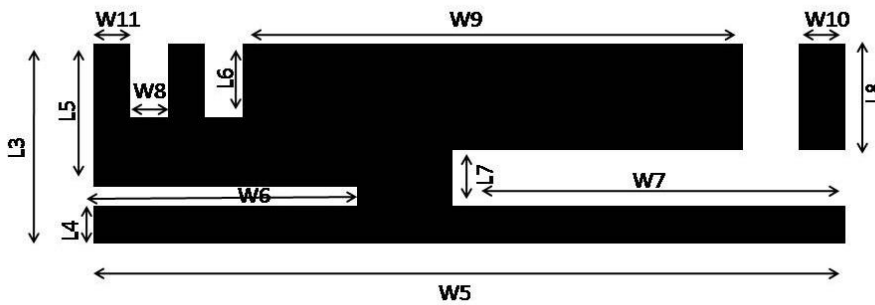
Cette étape consiste à améliorer le coefficient de réflexion pour atteindre une meilleure adaptation. On a opté pour insérer une baguette fine dans l'élément rayonnant et de jouer au même temps sur les fentes en masse.

**a Dimension de l'élément rayonnant :**



**Figure 3.11.** Dimensions de l'élément rayonnant.

**b dimension de la masse réduite :**



**Figure 3.12.** Dimensions de la masse réduite.

• **Tableau des dimensions :**

L'épaisseur du cuivre c'est 18  $\mu\text{m}$  et toute les autres valeurs sont en mm.

L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	W1	W2
11.7	14.6	10.7	2	7.7	4	3	5.7	1	0.8
W3	W4	W5	W6	W7	W8	W9	W10	W11	r1
0.64	10.45	40	14	21	2	27	2	2	8
r2	13.9	r3	16.9	t	0.4	s	1	h	0.8

**Tableau3.4** Tableau des dimensions d'antenne finale.

## 3.6 Coefficient de réflexion , gain, directivité

### 3.6.1 Coefficient de réflexion

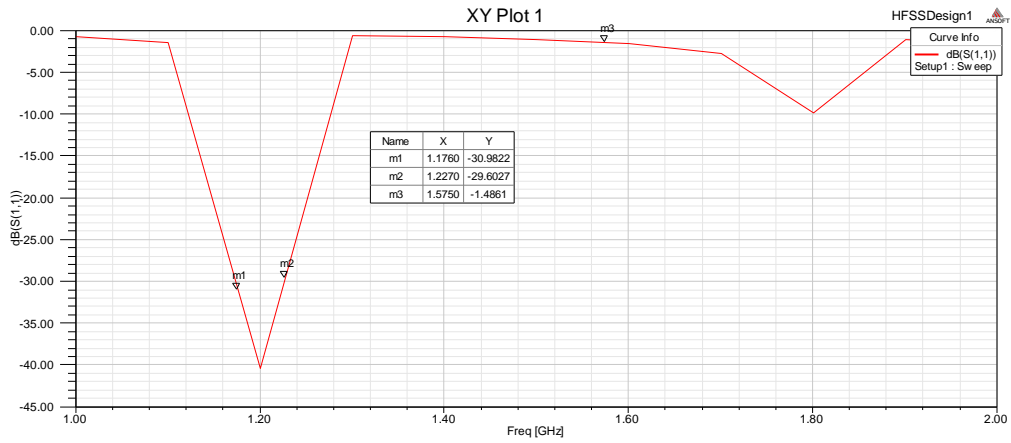


Figure 3.13. Coefficient de réflexion de la conception finale.

On remarque qu'il ya une forte adaptation pour les fréquences 1.176GHz (-30.98 dB) et 1.227GHz (-29.6 dB). Et cela montre que la baquette est une technique fiable pour obtenir des résultats satisfaisants.

### 3.6.2 Le gain total

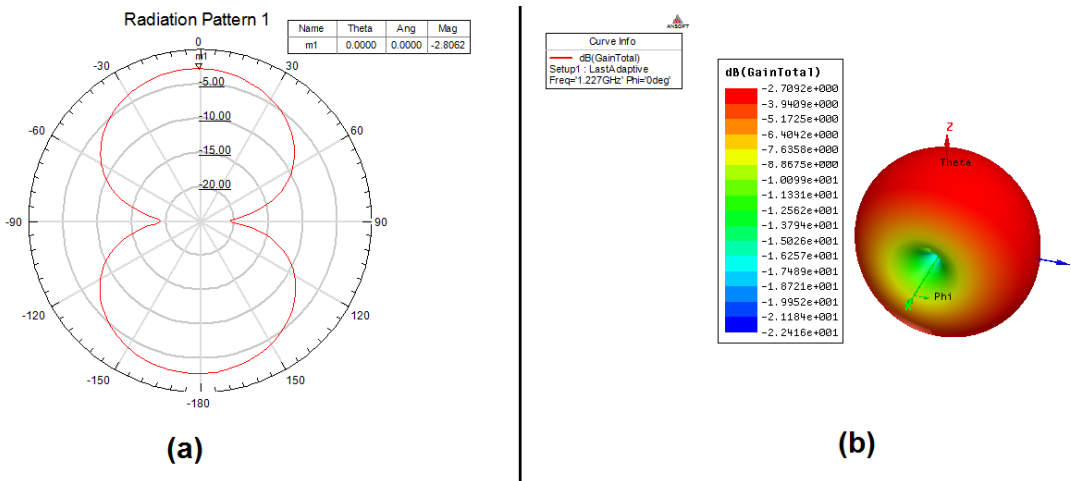


Figure 3.14. Le gain total (a) le gain totale en 3D (b).

La figure 3.14 montre le gain qui est faible (-2.8 dB) et cela est explicable parce qu'on a pas une grande masse d'élément rayonnant. Notre antenne contient une combinaison de fils très fins (une largeur de 0.5mm).

### 3.6.3 La directivité

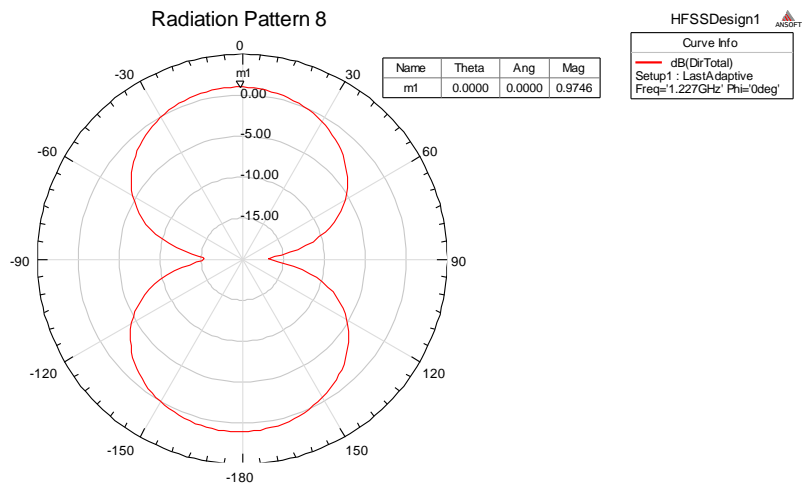


Figure 3.15. Diagramme de la directivité totale de la conception finale.

Le diagramme montre une directivité au environ de 1 dB.

## 3.7 Conception d'une deuxième antenne circulaire

### 3.7.1 Dimensions

Dans cette conception : l'épaisseur du cuivre est du 35  $\mu\text{m}$  et le substrat est EPOXY FR-4 d'épaisseur 1.6mm.

#### a L'Elément rayonnant

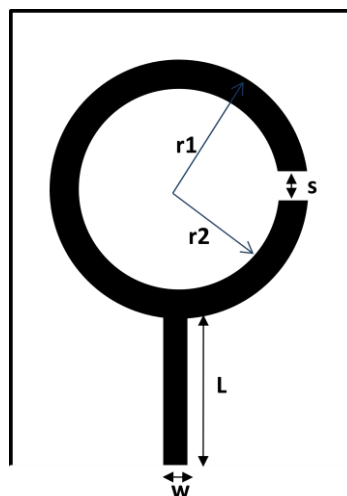


Figure 3.16. L'élément rayonnant de la 2eme antenne.

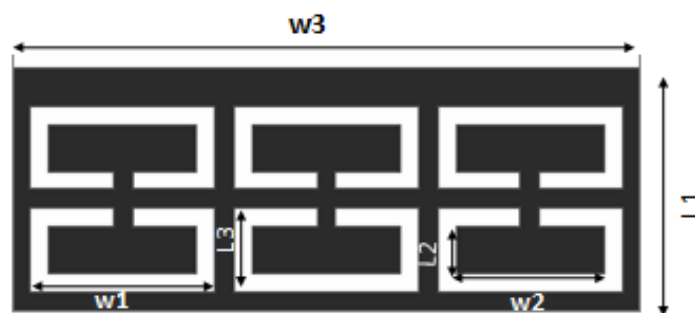
- **Tableau des dimensions:**

r1	r2	S	L	w
25mm	20mm	5mm	30mm	4mm

**Tableau3.5.** Les dimensions de l'élément rayonnant du 2eme antenne.

### ***b* La masse réduite**

Le choix de la masse en réseau du complémentaire-résonateurs en anneau fendu a été fait pour des raisons de la simplicité de réalisation par rapport aux autres structures.



**Figure 3.17.** La masse réduite de la 2eme antenne.

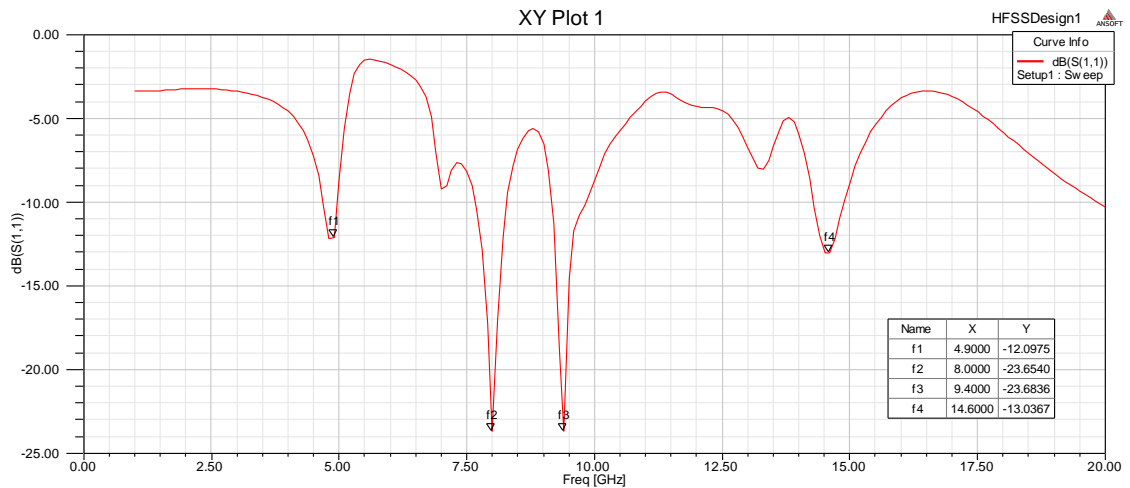
- **Tableau des dimensions :**

W1	W2	W3	L1	L2	L3
20mm	16mm	68mm	26mm	5mm	9mm

**Tableau3.6.** Les dimensions de La masse réduite de la 2eme antenne.

### **3.7.2 Coefficient de réflexion de deuxième antenne**

La simulation a été faite avec l'outil HFSS et les résultats sont présentés dans la figure 3.18.



**Figure 3.18.** Coefficient de réflexion de la 2eme antenne.

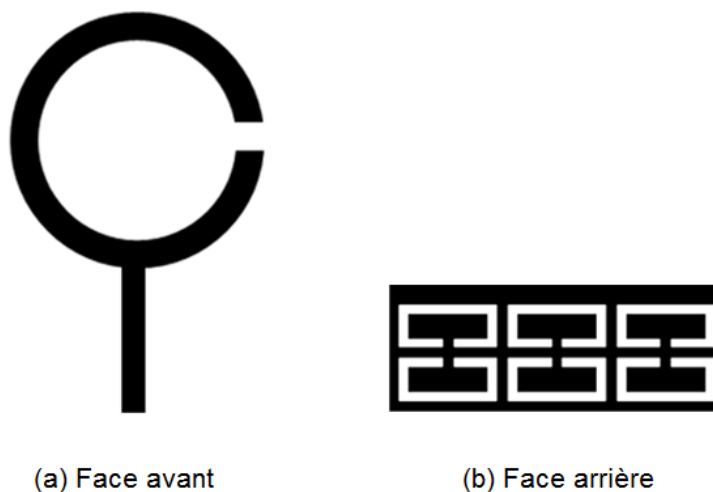
La figure montre un coefficient de réflexion de -12dB à une fréquence de 4.9GHz, de -23dB à 8 et 9.4 GHz et -19 dB à 14.6 GHz. L'antenne est donc une antenne multi bande.

### 3.8 Réalisation et mesures du Coefficient de réflexion

#### 3.8.1 Réalisation

L'antenne retenue pour la réalisation est celle des figures 3.16 - 3.17, dont les dimensions sont données dans les tableaux 3.5-3.6.

Afin de réaliser l'antenne sur le substrat FR4 ( $\epsilon_r=4.4$ , épaisseur=1.6mm et  $\tan D=0.02$ ) disponible au laboratoire des circuits imprimés, nous avons généré les masques de la figure 3.19.



**Figure 3.19.** Typons de l'antenne à réaliser.



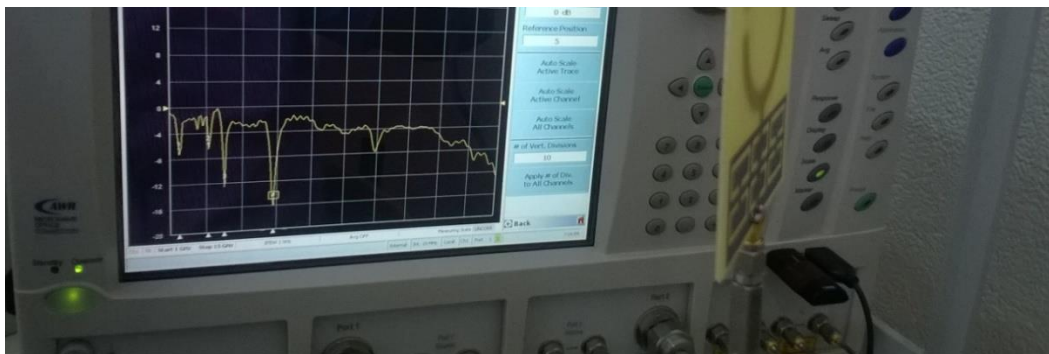
L'antenne a été réalisée dans le laboratoire des circuits imprimés à l'université Saad Dahleb Blida. Une fois l'antenne récupérée, nous avons soudé un connecteur de type SMA à l'endroit de l'excitation de l'antenne, comme le montre la figure 3.20



**Figure 3.20.** L'antenne réalisée.

### 3.8.2 Mesure du coefficient de réflexion

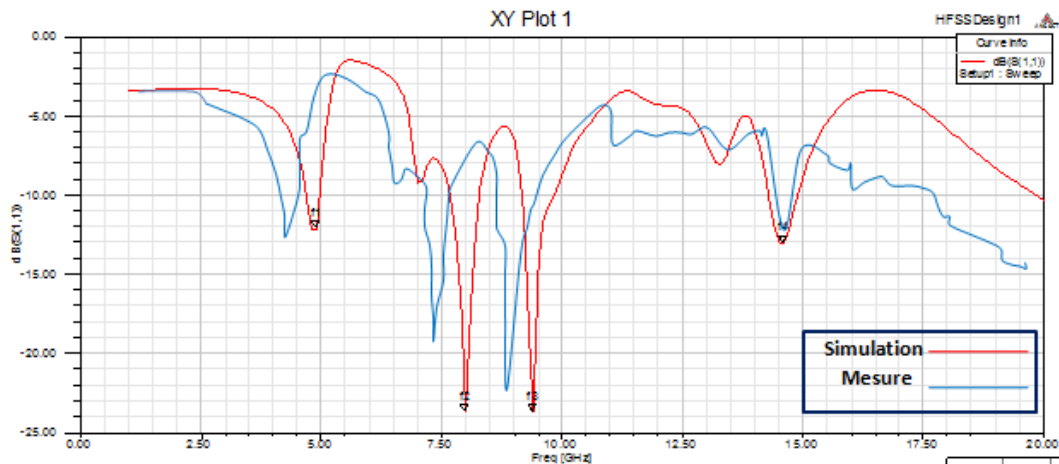
Les mesures ont été réalisées dans l'école des transmissions de Kolea. L'analyseur de réseau utilisé est "Anritsu VNA Network Analyser MS4640A" avec une bande de fréquence (70KHz - 40 GHz). La vitesse de mesure est de 20 ms / point.



**Figure3.21** Mesure en utilisant l'analyseur de réseau.

Une fois l'analyseur de réseau est calibré de façon automatique [3.5-20] GHz par un dispositif de calibration, l'antenne a été connectée au port 2.

La figure 3.22 montre les valeurs de simulation et mesure du coefficient de réflexion :



**Figure 3.22.** Comparaison de coefficient de réflexion de deuxième antenne.

### 3.8.3 Interprétation des résultats

Les mesures ont donnés la même allure de coefficient de réflexion que la simulation mais elle est décalé légèrement vers le bas entre [3-13] GHz. Certaines différences entre simulation et mesure peut être expliqué par les incertitudes de réalisation et de mesure. On a des vides entre les cellules plus grands que dans le design et cela va générer une capacité plus grande. Cette dernière a décalée le coefficient de réflexion vers des bases fréquences par rapport à la simulation. En général, les résultats de simulations et de mesure sont comparables et satisfaisants.

## 3.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une antenne qui permet de recevoir dans la bande de fréquence GPS.

La première partie a été consacré à la conception d'une antenne et l'étude de ses performances électriques et électromagnétiques en terme d'adaptation et de rayonnement afin d'obtenir les résultats souhaités.

Après que nous avons obtenu les résultats de simulation qui vérifient le cahier de charge , on a du passé à la réalisation de l'antenne mais pour des raisons de manque du matériau (substrat Epoxy-FR4 avec épaisseur de 0.8mm ). On a pas pu réaliser la première antenne.

La 2eme partie a été consacré à la conception d'une deuxième antenne et sa réalisation. Les mesures étaient comparables et satisfaisantes mais pas comme souhaités parce que la réalisation n'a pas était précise. La conception en utilisant les métamatériaux demande une haute précision et un matériel moderne qui permet de réaliser les structures souhaitées.

## Conclusion générale

---

Le premier chapitre présente les antennes et leurs caractéristiques tels que le coefficient de réflexion, les diagrammes de rayonnements et le gain ...etc.

Nous avons défini également les antennes patch et présenté la structure d'un système GPS et ces applications.

Dans le deuxième chapitre, nous avons défini les métamatériaux et ces différents types et les caractéristiques de chaque type. Après, on a présenté les différents types des résonateurs. On a simulé des réseaux de RAF pour vérifier les études théoriques.. Ensuite, on étudie l'effet des métamatériaux sur une antenne.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté le processus de conception d'une antenne circulaire à base d'anneaux résonateurs à fente avec une alimentation micro ruban. Les principales caractéristiques ont été présentées. Tels que le coefficient de réflexion qui montre l'adaptation et les diagrammes de gain et directivité.

Finalement, on a conçu et réalisé une deuxième antenne circulaire dans la fréquence de 5GHz. Les résultats de simulation et de la mesure sont comparables et sont satisfaisants.

Les perspectives du travail sont :

- Approfondissement des investigations dans le domaine des méta-matériaux.
- Conception d'une antenne miniaturiser GNSS a base des méta-matériaux.

# Annexe : Présentation de l'outil HFSS

## A. Présentation

HFSS (High Frequency Structure Simulator) est un outil performant à onde électromagnétique (EM) commercial qui fait la simulation du champ d'un modèle arbitraire en 3D.

Il intègre la simulation, visualisation, modélisation des solides, et l'automatisation dans un environnement facile à utiliser où les solutions des problèmes EM 3D sont obtenues rapidement et avec précision. HFSS emploie la méthode des éléments finis (FEM), Ansoft HFSS peut être utilisé pour calculer des paramètres tels que les Paramètres S, la fréquence, les champs électriques et magnétiques.

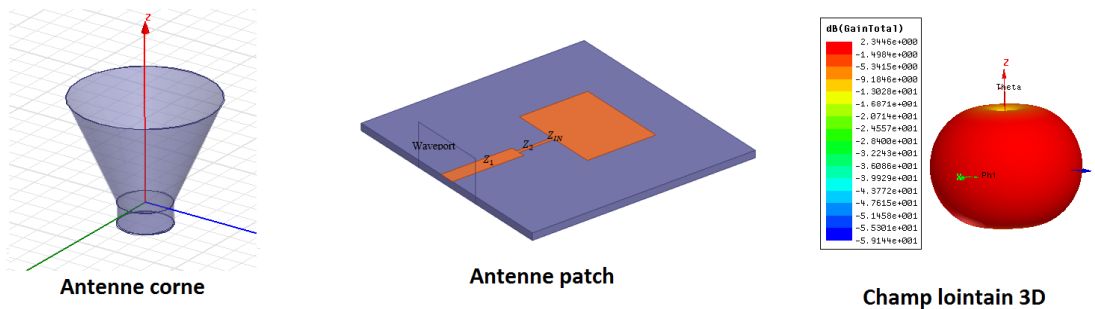
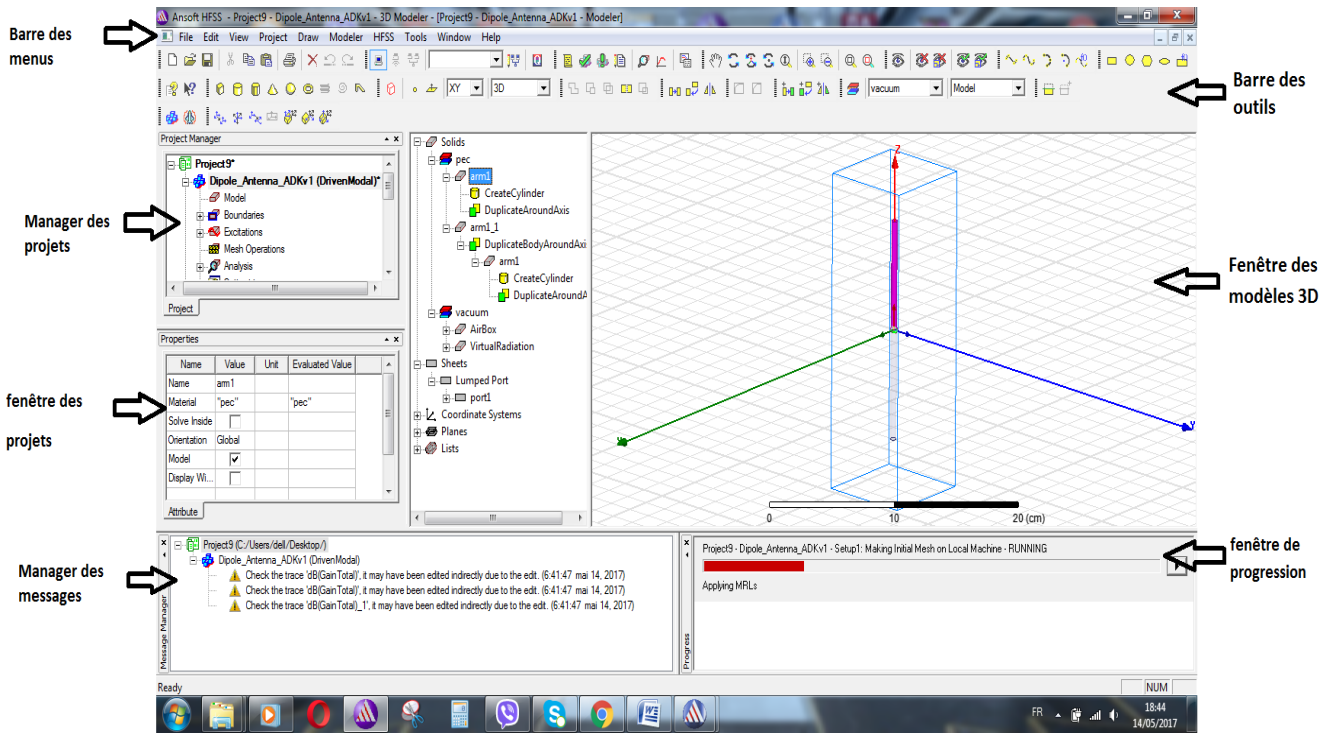
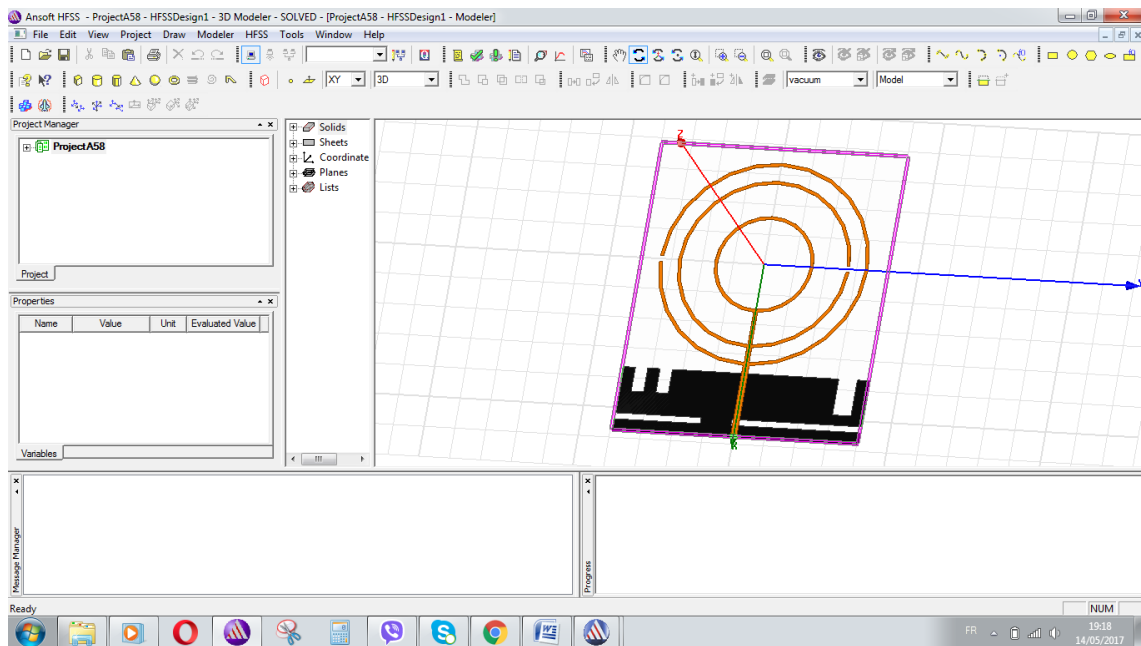


Figure A.1 différentes conceptions par HFSS.



**Figure A.2** Description générale des outils HFSS.



**Figure A.3** La conception d'antenne circulaire par HFSS.

# Bibliographie

---

- [1] Touati Mohamed Housseem Eddine, "Conception et Simulation d'une antenne micro-ruban circulaire", Mémoire Master, Biskra, 2014.
- [2] Alexandre Boyer, "ANTENNES SUPPORT DE COURS ENONCE DE TRAVAUX DIRIGES", INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE TOULOUSE, 5ème Année Réseau et Télécom, Toulouse, 2011.
- [3] Dominic Grenier, "Antennes & propagation radio", département de génie électriques et de génie informatique, Université Laval, Québec, 2017.
- [4] [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sidelobes\\_en.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sidelobes_en.svg)
- [5] Z. MUKIIBI et J. MOMODU, "Design and simulation of a circularly polarized GNSS patch antenna using momentum(ADS)", Mémoire Master, University of Saad Dahleb, Blida, 2014.
- [6] [http://www.telecom.ulg.ac.be/teaching/notes/total1/elen008/node89\\_ct.html](http://www.telecom.ulg.ac.be/teaching/notes/total1/elen008/node89_ct.html)
- [7] <http://blog.f6krk.org/wp-content/uploads/2012/02/Polarisation1.pdf>
- [8] A. ABDELHADI et I. HAROUN, "Conception et réalisation de deux antennes multi bande et large bande pour le système GNSS", Mémoire Master, Université Saad Dahlab, Blida, 2012.
- [9] Rabih A Slim, "Conception Antenne WIFI -Micro-ruban- HFSS Méthodologie", Rapport, Université Antonine, Faculté des Ingénieurs en Télécommunications, Informatique, Bierut, 2012.
- [10] F. Daout, S. Jacquet, X. Durocher et G. Holtzmer, "Conception, Simulation, Réalisation et mesure d'une antenne imprimée rectangulaire 2.4 GHz", IUT Ville d'Avray, 2009.
- [11] <http://www.memoireonline.com/11/12/6502/Conception-dune-antenne-Patch-Microstrip.html>
- [12] Grégory BEDDELEEM, "Antennes multistandards combinées à polarisations multiples pour les applications spatiales", thèse doctorat, Université Nice Sophia Antipolis, 2008.

- [13] Jean Luc COSANDIER , "GPS principes généraux de la localisation par satellite" , avril 2003.
- [14] <http://anr-prodige.com/index.php?n=Technologies.Geolocalisation>
- [15] <http://reperageterrestre.free.fr/erreurs.html>
- [16] F. GRANGE, "Matériaux composites pour antenne miniature intégrée", thèse de doctorat, Université de rennes 1, 2010.
- [17] S. LANNEBERE, "Etude Théorique de métamatériaux formes de particules diélectriques résonantes dans la gamme submillimétrique : Magnétisme artificiel et indice de réfraction négatif", Thèse doctorat, Université de Bordeaux 1 , 30 Novembre2011.
- [18] Hicham LALJ, "Conception et caractérisation de filtres et systèmes antennaires reconfigurables chargés par des résonateurs Métamatériaux sub-longueurs d'onde ", thèse doctorat, INSA de Rennes 2014.
- [19] [ <http://www.mdpi.com/2076-3417/2/2/375/htm>]
- [20] N. BENMOSTEFA, " Modélisation des structures électromagnétiques millimétriques agiles a bases des métamatériaux : application aux filtres ", Thèse de Doctorat, Université de ABOU BEKR BELKAID Tlemcen, 2014.
- [21] S N. BUROKUR, " Mise en œuvre de métamatériaux en vue d'application aux circuits microondes et aux antennes ", Thèse de Doctorat, Université de NANTES, 2005.
- [22] M. LABIDI, " Conception et application des métamatériaux pour des circuits RF", Thèse de Doctorat, l'Ecole Supérieure des Communications de Tunis, 2011-2012.
- [23] NACER Abdelghani, "Etude de structures à base de métamatériaux pour applications aux circuits micro-ondes et antennes: cas de résonateur en anneau fendu", Thèse de magister, Université ABOU BAKR BELKAID, Tlemcen, décembre 2011.
- [24] N.F. CHERCHAR et K. CHEBLAOUI, "Etude, simulation et réalisation d'une antenne GPS/GNSS planaire en utilisant le simulateur HFSS",Mémoire Master, Université Saad Dahleb , Blida ,2016.