

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique



**CRTI**  
Research Centre in Industrial Technologies

Département de Métallurgie

**Mémoire de projet de fin d'études**

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'État en Génie des Matériaux

---

Réalisation et simulation d'une antenne micro-ruban à base de  
métamatériaux

---

**ADJMI Chahd Rahyl**

Encadrée par : **Mr. Safou Abdelkader** (CRTI) et **PR. Chitroub  
Mohamed** (ENP)

Présenté et soutenu publiquement le (23/06/2024)

**Composition du jury :**

Président : Dr. Abadli Kamel ENP

Examinatrice : Dr. Mermoul Soumia ENP

Examinatrice : Dr. Zouzou Chaima ENP

ENP 2024

---



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique



**CRTI**  
Research Centre in Industrial Technologies

Département de Métallurgie

**Mémoire de projet de fin d'études**

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'État en Génie des Matériaux

---

Réalisation et simulation d'une antenne micro-ruban à base de  
métamatériaux

---

**ADJMI Chahd Rahyl**

Encadrée par : **Mr. Safou Abdelkader** (CRTI) et **PR. Chitroub  
Mohamed** (ENP)

Présenté et soutenu publiquement le (23/06/2024)

**Composition du jury :**

Président : Dr. Abadli Kamel ENP

Examinatrice : Dr. Mermoul Soumia ENP

Examinatrice : Dr. Zouzou Chaima ENP

ENP 2024

---

# ملخص

يعد تحسين تقنيات الكشف عن العيوب أمراً بالغ الأهمية في مختلف القطاعات الصناعية بسبب قيود الطرق التقليدية، مثل قدرات الكشف المحدودة والتكاليف المرتفعة، مما يتطلب ابتكاراً مستمراً. تقدم هوائيات المواد الخارقة حلاً واعداً بفضل قدرتها على التلاعب بالخصائص الكهرومغناطيسية وتعزيزها باستخدام مواد اصطناعية.

يركز هذا المشروع تحديداً على دراسة وتصميم هوائيات المواد الخارقة المحسنة للكشف عن العيوب. ومن خلال استكشاف تكوينات مختلفة للمواد الخارقة وتقييم أدائها، يهدف المشروع إلى دفع الحدود الحالية فيما يتعلق بالكشف عن طريق الجمع بين هندسة المواد والكهرومغناطيسية التطبيقية والابتكارات التكنولوجية.

الكلمات الرئيسية: كشف الأعطال - الهوائيات - المواد الخارقة - المواد الاصطناعية - الكهرومغناطيسية .

## Abstract

Improving defect detection techniques is crucial in various industrial sectors due to the limitations of traditional methods, such as limited detection capabilities and high costs, thus requiring continuous innovation. Metamaterial antennas offer a promising solution, due to their ability to manipulate and enhance electromagnetic properties using artificial materials.

This project focuses specifically on the study and design of metamaterial antennas optimized for defect detection. By exploring various metamaterial configurations and evaluating their performance, it aims to push back current limits in detection. By combining materials engineering, applied electromagnetism and technological innovatio

**Keywords :** fault detection - antennas - metamaterials - artificial materials - electromagnetism .

## Résumé

L'amélioration des techniques de détection des défauts est cruciale dans divers secteurs industriels en raison des limites des méthodes traditionnelles, telles que des capacités de détection restreintes et des coûts élevés, nécessitant ainsi des innovations continues. Les antennes métamatériaux se présentent comme une solution prometteuse grâce à leur capacité à manipuler et améliorer les propriétés électromagnétiques à l'aide de matériaux artificiels.

Ce projet se concentre spécifiquement sur l'étude et la conception d'antennes métamatériaux optimisées pour la détection des défauts. En explorant diverses configurations de métamatériaux et en évaluant leurs performances, il vise à repousser les limites actuelles en matière de détection. En combinant l'ingénierie des matériaux, l'électromagnétisme appliqué et les innovations technologiques, .

**Mots clés :** détection des défauts - antennes - métamatériaux - matériaux artificiels - électromagnétisme .

# Remerciements

Tout d'abord, je remercie Dieu tout-puissant pour m'avoir accordé la force et le courage nécessaires durant ces longues années d'études, ainsi que la patience pour mener à bien ce modeste travail.

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude envers mon encadrant, Monsieur Abdelkader Safou, pour m'avoir proposé ce sujet de recherche fascinant. Son engagement constant, son soutien inestimable et ses conseils avisés ont été d'une aide précieuse tout au long de ce travail. Je lui suis reconnaissante pour sa disponibilité exemplaire et la qualité exceptionnelle de son encadrement.

Mes remerciements vont également à mon encadrant à l'école, Monsieur Chitroub Mohamed, pour son suivi attentif de mon travail.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance envers tout le personnel du CRTI El Cheraga, en particulier la Division des Techniques d'Évaluation et de Contrôle Non Destructif ainsi que l'équipe de recherche Capteurs et Micro-ondes, pour leur assistance précieuse et le temps qu'ils m'ont généreusement accordé.

Je souhaite adresser mes sincères remerciements à tous les membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de lire et d'examiner mon travail.

Enfin, je tiens à remercier l'ensemble de mes professeurs au sein de l'École Nationale Polytechnique, département de Génie des Matériaux, pour la formation de qualité qu'ils m'ont prodiguée et pour avoir partagé avec moi leur savoir tout au long de mon cycle ingénieur.

*Adjmi Chahd Rahyl*

# Dédicaces

À ma mère, dont la présence inspire chacune de mes journées, guidée par la gentillesse et l'infinie patience qu'elle incarne.

À mon père, ma source de motivation et celui qui m'a encouragé à devenir indépendante.

À mes sœurs Hiba, Roumaïssa, Zhor et à mon petit frère, pour leur soutien précieux et constant

À mon amie Kamelia, compagne de mes jours heureux et de mes nuits sombres, toi qui peins de couleurs vives chaque instant partagé, tu es la brise légère qui efface mes soucis et ravive mes espoirs à chaque mot échangé.

À mon amie Lamis, un pilier que je connais depuis 8 ans, je suis reconnaissante d'avoir toujours pu compter sur sa présence à mes côtés.

À mon ami Massyl, qui illumine mes jours sombres par son rire contagieux et sa présence réconfortante. Sa capacité à me faire sourire, même lorsque je traverse des moments difficiles, est un cadeau précieux que je chéris profondément.

À mes amis Khawla, Anis, Rayan, Abelhak, et Sarah, qui m'ont écouté me plaindre pendant ces trois années sans jamais me juger, je vous apprécie énormément.

# Table des matières

Liste des tableaux

Table des figures

Liste des acronymes

Introduction générale	15
<b>1 État de l'art sur les métamatériaux</b>	<b>16</b>
1.1 Introduction	16
1.2 Approche de Veselago	16
1.3 Définition des métamatériaux	17
1.4 Classification des métamatériaux	19
1.4.1 Les matériaux doublement positifs (DPS)	20
1.4.2 Les matériaux à permittivité négative (ENG)	20
1.4.3 Matériaux à perméabilité négative (MNG)	21
1.4.4 Matériaux à doublement négatif (DNG)	21
1.5 Les résonateurs	23
1.5.1 Résonateur en anneaux fendus RAF (Split Ring Resonator)	23
1.5.2 Résonateur en Anneau Fendu Complémentaire(CSRR)	24
1.6 Propriétés des métamatériaux	25
1.6.1 Inversion de la loi de Snell	25
1.6.2 Inversion de l'effet Doppler	25
1.6.3 Inversion du rayonnement de Cerenkov	26
1.7 Applications des métamatériaux	26
1.7.1 Lentilles parfaites	26

1.7.2	Le Cloaking . . . . .	27
1.7.3	Domaine des antennes . . . . .	28
1.8	Conclusion . . . . .	28
<b>2</b>	<b>Antenne Micro-ruban</b>	<b>29</b>
2.1	Introduction . . . . .	29
2.2	Historique des antennes micro-rubans . . . . .	29
2.3	Définition d'antenne . . . . .	30
2.4	Antenne Micro-ruban . . . . .	30
2.4.1	L'éléments rayonnant . . . . .	30
2.4.2	Le substrat . . . . .	31
2.4.3	Le plan de masse . . . . .	33
2.5	Techniques d'alimentation . . . . .	33
2.5.1	Alimentation par contact . . . . .	33
2.5.1.1	Alimentation par ligne micro-ruban . . . . .	33
2.5.1.2	Alimentation par sonde coaxiale . . . . .	33
2.5.2	Alimentation sans contact . . . . .	34
2.5.2.1	Alimentation par couplage à travers une fente . . . . .	34
2.5.2.2	Alimentation par couplage de proximité . . . . .	35
2.5.2.3	Alimentation par lignes planaires de transmission . . . . .	35
2.6	Mécanisme de rayonnement . . . . .	36
2.7	Caractéristiques de l'antenne micro-ruban . . . . .	37
2.7.1	Paramètres électriques . . . . .	37
2.7.1.1	Impédance d'entrée . . . . .	37
2.7.1.2	Coefficient de réflexion S11 . . . . .	37
2.7.1.3	Rapport d'onde stationnaire ROS . . . . .	38
2.7.1.4	Bande passante . . . . .	38
2.7.2	Paramètres de rayonnement . . . . .	39
2.7.2.1	Diagramme de rayonnement . . . . .	39
2.7.2.2	Directivité . . . . .	41
2.7.2.3	Rendement de l'antenne . . . . .	41



2.7.2.4	Gain . . . . .	41
2.7.3	Polarisation . . . . .	41
2.8	Antenne à métamatériau . . . . .	42
2.9	Le principe détection des fissures par antenne . . . . .	43
2.10	La fabrication d'antennes micro-ruban . . . . .	43
2.11	Conclusion . . . . .	46
<b>3</b>	<b>Simulation et réalisation d'une Antenne à métamatériau</b>	<b>47</b>
3.1	Introduction . . . . .	47
3.2	La Simulation d'une antenne à métamateriau . . . . .	47
3.2.1	Présentation du Logiciel CST Microwave Studio . . . . .	47
3.2.2	processus de simulation dans CST . . . . .	48
3.2.3	Simulation d'une antenne SRR circulaire . . . . .	51
3.2.3.1	Dimensions et propriétés . . . . .	51
3.2.3.2	SRR circulaire avec plan de masse . . . . .	52
3.2.3.3	SRR Carré ligne de transmission . . . . .	52
3.2.4	Simulation d'une Antenne SRR carrée . . . . .	53
3.2.4.1	Dimensions et Propriétés . . . . .	53
3.2.4.2	SRR Carré avec plan de masse . . . . .	54
3.2.4.3	SRR Carré ligne de transmission . . . . .	54
3.2.5	Simulation d'une antenne CSRR circulaire . . . . .	55
3.2.5.1	Dimensions et Propriétés . . . . .	55
3.2.5.2	CSRR circulaire ligne de transmission . . . . .	56
3.2.6	Simulation d'une Antenne CSRR carrée . . . . .	56
3.2.6.1	Dimensions et Propriétés . . . . .	56
3.2.6.2	CSRR Carré ligne de transmission . . . . .	57
3.2.7	Simulation d'une Antenne patch . . . . .	58
3.2.7.1	Dimensions et Propriétés . . . . .	58
3.2.7.2	Patch microruban . . . . .	59
3.3	La Réalisation d'une antenne métamateriau . . . . .	60
3.3.1	La Methode Printed Circuit Board (PCB) . . . . .	60

---

3.3.2	Réalisation d'un résonateur à anneau fendu complété (CSRR) . . . . .	61
3.3.2.1	Procédure de Fabrication de PCB . . . . .	61
3.3.3	Réalisation d'un Résonateur à Anneau Fendu (SRR) . . . . .	66
3.3.3.1	Procédure de Fabrication de PCB . . . . .	66
3.4	La caractérisation de l'antenne métamateriau . . . . .	69
3.5	Conclusion . . . . .	71
<b>4</b>	<b>Résultats et interprétations</b>	<b>72</b>
4.1	Introduction . . . . .	72
4.2	Comparaison entre l'antenne patch et l'antenne à métamatériaux . . . . .	72
4.2.1	Coefficient de réflexion S11 et la bande passante . . . . .	73
4.2.2	Rapport d'onde stationnaire(VSWR) . . . . .	74
4.2.3	Diagramme de rayonnement . . . . .	75
4.3	Différents échantillons de métamatériaux . . . . .	79
4.3.1	Coefficient de réflexion S11 et la bande passante . . . . .	79
4.3.2	Rapport d'onde stationnaire(VSWR) . . . . .	81
4.3.3	Diagrame de rayonnement . . . . .	83
4.4	Conclusion . . . . .	90
	<b>Conclusions et perspectives</b>	<b>91</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>92</b>

# Liste des tableaux

3.1	Parametres de substrat SRR circulaire . . . . .	51
3.2	Paramètres de la ligne de transmission et double anneaux . . . . .	51
3.3	Paramètres de substrat SRR carré . . . . .	53
3.4	Paramètres de la ligne de transmission et double anneaux . . . . .	53
3.5	Paramètres de substrat CSRR circulaire . . . . .	55
3.6	Paramètres de la ligne de transmission et double anneaux . . . . .	55
3.7	Paramètres de substrat CSRR carré . . . . .	56
3.8	Paramètres de la ligne de transmission et double anneaux . . . . .	57
3.9	Paramètres de substrat . . . . .	58
3.10	Paramètres de la ligne de transmission et double anneaux . . . . .	58
4.1	Les caractéristiques de l'antenne patch et métamateriau . . . . .	78
4.2	Les résultats mesurés et simulés de chaque structure . . . . .	80
4.3	Les résultats VSWR mesurés de chaque structure . . . . .	82
4.4	Les résultats Gain mesurés de chaque structure . . . . .	85
4.5	Direction du lobe principal et angle d'ouverture pour chaque structure de méta- matériaux. . . . .	89

# Table des figures

1.1	Représentation vectorielle d'une onde plane[1]. (a) Milieu « main droite ». (b) Milieu « main gauche » . . . . .	19
1.2	Diagramme de la permittivité $\varepsilon$ de la perméabilité $\mu$ et de l'indice de réfraction( $n$ ) [2] . . . . .	19
1.3	Réseau de fils métalliques [3] . . . . .	20
1.4	Réseau de cercles métalliques [4] . . . . .	21
1.5	Exemple de réalisation du métamatériau DNG [5] . . . . .	22
1.6	Métamatériau DNG [5] . . . . .	22
1.7	Géométries des cellules unitaires d'un résonateur d'anneaux fendus [3]. a-RAF circulaire; b- RAF carrée. . . . .	23
1.8	Modèle du circuit équivalent du SRR [6]. . . . .	23
1.9	Différence entre une conception (a) RAF et (b) une conception complémentaire RAFC [7]. . . . .	24
1.10	Modèle du circuit équivalent du CSRR [6]. . . . .	24
1.11	Loi de Snell-Decartes lors du passage d'une onde d'un milieu main droite (a) vers un milieu main droite (angle positif). (b) Vers un milieu main gauche (angle négatif)[8]. . . . .	25
1.12	Schéma du rayonnement de Čerenkov (a) dans un milieu naturel conventionnel (b) dans un métamatériau [9] . . . . .	26
1.13	(a) Cas de la lentille classique (b) La résolution de l'image est mauvaise (c) Cas de la super lentille (d ) La résolution de l'image est meilleure [10] . . . . .	27
1.14	Principe du Cloaking [11] . . . . .	27
2.1	Schéma de l'antenne micro-ruban [12]. . . . .	30
2.2	Divers types d'éléments rayonnant [13] . . . . .	31
2.3	Efficacités de rayonnement en fonction de la permittivité relative du substrat [14] . . . . .	32
2.4	Alimentation par ligne Micro-ruban [15] . . . . .	33
2.5	Alimentation par câble coaxial [15] . . . . .	34

2.6	Alimentation par couplage à travers une fente [15]	34
2.7	Alimentation par couplage de proximité [15]	35
2.8	Les différents types de lignes planaires [16]	35
2.9	Mécanisme de rayonnement [17]	36
2.10	Bande passante et coefficient de réflexion [18]	38
2.11	Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne[19]	39
2.12	Diagramme de rayonnement de l'antenne isotrope [20]	39
2.13	Diagramme omnidirectionnel d'une antenne [20]	40
2.14	diagramme de rayonnement d'une antenne directive [20]	40
2.15	Polarisation du champ électromagnétique [21]	42
2.16	Illustrations des étapes de la photolithographie[22]	46
3.1	L'interface principale de CST	48
3.2	Modélisation Géométrique	48
3.3	Propriétés Matérielles	49
3.4	Paramétrage de la simulation	49
3.5	Calcul numérique	50
3.6	Analyse des résultats	50
3.7	Paramètres de la ligne de transmission et double anneaux	51
3.8	Représentation SRR circulaire avec plan de masse	52
3.9	Représentation SRR circulaire avec ligne de transmission	52
3.10	Paramètres de la ligne de transmission et double anneaux	53
3.11	Représentation SRR carré avec plan de masse	54
3.12	Représentation SRR carré avec la ligne de transmission	54
3.13	Paramètres de la ligne de transmission et double anneaux	55
3.14	Représentation CSRR circulaire	56
3.15	Paramètres de la ligne de transmission et double anneaux	57
3.16	Représentation CSRR carré	57
3.17	Paramètres de la ligne de transmission et double anneaux	58
3.18	Représentation antenne patch	59
3.19	Masques de PCB carré	61

3.20 Masques de PCB circulaire . . . . .	62
3.21 Substrat de PCB avec résine positive . . . . .	62
3.22 Substrat de PCB . . . . .	62
3.23 Substrat de PCB avec résine négative . . . . .	63
3.24 Le four . . . . .	63
3.25 BOite UV . . . . .	64
3.26 La resine négative apres la révélation . . . . .	65
3.27 Solution de gravure . . . . .	65
3.29 Substrat de PCB avec résine positive . . . . .	67
3.30 L’alignement dans la boite UV . . . . .	67
3.31 Résultat final . . . . .	68
3.32 Fer à souder et du laiton . . . . .	69
3.33 Soudure . . . . .	69
3.34 Connexion à l’analyseur de réseau . . . . .	70
3.35 L’analyseur de réseau . . . . .	70
3.36 CSRR carré et circulaire . . . . .	71
3.37 SRR carré et circulaire . . . . .	71
4.1 Comparaison S11 entre antenne patch et antenne métamatériaux . . . . .	73
4.2 Comparaison VSWR entre antenne patch et antenne métamatériaux . . . . .	74
4.3 Diagramme de rayonnement 3D de l’antenne métamatériau . . . . .	75
4.4 Diagramme de rayonnement 3D de l’antenne patch . . . . .	75
4.5 Diagramme de rayonnement 2D de l’antenne métamatériau . . . . .	77
4.6 Diagramme de rayonnement 2D de l’antenne patch . . . . .	77
4.7 Le paramètre S11 pour SRR carré . . . . .	79
4.8 Le paramètre S11 pour SRR circulaire . . . . .	79
4.9 Le paramètre S11 pour CSRR . . . . .	80
4.10 Le paramètre VSWR pour SRR carré . . . . .	81
4.11 Le paramètre VSWR pour SRR circulaire . . . . .	81
4.12 Le paramètre VSWR pour CSRR . . . . .	82
4.13 Diagramme de rayonnement 3D de SRR carré ligne de transmission . . . . .	83

---

4.14	Diagramme de rayonnement 3D de SRR carré plan de masse . . . . .	83
4.15	Diagramme de rayonnement 3D de SRR circulaire ligne de transmission . . . . .	84
4.16	Diagramme de rayonnement 3D de SRR circulaire plan de masse . . . . .	84
4.17	Diagramme de rayonnement 3D de CSRR carré . . . . .	85
4.18	Diagramme de rayonnement 3D de CSRR circulaire . . . . .	85
4.19	Diagramme de rayonnement 2D de SRR carré ligne de transmission . . . . .	87
4.20	Diagramme de rayonnement 2D de SRR carré plan de masse . . . . .	87
4.21	Diagramme de rayonnement 2D de SRR circulaire ligne de transmission . . . . .	87
4.22	Diagramme de rayonnement 2D de SRR circulaire plan de masse . . . . .	88
4.23	Diagramme de rayonnement 2D de CSRR carré . . . . .	88
4.24	Diagramme de rayonnement 2D de CSRR circulaire . . . . .	88

# Liste des acronymes

- **CND** : Contrôle Non Destructif
- **RHM** : Right-Handed Medium
- **DPS** : Double Positive
- **ENG** :Epsilon Negative
- **MNG** : Mu Negative
- **DNG** : Double Negative
- **SRR** : Split Ring Resonator
- **CSRR** : Complementary Split Ring Resonator
- **CPW** : Coplanar Waveguide
- **ROS** : Rapport d'Ondes Stationnaires
- **VSWR** : Voltage Standing Wave Ratio
- **PVD** : Physical Vapor Deposition
- **CVD** : Chemical Vapor Deposition
- **UV** : Ultraviolet
- **CST** :Computer Simulation Technology



# Introduction générale

**“Les métamatériaux ont le potentiel de révolutionner de nombreux domaines, notamment les communications sans fil, l’optique, l’imagerie et l’informatique.”**

**Vladimir M. Shalaev, "Metamaterials : Physics and Applications," Springer (2010).**

Les métamatériaux, des matériaux artificiels aux propriétés électromagnétiques inédites, ont récemment suscité un intérêt considérable dans le domaine de la recherche et de l’ingénierie. Contrairement aux matériaux naturels, les métamatériaux sont conçus pour manipuler les ondes électromagnétiques de manière précise, offrant ainsi des possibilités nouvelles et passionnantes pour l’innovation technologique.

Dans le domaine des antennes, les métamatériaux représentent une avancée significative. Ils permettent une amélioration notable des performances en termes de gain, de directivité et de bande passante. Grâce à leur capacité à concentrer et à diriger les ondes électromagnétiques, les antennes métamatériaux surpassent les antennes conventionnelles en efficacité et en précision. Cette amélioration est particulièrement cruciale dans des applications nécessitant une détection précise et fiable, telles que les contrôles non destructifs (CND).

Ce mémoire se concentre sur la réalisation et la simulation d’antennes métamatériaux optimisées pour la détection des défauts. En exploitant les propriétés uniques des métamatériaux et en mettant en lumière leur contribution à l’amélioration des performances des antennes, ce travail vise à démontrer leur potentiel dans le domaine de la détection

Ce travail comporte quatre chapitres organisés de la manière suivante :

Le premier chapitre est une étude bibliographique sur les métamatériaux, abordant leurs propriétés, leur fonctionnement, ainsi que leurs diverses applications.

Le deuxième chapitre constitue un état de l’art sur les antennes microruban pour la détection des défauts, en détaillant par la suite les méthodes de fabrication de ces dernières.

Le troisième chapitre présente les méthodes expérimentales utilisées, ainsi que la simulation effectuée à l’aide du logiciel CST.

Le quatrième et dernier chapitre expose les résultats obtenus pour les différentes structures de métamatériaux, accompagnés de leurs interprétations.

Le mémoire sera clôturé par une conclusion générale, résumant les principaux résultats obtenus et proposant des perspectives pour les travaux futurs.

# Chapitre 1

## État de l'art sur les métamatériaux

### 1.1 Introduction

La technologie des métamatériaux a révolutionné le domaine de l'électromagnétisme en offrant des possibilités jusqu'alors inexplorées. Contrairement aux matériaux naturels, les métamatériaux sont spécifiquement conçus pour exhiber des caractéristiques électromagnétiques inhabituelles telles qu'un indice de réfraction négatif, une permittivité et perméabilité négatives, entre autres. Grâce à ces propriétés uniques, ils permettent de manipuler avec précision le comportement de la lumière et des ondes électromagnétiques à des échelles nanométriques.

Ce chapitre propose un aperçu de l'état actuel des avancées concernant les matériaux magnétiques artificiels. Nous commencerons par présenter les différentes catégories de ces matériaux et les distinguerons en fonction des paramètres réels du milieu et de la bande de fréquence. En outre, nous examinerons en détail les propriétés et les caractéristiques électromagnétiques de ces matériaux, offrant ainsi une vue complète de leur potentiel et de leurs applications dans divers domaines technologiques.

### 1.2 Approche de Veselago

Tout a commencé en 1964 lorsque V. Veselago s'est résolu à étudier, d'un point de vue conceptuel, les propriétés qu'aurait un matériau ayant à la fois une permittivité et une perméabilité négatives dans la même gamme de fréquences. En appliquant les équations de Maxwell à une onde électromagnétique plane dans un tel milieu, Veselago a observé un comportement inhabituel : le trièdre formé par le vecteur d'onde, le champ électrique et le champ magnétique était indirect, tandis que dans le cas classique, ce trièdre est connu pour être direct. De plus, il a remarqué que le trièdre formé par le vecteur de Poynting, le champ électrique et le champ magnétique, restait direct lui aussi, ce qui signifiait que le vecteur d'onde et le vecteur de Poynting pointaient dans des directions opposées - une situation inédite.[23]

En se basant sur les lois de la réfraction de Snell et les relations de passage entre deux milieux, Veselago a également montré que l'indice d'un tel milieu serait négatif, ce qui impliquerait que tout rayon lumineux serait réfracté du même côté de la normale au plan d'incidence lorsqu'il passe d'un milieu d'indice positif à un milieu d'indice négatif (ou inversement), contrairement au phénomène de réfraction classique.

Cependant, Veselago a souligné que l'absence de matériaux possédant une perméabilité négative rendait impossible, à l'époque, la vérification expérimentale de ses résultats, ce qui a laissé ce sujet inexploré pendant de nombreuses années.

Il a fallu attendre la fin des années 1990 pour que le sujet soit réellement exploré, avec les travaux de J. Pendry et son équipe sur les réseaux de fils métalliques et les résonateurs en forme d'anneaux coupés. Ces deux types de structures, caractérisées par des dimensions bien inférieures à la longueur d'onde incidente, ont permis d'obtenir respectivement une permittivité et une perméabilité négatives dans la gamme des micro-ondes.[24]

En 2001, le groupe de D. Smith a fabriqué le premier matériau à permittivité et perméabilité négatives simultanées dans la gamme des micro-ondes, ce qui a permis de confirmer expérimentalement les prédictions de Veselago. Ils ont montré que dans un matériau où un seul des paramètres est négatif, les ondes ne peuvent se propager comme prévu, mais que la propagation est restaurée dans un milieu où les deux paramètres sont négatifs, comme Veselago l'avait prédit. En utilisant un montage avec un métamatériau taillé en forme de prisme, ils ont également confirmé l'existence d'un indice de réfraction négatif avec ce type de matériau.[25]

Voici un résumé de l'historique des métamatériaux [26] :

1. 1996 : Pendry démontre théoriquement la possibilité d'obtenir des perméabilités négatives  $\mu < 0$ .
2. 1999 : Pendry montre qu'il est possible d'obtenir des perméabilités négatives  $\mu < 0$  à partir d'un élément artificiel connu sous le nom de résonateur en anneau fendu (RAF) dans une bande de fréquence étroite autour de sa fréquence de résonance.
3. 2000 : Smith montre théoriquement la faisabilité d'un métamatériau composé d'un RAF couplé à un réseau de fils conducteurs verticaux.
4. 2001 : validation expérimentale de la réfraction négative par Smith.
5. 2002 : concept de lentille parfaite proposé par Pendry.
6. 2005 : Approche basée sur les lignes de transmission développée par Caloz et Itoh.
7. 2006 : applications des métamatériaux dans les antennes, les coupleurs, etc.

### 1.3 Définition des métamatériaux

Les métamatériaux sont une famille de matériaux innovants qui se composent de structures organisées d'éléments métalliques sur des substrats diélectriques. Le mot « métamatériau » provient des mots grecs « méta » et « matériau », où « méta » désigne quelque chose qui dépasse la norme, qui est modifié ou avancé.[27]

Il s'agit de matériaux artificiels créés pour avoir des caractéristiques physiques qui ne sont pas présentes dans les matériaux naturels. La définition des métamatériaux, élaborée par Rodger M. Walser de l'Université du Texas à Austin, comprend les composites macroscopiques avec une structure cellulaire synthétique, tridimensionnelle et périodique, conçue pour obtenir une combinaison optimale de deux réponses ou plus inconnues dans la nature.[28]

Il existe différentes définitions des métamatériaux électromagnétiques qui permettent d'avoir une vision de leur nature et de leurs caractéristiques [5] :

- Les matériaux artificiels appelés métamatériaux électromagnétiques (MTMs) sont constitués de structures métalliques homogènes arrangées de manière à présenter des propriétés inhabituelles qui ne sont pas présentes dans les matériaux naturels.

- Dans les métamatériaux, il est essentiel que les dimensions de la structure homogène effective, qui forme une cellule unitaire, soient nettement inférieures à la longueur d'onde guidée.
- Les métamatériaux se forment en utilisant des microstructures, couramment désignées sous le nom d'« atomes » ou de cellules.
- Il est possible de créer ces « atomes » en utilisant des matériaux électriques, non électriques ou diélectriques.
- On peut observer une symétrie ou une asymétrie, une isotropie ou une anisotropie dans les structures.
- Il est possible d'organiser ou de chaotiser l'organisation des atomes afin d'obtenir les caractéristiques macroscopiques souhaitées pour le métamatériau.

## Les équations de Maxwell dans les métamatériaux [29]

La propriété électromagnétique de ces métamatériaux peut être décrite par les équations de Maxwell. La transformation de ces équations sert à mettre en évidence les propriétés des métamatériaux. Elles sont données par l'ensemble des équations suivantes :

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \quad (1.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = -j\omega\varepsilon\vec{E} \quad (1.2)$$

où  $\omega$  est la fréquence angulaire,  $\varepsilon$  et  $\mu$  sont permittivité et perméabilité.

Pour les champs électriques et magnétiques d'ondes planes :

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{j(-kr+\omega t)} \quad (1.3)$$

$$\vec{H} = \vec{H}_0 e^{j(-kr+\omega t)} \quad (1.4)$$

où  $k$  est un vecteur d'onde, les équations (1.1) et (1.2) deviendront :

$$\vec{k} \times \vec{E} = \omega\mu\vec{H} \quad (1.5)$$

$$\vec{k} \times \vec{H} = -\omega\varepsilon\vec{E} \quad (1.6)$$

Il faut savoir que le flux d'énergie dans un champ électromagnétique est déterminé par la partie réelle du vecteur de Poynting. Ce vecteur, noté  $(\vec{S})$ , représente la densité de puissance transportée par l'onde électromagnétique. On écrit :

$$\vec{S} = \frac{1}{2} \vec{E} \times \vec{H}^* \quad (1.7)$$

Dans un milieu isotrope et homogène, les valeurs de  $\varepsilon$  et  $\mu$  sont simultanément positives. Dans ce milieu, le champ électrique  $\vec{E}$ , le champ magnétique  $\vec{H}$  et le vecteur de propagation  $\vec{k}$  forment un trièdre direct de vecteurs. Par conséquent, il est également défini comme milieu main droite (RHM), où  $\vec{S}$ ,  $\vec{K}$  ont les mêmes directions et les ondes électromagnétiques peuvent se propager.

Dans le cas où les valeurs de  $\varepsilon$  et  $\mu$  sont négatives simultanément, les équations (1.5) et (1.6) peuvent être réécrites comme :

$$\vec{k} \times \vec{E} = -\omega|\mu|\vec{H} \quad (1.8)$$

$$\vec{k} \times \vec{H} = \omega|\varepsilon|\vec{E} \quad (1.9)$$

Dans ce cas, le champ électrique  $\vec{E}$ , le champ magnétique  $\vec{H}$  et le vecteur de propagation  $\vec{k}$  forment un trièdre indirect de vecteurs, qui est également défini comme milieu main gauche (LHM). Dans ce milieu, le vecteur de Poynting  $\vec{S}$  a une direction opposée à celle du vecteur de propagation  $\vec{k}$ . Cela signifie que l'énergie et les fronts d'onde se déplacent dans des directions opposées.

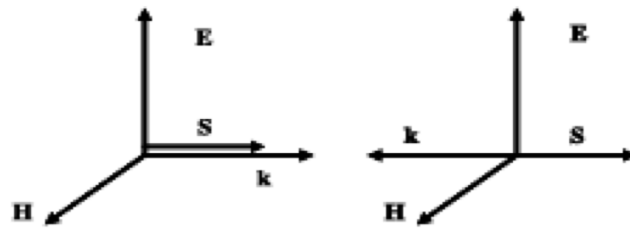


FIGURE 1.1 – Représentation vectorielle d'une onde plane[1]. (a) Milieu « main droite ». (b) Milieu « main gauche ».

## 1.4 Classification des métamatériaux

Veselago a suggéré de classer les métamatériaux en prenant en considération leur permittivité  $\varepsilon$  et perméabilité  $\mu$ , ainsi que l'indice de réfraction  $n$ . Les métamatériaux électromagnétiques sont classés en fonction de chaque combinaison de signes de  $\varepsilon$  et  $\mu$  [30].

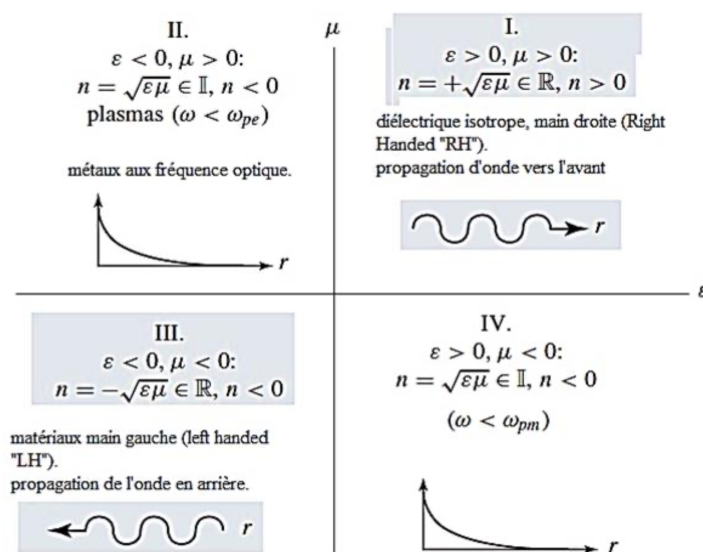


FIGURE 1.2 – Diagramme de la permittivité  $\varepsilon$  de la perméabilité  $\mu$  et de l'indice de réfraction( $n$ ) [2]

### 1.4.1 Les matériaux doublement positifs (DPS)

Les deux paramètres  $\varepsilon$  et  $\mu$  sont positifs dans le quadrant I et sont connus sous le nom de double positif (DPS) ou milieu main droite (RHM). Ces matériaux peuvent être trouvés dans la nature, tels que les matériaux diélectriques, dans lesquels les ondes électromagnétiques peuvent se propager [5].

### 1.4.2 Les matériaux à permittivité négative (ENG)

Dans le quadrant II, les paramètres sont  $\varepsilon$  négatifs et  $\mu$  positifs. Ces matériaux sont appelés milieu epsilon négatif (ENG) et sont représentés par les plasmas. Selon Pendry et ses collègues, un réseau de tiges métalliques orienté parallèlement, avec un rayon 'r' et une périodicité 'a', montre une réponse électromagnétique comparable à celle d'un plasma de faible densité [31].

La figure (1.3) illustre le réseau de fils métalliques. Le réseau de tiges étudié par Pendry a montré une permittivité négative lorsqu'il a été excité par un champ électrique en parallèle avec les tiges.

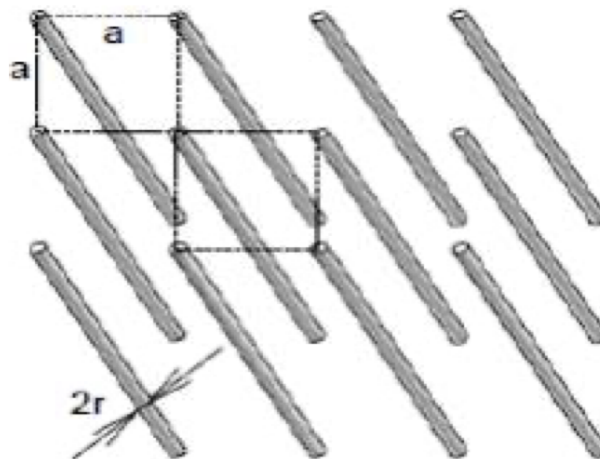


FIGURE 1.3 – Réseau de fils métalliques [3]

La permittivité effective est donnée par l'équation suivante selon [32] :

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (1.10)$$

où  $\omega$  est la fréquence de la propagation de l'onde électromagnétique et  $\omega_p$  est celle du plasma.

La fréquence de plasma est calculée par l'expression suivante [18] :

$$\omega_p^2 = \frac{\rho e^2}{\varepsilon_0 m_e} \quad (1.11)$$

où  $\rho$  représente la densité des électrons,  $e$  la charge et  $m_e$  la masse effective.

L'équation (1.10) montre que la permittivité est négative lorsque la fréquence de propagation est inférieure à la fréquence de plasma. Dans ce cas, il n'y a pas de propagation d'ondes, et les ondes électromagnétiques sont entièrement réfléchies. Ce comportement est similaire à la propagation des ondes électromagnétiques dans un milieu plasmatique [5].

### 1.4.3 Matériaux à perméabilité négative (MNG)

Il est possible que certains matériaux ferromagnétiques et composites antiferromagnétiques aient une perméabilité négative, comme montré dans le quadrant IV. Toutefois, ces matériaux sont peu fréquents, lourds et ont de grandes pertes magnétiques. La création de milieux non magnétiques avec une réponse magnétique est donc extrêmement intéressante. Cela est devenu possible en 1999 lorsque Pendry a introduit la structure de rouleau suisse (Swiss-roll). Il s'agit de deux cercles métalliques ouverts imbriqués, qui ont une perméabilité négative dans certaines conditions, lorsqu'un champ magnétique d'excitation  $H$  est parallèle au plan des anneaux ( $H // Y$ ) [29].

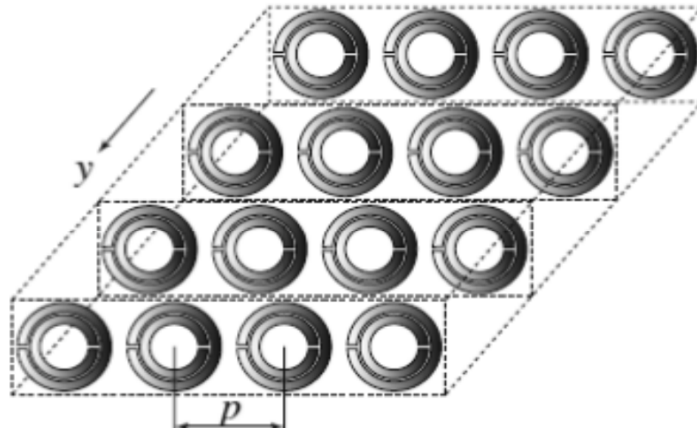


FIGURE 1.4 – Réseau de cercles métalliques [4]

La perméabilité effective est donnée par la formule suivante [33] :

$$\mu(\omega) = 1 - \frac{F\omega^2}{\omega^2 - \omega_0^2 + j\omega\zeta} \quad (1.12)$$

$$F = \pi \left( \frac{a}{p} \right)^2 \quad (1.13)$$

Où  $F$  est une constante et  $a$  est le rayon du petit anneau.

$\omega$  est la fréquence de la propagation de l'onde électromagnétique,  $\omega_0$  est la fréquence de résonance magnétique et  $\zeta$  est le facteur d'atténuation dû aux pertes du métal.

Dans le cas sans perte  $\zeta$  est nulle, la perméabilité est négative lorsque :

$$\omega_0 < \omega < \frac{\omega_0}{\sqrt{1-F}} \quad (1.14)$$

Il n'y a pas de propagation d'ondes et les ondes électromagnétiques sont entièrement réfléchies. Ce comportement est similaire à la propagation des ondes électromagnétiques dans les ferrites [5].

### 1.4.4 Matériaux à doublement négatif (DNG)

Dans le quadrant III, les deux paramètres sont négatifs, cette région est appelée doublement négative (DNG) ou milieu main gauche (LHM). D. Smith a présenté la première démonstration

expérimentale d'un milieu composite doublement négatif en 2000. En se basant sur les recherches de J. Pendry, il a combiné un réseau de fils avec un réseau de cercles métalliques. Il a donc constaté une transmission à travers ce milieu dans la bande de fréquence où la permittivité et la perméabilité sont négatives, même l'indice de réfraction négatif  $n = -\sqrt{\varepsilon\mu}$  [34].

La théorie des milieux main gauche, introduite par Veselago, a été mise en évidence pour la première fois dans cette expérimentation, qui prévoit une propagation des ondes électromagnétiques à travers un milieu doublement négatif. Il s'agissait du premier métamatériau fabriqué.

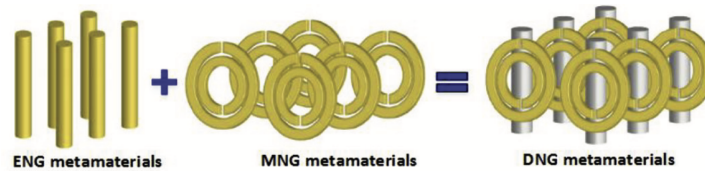


FIGURE 1.5 – Exemple de réalisation du métamatériau DNG [5]

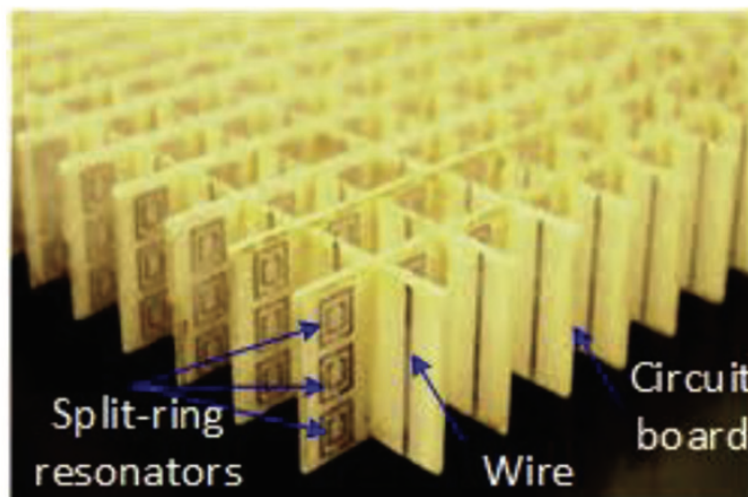


FIGURE 1.6 – Métamatériau DNG [5]

La permittivité effective est donnée par la formule suivante [35] :

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_{ep}^2 - \omega_{e0}^2}{\omega^2 - \omega_{e0}^2 + j\omega\gamma_c} \quad (1.15)$$

où  $\omega_{ep}$  la fréquence électrique du plasma,  $\omega_{e0}$  est celle de la résonance électrique et  $\gamma_c$  est la fréquence de collision.

La perméabilité effective est donnée par la formule suivante [35] :

$$\mu(\omega) = 1 - \frac{\omega_{mp}^2 - \omega_{m0}^2}{\omega^2 - \omega_{m0}^2 + j\omega\Gamma} \quad (1.16)$$

où  $\omega_{mp}$  est la fréquence magnétique du plasma,  $\omega_{m0}$  est celle de la résonance magnétique et  $\Gamma$  est le facteur d'amortissement.



## 1.5 Les résonateurs

### 1.5.1 Résonateur en anneaux fendus RAF (Split Ring Resonator)

Les métamatériaux sont principalement constitués de résonateurs conducteurs, souvent en cuivre, connus sous le nom de Split Ring Resonators, dont la géométrie et la taille varient selon le contexte. Généralement circulaires ou carrés, leur diamètre minimal est de l'ordre du millimètre.

Pour renforcer les effets électromagnétiques, ces résonateurs sont habituellement disposés de manière à être imbriqués deux par deux, introduisant ainsi une inductance mutuelle et capacitive. Ces cellules sont ensuite imprimées périodiquement sur des substrats tels que le Téflon ou les fibres de verre, et sont espacées de quelques millimètres les unes des autres. Ensuite, les substrats sont superposés pour former un bloc supposé homogène par la suite.

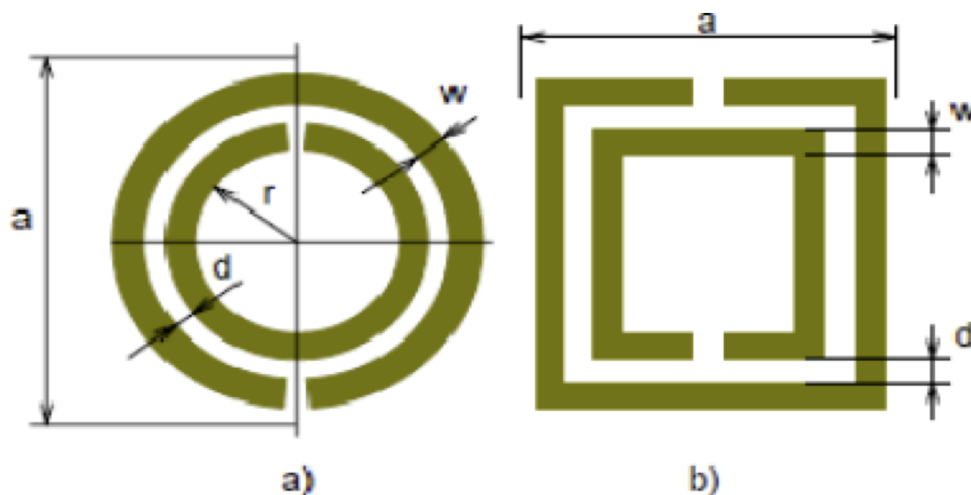


FIGURE 1.7 – Géométries des cellules unitaires d'un résonateur d'anneaux fendus [3]. a-RAF circulaire ; b- RAF carrée.

La figure suivante présente le circuit équivalent d'un résonateur en anneau fendu [36] :

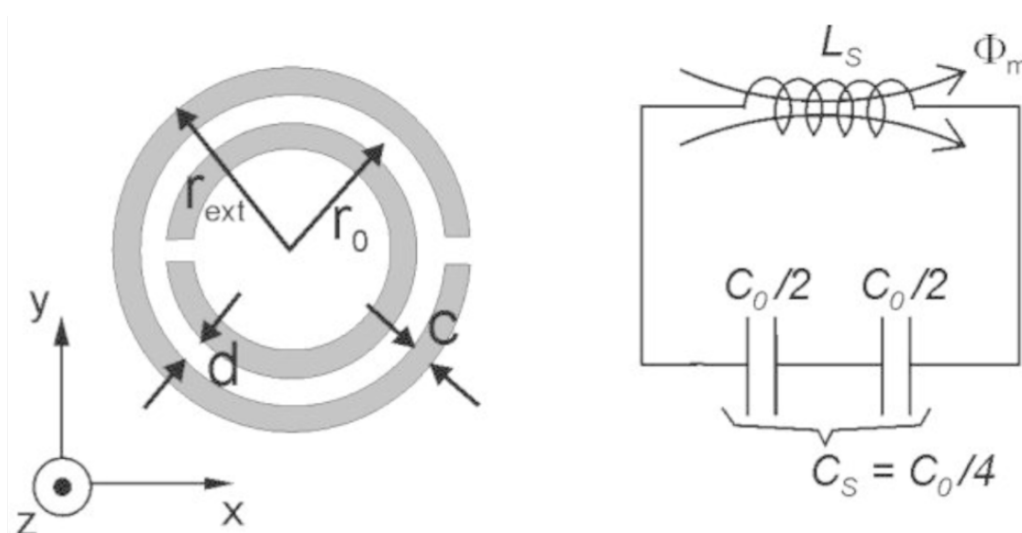


FIGURE 1.8 – Modèle du circuit équivalent du SRR [6].

### 1.5.2 Résonateur en Anneau Fendu Complémentaire (CSRR)

Le Résonateur en Anneau Fendu Complémentaire (RAFC), également connu sous le nom de CSRR en anglais, est un composant dont les dimensions sont nettement inférieures à la longueur d'onde, dérivé du Résonateur en Anneaux Fendus (RAF ou SRR) introduit par Pendry. Contrairement au RAF, qui consiste en deux anneaux interrompus concentriques en métal gravés sur un support diélectrique, le RAFC présente deux fentes en forme d'anneaux interrompus concentriques dans le plan conducteur (en cuivre dans notre cas), agencées sur un substrat. La différence entre une conception RAF et une conception RAFC est illustrée dans la figure suivante, où toute la partie conductrice (les anneaux) et la partie diélectrique (les fentes) du RAF sont respectivement remplacées par des fentes et du cuivre dans le RAFC.

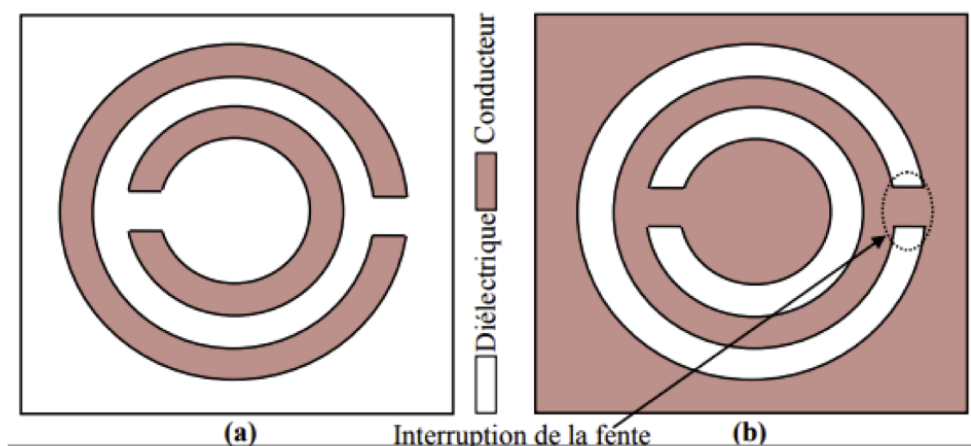


FIGURE 1.9 – Différence entre une conception (a) RAF et (b) une conception complémentaire RAFC [7].

La figure suivante nous montre le circuit électrique équivalent d'une cellule de (RAFC) [36] :

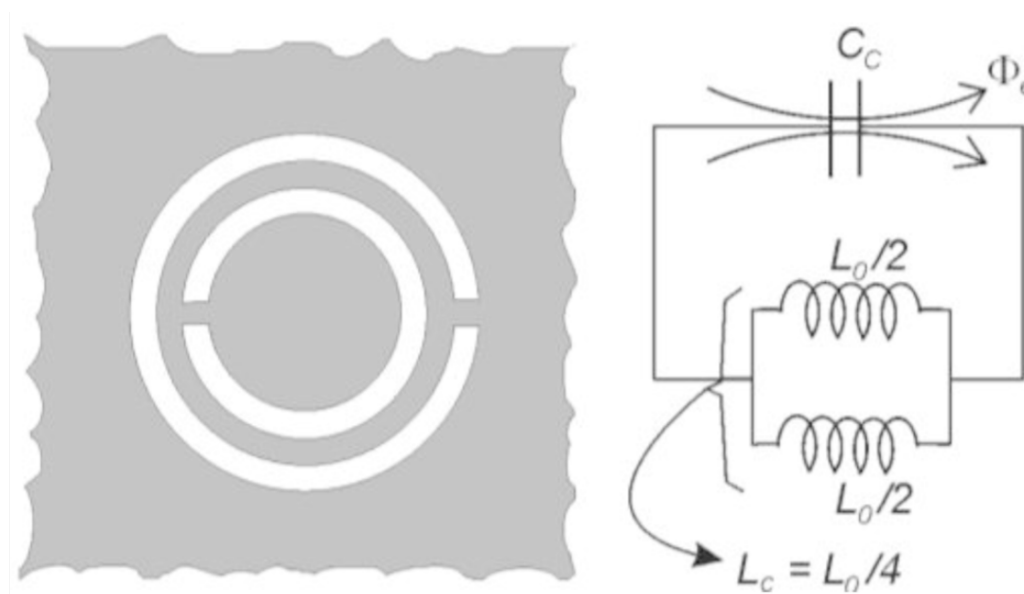


FIGURE 1.10 – Modèle du circuit équivalent du CSRR [6].

## 1.6 Propriétés des métamatériaux

Selon Veselago, lorsque  $\varepsilon$  et  $\mu$  sont simultanément négatifs, certains phénomènes inhabituels se produisent, tels que la loi inversée de Snell, le rayonnement de Cerenkov et le changement de Doppler. [37].

### 1.6.1 Inversion de la loi de Snell

La réfraction est le phénomène où la lumière change brusquement de direction lorsqu'elle passe d'un milieu à un autre ayant des vitesses de propagation différentes. Cette variation de trajectoire est prévisible grâce à la loi de Snell-Descartes, qui nous permet de déterminer la direction du rayon lorsqu'il rencontre une surface séparant deux milieux. Elle est donnée par la relation suivante [38] :

$$n_1 \sin(\theta_i) = n_2 \sin(\theta_t) \quad (1.17)$$

Avec  $n_1$  et  $n_2$  les indices de réfraction des matériaux supportant l'onde incidente et l'onde transmise, respectivement, et  $\theta_i$  et  $\theta_t$  les angles des ondes incidentes et transmises par rapport à la normale de l'interface entre les deux matériaux.

On peut alors distinguer deux cas. Dans le cas où les deux matériaux ont un indice de même signe, on considère que la réfraction est positive, car les deux angles sont positifs. En cas de signes différents entre les deux matériaux, on considère que la réfraction est négative, car l'un des deux angles sera négatif.

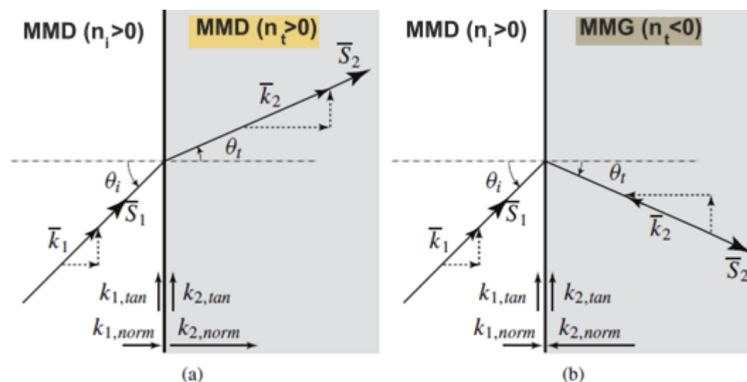


FIGURE 1.11 – Loi de Snell-Descartes lors du passage d'une onde d'un milieu main droite (a) vers un milieu main droite (angle positif). (b) Vers un milieu main gauche (angle négatif)[8].

### 1.6.2 Inversion de l'effet Doppler

Lorsqu'un objet se déplace par rapport à une source électromagnétique ou acoustique qui est immobile, il se produit un décalage entre la fréquence à laquelle le signal est émis par la source et celle reçue par l'objet. Cette différence de fréquence peut être caractérisée par la relation suivante [39] :

$$\Delta\omega = \omega_{\text{source}} - \omega_{\text{récepteur}} = \omega_0 \frac{n\nu}{c} \quad (1.18)$$

Où  $\omega_0$  est la pulsation de la source,  $\nu$  est la vitesse de la lumière dans le milieu de propagation et  $n$  est l'indice de réfraction du milieu de propagation.

Cette relation permet de conclure que si l'onde se propage dans un milieu à indice de réfraction positif, la fréquence du signal reçu augmente par rapport à la fréquence d'émission lorsque l'émetteur s'approche du récepteur. Mais lorsque l'onde se propage dans un milieu à indice de réfraction négatif, la fréquence du signal reçu par l'objet diminue.

### 1.6.3 Inversion du rayonnement de Čerenkov

Le rayonnement de Čerenkov se produit lorsque des particules chargées, comme des électrons, se déplacent à travers un milieu diélectrique à une vitesse supérieure à celle de la lumière dans ce milieu, émettant ainsi un rayonnement électromagnétique dans un cône dirigé vers l'avant. Ce phénomène est nommé d'après le scientifique russe qui l'a découvert. Dans une récente étude publiée dans *Physical Review Letters*, des chercheurs ont démontré expérimentalement que la direction du rayonnement de Čerenkov peut être inversée dans les métamatériaux.[9]. On peut calculer  $\theta$  l'angle dite « angle de Čerenkov » par [29] :

$$\cos \theta = \frac{c_0}{n\nu} \quad (1.19)$$

Où  $\nu$  est la vitesse de la particule dans le milieu .

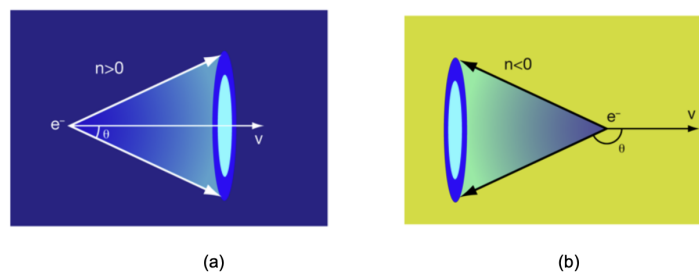


FIGURE 1.12 – Schéma du rayonnement de Čerenkov (a) dans un milieu naturel conventionnel (b) dans un métamatériau [9]

## 1.7 Applications des métamatériaux

Les métamatériaux sont de nouveaux matériaux qui présentent des caractéristiques électromagnétiques captivantes telles qu'un indice de réfraction négatif, la propagation des ondes inverses. Ils constituent un vaste domaine de recherche renommé pour ses potentielles applications révolutionnaires, telles que les super lentilles optiques ou les antennes miniaturisées.

### 1.7.1 Lentilles parfaites

Les super lentilles, conçues à partir de métamatériaux, offrent une capacité unique de concentration précise de la lumière et des ondes électromagnétiques. Contrairement aux lentilles traditionnelles qui nécessitent une courbure pour focaliser la lumière, les super lentilles peuvent être plates.

Leur caractère « super » réside dans leur capacité à surmonter la limite de résolution imposée par la longueur d'onde de la lumière, une limitation des lentilles classiques. Par exemple,

les atomes, bien plus petits que la longueur d'onde de la lumière visible, sont invisibles aux microscopes optiques traditionnels[40].

Les super lentilles peuvent manipuler la lumière de manière spécifique, permettant la visualisation de détails bien plus fins que la longueur d'onde de la lumière. Cela ouvre de nouvelles perspectives dans des domaines tels que la biologie et la nanotechnologie, en permettant l'observation de structures invisibles jusqu'alors.

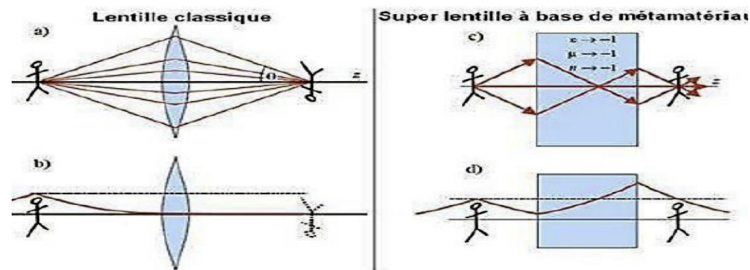


FIGURE 1.13 – (a) Cas de la lentille classique (b) La résolution de l'image est mauvaise (c) Cas de la super lentille (d) La résolution de l'image est meilleure [10]

Une super lentille a été construite pour la première fois en 2005 par des chercheurs de l'UC Berkeley [41].

## 1.7.2 Le Cloaking

L'application de la cape d'invisibilité, également connue sous le nom de Cloaking, a suscité un vif intérêt parmi les chercheurs. Son objectif est de rendre un objet ou une personne invisibles en les entourant d'un réseau de métamatériaux qui dévie la lumière ainsi que les ondes électromagnétiques en général, tout en permettant la reconstitution des fronts d'onde à l'aval de cet objet. [42].

Concrètement, cela signifie que la cape d'invisibilité manipule la lumière de telle manière que tout ce qui est placé à l'intérieur devient indétectable pour un observateur externe. Cette approche présente un intérêt considérable dans le domaine de la défense, notamment pour les applications de furtivité.

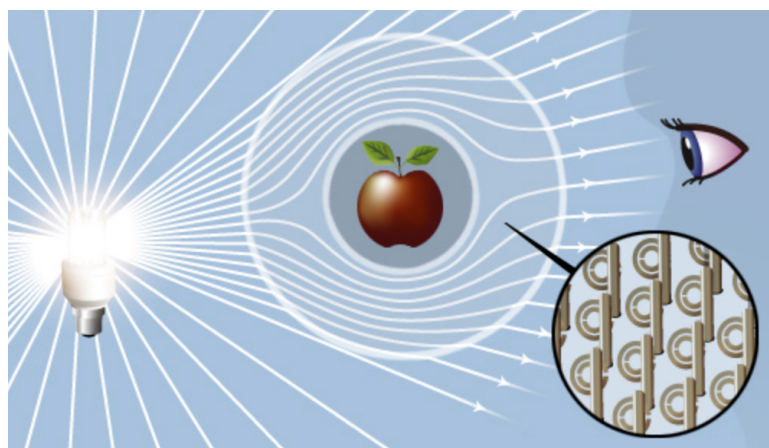


FIGURE 1.14 – Principe du Cloaking [11]

Les premières expériences ont principalement utilisé les micro-ondes [43], La première cape d'invisibilité à base de métamatériaux sub-longueur d'onde a été publiée dans la revue Science en novembre 2006. Créé par D. R. Smith et théoriquement conçu par J. B. Pendry, ce nouvel appareil électromagnétique permet de rendre un objet métallique invisible face à une onde électromagnétique approchant [44].

### 1.7.3 Domaine des antennes

Les antennes jouent un rôle crucial dans la transmission et la réception des signaux radio. Depuis l'avènement pratique des métamatériaux en 2001, ceux-ci sont devenus un outil précieux dans l'amélioration des performances des antennes.

Aujourd'hui, les métamatériaux sont utilisés dans le domaine des antennes pour diverses améliorations. Cela inclut la réduction de leur taille, l'extension de leur bande de fréquences de résonance, l'augmentation de leur largeur de bande, l'augmentation du gain et de la directivité, la manipulation de la polarisation, l'amélioration du diagramme de rayonnement, ainsi que la capacité à reconfigurer l'antenne selon les besoins[45].

Les métamatériaux ont vraiment changé la donne pour les antennes utilisées dans la détection des fissures avec les micro-ondes. Ils rendent ces antennes beaucoup plus sensibles et précises. En concentrant et en amplifiant les champs électriques autour des parties qui détectent les fissures, les métamatériaux permettent de repérer même les plus petites fissures cachées dans des matériaux qui ne sont pas métalliques. C'est comme si on mettait des lunettes ultra-performantes à nos antennes pour voir les problèmes avec une incroyable précision[46].

## 1.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré l'histoire de la création des métamatériaux ainsi que leurs classifications. Nous avons ensuite examiné les différents types de métamatériaux en fonction de leur perméabilité négative, de leur permittivité négative ou des deux simultanément, ainsi que les conditions requises pour obtenir ces paramètres négatifs. Nous avons également discuté des conséquences de l'indice de réfraction négatif, telles que l'inversion de la loi de Snell-Descartes et de l'effet Doppler et Čerenkov.

Enfin, nous avons illustré quelques exemples d'applications des métamatériaux, notamment des lentilles parfaites et des capes d'invisibilité. Ce chapitre met en évidence le rôle crucial des métamatériaux dans les nouvelles technologies, en particulier dans le domaine des télécommunications, notamment les antennes.

Le deuxième chapitre, dans la continuité de notre exploration, se concentre plus particulièrement sur le domaine des antennes micro-ruban, en mettant en évidence leur conception, leurs caractéristiques et leurs applications dans le domaine de la détection des défauts.

# Chapitre 2

## Antenne Micro-ruban

### 2.1 Introduction

Les antennes micro ruban, également connues sous le nom d'antennes microstrip, ont acquis une réputation de technologie polyvalente et prometteuse pour la détection de défauts dans différents matériaux. Grâce à leur petite taille, leur faible poids et leur facilité d'intégration, ces outils sont idéaux pour les systèmes d'inspection portables et non destructifs.

Ce chapitre sera consacré à la présentation générale de la technologie des antennes imprimées. Nous débuterons par une analyse de leur structure et des techniques d'alimentation utilisées. Ensuite, nous mettrons en lumière les caractéristiques qui rendent cette technologie innovante et unique. Enfin, nous conclurons ce chapitre en détaillant la méthode de réalisation des antennes dans ce contexte.

### 2.2 Historique des antennes micro-rubans

L'idée des antennes micro-rubans est apparue dans les années 50, mais leur véritable évolution s'est produite dans les années 70. Elles ont été utilisées dans des domaines tels que la défense, l'aéronautique et l'aérospatiale pour leurs premières applications. De nos jours, grâce au développement des télécommunications, les antennes imprimées sont présentes dans de nombreux appareils électroniques, tels que les smart phones, et même dans les structures d'avions [47].

La première antenne imprimée a été conçue par Georges Deschamps en 1953, puis Henri Gutton et Georges Baissinot ont breveté une antenne micro-ruban en 1956. Cependant, les premiers prototypes n'ont été produits que dans les années 1970, avec les progrès de la lithographie du cuivre et de l'or sur des substrats diélectriques, ainsi que l'amélioration des techniques de modélisation [48].

En 1972, John Howell a réalisé une antenne imprimée avec des polarisations linéaires et circulaires pour la NASA. À la même époque, Robert Munson d'Aerospace Systems a développé une antenne imprimée adaptable à la forme et à la circonférence des missiles [49].

## 2.3 Définition d'antenne

Le rôle de l'antenne d'émission est de convertir la puissance électromagnétique guidée provenant d'un générateur en une puissance rayonnée. En ce sens, elle agit comme un transducteur. Inversement, une antenne de réception peut capter cette puissance rayonnée et la transformer en puissance électromagnétique guidée. Dans ce cas, l'antenne fonctionne comme un capteur et un convertisseur de puissance rayonnée en puissance électromagnétique guidée, similaire à un télescope qui capte la lumière des étoiles et la transforme [50].

Généralement, une antenne peut être utilisée aussi bien en réception qu'en émission avec les mêmes caractéristiques de rayonnement. On parle alors de réciprocité de son fonctionnement [51].

## 2.4 Antenne Micro-ruban

L'antenne micro-ruban, également connue sous le nom d'antenne imprimée, est une forme d'antenne récemment développée et utilisée de plus en plus couramment. Elle est composée d'un diélectrique, sur une face du substrat, d'une couche métallique plane et conductrice, appelée plan de masse. Sur la face opposée, un motif métallique conducteur de forme variable, connu sous le nom d'élément rayonnant, est employé afin de supporter les courants de surface qui génèrent le rayonnement électromagnétique [52].

De cette manière, elle remplit deux fonctions essentielles qui définissent de manière générale le principe d'une antenne, à savoir le rayonnement d'émission et la réception d'une onde électromagnétique.

La structure de base est comme la suivante :

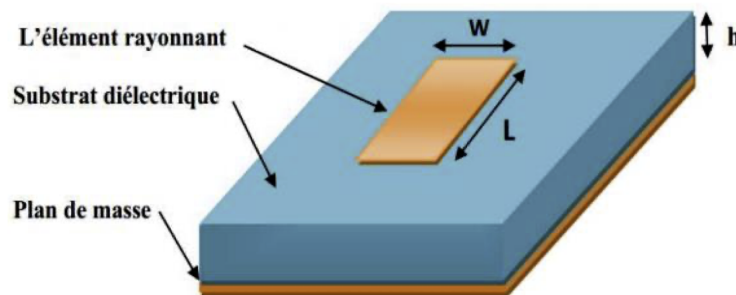


FIGURE 2.1 – Schéma de l'antenne micro-ruban [12].

### 2.4.1 L'éléments rayonnant

Le dessus peut contenir des éléments métalliques appelés « éléments rayonnants », « plaques rayonnantes » ou « patches » en anglais, qui ont pour fonction principale de transmettre de l'énergie. Le patch est un conducteur mince sur le plan physique (son épaisseur est souvent négligeable, car elle est d'environ quelques micromètres), et dans la plupart des applications pratiques, il est généralement de forme rectangulaire ou circulaire. Cependant, il est possible de tester d'autres géométries, y compris la forme triangulaire.

En général, les matériaux couramment employés pour fabriquer des patches sont le cuivre, l'argent et l'or, mais d'autres matériaux et polymères conducteurs sont en cours d'étude [53].



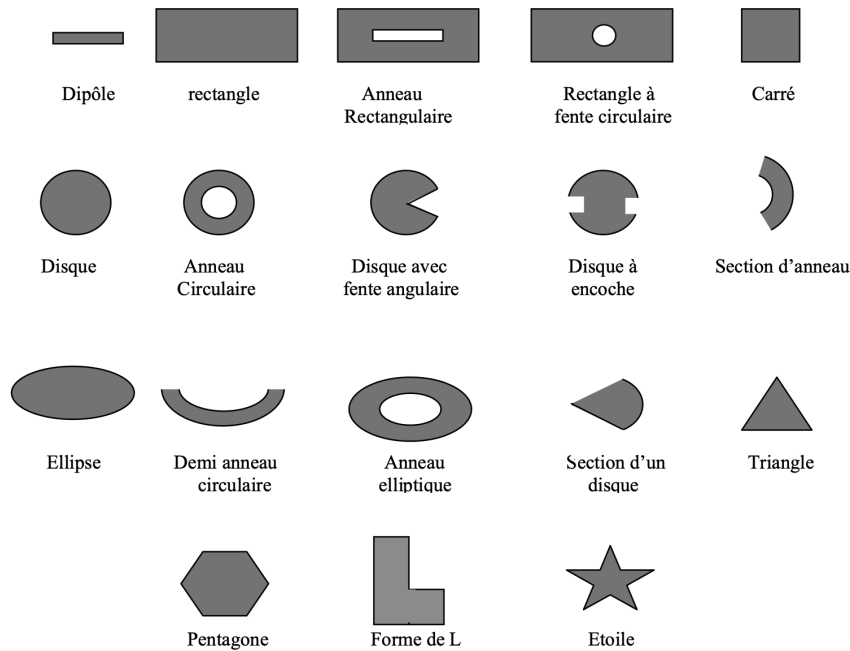


FIGURE 2.2 – Divers types d'éléments rayonnant [13]

## 2.4.2 Le substrat

Le rôle du substrat dans la technologie des antennes micro-ruban est double. Il agit à la fois comme un matériau diélectrique, où les circuits sont gravés, et comme une pièce mécanique, constituant le support de la structure. Cette dualité implique des contraintes à la fois mécaniques et électriques, parfois difficiles à concilier. Le substrat est utilisé pour augmenter la puissance émise par l'antenne, réduire les pertes liées à l'effet Joule, et améliorer sa bande passante.

Le substrat diélectrique joue un rôle crucial en influençant directement la fréquence de résonance, la bande passante et le rayonnement de l'antenne, car une grande partie des ondes se propagent à travers lui. Il est recommandé de choisir des matériaux à faible permittivité afin d'éviter le blocage des champs à l'intérieur de la cavité (plans métalliques et substrat) et de diminuer les pertes diélectriques, ce qui améliore le rendement du patch. Le substrat peut avoir une constante diélectrique allant de 2 à 12 afin de fonctionner à des fréquences allant de 1 à 100 GHz [20].

La permittivité augmentée réduit l'efficacité du rayonnement. Afin d'améliorer l'efficacité, on privilégie l'utilisation de substrats diélectriques épais à faible permittivité, même si cela entraîne une augmentation des pertes par onde de surface et de l'encombrement de l'antenne. D'un autre côté, il est recommandé d'utiliser des substrats minces à permittivité élevée pour les circuits micro-ondes, car ils permettent de diminuer les ondes de surface, les radiations indésirables, et le volume de l'antenne, même si leur efficacité et leur bande passante sont réduites. Il est donc essentiel de trouver un compromis entre ces contraintes [14].

la Figure ci-dessous montre que l'efficacité est décroissante en fonction de la permittivité.

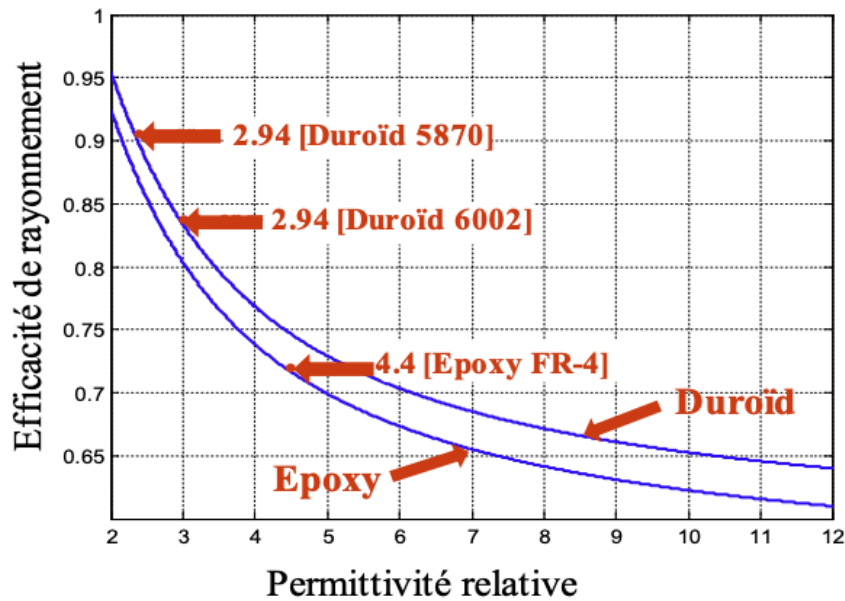


FIGURE 2.3 – Efficacités de rayonnement en fonction de la permittivité relative du substrat [14]

Les matériaux les plus couramment utilisés pour les substrats diélectriques sont [54] :

- **Composites à base de Téflon PTFE** : Ces matériaux ont une permittivité relative ( $\epsilon_r$ ) comprise entre 2 et 3 et un facteur de pertes diélectriques ( $\tan \delta$ ) supérieur ou égal à  $10^{-3}$ . Ils offrent de bonnes performances en termes de faible permittivité et de pertes diélectriques modérées.
- **Polypropylène** : Ce matériau présente une permittivité relative ( $\epsilon_r$ ) de 2,18 et un facteur de pertes diélectriques ( $\tan \delta$ ) de  $3 \times 10^{-4}$ . Il est apprécié pour sa faible permittivité et ses faibles pertes.
- **Composite de résine époxy renforcé de fibre de verre FR4** : Ce matériau possède une permittivité relative ( $\epsilon_r$ ) de 4,4 et un facteur de pertes diélectriques ( $\tan \delta$ ) de  $0,14 \times 10^{-1}$ . Il est couramment utilisé en raison de sa robustesse mécanique et de ses propriétés électriques raisonnables.
- **Mousses synthétiques** : Ces matériaux contiennent de nombreuses petites poches d'air, offrant une permittivité relative ( $\epsilon_r$ ) de 10,3 et un facteur de pertes diélectriques ( $\tan \delta$ ) d'environ  $10^{-5}$ .

Si le matériau de patch est supraconducteur, il est nécessaire que le substrat soit monocristallin, plutôt isotrope, afin de réduire les défauts lors de la croissance du supraconducteur. Il est essentiel que les pertes diélectriques soient minimisées. En général, les pertes tangentées des substrats utilisés sont inférieures à  $10^{-5}$  [55].

### 2.4.3 Le plan de masse

Le plan de masse est une surface conductrice, souvent en cuivre, qui recouvre la partie inférieure du substrat dans une conception d'antenne. Son rôle principal est de fournir un chemin de retour pour le courant de l'antenne. En recouvrant la partie inférieure du substrat, le plan de masse aide à réduire les perturbations électromagnétiques et à améliorer l'efficacité de rayonnement de la partie supérieure de l'antenne. En fournissant un sol conducteur, il aide également à maintenir l'impédance caractéristique de l'antenne et à minimiser les pertes de signal.[54]

## 2.5 Techniques d'alimentation

Plusieurs méthodes peuvent exciter les antennes micro-ruban. Ces méthodes peuvent être classées en deux catégories : avec contact où l'antenne est alimentée grâce à un élément de contact comme les lignes micro-ruban et les câbles coaxiaux et sans contact où on utilise la fente ou le couplage de proximité pour fournir l'alimentation. Dans ce dernier groupe, la transmission de la puissance entre la ligne micro-ruban et l'élément rayonnant de l'antenne est assurée grâce à la couplage du champ électromagnétique.

### 2.5.1 Alimentation par contact

#### 2.5.1.1 Alimentation par ligne micro-ruban

La ligne micro-ruban est directement connectée à l'élément rayonnant dans le même plan que l'élément rayonnant. La longueur du ruban conducteur diminue avec la taille de l'élément rayonnant. Cette alimentation présente l'avantage d'être gravée sur le même substrat, ce qui lui confère une structure plane. Il s'agit de la méthode la plus abordable et la plus facile à mettre en place.[56]

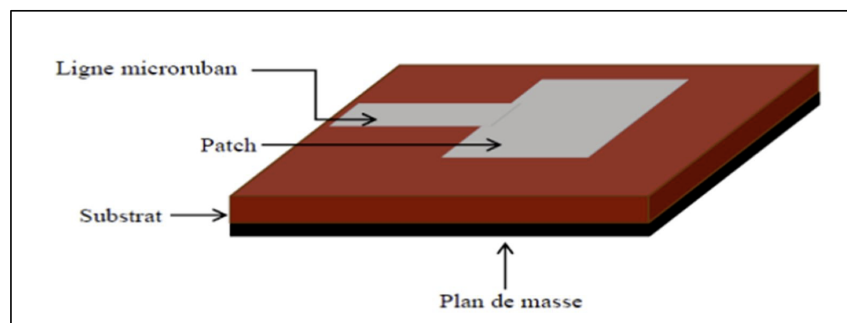


FIGURE 2.4 – Alimentation par ligne Micro-ruban [15]

#### 2.5.1.2 Alimentation par sonde coaxiale

La meilleure façon d'alimenter un patch est de le connecter à une ligne coaxiale qui traverse le plan de masse. Afin d'accomplir cela, une ouverture est créée entre le diélectrique et le plan de

masse, ce qui permet à l'âme centrale du coaxial de passer et d'être soudée au plan métallique rayonnant [15].

Ce type d'alimentation présente plusieurs avantages, tels que l'absence de pertes dues au rayonnement de la ligne et la possibilité de sélectionner un mode privilégié. Cependant, il comporte aussi des inconvénients, notamment le rayonnement parasite de la sonde et le coût élevé.

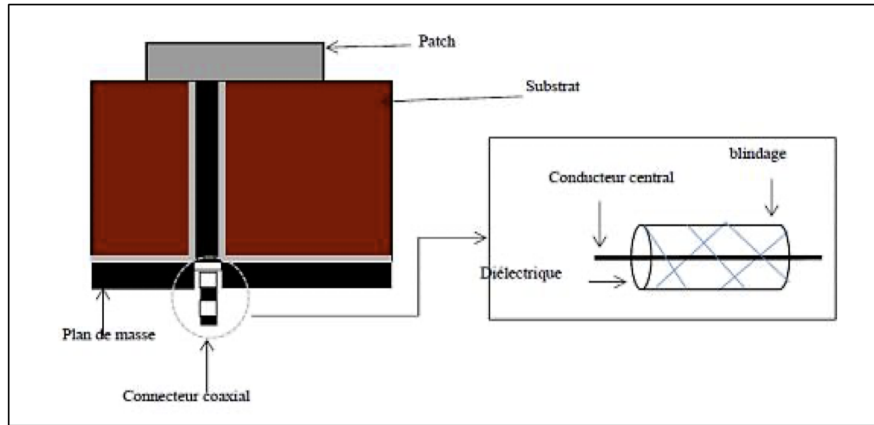


FIGURE 2.5 – Alimentation par câble coaxial [15]

## 2.5.2 Alimentation sans contact

### 2.5.2.1 Alimentation par couplage à travers une fente

L'alimentation par couplage à fente ou à ouverture est une méthode d'alimentation qui consiste à séparer le patch rayonnant de la ligne d'alimentation en utilisant un plan de masse. Comme le montre la Figure , on peut observer une ouverture ou une fente dans le plan de masse afin de créer une connexion entre le patch et la ligne d'alimentation [15].

Pour améliorer les performances de rayonnement du patch, des matériaux à permittivité élevée sont employés pour le substrat inférieur et des matériaux à permittivité faible pour le substrat supérieur. L'un des principaux avantages de cette méthode d'alimentation réside dans sa capacité à étendre la portée de l'antenne .

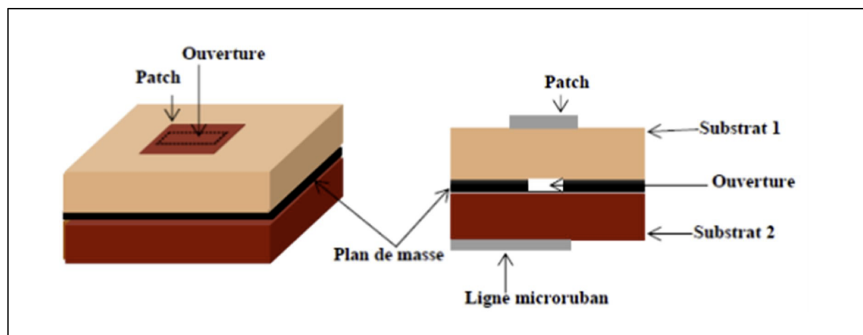


FIGURE 2.6 – Alimentation par couplage à travers une fente [15]

### 2.5.2.2 Alimentation par couplage de proximité

cette méthode s'appuie sur deux substrats diélectriques distincts. La ligne d'alimentation est insérée entre ces substrats, tandis que le patch rayonnant est positionné sur le substrat supérieur. Cette technique présente des avantages notables, tels que la suppression du rayonnement parasite de la ligne d'alimentation et l'élargissement de la bande passante grâce à l'augmentation de l'épaisseur totale de l'antenne. Cependant, il convient de noter que cette technique est plus complexe que d'autres méthodes d'alimentation.[15]

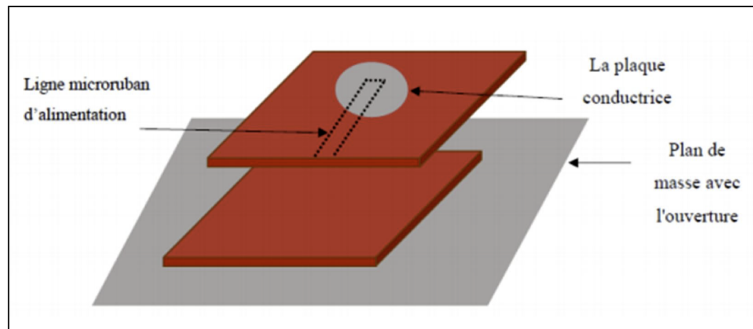


FIGURE 2.7 – Alimentation par couplage de proximité [15]

### 2.5.2.3 Alimentation par lignes planaires de transmission

Les lignes de transmission planaires sont devenues des composants essentiels dans le domaine de l'électronique, permettant la transmission efficace des signaux haute fréquence. Elles offrent un chemin contrôlé pour la propagation du signal tout en minimisant les pertes et les rayonnements parasites. Leurs avantages, notamment la miniaturisation, la légèreté et la facilité de fabrication, les rendent indispensables pour diverses applications électroniques[16]. Il existe diverses formes de lignes planaires :

- (a) La ligne bande (stripline) : Cette ligne utilise deux plans de masse pour orienter le signal entre eux. Son volume est assez important en raison de sa structure à deux couches.
- (b) La ligne coplanaire (CPW) : La CPW est composée de trois bandes métalliques et de deux fentes. Un espace d'air de deux lignes de masse sépare le conducteur du signal. On l'emploie aussi dans les circuits intégrés et les antennes.
- (c) La ligne à fente (slot line) : dans cette configuration, deux conducteurs constituant la ligne de transmission sont placés sur la même face du substrat diélectrique sous forme de fente.
- (d) La ligne micro-ruban (ou encore microbande ou microstrip) est composée d'un substrat diélectrique métallisé sur la face arrière et d'un circuit métallisé sur la face avant.

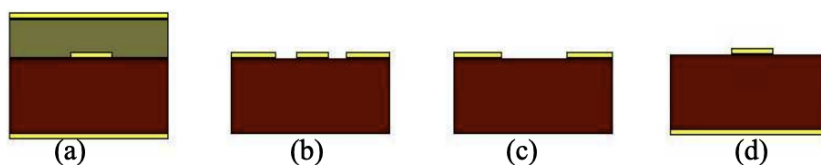


FIGURE 2.8 – Les différents types de lignes planaires [16]

## 2.6 Mécanisme de rayonnement

La théorie de l'optique est en effet un outil précieux pour comprendre le mécanisme de rayonnement des antennes imprimées[57].

L'élément rayonnant d'une antenne imprimée peut être considéré comme une multitude de sources ponctuelles, similaires à celle située au point « a » de la figure. Ces sources isotropes rayonnent dans toutes les directions. Une partie de ce rayonnement est réfléchi par le plan de masse, puis par le conducteur supérieur, et ainsi de suite. Certains de ces rayons atteignent le bord du conducteur (point « b ») et y sont diffractés. [17].

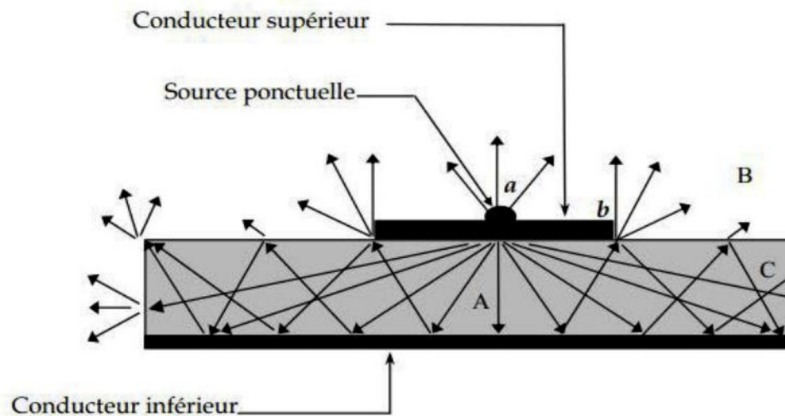


FIGURE 2.9 – Mécanisme de rayonnement [17]

On peut donc distinguer trois régions distinctes [17] :

La région A est la plus dense en rayons, où le champ électromagnétique s'accumule fortement. Cette propriété est utilisée pour la propagation le long des lignes microruban. À basse fréquence, les champs restent concentrés dans cette zone, permettant une propagation sans rayonnement.

La région B (espace libre), qui occupe tout le demi-espace au-dessus de l'antenne, est une zone où le champ se disperse librement dans l'air et s'ajoute au rayonnement de la source. À mesure que la fréquence augmente, ce rayonnement électromagnétique, bien que modérément efficace, devient significatif, permettant à l'antenne de fonctionner efficacement.

La région C correspond à une zone où certains rayons atteignent les surfaces de séparation avec un angle rasant et restent piégés dans le matériau diélectrique. Une onde de surface se forme le long du bord du diélectrique, ne contribuant pas directement au rayonnement de l'antenne. Cependant, lorsque cette onde atteint le bord du substrat, elle est diffractée, ce qui génère un rayonnement parasite.

## 2.7 Caractéristiques de l'antenne micro-ruban

Pour décrire les performances et les caractéristiques des antennes, on utilise plusieurs paramètres regroupés en deux catégories distinctes :

### 2.7.1 Paramètres électriques

Ce groupe de paramètres se concentre sur le comportement de l'antenne en tant qu'élément de circuit électrique. Il fournit des informations sur la façon dont l'antenne interagit avec le circuit connecté :

#### 2.7.1.1 Impédance d'entrée

Ce paramètre représente la résistance électrique, la réactance et la capacité que l'antenne présente à la source de signal connectée. Il détermine la quantité de puissance transférée de la source à l'antenne pour le rayonnement. Il est possible de représenter une antenne passive en utilisant un circuit équivalent RLC [14].

L'impédance  $Z_{in}$  vue à l'entrée de l'antenne est donnée par [19] :

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = R_{in} + jX_{in} \quad (2.1)$$

Pour la partie active

$$R_{in} = R_{rad} + R_{loss} \quad (2.2)$$

où :

- $R_{rad}$  est la résistance de rayonnement,
- $R_{loss}$  est la résistance de pertes,
- $Z_{in}$  est l'impédance d'entrée,
- $X_{in}$  est la réactance,

#### 2.7.1.2 Coefficient de réflexion S11

Quand une onde passe d'un milieu à un autre ou rencontre une interface, une partie est réfléchiée et une autre est transmise dans le nouveau milieu. Ce paramètre quantifie le rapport entre la quantité de signal réfléchiée et l'onde incidente [14] .

Il est également exprimé par la formule suivante [14] :

$$S_{11} = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (2.3)$$

Le coefficient de réflexion en décibels (dB) se définit comme suit [14] :

$$S_{11}(\text{dB}) = 20 \log \left( \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right) \quad (2.4)$$

- $Z_0$  est l'impédance caractéristique (50 ohm).
- $Z_{in}$  est l'impédance d'entrée,

Étant donné que la fréquence de résonance correspond à la fréquence à laquelle l'antenne émet des rayons d'une manière optimale[58].

### 2.7.1.3 Rapport d'onde stationnaire ROS

Dans le domaine de l'ingénierie radiofréquence (RF), le rapport d'ondes stationnaires (ROS), connu sous le nom de Voltage Standing Wave Ratio (VSWR) en anglais, est un indicateur essentiel pour évaluer les performances des systèmes d'antennes. Il mesure le déséquilibre d'impédance entre une antenne et son émetteur ou récepteur connecté, fournissant des informations cruciales sur l'efficacité du transfert de puissance et les problèmes potentiels, tels que les réflexions de signal[18].

Le rapport d'ondes stationnaires (ROS) est donné par [14] :

$$\text{ROS} = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|} \quad (2.5)$$

La plupart des applications RF considèrent généralement une valeur de VSWR inférieure ou égale à 2 comme une plage acceptable pour l'ajustement de l'impédance.

### 2.7.1.4 Bande passante

La bande passante d'une antenne est la plage de fréquences où l'énergie est le plus transmise de l'alimentation vers l'antenne (ou de l'antenne vers le récepteur). Le coefficient de réflexion permet de déterminer la bande passante (il n'existe pas de critères spécifiques pour la limite). Il est courant d'avoir un coefficient de réflexion inférieur à -10 dB comme critère [18].

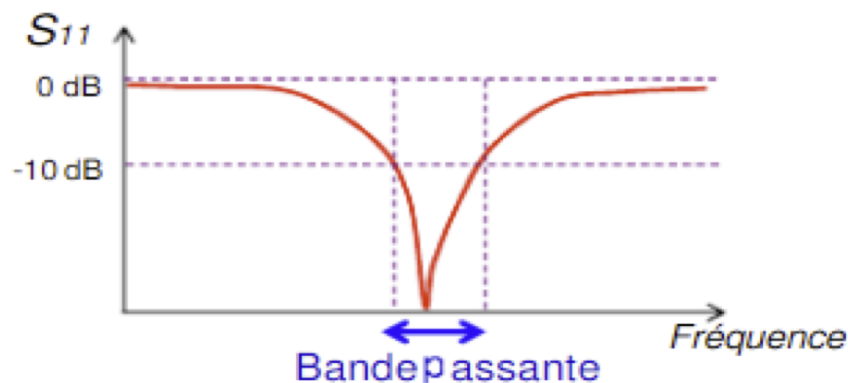


FIGURE 2.10 – Bande passante et coefficient de réflexion [18]

On déduit souvent la bande passante d'une antenne à partir de la courbe de son coefficient de réflexion. On l'exprime par [18] :

$$BP(\%) = \frac{\Delta f}{f_c} \times 100 \quad (2.6)$$

- $\Delta f = f_2 - f_1$  est la largeur de bande,
- $f_c$  est la fréquence centrale,



## 2.7.2 Paramètres de rayonnement

Ce groupe de paramètres met en lumière la capacité de l'antenne à rayonner des ondes électromagnétiques :

### 2.7.2.1 Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement est une représentation graphique de la fonction spécifique de l'antenne. La répartition du rayonnement en puissance, gain ou champ électrique rayonné à grande distance est illustrée dans ce diagramme en 2D ou 3D, en fonction de  $\theta$  (dans le plan vertical) et de  $\Phi$  (dans le plan horizontal). [59]

La distribution spatiale de l'énergie rayonnée ou reçue par l'antenne est donnée par le diagramme de rayonnement. De cette manière, il est possible de déterminer divers paramètres de rayonnement d'antenne, tels que l'ouverture, le niveau de puissance et la direction des lobes latéraux.

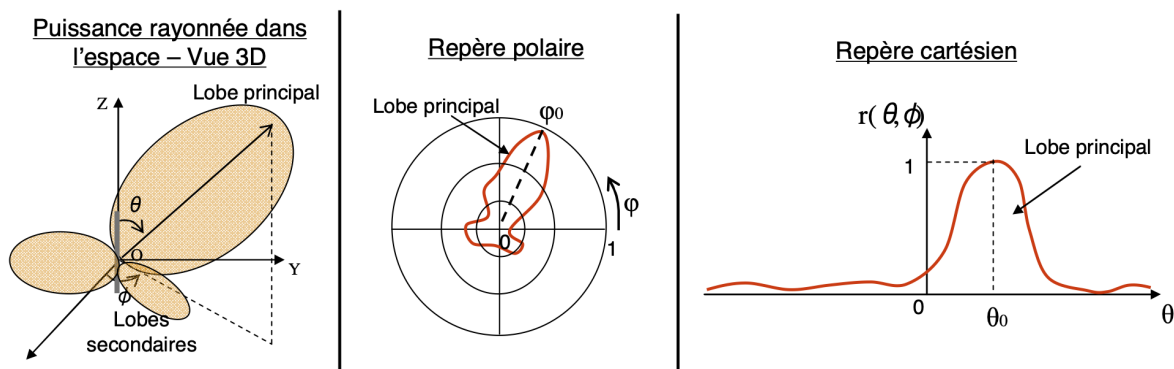


FIGURE 2.11 – Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne[19]

On peut classer les diagrammes de rayonnement des antennes en trois catégories principales en fonction de la répartition spatiale de la puissance rayonnée :

1. Le diagramme isotrope illustre la situation théorique d'une antenne isotrope parfaite, qui émettra son énergie de manière homogène et uniforme dans toutes les directions. de l'espace[12].

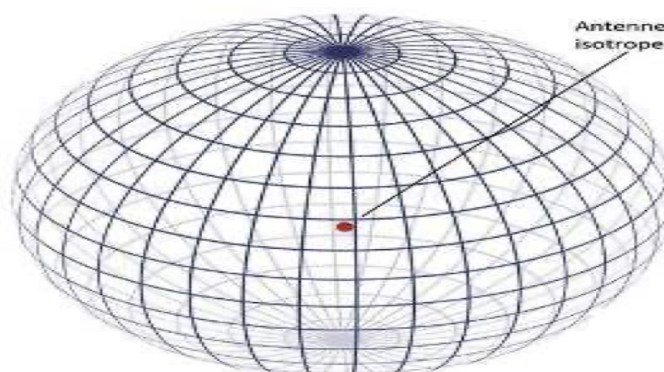


FIGURE 2.12 – Diagramme de rayonnement de l'antenne isotrope [20]

2. Un diagramme omnidirectionnel : illustre le rayonnement d'une antenne dans un seul plan de l'espace, habituellement le plan horizontal. Dans ce plan, l'antenne émet un rayonnement assez homogène, mais avec une certaine variation de puissance en fonction de l'angle[12].

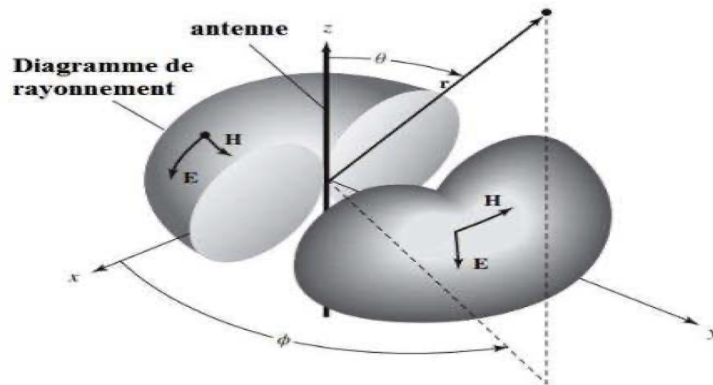


FIGURE 2.13 – Diagramme omnidirectionnel d'une antenne [20]

3. Un diagramme directif : illustre la situation où une antenne concentre la plupart de son énergie rayonnée dans une direction précise, connue sous le nom de lobe principal. Les lobes secondaires de plus faible intensité répartissent le reste de l'énergie[12].

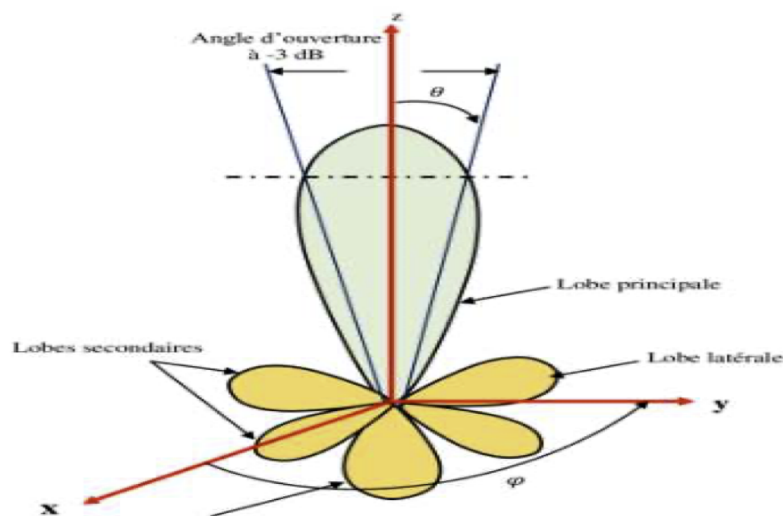


FIGURE 2.14 – diagramme de rayonnement d'une antenne directive [20]

- Lobe principal : c'est celui où l'énergie est la plus élevée, ce qui indique la direction du rayonnement le plus intense.
- Angle d'ouverture : correspond à l'angle où la puissance rayonnée diminue à la moitié de son maximum.
- Lobes secondaires : ce sont les lobes qui émettent des rayons dans les directions indésirables, à l'exception du lobe principal, autres que le lobe principal.
- Lobe arrière (rayonnement arrière) : il est situé dans le sens inverse (à 180 degrés) du lobe principal.

Les lobes secondaires sont indésirables dans la plupart des systèmes antennaires. Une antenne de qualité doit réduire au minimum ces lobes secondaires.

### 2.7.2.2 Directivité

Il est essentiel de comprendre la directivité d'une antenne afin de saisir sa capacité à concentrer la puissance rayonnée dans une direction précise. Cela offre la possibilité de mesurer l'intensité du rayonnement dans une direction spécifique par rapport à une antenne isotrope théorique qui émettrait un rayonnement homogène dans toutes les directions. La directivité  $D(\theta, \phi)$  d'une antenne dans la direction  $(\theta, \phi)$  est définie par [19] :

$$D(\theta, \phi) = \frac{4\pi P(\theta, \phi)}{P_r} \quad (2.7)$$

où :

- $P(\theta, \phi)$  est la puissance rayonnée par unité d'angle solide dans la direction  $(\theta, \phi)$
- $P_r$  est la puissance totale rayonnée par l'antenne.

### 2.7.2.3 Rendement de l'antenne

La capacité d'une antenne à convertir l'énergie électrique fournie en une onde électromagnétique émise est un critère qui évalue sa performance. Le rapport entre la puissance émise par l'antenne ( $P_r$ ) et la puissance totale fournie à l'antenne ( $P_f$ ) [19].

$$\eta = \frac{P_r}{P_f} \quad (2.8)$$

### 2.7.2.4 Gain

Le gain d'une antenne est un critère non dimensionnel qui qualifie sa capacité à concentrer l'énergie rayonnée dans une direction spécifique par rapport à une antenne isotrope théorique. donc [19] :

$$G(\theta, \phi) = \eta \times D(\theta, \phi) \quad (2.9)$$

## 2.7.3 Polarisation

La propagation des ondes électromagnétiques est caractérisée par leur direction, leur amplitude et leur orientation dans un plan perpendiculaire à cette direction. La polarisation de l'antenne pour une direction de propagation donnée est déterminée par l'évolution de la direction de l'onde dans le temps.

Les types de polarisation :

1. Polarisation rectiligne ou linéaire
2. Polarisation circulaire
3. Polarisation elliptique

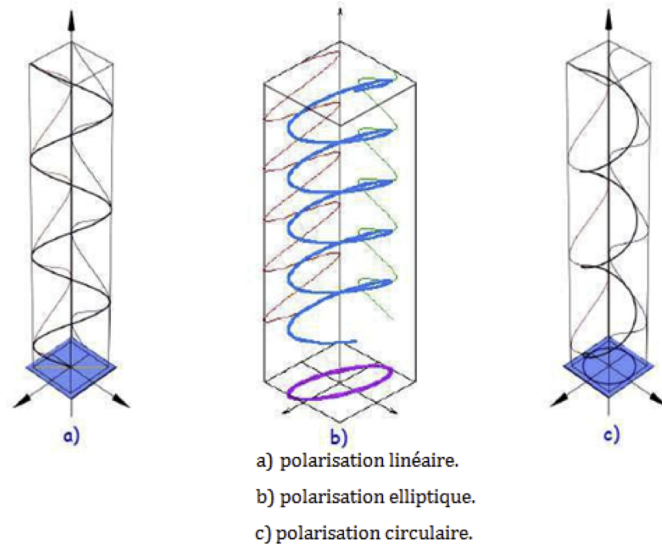


FIGURE 2.15 – Polarisation du champ électromagnétique [21]

## 2.8 Antenne à métamatériau

Une antenne à métamatériau est une antenne qui utilise des métamatériaux pour améliorer ses performances. Les métamatériaux sont des matériaux artificiels fabriqués à partir de structures de taille inférieure à la longueur d'onde qui ont des propriétés électromagnétiques qui ne se trouvent pas dans les matériaux naturels.

En incorporant des métamatériaux dans la conception des antennes, il est possible d'obtenir des propriétés uniques et d'améliorer le gain d'une antenne de plusieurs façons telles que [60] :

1. Miniaturisation : les antennes à métamatériaux peuvent être beaucoup plus petites que les antennes conventionnelles tout en conservant les mêmes performances, ou même meilleures.
2. Directivité accrue : les antennes à métamatériaux peuvent être conçues pour avoir une directivité plus focalisée, ce qui signifie qu'elles peuvent émettre ou recevoir des ondes dans une direction plus précise.
3. Bande passante large : les antennes à métamatériaux peuvent fonctionner sur une bande de fréquences plus large que les antennes conventionnelles.
4. Impédance adaptée : les antennes à métamatériaux peuvent être mieux adaptées à l'impédance de la source d'alimentation, ce qui se traduit par une meilleure efficacité de transfert de puissance.

## 2.9 Le principe détection des fissures par antenne

La détection de fissures par antenne utilise le principe de la résonance pour identifier les défauts d'un matériau. Une antenne émet des ondes électromagnétiques dans tout le matériau à inspecter. Lorsque ces ondes rencontrent une fissure, elles subissent des perturbations dans leur propagation. Ces perturbations modifient la fréquence de résonance des ondes, qui est alors détectée par une antenne réceptrice. L'analyse des changements de fréquence permet de localiser et de caractériser les fissures dans le matériau. Avantages de la méthode :

1. Non destructive : cette technique n'endommage pas le matériau inspecté, elle peut donc être utilisée sur des pièces critiques ou fragiles.
2. Haute sensibilité : La méthode est capable de détecter des fissures très fines, invisibles à l'œil nu ou à d'autres méthodes d'inspection.
3. Large éventail d'applications : elle peut être utilisée sur une grande variété de matériaux, y compris les métaux, les composites et les plastiques.
4. Inspection rapide et automatisée : le processus de détection peut être automatisé, ce qui permet une inspection rapide et efficace de grandes surfaces.

## 2.10 La fabrication d'antennes micro-ruban

Les antennes Micro-ruban jouent un rôle important dans les systèmes de communication sans fil en raison de leur légèreté et de leur facilité d'intégration dans les appareils électroniques. La photolithographie est la technique de fabrication la plus utilisée pour la fabrication des antennes micro-ruban.

### La photolithographie

La photolithographie est une technique de gravure par la lumière utilisée dans la fabrication de dispositifs électroniques pour créer des circuits miniaturisés et complexes avec une précision et une fiabilité remarquables. Il s'agit d'une étape essentielle dans la production de puces électroniques qui sont présentées dans les appareils modernes, des smartphones aux ordinateurs en passant par les véhicules automobiles.

Pour créer des motifs complexes sur des plaques de métal, la photolithographie implique la déposition d'un matériau photosensible, appelé photoresist, sur la surface de la plaquette. Celle-ci est ensuite superposée d'un masque à motifs et exposée à une lumière ultraviolette.

L'exposition sélective à la lumière provoque une réaction chimique qui modifie la solubilité de la résine. En conséquence, les zones exposées sont éliminées dans le cas d'une résine positive, tandis que les zones non exposées sont éliminées si la résine est négative, révélant ainsi le motif désiré.

Pour les antennes micro-ruban, il est nécessaire de déposer au préalable une couche de cuivre sur le diélectrique par l'une des méthodes connues, comme le CVD (dépôt chimique en phase vapeur) ou le PVD (dépôt physique en phase vapeur). Ensuite, le substrat est prêt pour la photolithographie [61].

Le procédé de photolithographie combine plusieurs étapes en séquence, les étapes de ce processus sont les suivantes :

## 1. Préparation du masque

Le masque nous permet de transférer un motif précis de circuit métallique sur un substrat. Il s'agit d'un élément essentiel du processus de photolithographie, qui permet de créer des circuits miniaturisés et complexes avec une grande précision. On crée d'abord le motif du circuit avec un logiciel de CAO, puis on le transfère à grande échelle sur un film. Ensuite, le motif est réduit photographiquement pour obtenir le masque à l'échelle réelle du circuit.

## 2. Nettoyage du substrat

Il élimine les impuretés et contaminants qui pourraient compromettre la qualité du circuit final. Un substrat propre assure une bonne adhérence du photoresist et une gravure uniforme[62].

Les objectifs incluent l'élimination des particules (poussières, fibres), des contaminants organiques (graisses, huiles, traces de produits chimiques) et des contaminants inorganiques (métaux, oxydes, sels). Les méthodes de nettoyage comprennent le nettoyage par voie humide, où le substrat est immergé ou aspergé d'une solution de nettoyage (acides, bases, solvants organiques, agents tensioactifs) suivi d'un rinçage et séchage, avec des techniques telles que le nettoyage par ultrasons. Le nettoyage par voie sèche expose le substrat à un plasma ou à un gaz réactif pour éliminer les contaminants.

## 3. Dépôt du photoresist

Une résine photosensible est une solution organique sensible aux photons dans une plage de longueurs d'onde allant de 200 nm à 500 nm. Lorsqu'elle est exposée à des rayonnements de photons ultraviolets, elle présente deux comportements possibles selon sa composition. De plus, il est crucial que cette résine puisse produire des dispositifs submicroniques de haute qualité. Il existe deux catégories de résines [61] :

- La résine positive se caractérise par la solubilité des parties exposées à la lumière par rapport aux parties non exposées.
- La résine négative se distingue par la solubilité des parties non exposées par rapport aux parties exposées.

Pour appliquer une couche de matériau photosensible sur la structure, plusieurs méthodes sont utilisées :

- Immersion : la structure est plongée entièrement dans une laque photosensible, puis retirée à une vitesse constante. L'épaisseur de la couche dépend de la vitesse d'extraction et de la viscosité de la laque. Ce procédé produit généralement des couches relativement épaisses.
- Pulvérisation : le matériau photosensible est vaporisé sur la structure à l'aide d'une buse. L'épaisseur de la couche obtenue par ce procédé n'est généralement pas constante.
- Centrifugation : la structure est placée en rotation rapide et le matériau photosensible est déposé au centre de rotation. Sous l'effet de la force centrifuge, il s'étale uniformément pour former une couche fine. Cette méthode est principalement utilisée pour des circuits de petites dimensions.

Une fois le matériau photosensible déposé, il est ensuite séché à une température élevée. Ce processus de séchage permet de durcir le matériau et d'améliorer son adhérence.

## 4. Insolation

Lors de l'étape d'insolation, le masque photographique est soigneusement positionné sur le substrat revêtu de photoresist. Ensuite, le substrat est exposé à un rayonnement ultraviolet (UV)[62].

Dans le cas des photoresists positifs, les zones exposées aux UV subissent une réaction de photolyse, qui consiste en la décomposition du composé par l'action de la lumière. Ce processus direct implique l'interaction d'un photon avec une molécule cible. Cette réaction rompt les chaînes polymères du photoresist, le rendant soluble dans le révélateur.

En revanche, pour les photoresists négatifs, les zones exposées aux UV subissent une réaction de réticulation, également appelée formation de réseau, où les chaînes polymères du photoresist sont liées entre elles, augmentant ainsi sa résistance au révélateur.

## 5. Développement

Cette étape implique l'application d'un révélateur chimique qui dissout sélectivement la résine photosensible en fonction de son exposition à la lumière UV lors de l'étape précédente d'exposition [62].

Pour les résines positives, les zones exposées à la lumière UV subissent une modification chimique les rendant solubles dans le révélateur, tandis que les zones non exposées restent insolubles. Ainsi, le révélateur dissout les zones exposées, révélant le substrat nu, tandis que les zones non exposées demeurent protégées par la résine.

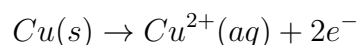
Mais, pour les résines négatives, les zones non exposées subissent une modification chimique les rendant insolubles dans le révélateur, tandis que les zones exposées restent solubles. Par conséquent, le révélateur dissout les zones non exposées, exposant le substrat nu, tandis que les zones exposées restent protégées par la résine.

Après la dissolution de la résine non désirée à l'aide d'un révélateur chimique, le substrat est soigneusement rincé pour éliminer tout résidu de révélateur. Cette étape de rinçage est suivie d'un processus de séchage visant à éliminer toute trace d'eau ou de solvant.

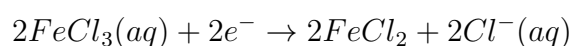
## 6. Gravure

La technique de gravure repose sur une réaction entre le cuivre (Cu) et le chlorure ferrique (FeCl<sub>3</sub>), également connu sous le nom de chlorure de fer (III). Cette réaction, qui se déroule selon un processus d'oxydoréduction (redox), joue un rôle fondamental dans le processus de gravure des circuits imprimés[62].

1. Oxydation du cuivre (Cu) :



2. Réduction du chlorure ferrique (FeCl<sub>3</sub>) :



Au fur et à mesure que la réaction progresse, le cuivre continue à se dissoudre dans la solution, laissant derrière lui le motif de circuit souhaité sur le substrat en cuivre.

Une fois que toutes les étapes décrites sont achevées, ce qui reste de la couche photosensible est éliminé à l'aide d'un solvant ou d'une solution alcaline concentrée. Chaque phase de la procédure doit être suivie de périodes de rinçage et de nettoyage, parfois accompagnées de séchage au four.

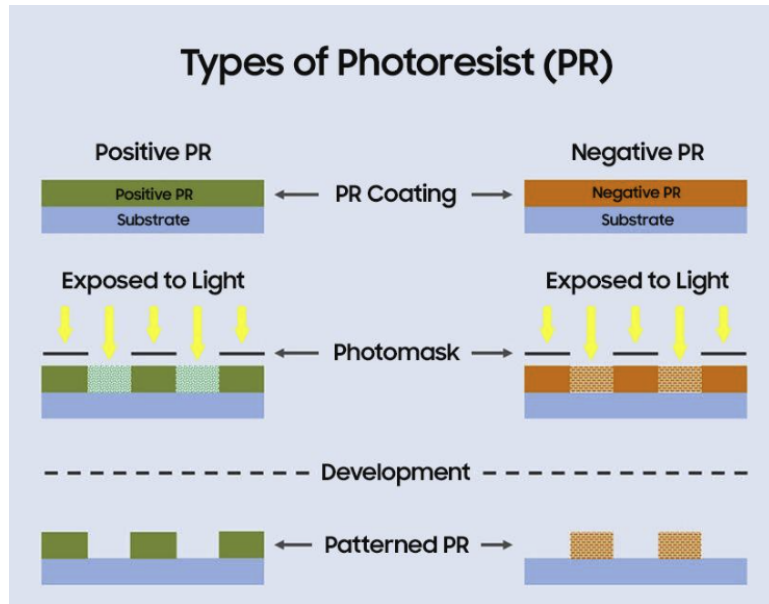


FIGURE 2.16 – Illustrations des étapes de la photolithographie[22]

## 2.11 Conclusion

Ce chapitre explore les antennes micro-rubans en détaillant leur historique, leur définition, leurs composants principaux (élément rayonnant, substrat, plan de masse) et leurs techniques d'alimentation (par contact et sans contact). Il explique le mécanisme de rayonnement et les caractéristiques clés des antennes, telles que le coefficient de réflexion, le diagramme de rayonnement, le rendement, le gain et la polarisation. Les avancées technologiques comme les antennes métamatériaux et leur utilisation pour la détection de fissures sont également discutées. Enfin, les méthodes de fabrication, notamment la photolithographie, sont présentées.

Le chapitre suivant se concentre sur les étapes de simulation des antennes micro-rubans à l'aide du logiciel CST (Computer Simulation Technology), en détaillant les procédures pour modéliser et analyser les performances des antennes. Il aborde également la méthode de fabrication des circuits imprimés (PCB), en expliquant les techniques et les processus nécessaires pour produire les antennes micro-rubans.



# Chapitre 3

## Simulation et réalisation d'une Antenne à métamatériau

### 3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous examinons en profondeur la méthode de fabrication des antennes métamatériaux. Nous aborderons les éléments matériels employés, les méthodes de production et les difficultés liées à chaque étape du processus. En plus de la production physique des antennes, il est essentiel de simuler leur performance afin d'assurer leur efficacité avant de les mettre en production.

L'utilisation du logiciel CST (Computer Simulation Technology) pour simuler les antennes permet de représenter et d'étudier les propriétés électromagnétiques des antennes avant leur production. CST propose une gamme d'outils permettant de simuler le fonctionnement des antennes dans divers environnements et conditions de montage. Grâce aux CST, il est envisageable d'améliorer la conception, de prévoir les résultats et de diminuer les dépenses et le temps de développement.

### 3.2 La Simulation d'une antenne à métamatériau

#### 3.2.1 Présentation du Logiciel CST Microwave Studio

CST Microwave Studio est un programme de simulation électromagnétique en 3D pour des structures passives, qui repose sur la résolution des équations de Maxwell en utilisant la technique de l'intégration fine (FIT). La discrétisation de l'espace de cette méthode numérique permet de décrire en 3D tous les éléments des systèmes, ce qui permet de l'utiliser pour différents problèmes électromagnétiques, allant de la statique aux hyperfréquences dans les analyses temporelles et fréquentielles.

CST utilise une méthode qui discrétise la forme intégrale des équations de Maxwell et non leurs formes différentielles, contrairement à la plupart des logiciels de simulation électromagnétique. Grâce à cette caractéristique, CST peut sélectionner le type de simulateur ou maillage le plus approprié pour résoudre un problème spécifique.

L'avantage principal du logiciel CST est sa capacité à traiter toutes les structures homogènes et inhomogènes en trois dimensions, telles que les antennes, les structures planaires, les structures multicouches et les filtres, avec une bonne précision. CST permet également de calculer divers paramètres importants, tels que la bande passante, les paramètres de la matrice S, le gain, la directivité et le diagramme de rayonnement. Cependant, un inconvénient notable de ce logiciel est que le temps d'exécution de la simulation peut augmenter de manière significative lorsque le volume du projet est important et que sa forme est complexe.

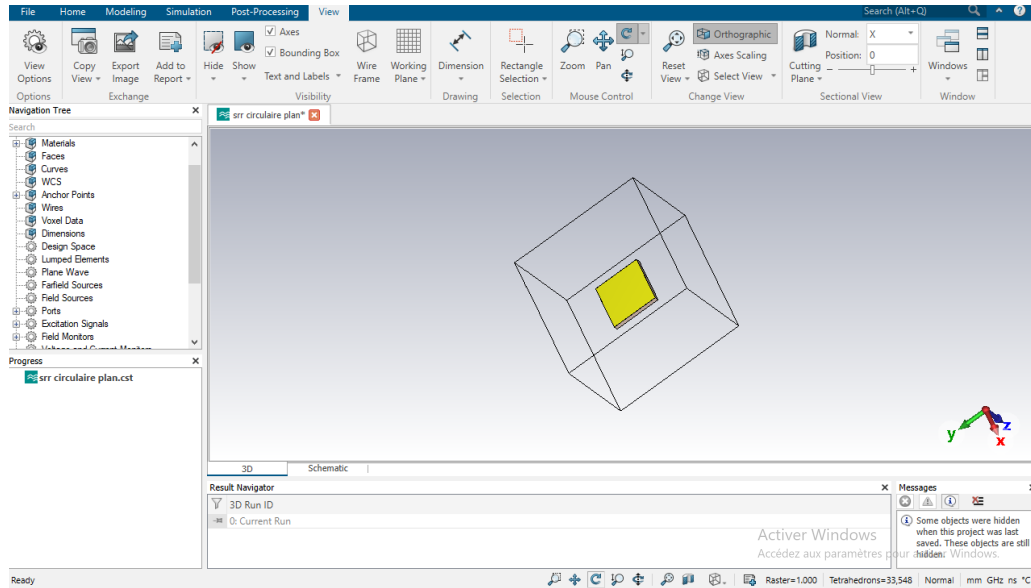


FIGURE 3.1 – L'interface principale de CST

### 3.2.2 processus de simulation dans CST

Dans cette section, nous décrivons le processus général de simulation utilisant CST (Computer Simulation Technology) Studio Suite, un outil puissant pour la modélisation et la simulation électromagnétiques. Il est utilisé par les ingénieurs et les scientifiques pour concevoir et analyser une large gamme de dispositifs électromagnétiques, tels que les antennes, les filtres, les circuits imprimés et les composants à métamatériaux. Le processus de simulation dans CST Microwave Studio comprend plusieurs étapes clés :

#### 1. Modélisation géométrique

La première étape pour obtenir des résultats de simulation précis dans CST Studio Suite consiste à créer un modèle 3D exact de la géométrie du composant à analyser. Cela peut être réalisé en utilisant les outils de modélisation CAD intégrés à CST Studio Suite ou en important un modèle existant à partir d'un logiciel de CAO externe, tels que SolidWorks ou AutoCAD.

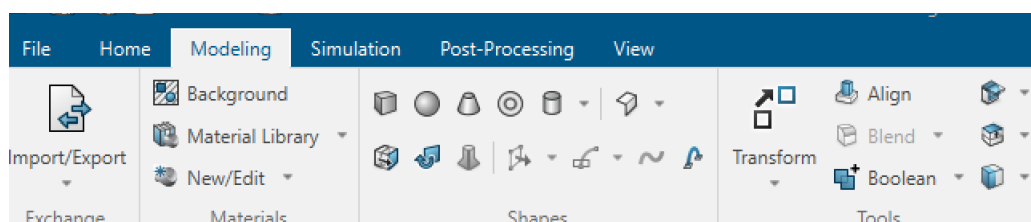


FIGURE 3.2 – Modélisation Géométrique

## 2. Définition des propriétés de matériaux

Une fois la géométrie définie, nous avons défini les paramètres de notre modèle, en choisissant les matériaux appropriés comme les conducteurs et les diélectriques. Cela inclut la permittivité, la perméabilité et la conductivité électrique de chaque matériau. Les propriétés matérielles peuvent être définies à partir de bibliothèques de matériaux intégrées ou en saisissant des valeurs personnalisées.

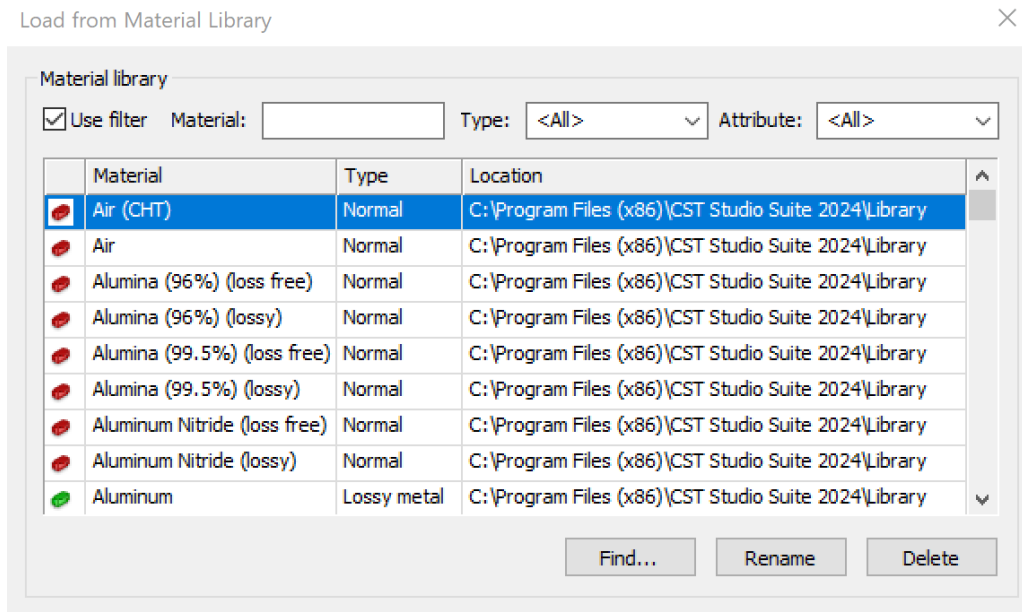


FIGURE 3.3 – Propriétés Matérielles

## 3. Paramétrage de la simulation

Avant de lancer la simulation, il est nécessaire de définir plusieurs paramètres de simulation. Cela inclut la plage de fréquences à analyser, qui dans notre cas est de [1 GHz, 10 GHz], les conditions aux limites qui définissent le comportement du champ électromagnétique aux frontières du modèle, et les sources d'excitation qui injectent de l'énergie dans le modèle. Dans notre cas, nous avons utilisé les paramètres standards.

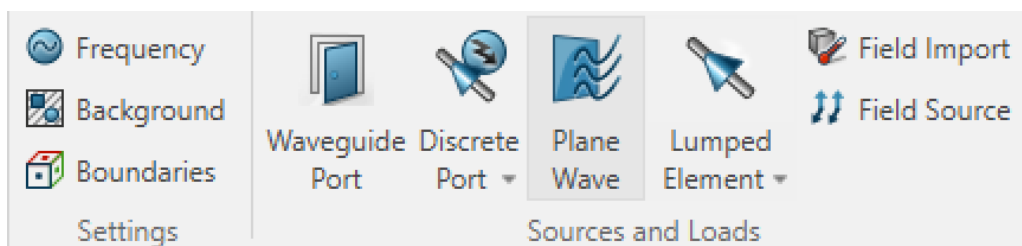


FIGURE 3.4 – Paramétrage de la simulation

## 4. Calcul numérique

Une fois la configuration terminée, nous avons lancé la simulation. CST Studio Suite a exécuté les calculs nécessaires en utilisant des algorithmes de simulation avancés, tout en permettant de surveiller le processus pour s'assurer de l'absence d'erreurs.

Au cœur de CST Microwave Studio se trouve un puissant moteur de calcul numérique qui résout les équations de Maxwell discrétisées pour prédire le champ électromagnétique autour du modèle. La méthode la plus couramment utilisée dans CST Studio Suite est la méthode des éléments finis (FIT), qui divise automatiquement le modèle en un maillage de cellules élémentaires et calcule les champs électromagnétiques à chaque nœud du maillage.

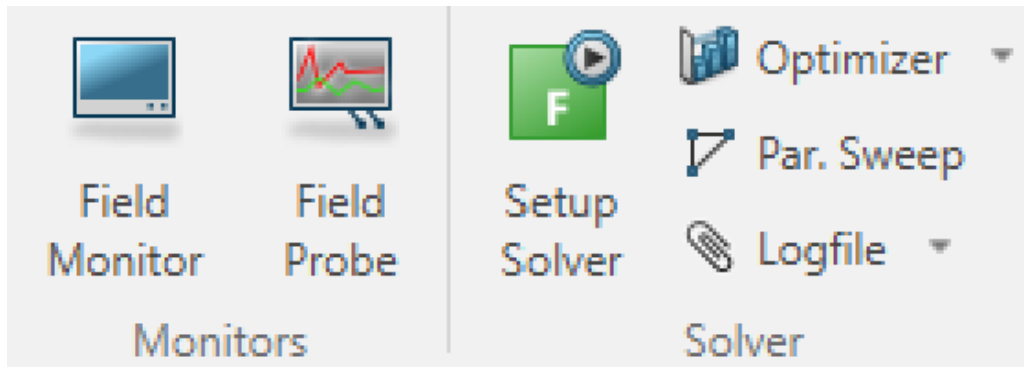


FIGURE 3.5 – Calcul numérique

## 5. Analyse des résultats

Après l'exécution de la simulation, les résultats ont été extraits, incluant les paramètres S, les diagrammes de rayonnement, et autres données pertinentes. Un post traitement des données a été effectué pour interpréter les performances de l'antenne simulée.

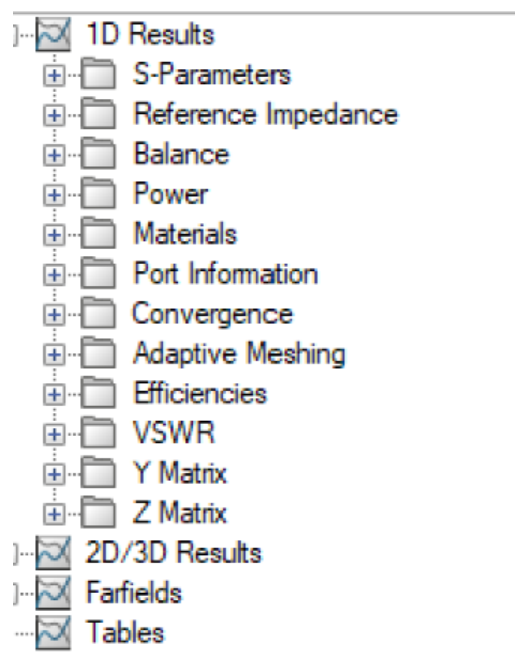


FIGURE 3.6 – Analyse des résultats

### 3.2.3 Simulation d'une antenne SRR circulaire

Cette section détaille la simulation d'une antenne à résonateur annulaire fendu (SRR) circulaire.

#### 3.2.3.1 Dimensions et propriétés

Pour cette simulation, les dimensions et les propriétés de l'antenne SRR circulaire ont été spécifiquement définies comme suit :

#### A-Substrat

TABLE 3.1 – Parametres de substrat SRR circulaire

Dimensions			Propriétés		
Largeur (mm)	Longueur (mm)	Épaisseur (mm)	Type	Permittivité	Perméabilité
14.48	14.48	1.6	FR4 epoxy	4.4	1

#### B-Double anneaux et ligne de transmission

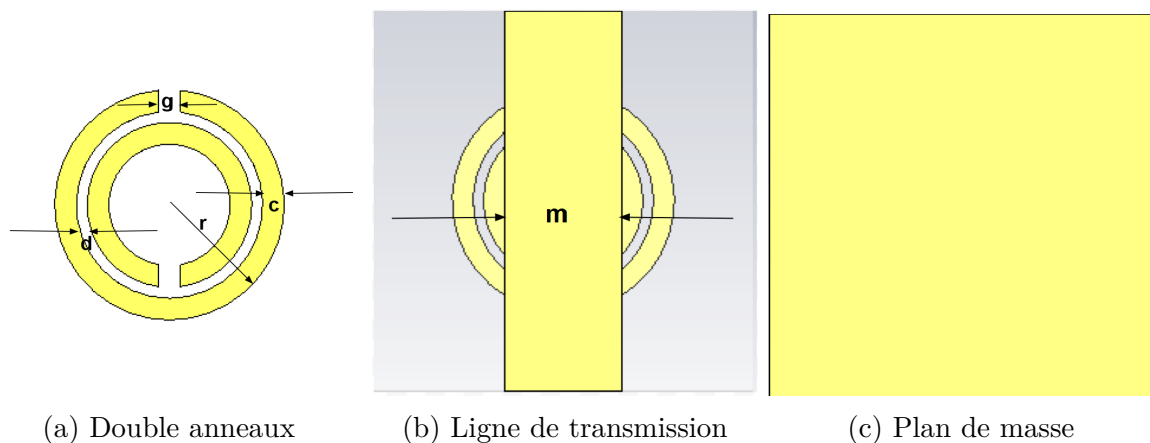
Dimension	Valeur
Rayon de l'anneau	$r = 4.24 \text{ mm}$
Distance entre les deux anneaux	$d = 0.4 \text{ mm}$
Largeur de l'anneau	$c = 0.8 \text{ mm}$
Gap	$g = 0.8 \text{ mm}$
Épaisseur	$e = 0.035 \text{ mm}$

(a) Double anneaux

Dimension	Valeur
Longueur	$14.48 \text{ mm}$
Largeur	$m = 4.48 \text{ mm}$
Épaisseur	$e = 0.035 \text{ mm}$

(b) Ligne de transmission

TABLE 3.2 – Paramètres de la ligne de transmission et double anneaux



(a) Double anneaux

(b) Ligne de transmission

(c) Plan de masse

FIGURE 3.7 – Paramètres de la ligne de transmission et double anneaux

### 3.2.3.2 SRR circulaire avec plan de masse

Après avoir suivi les étapes de simulation mentionnées ci-dessus, voici notre échantillon de résonateur à anneau fendu (SRR) circulaire avec plan de masse.

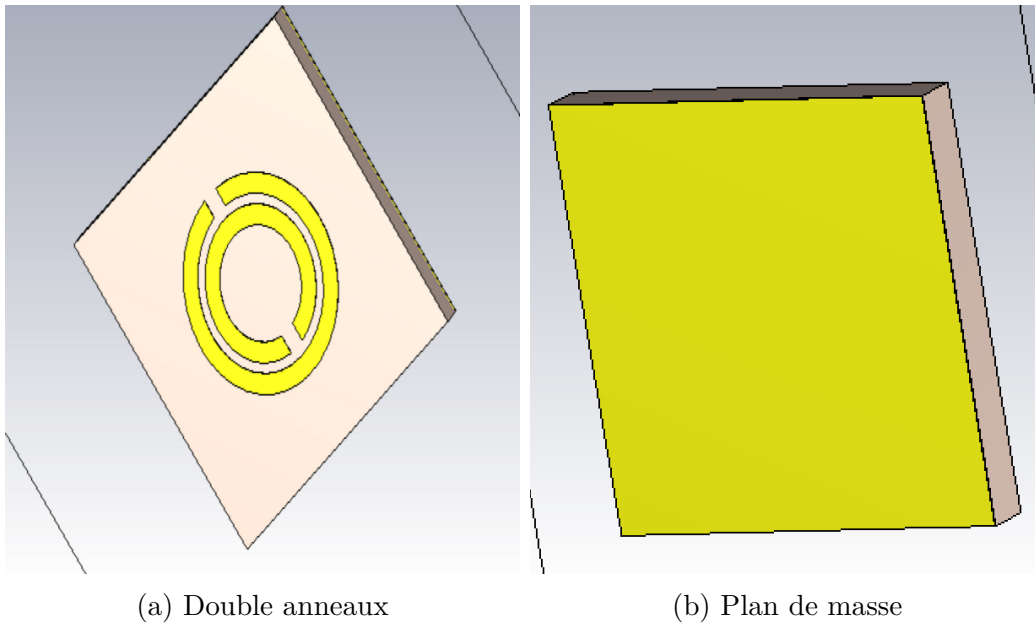


FIGURE 3.8 – Représentation SRR circulaire avec plan de masse

### 3.2.3.3 SRR Carré ligne de transmission

Nous présentons notre échantillon de résonateur à anneau fendu (SRR) circulaire avec la ligne de transmission de la façon suivante :

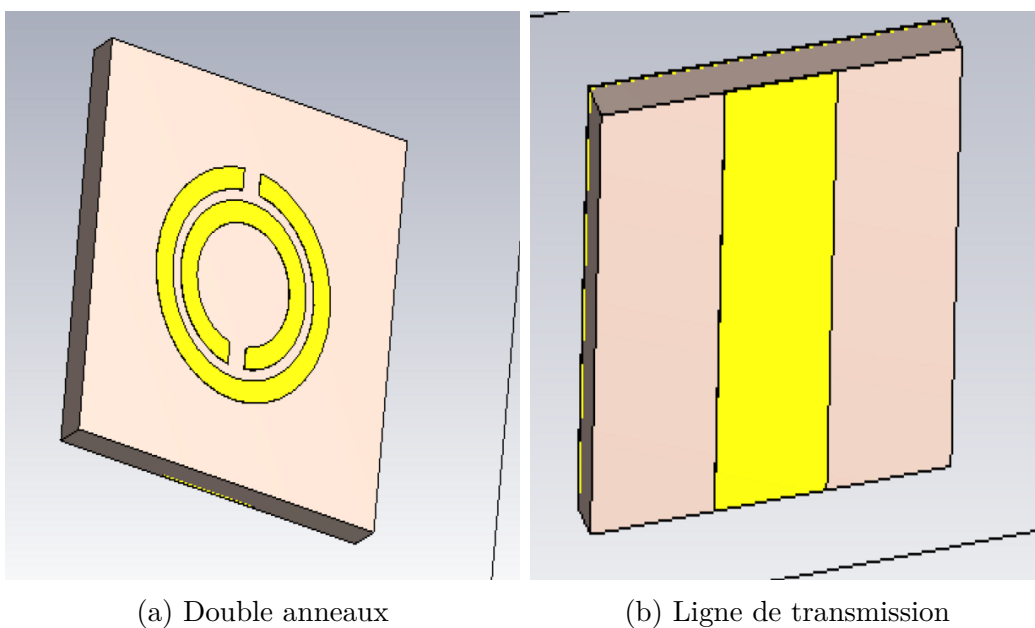


FIGURE 3.9 – Représentation SRR circulaire avec ligne de transmission

### 3.2.4 Simulation d'une Antenne SRR carrée

Bien que cette section concerne initialement une antenne SRR carrée, nous avons adapté le même processus utilisé pour l'antenne SRR circulaire :

#### 3.2.4.1 Dimensions et Propriétés

Les dimensions et propriétés de l'antenne SRR carrée ont été soigneusement définies :

#### A-Substrat

TABLE 3.3 – Paramètres de substrat SRR carré

Dimensions			Propriétés		
Largeur (mm)	Longueur (mm)	Épaisseur (mm)	Type	Permittivité	Perméabilité
18	18	1.6	FR4 epoxy	4.4	1

#### B-Double anneaux et ligne de transmission

Dimension	Valeur
Longueur de L'anneau	$L = 12 \text{ mm}$
Largeur de L'anneau	$W = 10.2 \text{ mm}$
Distance anneau	$a = b = 0.9 \text{ mm}$
Gap	$g = 0.9 \text{ mm}$
Épaisseur	$e = 0.035 \text{ mm}$

(a) Double anneaux

Dimension	Valeur
Longueur	$18 \text{ mm}$
Largeur	$m = 2.4 \text{ mm}$
Épaisseur	$e = 0.035 \text{ mm}$

(b) Ligne de transmission

TABLE 3.4 – Paramètres de la ligne de transmission et double anneaux

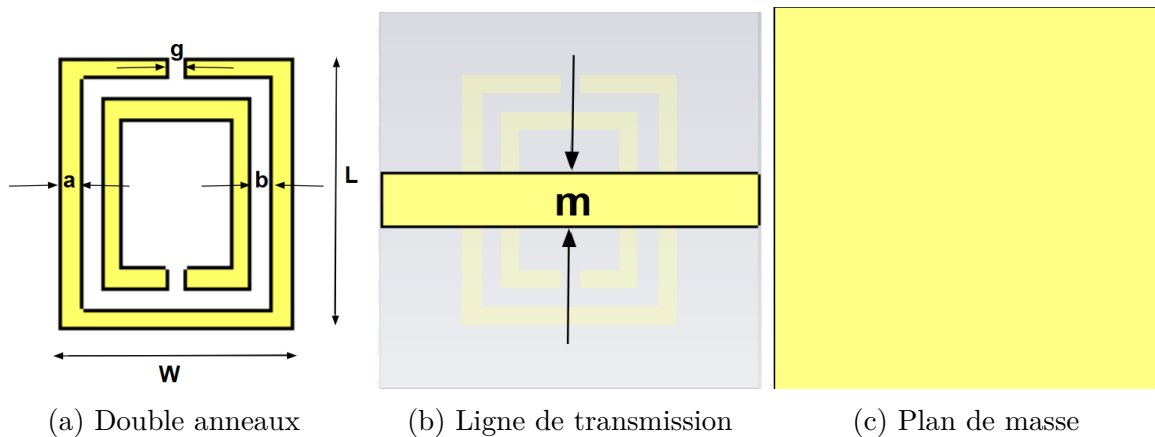


FIGURE 3.10 – Paramètres de la ligne de transmission et double anneaux

### 3.2.4.2 SRR Carré avec plan de masse

Voici notre échantillon de résonateur à anneau fendu (SRR) carré avec plan de masse.

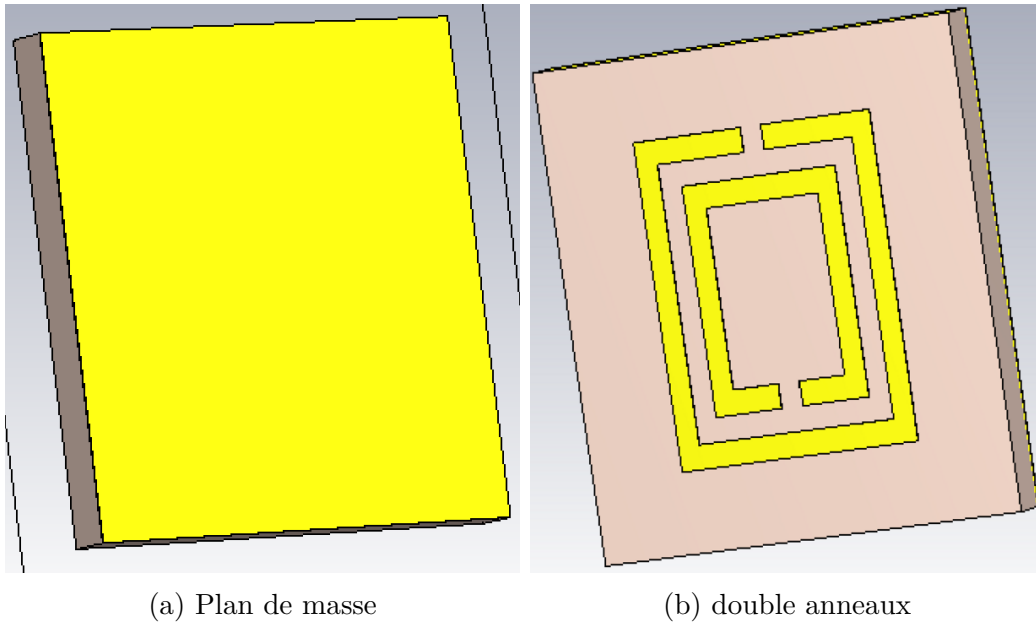


FIGURE 3.11 – Représentation SRR carré avec plan de masse

### 3.2.4.3 SRR Carré ligne de transmission

Notre échantillon de résonateur à anneau fendu (SRR) carré avec la ligne de transmission.

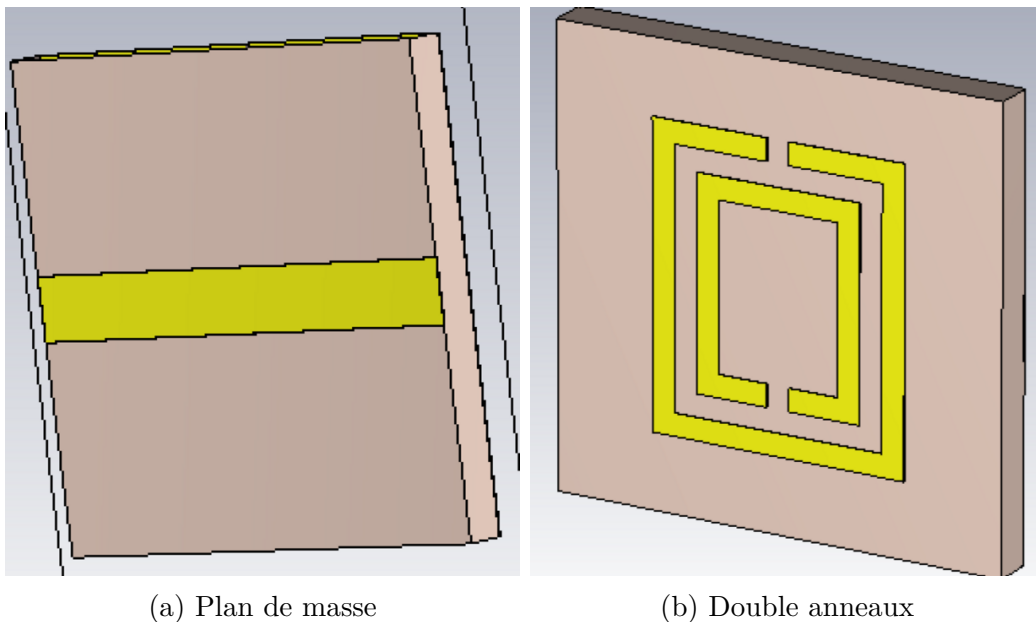


FIGURE 3.12 – Représentation SRR carré avec la ligne de transmission



### 3.2.5 Simulation d'une antenne CSRR circulaire

Cette section décrit la simulation d'une antenne CSRR (Complementary Split Ring Resonator) circulaire.

#### 3.2.5.1 Dimensions et Propriétés

Les dimensions de l'antenne CSRR circulaire sont définies comme suit :

##### A-Substrat

TABLE 3.5 – Paramètres de substrat CSRR circulaire

Dimensions			Propriétés		
Largeur (mm)	Longueur (mm)	Épaisseur (mm)	Type	Permittivité	Perméabilité
14.48	14.48	1.6	FR4 epoxy	4.4	1

##### B-Double anneaux et ligne de transmission

Dimension	Valeur
Rayon de l'anneau	$r = 4.24 \text{ mm}$
Distance entre les deux anneaux	$d = 0.4 \text{ mm}$
Largeur de l'anneau	$c = 0.8 \text{ mm}$
Gap	$g = 0.8 \text{ mm}$
Épaisseur	$e = 0.035 \text{ mm}$

(a) Double anneaux

Dimension	Valeur
Longueur	$14.48 \text{ mm}$
Largeur	$m = 4.48 \text{ mm}$
Épaisseur	$e = 0.035 \text{ mm}$

(b) Ligne de transmission

TABLE 3.6 – Paramètres de la ligne de transmission et double anneaux

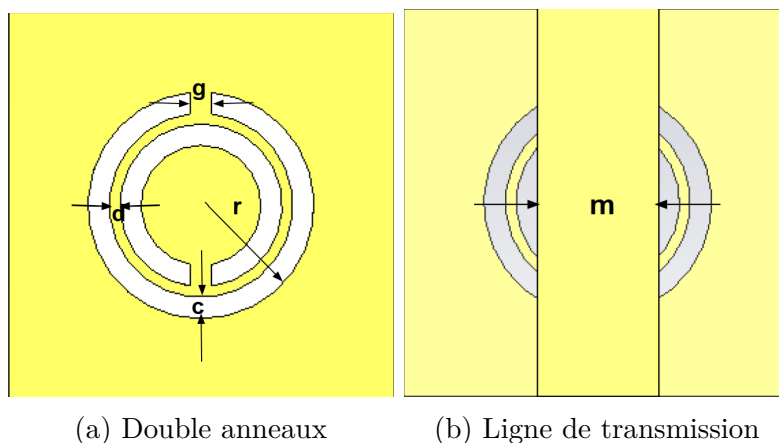


FIGURE 3.13 – Paramètres de la ligne de transmission et double anneaux

### 3.2.5.2 CSRR circulaire ligne de transmission

La ligne de transmission avec le CSRR circulaire a été réalisée de manière suivante :

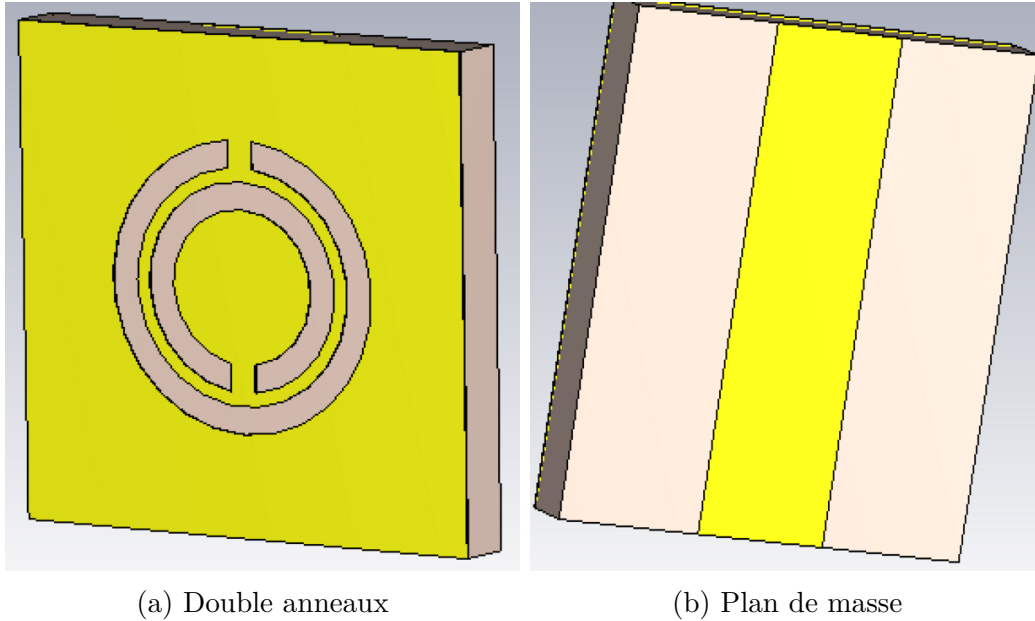


FIGURE 3.14 – Représentation CSRR circulaire

### 3.2.6 Simulation d'une Antenne CSRR carrée

Enfin, cette section traite de la simulation d'une antenne CSRR carrée.

#### 3.2.6.1 Dimensions et Propriétés

Les dimensions et propriétés de l'antenne CSRR carrée sont :

#### A-Substrat

TABLE 3.7 – Paramètres de substrat CSRR carré

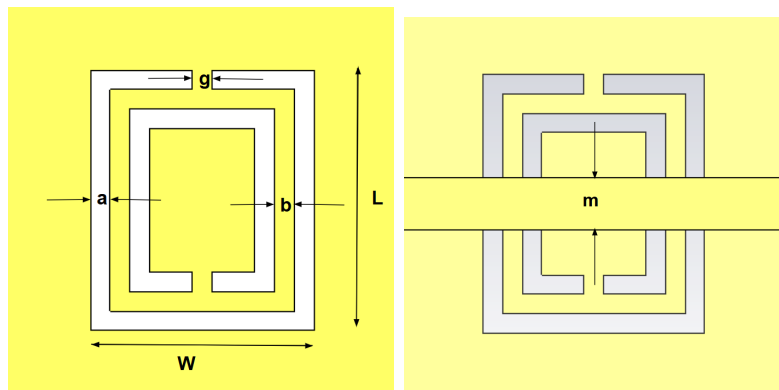
Dimensions			Propriétés		
Largeur (mm)	Longueur (mm)	Epaisseur (mm)	Type	Permittivité	Perméabilité
18	18	1.6	FR4 epoxy	4.4	1

Dimension	Valeur
Longueur de L'anneau	$L = 12 \text{ mm}$
Largeur de L'anneau	$W = 10.2 \text{ mm}$
Distance anneau	$a = b = 0.9 \text{ mm}$
Gap	$g = 0.9 \text{ mm}$
Épaisseur	$e = 0.035 \text{ mm}$

Dimension	Valeur
Longueur	$18 \text{ mm}$
Largeur	$m = 2.4 \text{ mm}$
Épaisseur	$e = 0.035 \text{ mm}$

TABLE 3.8 – Paramètres de la ligne de transmission et double anneaux

### B-Double anneaux et ligne de transmission



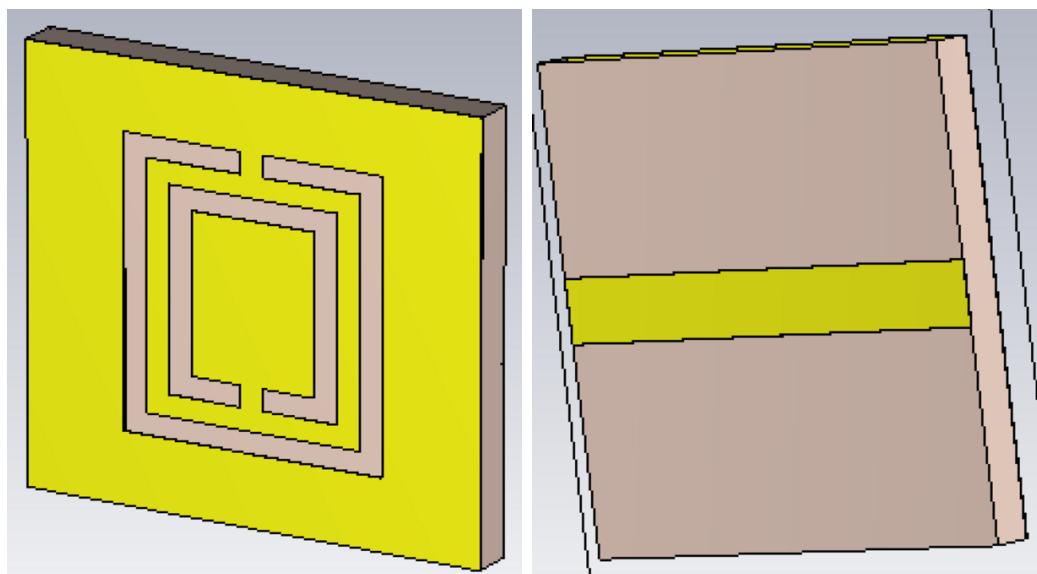
(a) Double anneaux

(b) Ligne de transmission

FIGURE 3.15 – Paramètres de la ligne de transmission et double anneaux

#### 3.2.6.2 CSRR Carré ligne de transmission

voici une antenne CSRR carré avec une ligne de transmission.



(a) Double anneaux

(b) Plan de masse

FIGURE 3.16 – Représentation CSRR carré

### 3.2.7 Simulation d'une Antenne patch

Dans le but de comparer une antenne patch avec une antenne à métamatériaux, nous avons procédé à la simulation des deux types d'antennes. Nous avons insisté sur la simulation détaillée d'une antenne patch ainsi que d'une antenne à métamatériaux afin de mettre en évidence leurs différences en termes de performance, de bande passante, de gain et de directivité. Cette comparaison est essentielle pour comprendre les avantages et les limitations de chaque type d'antenne.

#### 3.2.7.1 Dimensions et Propriétés

Les dimensions et propriétés de l'antenne Patch carrée sont :

##### A-Substrat

TABLE 3.9 – Paramètres de substrat

Dimensions			Propriétés		
Largeur (mm)	Longueur (mm)	Épaisseur (mm)	Type	Permittivité	Perméabilité
27	33	1.6	FR4 epoxy	4.4	1

##### B-Patch et le microruban

Dimension	Valeur
Longueur de patch	$L = 12 \text{ mm}$
Largeur de patch	$W = 11.2 \text{ mm}$
$l$	$3.8 \text{ mm}$
$g$	$0.8 \text{ mm}$
Épaisseur	$e = 0.035 \text{ mm}$

Dimension	Valeur
Longueur	$wr = 7 \text{ mm}$
Largeur	$lr = 2.2 \text{ mm}$
Épaisseur	$e = 0.035 \text{ mm}$

TABLE 3.10 – Paramètres de la ligne de transmission et double anneaux

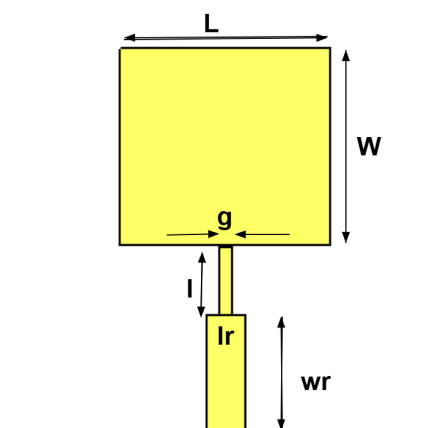


FIGURE 3.17 – Paramètres de la ligne de transmission et double anneaux

### 3.2.7.2 Patch microruban

Voici une antenne patch carré avec une ligne microruban.

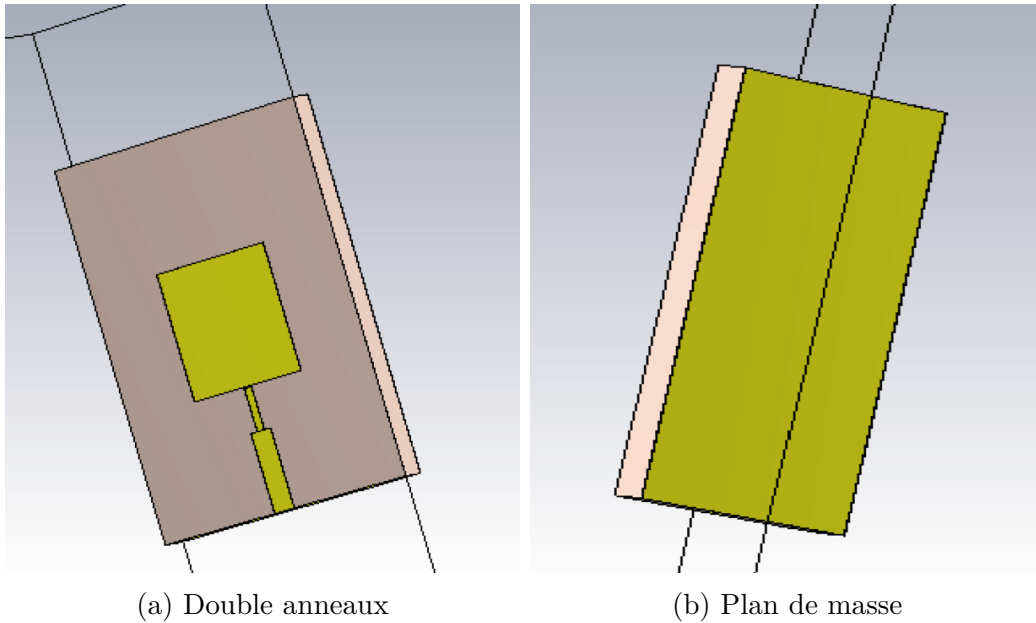


FIGURE 3.18 – Représentation antenne patch

Ces sections offrent une description complète et précise du processus de simulation pour chaque type d'antenne, y compris les antennes à résonateurs à anneau fendu (SRR) et les résonateurs à anneau fendu complété (CSRR), tant circulaires que carrés, en utilisant CST Studio Suite. Passons maintenant aux étapes détaillées de la fabrication de ces antennes, en mettant l'accent sur les techniques de PCB et de traitement des matériaux nécessaires pour réaliser ces structures complexes avec précision.

### 3.3 La Réalisation d'une antenne métamatériau

Dans cette partie , nous examinerons en détail les techniques expérimentales utilisées dans notre étude. Nous commencerons par décrire le substrat diélectrique employé, puis nous expliquerons les méthodes expérimentales appliquées aux résonateurs à anneau fendu (SRR) et aux résonateurs à anneau fendu complété (CSRR).. Nous avons adopté la méthode de fabrication par circuit imprimé (PCB) pour réaliser ces résonateurs. Enfin, nous présenterons la technique de caractérisation utilisée pour déterminer la fréquence de résonance.

#### 3.3.1 La Methode Printed Circuit Board (PCB)

Les circuits imprimés (PCB) sont omniprésents dans notre quotidien, se cachant derrière presque tous les appareils électroniques que nous utilisons. Qu'il s'agisse de smartphones, d'ordinateurs portables, de téléviseurs ou d'appareils électroménagers, les PCB constituent la base de l'interconnexion et du fonctionnement des composants électroniques.

La fabrication de PCB et la photolithographie partagent certaines similitudes au niveau du processus, notamment l'utilisation de la photolithographie pour transférer un motif sur un substrat. Cependant, il existe des différences importantes à souligner, en particulier en ce qui concerne le point de départ et les matériaux utilisés.

##### 1-Points communs :

##### Utilisation de la photolithographie :

Dans les deux cas, la photolithographie est employée pour transférer un motif précis sur un substrat. Une couche photosensible est déposée, exposée à la lumière à travers un masque, puis développée pour révéler le motif souhaité.

##### Processus de gravure :

Une fois le motif révélé, une technique de gravure est utilisée pour éliminer le matériau indésirable du substrat, laissant le motif souhaité en relief.

##### 2-Différences :

##### Substrat de départ :

Photolithographie : Le processus débute avec un substrat nu, généralement en silicium ou en autre matériau conducteur.

En revanche Le processus de PCB débute avec un substrat déjà recouvert d'une couche de cuivre conductrice.

### Matériau photosensible :

Photolithographie : Utilise des résines photosensibles spécifiques conçues pour les applications de microfabrication.

PCB : Utilise généralement une couche de photoresist à base d'époxyde ou d'acrylate, plus adaptée à la fabrication de circuits imprimés.

### 3.3.2 Réalisation d'un résonateur à anneau fendu complété (CSRR)

Pour réaliser un résonateur à anneau fendu complété (CSRR), il est nécessaire d'enlever le cuivre des anneaux. Cette méthode consiste à graver des fentes dans le cuivre du circuit imprimé (PCB), ce qui crée les structures annulaires caractéristiques du CSRR. En enlevant le cuivre de manière précise, on forme les anneaux fendus nécessaires pour les résonateurs.

#### 3.3.2.1 Procédure de Fabrication de PCB

##### 1-Réalisation des masques de la photolithographie

Pour réaliser les masques nécessaires à la photolithographie, nous avons utilisé le logiciel KICAD pour dessiner le schéma des électrodes. KICAD est un outil puissant et flexible qui permet de créer des designs précis et adaptés aux exigences des circuits imprimés. Une fois le schéma finalisé, nous l'avons exporté et imprimé sur des acétates en plastique spécialement conçus pour être utilisés dans des processus de fabrication de circuits imprimés. Ces acétates servent de masques lors de l'exposition à la lumière UV, permettant de transférer avec précision les motifs des électrodes sur le substrat de cuivre du PCB.



(a) Masque double anneaux

(b) Masque ligne de transmission

FIGURE 3.19 – Masques de PCB carré

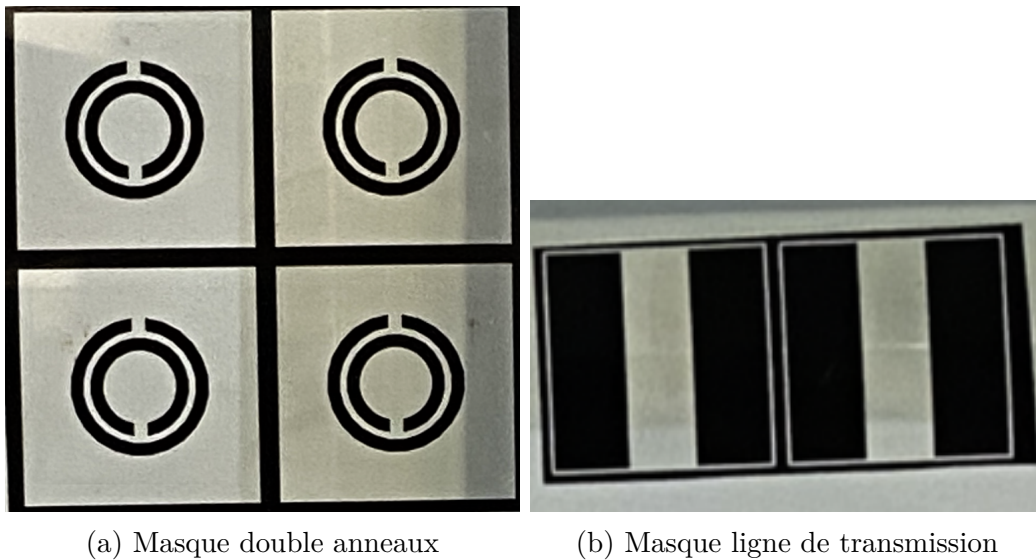


FIGURE 3.20 – Masques de PCB circulaire

## 2-Substrat utilisé

Le substrat utilisé pour notre étude est un FR4, caractérisé par une épaisseur de 1,6 mm et une permittivité relative  $\epsilon$  de 4,4. Ce substrat est couvert avec une couche de cuivre de 0,035 mm d'épaisseur sur les deux faces, assurant une conductivité adéquate pour les applications de circuits imprimés. De plus, le substrat est revêtu d'une résine thermodurcissable positive.

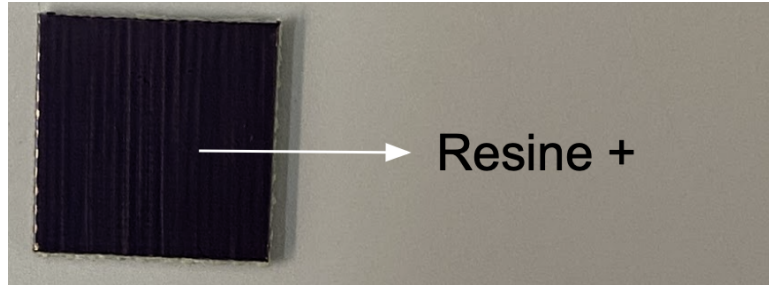


FIGURE 3.21 – Substrat de PCB avec résine positive

Une étape supplémentaire est nécessaire, nous devons retirer cette résine pour pouvoir déposer une résine négative pour le type CSRR. Pour ce faire, nous utilisons de l'acétone pour dissoudre la résine positive.



FIGURE 3.22 – Substrat de PCB



### 3-Photoresist negatif

Une fois la résine positive enlevée, nous pouvons déposer un ruban de résine négative sur le substrat. Le film de photoresist quand exposé aux rayons ultraviolets (UV), subit un processus de durcissement. Ce film est constitué de matériaux photoactifs, qui réagissent à l'exposition aux UV en subissant une transformation chimique. Il est généralement présenté sous forme de rouleaux, où les matériaux photoactifs sont pris en sandwich entre deux couches de protection .

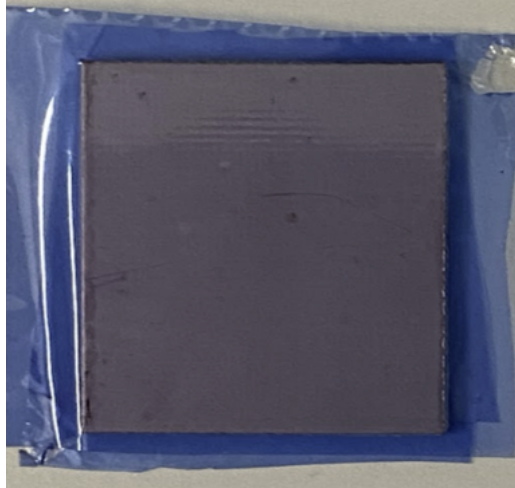


FIGURE 3.23 – Substrat de PCB avec résine négative

Après avoir appliqué le photoresist sur notre échantillon, nous procédons à une étape de cuisson (bake) pour assurer une adhérence optimale sur la surface en cuivre pendant 5 min à la températures autour de 90°C. Cette étape de cuisson permet au photoresist de se lier fermement au substrat, assurant ainsi une couverture uniforme et réduisant les risques de défauts tels que les bulles d'air ou les vide.



FIGURE 3.24 – Le four

#### 4-Alignement

Nous avons garanti un bon alignement approprié des photomasques en faisant correspondre les repères du photomasque avec les caractéristiques de notre échantillon. Cette pratique est essentielle pour éviter les défauts lors de l'exposition aux rayons UV.

#### 5-Insolation

Une étape critique du processus a impliqué l'exposition de la résine photosensible à la lumière UV. Après avoir soigneusement positionné le masque sur la résine, nous avons placé l'échantillon dans une boîte UV spécialisée, où il a été exposé à une lumière ultraviolette spécifique pendant 90 s. Cette exposition précise et contrôlée a permis de transférer fidèlement l'image du masque sur la résine, activant ainsi les zones exposées de manière sélective

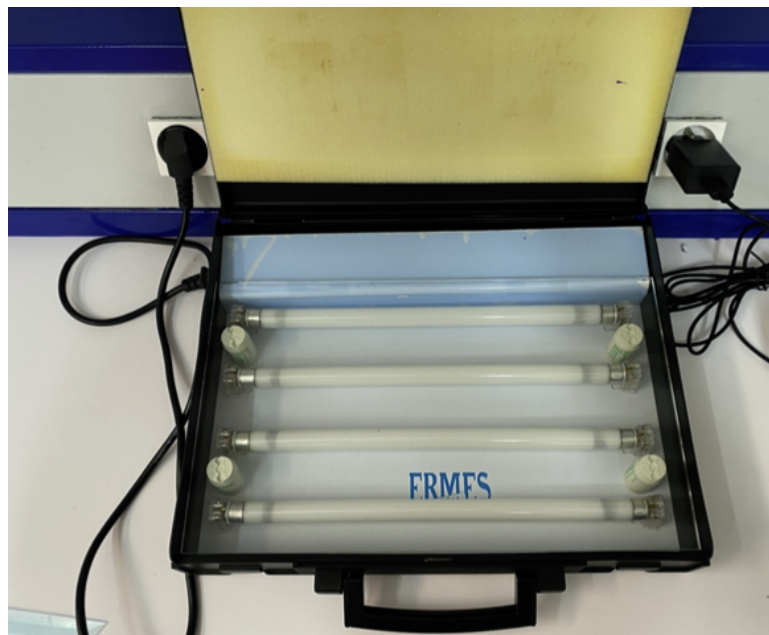


FIGURE 3.25 – BOite UV

#### 6-La révélation

Une fois que la résine a été exposée, l'échantillon a été placé dans un bain de développement d'acide alcalin pendant 30s afin d'éliminer la partie de la résine qui n'a pas été exposée.

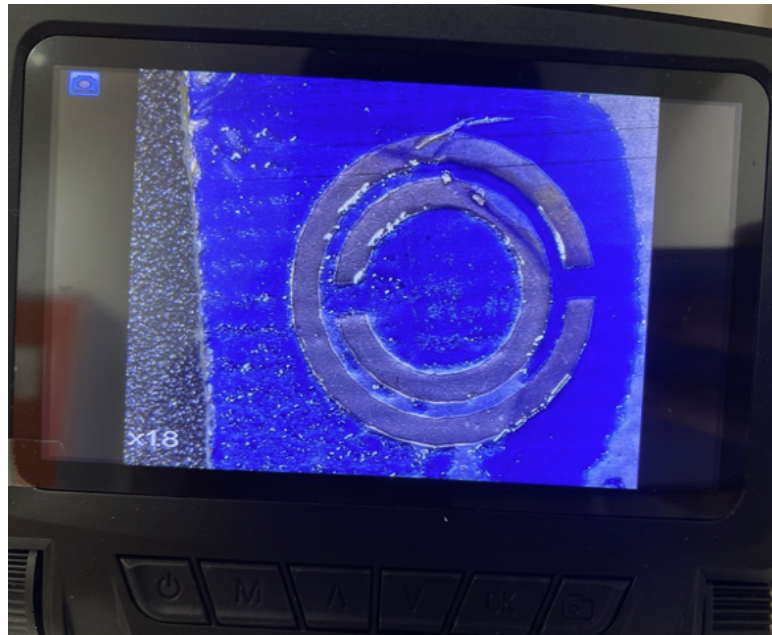


FIGURE 3.26 – La resine négative après la révélation

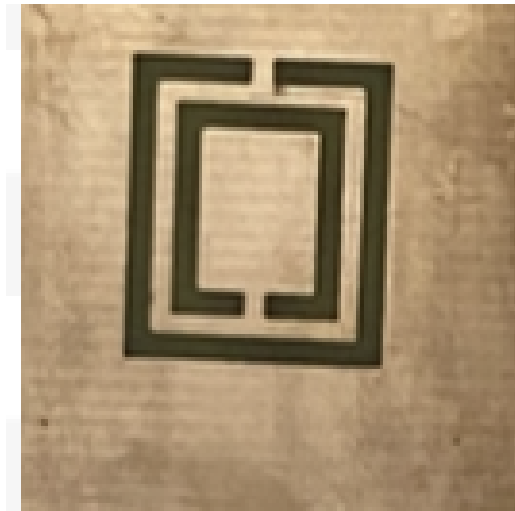
## 7-La gravure

Nous avons effectué une manipulation des échantillons dans une solution de gravure en utilisant du Perchlorure de Fer ( $\text{FeCl}_3$ ) à une température de  $55^\circ\text{C}$  pendant 8 minutes qui a pour propriété de dissoudre le cuivre non protégé par la résine.



FIGURE 3.27 – Solution de gravure

Après la gravure, les résines restantes sur le Cuivre ont dissous par l'acétone.



(a) Résultat final

### 3.3.3 Réalisation d'un Résonateur à Anneau Fendu (SRR)

En effet, pour réaliser un résonateur à anneau fendu (SRR), il faut préserver le cuivre des anneaux tout en enlevant le cuivre du reste. La méthode décrite précédemment, utilisant une résine photosensible positive et une solution de gravure, peut être employée pour obtenir ce résultat.

#### 3.3.3.1 Procédure de Fabrication de PCB

##### 1-Réalisation des Masques de la Photolithographie

La première étape consiste à réaliser les masques nécessaires pour la photolithographie. Pour cette procédure, nous avons utilisé les mêmes masques que ceux employés pour la fabrication de CSRR (Complimentary Split-Ring Resonator).

##### 2-Substrat utilisé

Le substrat utilisé pour notre étude est un matériau FR4 le même substrat utilisé pour la réalisation des CSRR, qui possède des caractéristiques spécifiques : une épaisseur de 1,6 mm et une permittivité relative de 4,4. Ce substrat est recouvert d'une couche de cuivre de 0,035 mm d'épaisseur sur les deux faces. En outre, il est revêtu d'une résine thermodurcissable positive.

##### 3-Photoresist positif

Notre substrat est déjà enduit d'une résine positive, qui réagit chimiquement à l'exposition aux rayons UV. Cette résine devient plus faible lorsqu'elle est exposée à la lumière.

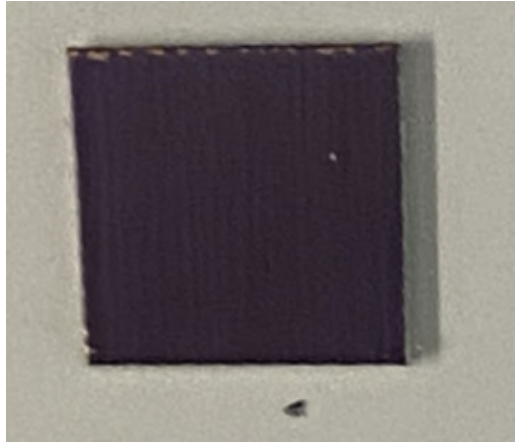


FIGURE 3.29 – Substrat de PCB avec résine positive

#### 4-Alignement

Pour garantir un alignement précis, nous veillons à faire correspondre les repères du photomasque avec les caractéristiques spécifiques de notre échantillon. Cette étape est essentielle pour assurer que les motifs sont correctement transférés et alignés sur le substrat de cuivre, ce qui est fondamental pour la précision des antennes métamatériau.

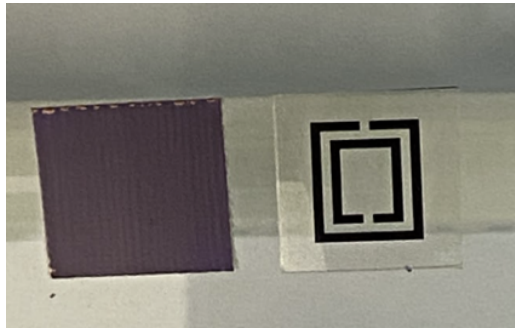


FIGURE 3.30 – L'alignement dans la boîte UV

#### 5-Insolation

Après avoir soigneusement positionné le masque sur la résine, nous plaçons l'échantillon dans une boîte UV spécialisée, où il est exposé à une lumière ultraviolette spécifique pendant 90 secondes. Cette exposition précise et contrôlée permet de transférer fidèlement l'image du masque sur la résine, activant ainsi les zones exposées de manière sélective.

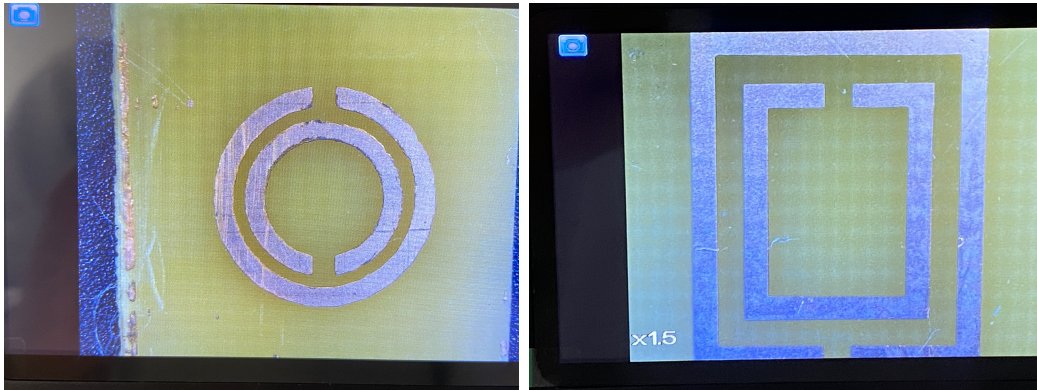
#### 6-La révélation

Post-exposition, l'échantillon est placé dans un bain de développement contenant du NaOH pendant 15 secondes. Cette étape élimine la résine exposée aux UV. La solution de NaOH dissout sélectivement la résine exposée, révélant ainsi les motifs protégés par le masque sur le cuivre.

## 7-La gravure

Nous procédons ensuite à la gravure des motifs en immergeant les échantillons dans une solution de Perchlorure de Fer ( $\text{FeCl}_3$ ) chauffée à  $55^\circ\text{C}$  pendant 8 minutes. Cette solution a pour propriété de dissoudre le cuivre non protégé par la résine. La gravure permet de créer les motifs de cuivre nécessaires en éliminant les zones non protégées.

Enfin, les résines restantes sur le cuivre sont dissoutes à l'aide d'acétone.



(a) SRR circulaire

(b) SRR carré

FIGURE 3.31 – Résultat final

### 3.4 La caractérisation de l'antenne métamatériau

La caractérisation d'une antenne métamatériau est essentielle pour évaluer ses performances. Utiliser un analyseur de réseau permet de déterminer des paramètres clés comme la fréquence de résonance et le coefficient de réflexion S11. Voici les étapes et concepts principaux de ce processus :

#### 1-Soudure des Connecteurs

Pour connecter l'antenne à l'analyseur de réseau, il est nécessaire de souder des connecteurs appropriés à l'antenne. Cette opération est réalisée en utilisant un fer à souder et du laiton, grâce à son refroidissement rapide. Il est crucial de respecter les spécifications de la ligne de transmission pour garantir une connexion optimale.



FIGURE 3.32 – Fer à souder et du laiton

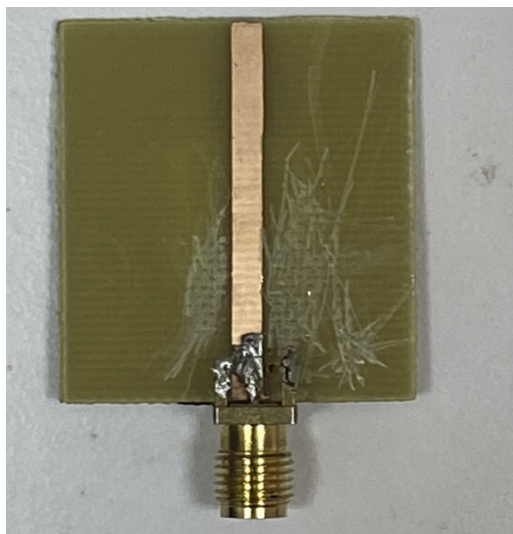


FIGURE 3.33 – Soudure

## 2-Connexion à l'analyseur de réseau

Avant de connecter l'antenne, l'analyseur de réseau doit être calibré pour assurer des mesures précises. La calibration est effectuée en utilisant un kit spécifique. Ensuite, l'analyseur est configuré pour balayer la plage de fréquences autour de 3 à 10 GHz. L'antenne est connectée au port de l'analyseur à l'aide d'un câble coaxial de haute qualité pour minimiser les pertes.

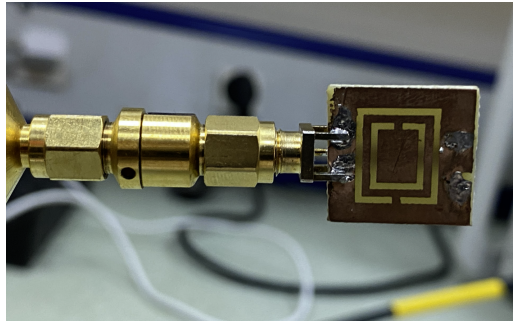


FIGURE 3.34 – Connexion à l'analyseur de réseau

## 3-Mesure et Analyse

Une fois la connexion établie, la mesure est lancée pour obtenir le paramètre S11 (le coefficient de réflexion) sur toute la bande de fréquences balayée. Les résultats sont enregistrés sous forme de graphes pour chaque échantillon testé.

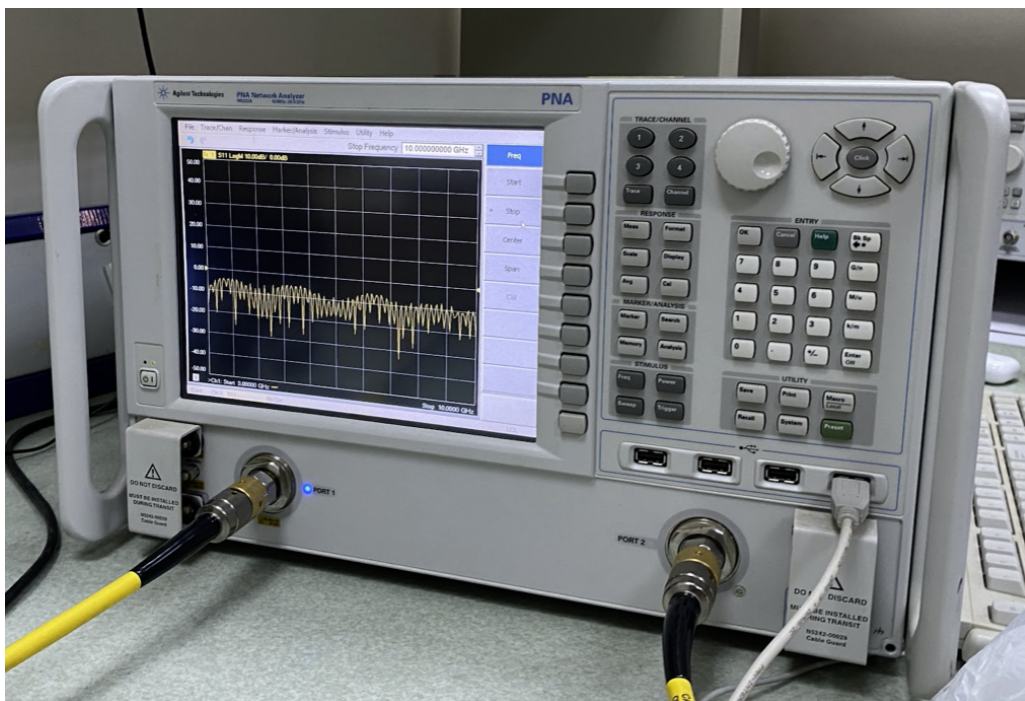


FIGURE 3.35 – L'analyseur de réseau



## Les échantillons obtenus

### Les résonateur à anneau fendu complété (CSRR)

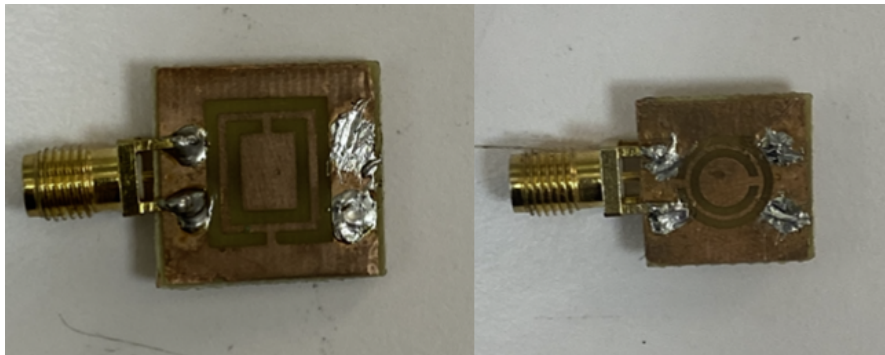


FIGURE 3.36 – CSRR carré et circulaire

### Les résonateur à anneau fendu (SRR)

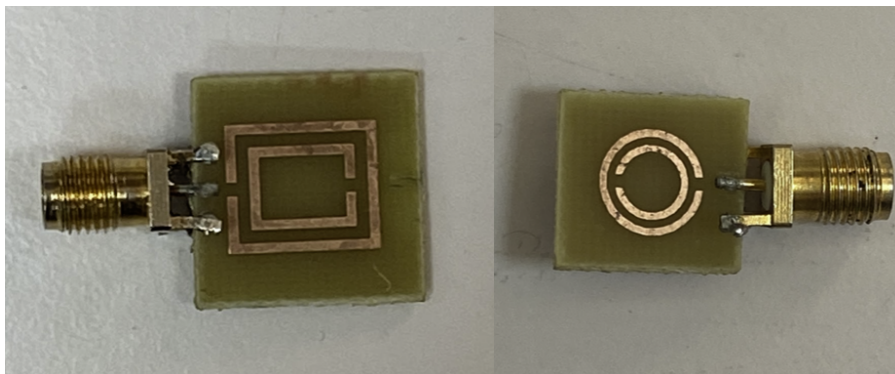


FIGURE 3.37 – SRR carré et circulaire

## 3.5 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les méthodes expérimentales utilisées lors de notre étude. Nous avons d'abord effectué des simulations en utilisant CST Studio Suite pour modéliser les antennes à résonateurs à anneau fendu (SRR) et à résonateurs à anneau fendu complété (CSRR). Ensuite, nous avons décrit la réalisation de ces antennes en utilisant la méthode des circuits imprimés (PCB). Enfin, nous avons caractérisé les antennes fabriquées à l'aide d'un analyseur de réseau pour évaluer leurs performances. L'ensemble des résultats collectés sera présenté et discuté en détail dans le prochain chapitre.

# Chapitre 4

## Résultats et interprétations

### 4.1 Introduction

Ce chapitre se divise en deux parties. La première partie concerne la comparaison entre l'antenne patch et l'antenne à métamatériaux. La deuxième partie présente les résultats des CSRR et SRR réalisés précédemment.

### 4.2 Comparaison entre l'antenne patch et l'antenne à métamatériaux

Dans cette section, nous analyserons et comparerons les performances d'une antenne patch et d'une antenne utilisant des métamatériaux simulés par CST.

### 4.2.1 Coefficient de réflexion S11 et la bande passante

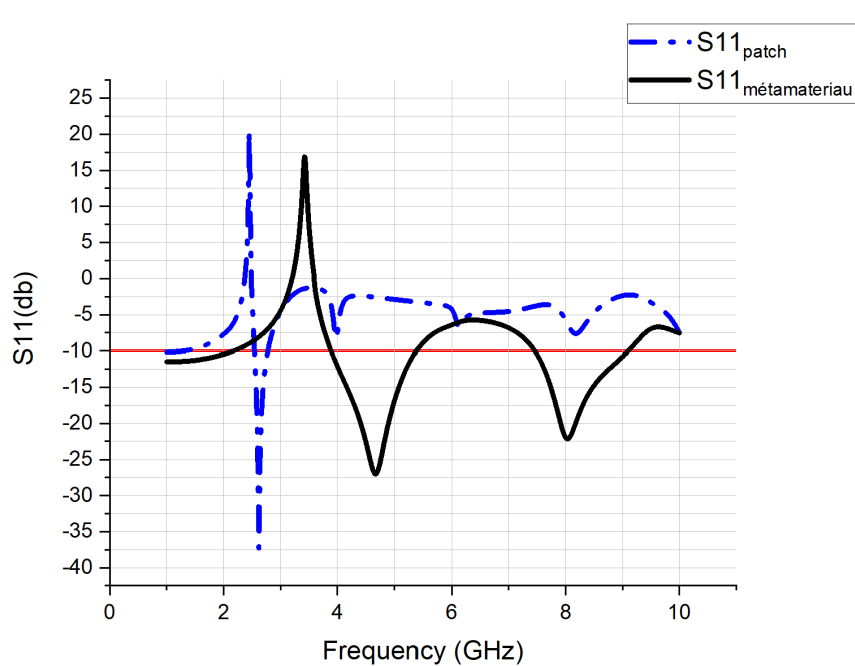


FIGURE 4.1 – Comparaison S11 entre antenne patch et antenne métamatériaux

#### Analyse du graphique

Le graphique que nous possédons représente le paramètre S11 de deux antennes en fonction de la fréquence : une antenne patch (ligne bleue) et une antenne à métamatériaux (ligne noire) de même dimensions .

Le S11 reflète la capacité d'une antenne à réfléchir un signal ; une valeur de S11 plus faible indique une meilleure adaptation entre l'antenne et la ligne de transmission, ce qui se traduit par une moindre réflexion du signal.

#### Performance de l'antenne patch :

- L'antenne patch (ligne bleue) présente une valeur S11 plus faible sur toute la plage de fréquences, avec une fréquence de résonance à 2,62 GHz et un S11 de -37,27 dB.
- Cependant, elle a une bande passante relativement étroite de 0,23 GHz (2,54 GHz à 2,77 GHz).

#### Analyse de l'antenne à métamatériaux :

- La ligne noire (antenne à métamatériaux) montre quelques variations qui pourraient indiquer des fréquences de résonance potentielles dans la plage de 0 à 10 GHz.
- On observe une valeur de S11 plus faible de -27,04 dB à une fréquence de résonance de 4,67 GHz.
- Toutefois, la bande passante est large, s'étendant sur 1,49 GHz (de 3,89 GHz à 5,38 GHz), même pour le deuxième pic, ce qui indique une autre bande passante large.

### 4.2.2 Rapport d'onde stationnaire(VSWR)

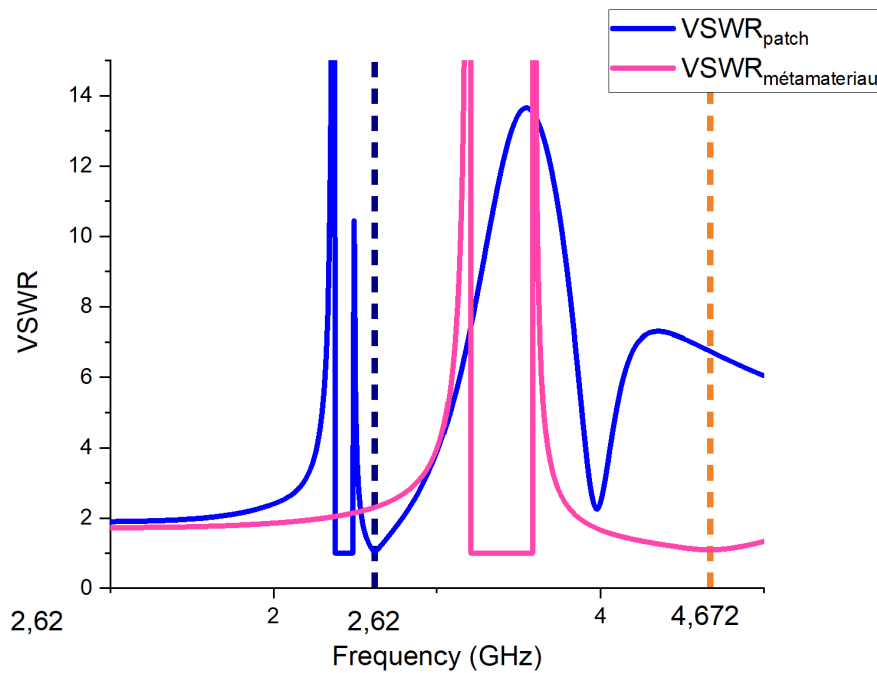


FIGURE 4.2 – Comparaison VSWR entre antenne patch et antenne métamatériaux

#### Analyse du graphique

Le graphique compare les performances du rapport d'onde stationnaire de tension (VSWR) de l'antenne patch (en bleue) et l'antenne à métamatériaux (en rose). Le VSWR mesure l'efficacité d'une antenne à émettre un signal, où une valeur plus faible et proche de 1 indique une meilleure adaptation .

#### Performance de l'antenne patch :

- La fréquence de résonance est indiquée par une ligne en pointillés bleue verticale à 2,62 GHz.
- À cette fréquence, le VSWR est 1,09 , ce qui indique une bonne adaptation d'impédance.
- Cependant, la bande passante de l'antenne patch est assez étroite, comme en témoigne la montée rapide du VSWR dès qu'on s'éloigne de 2,62 GHz.

#### Performance de l'antenne à métamatériaux :

- La fréquence de résonance principale est indiquée par une ligne en pointillés orange verticale à 4,67 GHz.
- À cette fréquence, le VSWR est 1,02 , indiquant une très bonne adaptation d'impédance.
- L'antenne à métamatériaux présente une bande passante beaucoup plus large comparée à l'antenne patch, comme le montre la courbe plus étendue et moins abrupte autour de 4,67 GHz.

- On observe également une deuxième plage de fréquences où le VSWR est bas, bien que ce ne soit pas aussi prononcé que le pic principal à 4,67 GHz.

### 4.2.3 Diagramme de rayonnement

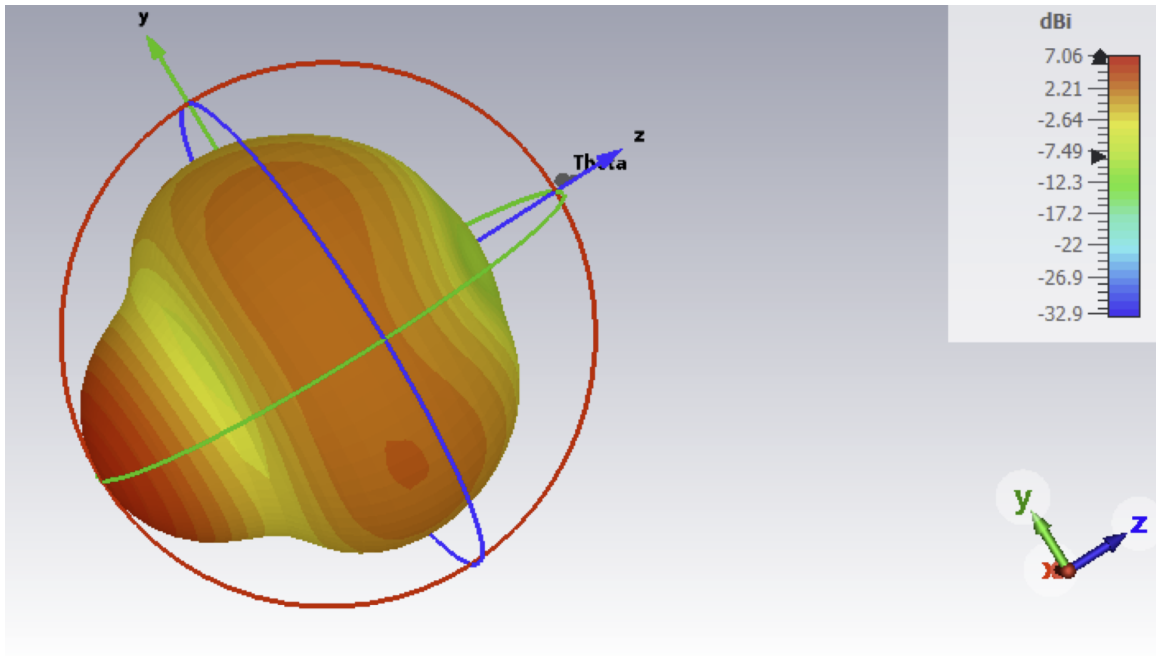


FIGURE 4.3 – Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne métamatériau

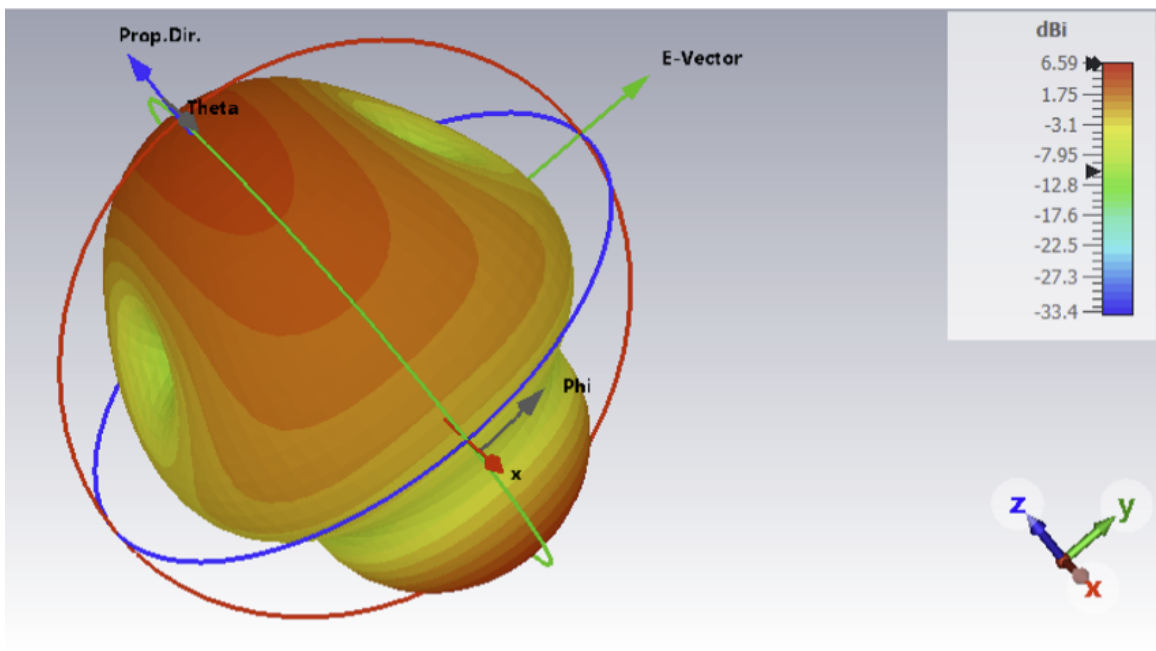


FIGURE 4.4 – Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne patch

## 1-Analyse du diagramme 3D

Le diagramme de rayonnement présenté illustre la distribution spatiale de l'énergie rayonnée par l'antenne à métamatériaux (le premier diagramme )et l'antenne patch (deuxième diagramme). Il s'agit d'une représentation tridimensionnelle de l'intensité du champ électromagnétique émis par l'antenne dans différentes directions.

### Performances de l'antenne patch et de l'antenne à métamatériaux

- L'antenne patch atteint un gain maximal de 6.59 dBi.
- L'antenne à métamatériaux atteint un gain légèrement supérieur de 7.056 dBi, indiquant une meilleure performance dans la direction de gain maximal.
- Les deux antennes montrent des zones de gain modéré (vert et jaune) et des zones de gain faible à négatif (bleu).
- La répartition du gain suit une tendance similaire, mais l'antenne à métamatériaux a une région de gain maximal plus prononcée.
- Les deux diagrammes montrent une forme irrégulière, indiquant une distribution non uniforme du rayonnement.
- Les deux antennes ont un lobe principal bien défini dans une direction spécifique(à déterminer par le diagramme 2D) donc des diagrammes directifs , accompagné de plusieurs lobes secondaires.

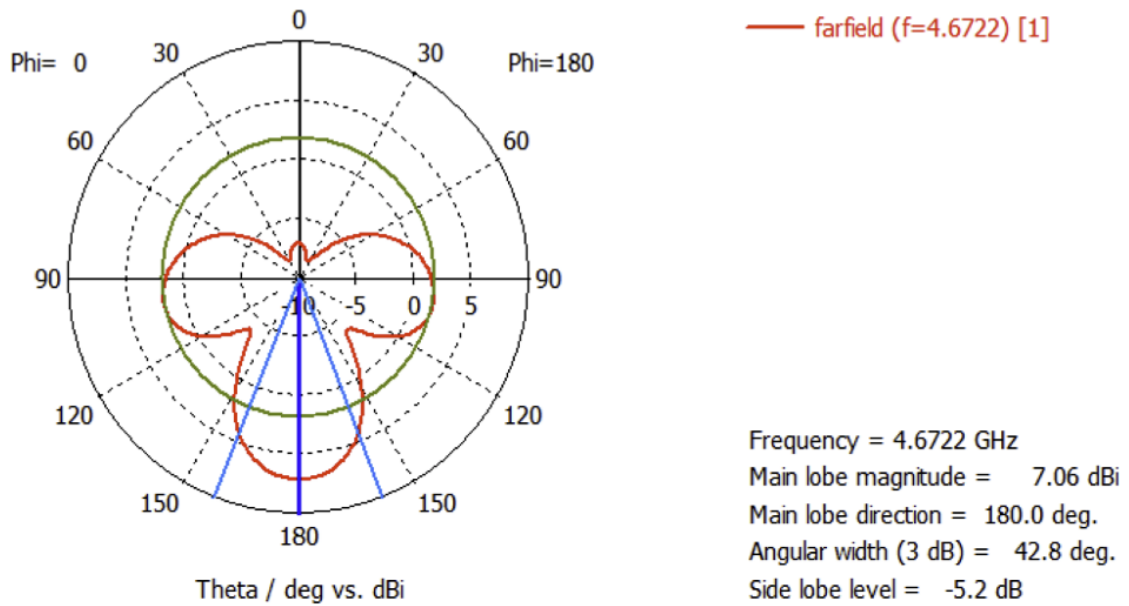


FIGURE 4.5 – Diagramme de rayonnement 2D de l’antenne métamatériau

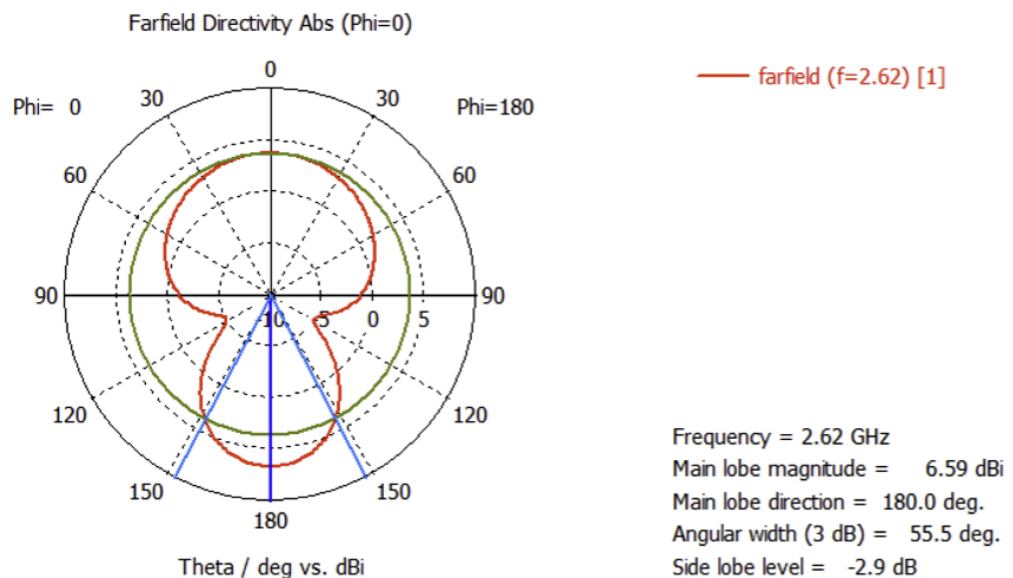


FIGURE 4.6 – Diagramme de rayonnement 2D de l’antenne patch

## 2-Analyse du diagramme 2D

Le diagramme de rayonnement 2D fournit des informations détaillées sur la distribution angulaire du gain de l’antenne et la directivité . Gain Maximal : Le gain maximal du lobe principal est de 7.06 dBi.

### Performance l’antenne à métamatériaux :

- Le lobe principal est dirigé vers 180 degrés en Theta.
- La largeur angulaire à 3 dB est la plage d’angles dans laquelle le gain reste à 3 dB en dessous du gain maximal.

- La largeur angulaire à 3 dB est de 42.8 degrés. Cela indique que le lobe principal est relativement étroit, ce qui correspond à une bonne directivité.
- Les lobes secondaires sont les régions où le gain est inférieur mais toujours présent en dehors du lobe principal.
- Le niveau des lobes secondaires est de -5.2 dB. Cela signifie que les lobes secondaires sont significativement plus faibles que le lobe principal.

### Performance de l'antenne patch :

- La magnitude du lobe principal est de 6,59 dBi.
- La direction principale du lobe est à 180 degrés.
- La largeur angulaire à 3 dB est de 55,5 degrés donc l'antenne métamatériau a une directivité meilleure .
- Le niveau des lobes secondaires est de -2,9 dB. Cela indique que les lobes secondaires sont plus faibles de 2,9 dB par rapport au lobe principal.

Pour résumer et comparer les caractéristiques de l'antenne patch et métamatériau, voici un tableau qui inclut les paramètres ci-dessus

Paramètres	S11(dB)	Fr(GHz)	B.P(GHz)	VSWR	Gain(dBi)	Lobe.p	Angle.O
A.P	-37,27	2,6	0,23	1,09	6,59	180	55,5
A.M	-27,04	4,67	4,67	1,02	7,056	180	42,8

TABLE 4.1 – Les caractéristiques de l'antenne patch et métamatériau

Bien que les deux antennes présentent un très bon coefficient de réflexion, indiquant une bonne adaptation d'impédance, l'antenne patch possède un coefficient de réflexion légèrement meilleur. Elles résonnent à des fréquences différentes, chaque fréquence de résonance étant adaptée à des applications spécifiques. Le VSWR de l'antenne métamatériau est légèrement meilleur, suggérant une meilleure adaptation d'impédance. De plus, l'antenne métamatériau offre un gain supérieur, ce qui signifie qu'elle peut émettre ou recevoir des signaux plus efficacement. Les deux antennes ont la même direction pour leur lobe principal. Cependant, l'antenne métamatériau possède un lobe principal plus étroit, ce qui indique une meilleure directivité.

### Conclusion

Ces caractéristiques font de l'antenne métamatériau un choix préférable par rapport à l'antenne patch pour des applications spécifiques telles que la détection des défauts en Contrôle Non Destructif (CND). La meilleure directivité et le gain supérieur de l'antenne métamatériau permettent une détection plus précise et plus efficace des défauts, ce qui est crucial pour les applications CND.

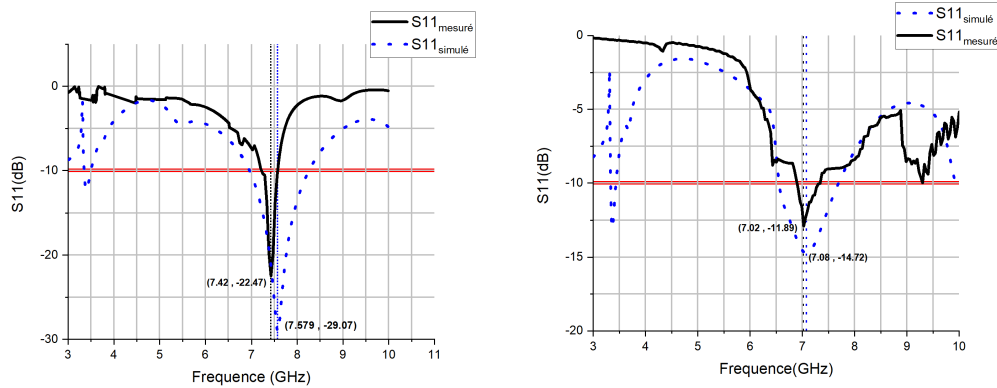


## 4.3 Différents échantillons de métamatériaux

Dans cette section, nous examinerons et comparerons différentes structures utilisées dans les métamatériaux pour diverses applications. Parmi celles-ci, on retrouve les anneaux fractals (CSRR), les anneaux fendus (SRR), ainsi que leurs variantes carrées ou circulaires. Chaque type de structure présente des caractéristiques distinctes qui influencent leur performance. Cette analyse permettra de déterminer quelle structure est la plus adaptée pour la détection.

### 4.3.1 Coefficient de réflexion S11 et la bande passante

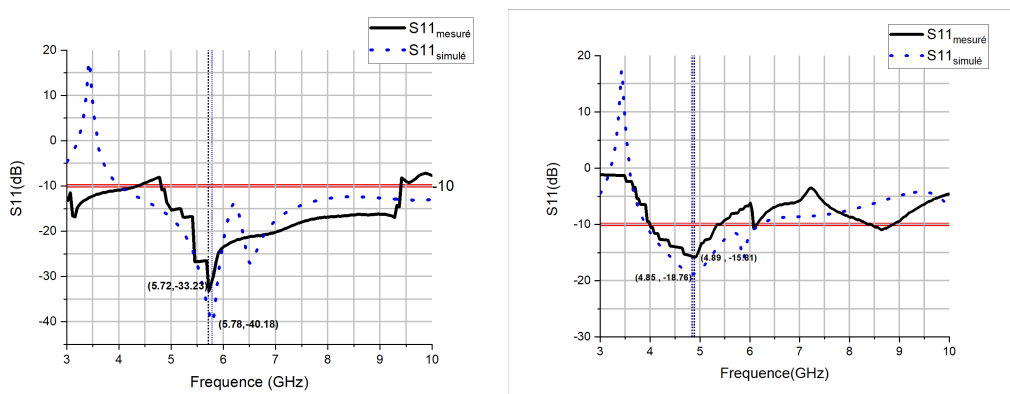
Dans cette partie, nous allons comparer les valeurs simulées par CST avec celles mesurées par un analyseur de réseau de S11 et les fréquences de résonances afin de vérifier leur proximité. Cette comparaison est essentielle pour garantir que les données simulées sont fiables et peuvent être utilisées avec confiance pour interpréter les diagrammes de rayonnement obtenus également par CST.



(a) SRR carré ligne de transmission

(b) SRR carré plan de masse

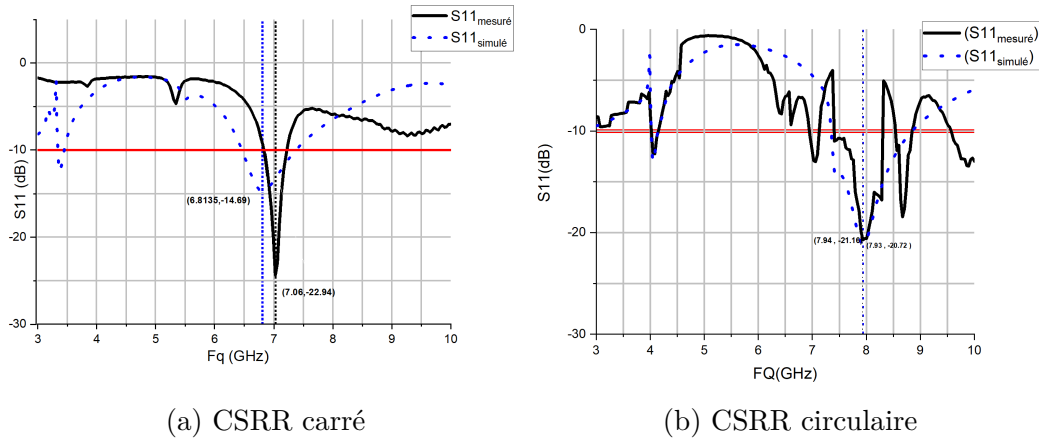
FIGURE 4.7 – Le paramètre S11 pour SRR carré



(a) SRR circulaire ligne de transmission

(b) SRR circulaire plan de masse

FIGURE 4.8 – Le paramètre S11 pour SRR circulaire



(a) CSRR carré

(b) CSRR circulaire

FIGURE 4.9 – Le paramètre S11 pour CSRR

Voici un tableau résumant les valeurs de S11 pour chaque courbe, y compris les fréquences de résonance et les bandes passantes :

TABLE 4.2 – Les résultats mesurés et simulés de chaque structure

courbe	Fréquence de résonance (GHz)		S11 (dB)		Bande passante (GHz)	
	Mesure	Simulé	Mesure	Simulé	Mesure	Simulé
**						
a	7.42	7.579	-22.47	-29.07	0.5	1.3
b	7.02	7.08	-11.89	-14.72	0.71	1.13
c	5.72	5.78	-33.23	-40.18	4.6	>6
d	4.89	4.85	-15.81	-18.76	1.8	2.3
e	7.06	6.8135	-22.94	-14.69	0.5	0.91
f	7.93	7.94	-20.72	-21.16	0.94	1.5

### Analyse des résultats obtenus

- Les courbes de S11 mesurées et simulées montrent une tendance générale similaire, ce qui indique que le modèle de simulation capture efficacement le comportement global du dispositif métamatériau.
- Les valeurs de S11 mesurées sont légèrement différentes des valeurs simulées sur l'ensemble de la plage de fréquences. Cela peut être dû à des variations dans les tolérances de fabrication ou à des limitations de la précision de mesure, mais la cohérence générale entre les deux types de données est encourageante.
- On remarque quelques divergences mineures entre les courbes mesurées et simulées, en particulier autour des fréquences de résonance spécifiques. Ces différences pourraient résulter de la précision du modèle de simulation par rapport aux conditions réelles de fabrication et de mesure.
- Les légères divergences entre les valeurs mesurées et simulées peuvent également être attribuées à des facteurs tels que les imperfections dans la configuration de mesure, les effets de couplage électromagnétique, ou encore des variations dans les matériaux utilisés.

## Conclusion

En conclusion, malgré quelques différences observées, les résultats simulés et mesurés indiquent que le modèle CST est capable de capturer efficacement le comportement du métamatériau étudié. Cette validation renforce la confiance dans l'utilisation des diagrammes de rayonnement simulés pour interpréter les performances et les caractéristiques électromagnétiques du métamatériau.

### 4.3.2 Rapport d'onde stationnaire(VSWR)

Pour comparer le VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) pour chaque structure, nous allons présenter les courbes de VSWR pour les valeurs simulées et mesurées

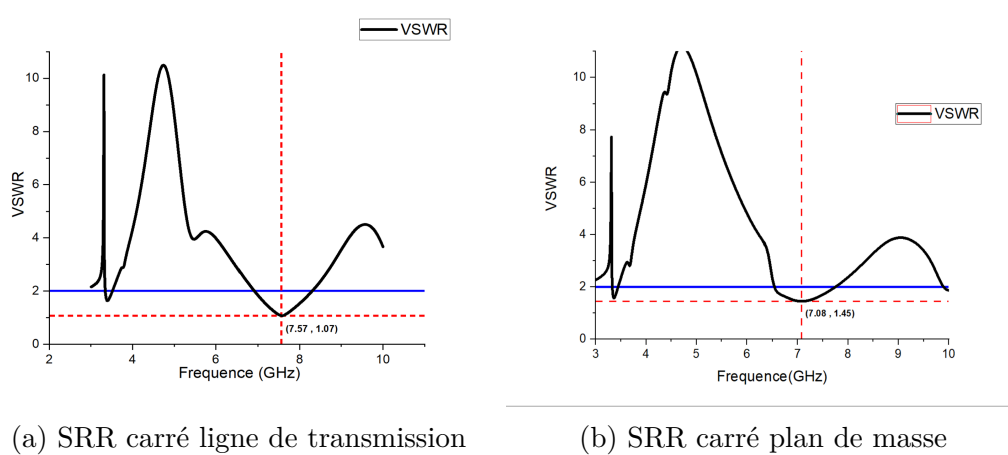


FIGURE 4.10 – Le paramètre VSWR pour SRR carré

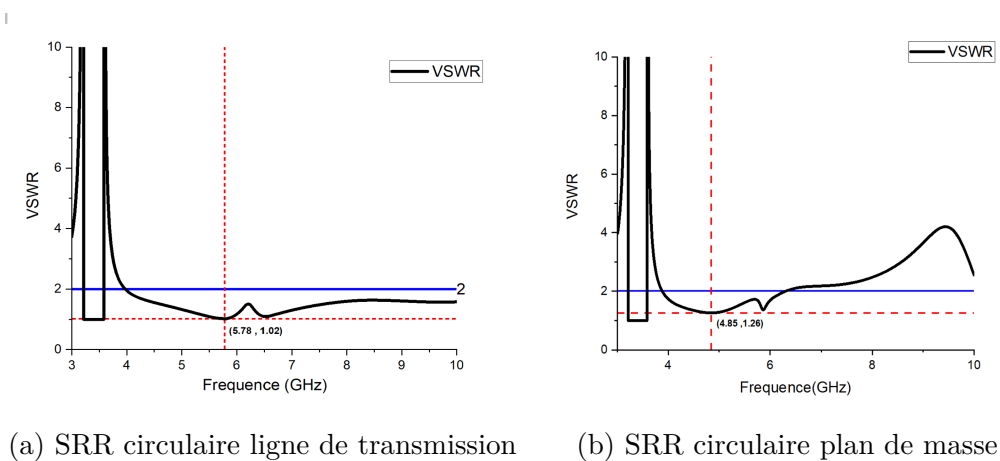


FIGURE 4.11 – Le paramètre VSWR pour SRR circulaire

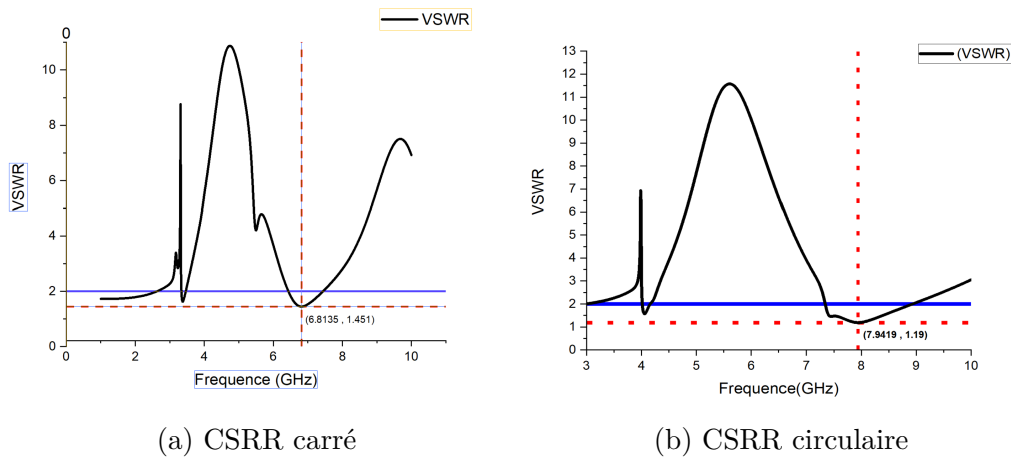


FIGURE 4.12 – Le paramètre VSWR pour CSRR

nous pouvons organiser les résultats dans un tableau résumant les valeurs de VSWR :

<b>courbe</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b>d</b>	<b>e</b>	<b>f</b>
VSWR	1.07	1.45	1.02	1.26	1.451	1.19

TABLE 4.3 – Les résultats VSWR mesurés de chaque structure

### Interprétation des résultats :

Pour les structures de métamatériaux étudiées, les valeurs de VSWR révèlent des niveaux d'adaptation d'impédance variés. La colonne a, représentant la structure SRR carrée avec ligne de transmission, affiche un VSWR de 1.07, indiquant une très bonne adaptation, très proche de la valeur idéale de 1. La colonne c, avec la structure SRR circulaire et ligne de transmission, présente un VSWR encore meilleur de 1.02, signifiant une adaptation excellente, légèrement supérieure à celle de la structure SRR carrée.

En comparaison générale, la colonne b, avec un VSWR de 1.45, montre une adaptation moins performante par rapport aux colonnes a et c. Les colonnes d et e, avec des VSWR de 1.26 et 1.451 respectivement, suggèrent également des adaptations moins efficaces. La colonne f, ayant un VSWR de 1.19, se situe de manière intermédiaire, offrant une adaptation meilleure que celles des colonnes b, d, et e, mais inférieure à celles des colonnes a et c.

### Conclusion

En conclusion, les structures SRR carrée et SRR circulaire avec ligne de transmission démontrent les meilleures performances en termes de VSWR, indiquant une excellente adaptation d'impédance. Les autres structures montrent des résultats moins optimaux avec des valeurs de VSWR plus élevées.

### 4.3.3 Diagramme de rayonnement

Dans cette partie, nous allons examiner les diagrammes de rayonnement de chaque structure de métamatériau en deux dimensions (2D) et trois dimensions (3D) afin de déterminer respectivement la directivité et le gain.

#### 1-Analyse du diagramme 3D

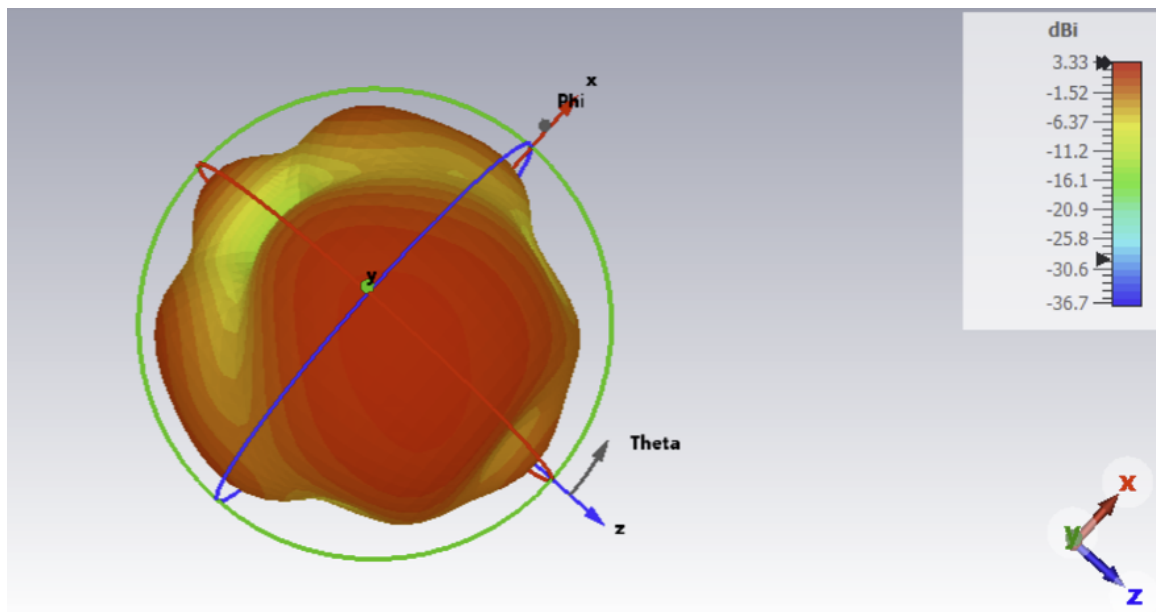


FIGURE 4.13 – Diagramme de rayonnement 3D de SRR carré ligne de transmission

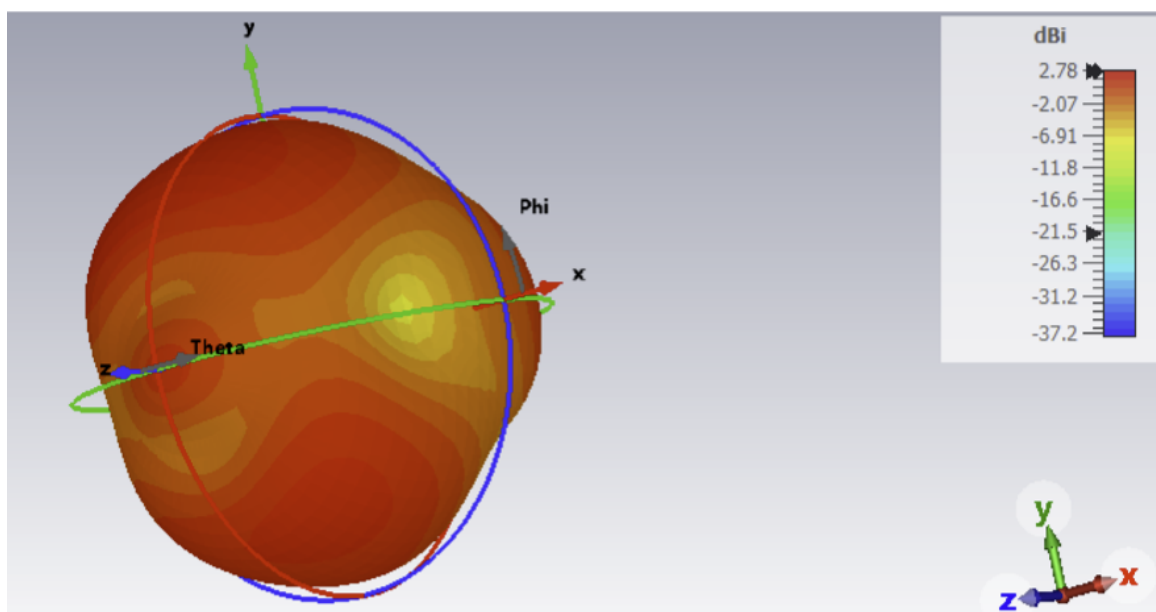


FIGURE 4.14 – Diagramme de rayonnement 3D de SRR carré plan de masse

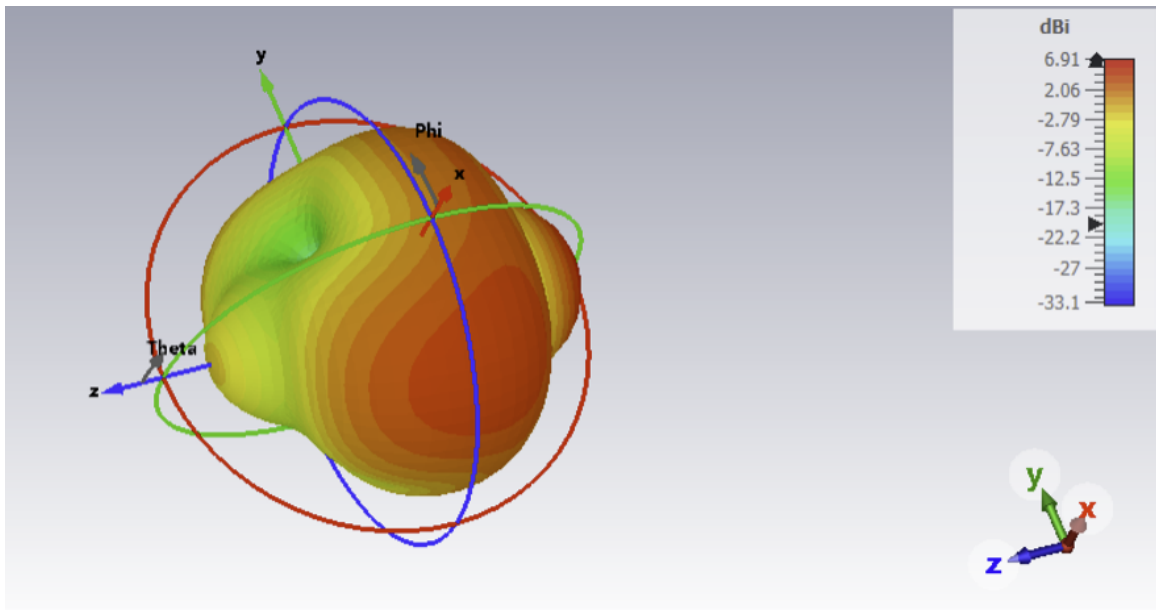


FIGURE 4.15 – Diagramme de rayonnement 3D de SRR circulaire ligne de transmission

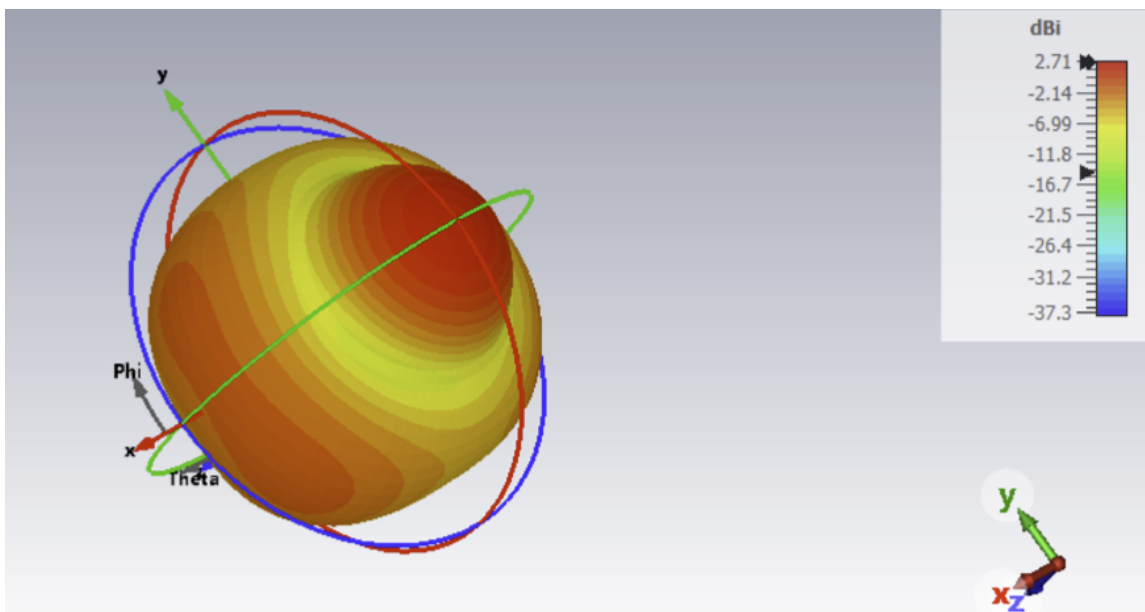


FIGURE 4.16 – Diagramme de rayonnement 3D de SRR circulaire plan de masse

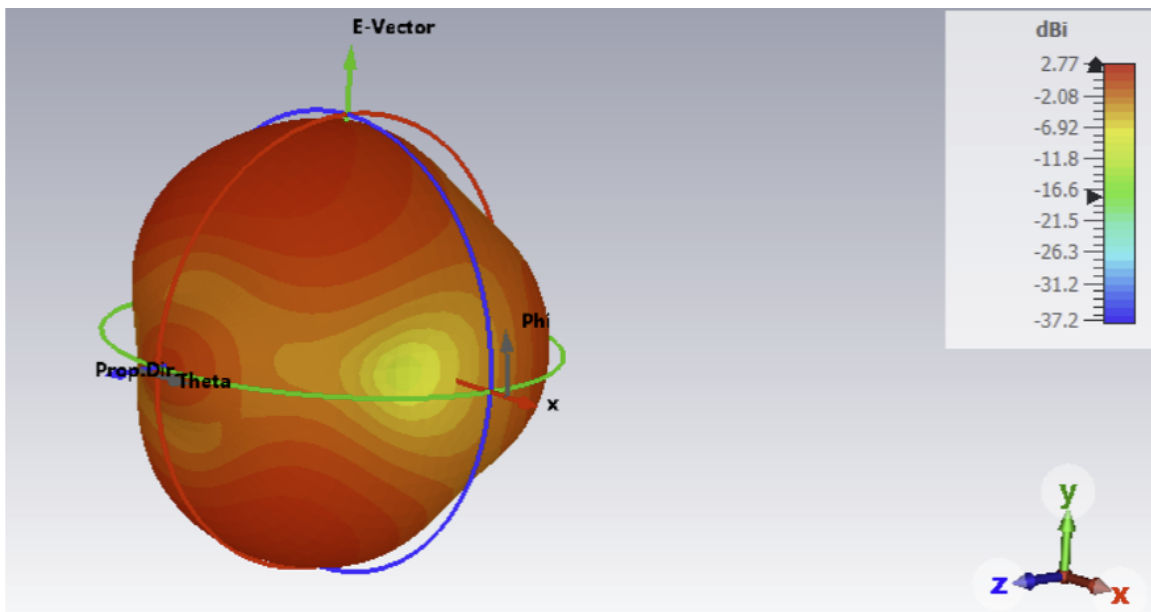


FIGURE 4.17 – Diagramme de rayonnement 3D de CSRR carré

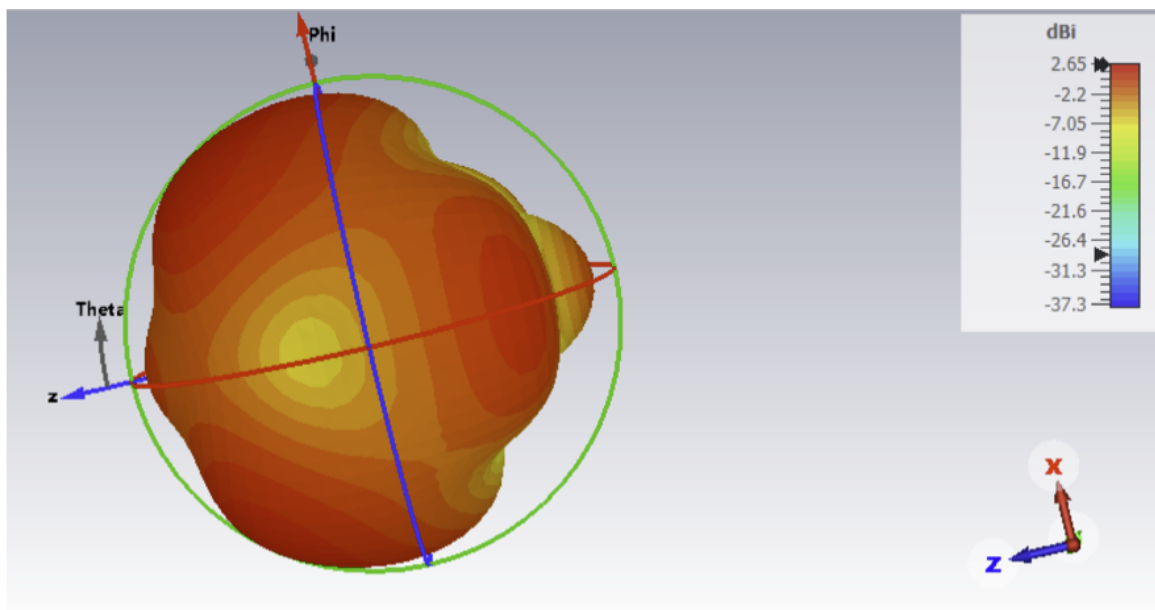


FIGURE 4.18 – Diagramme de rayonnement 3D de CSRR circulaire

Nous pouvons présenter les résultats dans un tableau résumant les valeurs de gain :

D.R	a	b	c	d	e	f
Gain (dBi)	3.33	2.78	6.91	2.71	2.77	2.65

TABLE 4.4 – Les résultats Gain mesurés de chaque structure

### Interprétation des résultats :

Le tableau présente le gain (en dBi) de six structures de métamatériaux, une mesure de la directivité d'une antenne, indiquant sa capacité à concentrer l'énergie dans une direction

particulière. Un gain élevé correspond à une plus grande directivité, tandis qu'un gain faible suggère une répartition plus omnidirectionnelle.

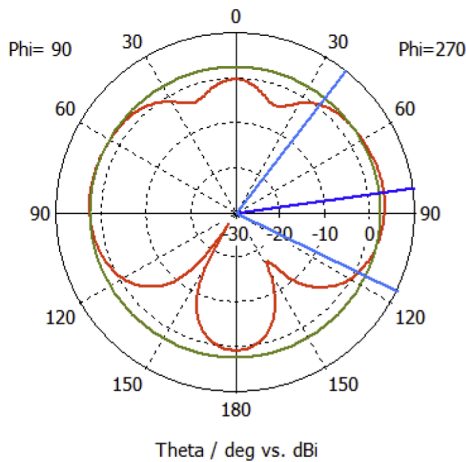
Dans le tableau, la structure SRR circulaire a la ligne de transmission affiche le gain le plus élevé (6,91 dBi), ce qui en fait la structure la plus directive parmi les six. relativement meme structure SRR CARRE LIGNE DE TRANSMISSION a un gain eleve donc cest une antenne directive . Les autre structures présentent des gains similaires, compris entre 2,65 et 2,78 dBi, indiquant une directivité intermédiaire.

## **Conclusion**

Les analyses des diagrammes de rayonnement 3D et des valeurs de gain montrent que les structures SRR circulaire avec ligne de transmission et SRR carrée avec ligne de transmission sont les plus directives. La structure SRR circulaire avec ligne de transmission présente le gain le plus élevé, indiquant une directivité supérieure. La structure SRR carrée avec ligne de transmission suit de près, montrant également une bonne directivité.

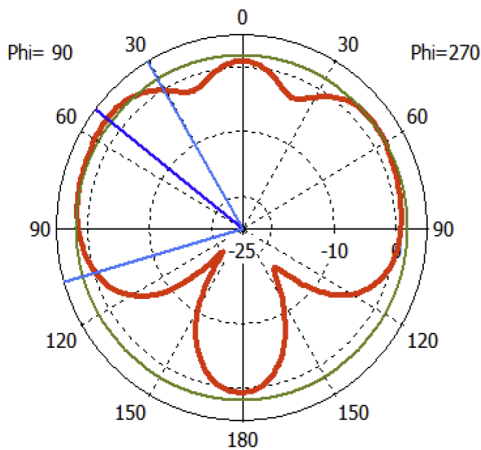


## 2-Analyse du diagramme 2D



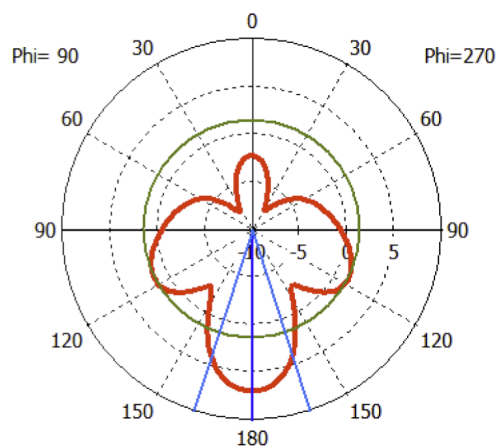
Frequency = 7.5791 GHz  
 Main lobe magnitude = 3.33 dBi  
 Main lobe direction = 82.0 deg.  
 Angular width (3 dB) = 78.0 deg.  
 Side lobe level = -0.8 dB

FIGURE 4.19 – Diagramme de rayonnement 2D de SRR carré ligne de transmission



Frequency = 7.08 GHz  
 Main lobe magnitude = 2.63 dBi  
 Main lobe direction = 52.0 deg.  
 Angular width (3 dB) = 75.9 deg.  
 Side lobe level = -0.8 dB

FIGURE 4.20 – Diagramme de rayonnement 2D de SRR carré plan de masse



Frequency = 5.788 GHz  
 Main lobe magnitude = 6.91 dBi  
 Main lobe direction = 180.0 deg.  
 Angular width (3 dB) = 35.7 deg.  
 Side lobe level = -5.5 dB

FIGURE 4.21 – Diagramme de rayonnement 2D de SRR circulaire ligne de transmission

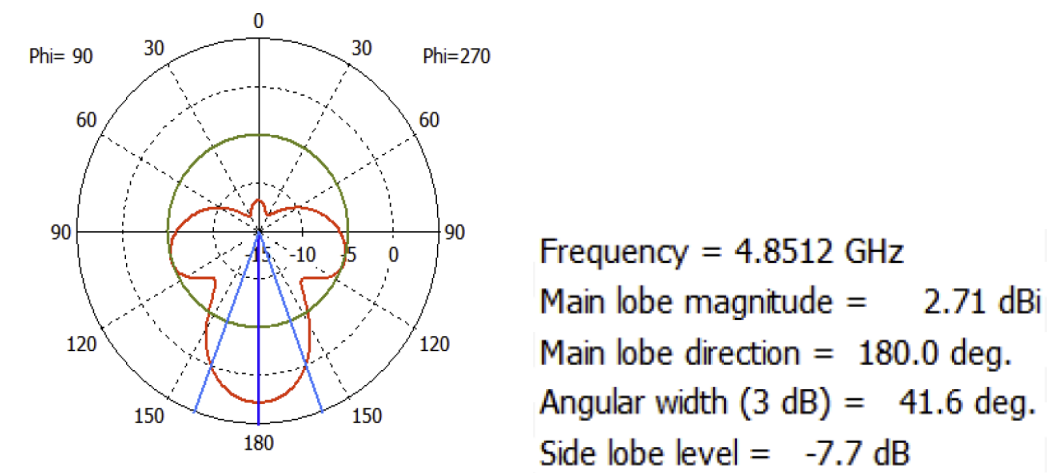


FIGURE 4.22 – Diagramme de rayonnement 2D de SRR circulaire plan de masse

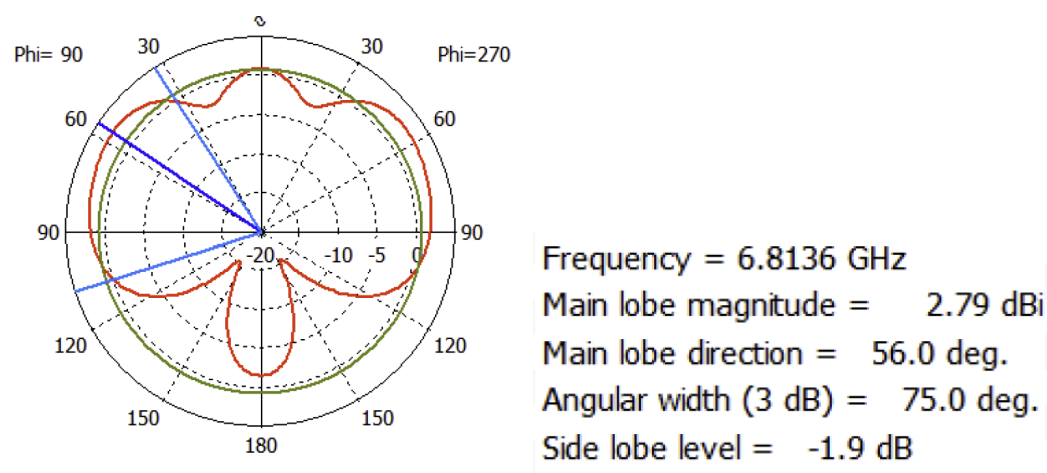


FIGURE 4.23 – Diagramme de rayonnement 2D de CSRR carré

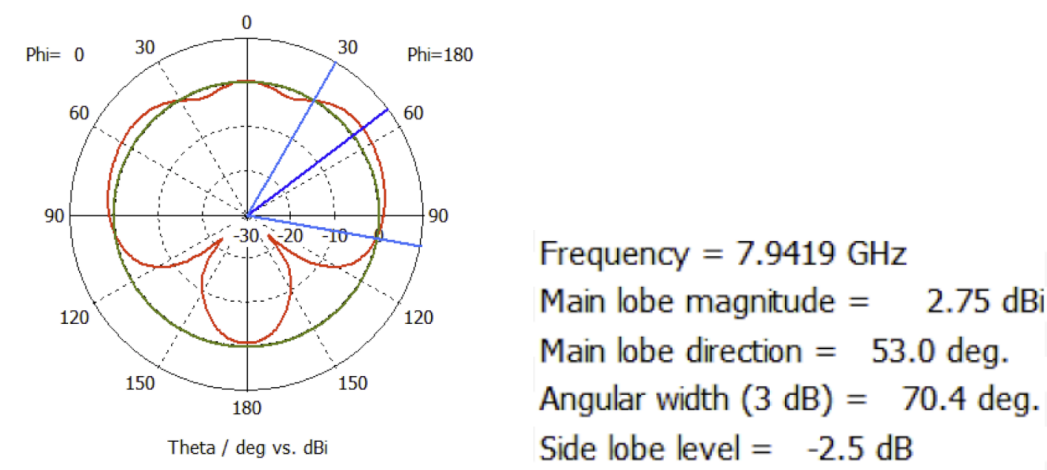


FIGURE 4.24 – Diagramme de rayonnement 2D de CSRR circulaire

Les diagrammes de rayonnement en 2D permettent de visualiser la directivité de chaque structure en deux dimensions, mettant en évidence la direction du lobe principal et l'angle d'ouverture. Voici un résumé des résultats pour chaque structure :

Structure	Direction du lobe principal	Angle d'ouverture
a	$\theta = 82^\circ$	$78^\circ$
b	$\theta = 52^\circ$	$75.9^\circ$
c	$\theta = 180^\circ$	$35.7^\circ$
d	$\theta = 180^\circ$	$41.6^\circ$
e	$\theta = 56^\circ$	$75^\circ$
f	$\theta = 53^\circ$	$70.4^\circ$

TABLE 4.5 – Direction du lobe principal et angle d'ouverture pour chaque structure de métamatériaux.

### Interprétation des résultats :

Pour les structures de métamatériaux étudiées, les angles d'ouverture révèlent des niveaux variés de directivité. La structure SRR CARRE LIGNE DE transmission, avec un angle d'ouverture de  $78^\circ$ , indique une distribution d'énergie large. La structure en plan de masse présente un angle d'ouverture de  $75.9^\circ$ , suggérant une directivité modérée.

La structure SRR CIRCULAIRE LIGNE DE transmission est très directive, ayant un angle d'ouverture étroit de  $35.7^\circ$ . De manière similaire, la structure en plan de masse, avec un angle d'ouverture de  $41.6^\circ$ , reste très directive mais légèrement moins concentrée que la structure c. Les structures CSRR, avec un angle d'ouverture de  $75^\circ$  et un angle de  $70.4^\circ$ , montrent toutes deux une directivité modérée avec une distribution d'énergie plus large.

### Conclusion

En conclusion, les structures SRR CIRCULAIRE LIGNE DE transmission et SRR CIRCULAIRE plan de masse se distinguent par leurs angles d'ouverture étroits, indiquant une haute directivité, tandis que les autres structures (a, b, e, f) ont des angles d'ouverture plus larges, montrant une directivité moindre.

### Interprétation des résultats :

#### 1-Comparaison entre CSRR et SRR :

Après avoir analysé les résultats de VSWR, du gain et de la directivité, il est clair que les SRR (Split Ring Resonators) surpassent les CSRR (Complementary Split Ring Resonators) dans plusieurs aspects importants. Les SRR présentent un VSWR plus faible, indiquant une meilleure adaptation d'impédance et moins de pertes par réflexion comparé aux CSRR. Leur symétrie et leur mécanisme de résonance plus directif permettent aux SRR d'offrir un gain supérieur et une directivité améliorée. En revanche, les CSRR, en raison de leur conception asymétrique et des interactions complexes entre leurs composants, présentent généralement une directivité et un gain moins élevés. Ces caractéristiques asymétriques peuvent engendrer des modes de rayonnement moins contrôlés avec des lobes secondaires indésirables, limitant ainsi leurs performances globales en termes de directivité et de gain.

## 2-Comparaison entre SRR avec ligne de transmission et SRR avec plan de masse

Après analyse des résultats obtenus, il est évident que les SRR utilisant une ligne de transmission surpassent les SRR avec plan de masse dans plusieurs aspects cruciaux. Les SRR avec ligne de transmission confinent efficacement le champ électromagnétique grâce à l'action de guide d'ondes de la ligne, favorisant ainsi un rayonnement plus directif et une meilleure efficacité globale. En revanche, les SRR avec plan de masse rayonnent à partir d'une surface conductrice, ce qui peut induire des courants parasites et altérer la directivité de l'antenne. Malgré leur simplicité de fabrication, les SRR avec plan de masse nécessitent souvent des techniques supplémentaires pour minimiser ces effets parasites et optimiser leur performance. Ainsi, les SRR avec ligne de transmission offrent une flexibilité accrue pour ajuster la directivité et maximiser le gain, ce qui les place en meilleure position par rapport aux SRR avec plan de masse pour des applications nécessitant une haute performance en matière de rayonnement électromagnétique.

## 4.4 Conclusion

Ce chapitre se concentre sur la démonstration de l'amélioration des antennes grâce aux métamatériaux, en comparant différentes structures métamatériaux. L'analyse approfondie des résultats obtenus révèle que les SRR, particulièrement ceux utilisant une ligne de transmission, offrent des avantages significatifs en termes d'adaptation d'impédance, de gain et de directivité par rapport aux CSRR et aux SRR avec plan de masse.

Cette étude souligne l'importance critique de choisir judicieusement la structure de métamatériau en fonction des objectifs spécifiques de l'application, afin de maximiser les performances en rayonnement électromagnétique tout en minimisant les compromis liés à la conception et à la fabrication.

# Conclusions et perspectives

Ce travail de recherche s'est concentré sur l'étude comparative des structures de métamatériaux afin d'améliorer les performances des antennes en termes d'adaptation d'impédance, de gain et de directivité. À travers une analyse approfondie des résultats obtenus pour les structures SRR avec ligne de transmission, SRR avec plan de masse et CSRR, plusieurs conclusions importantes ont été tirées :

- Les métamatériaux artificiels ont démontré une amélioration remarquable des caractéristiques des antennes.
- Pour une meilleure détection, les antennes utilisant des SRR circulaires avec ligne de transmission se sont révélées particulièrement efficaces. Elles ont montré une capacité supérieure à confiner le champ électromagnétique et à concentrer l'énergie dans une direction spécifique, améliorant ainsi la sensibilité de détection dans diverses applications.
- Outre le choix des métamatériaux eux-mêmes, les dimensions et la géométrie des antennes jouent un rôle crucial dans leurs performances. Les dimensions influencent la résonance des structures métamatériaux et impactent directement la directivité, le gain et l'efficacité globale de l'antenne.

En perspective, l'utilisation de chambres spéciales pour la fabrication et la caractérisation des antennes métamatériaux serait hautement bénéfique. Cela pourrait inclure l'utilisation de chambres à vide pour minimiser les perturbations externes, ainsi que des chambres anéchoïques pour caractériser précisément les performances en rayonnement sans aucune réflexion indésirable.

L'exploration de l'utilisation de matériaux diélectriques et conducteurs alternatifs, tels que l'or, présente un potentiel significatif pour une excellente amélioration des antennes métamatériaux. L'or est connu pour ses propriétés uniques en termes de conductivité élevée et de stabilité chimique, ce qui pourrait permettre de réaliser des structures métamatériaux plus efficaces.

L'intégration de l'intelligence artificielle et du machine learning dans la conception et l'optimisation des antennes métamatériaux représente une avancée stratégique pour améliorer leurs performances et leur efficacité, tout en ouvrant de nouvelles possibilités pour des applications avancées dans la détection.

# Bibliographie

- [1] Musa Hussain and Wahaj Abbas Awan. Metamaterials and their application in the performance enhancement of reconfigurable antennas : A review. 2023. ORCID : Musa Hussain, Wahaj Abbas Awan.
- [2] Triprijoetomo and Toto Supriyanto. Perancangan wideband band pass filter (bpf) dengan metamaterial mikrostrip frekuensi 1,78 ghz – 3,38 ghz. 2015.
- [3] Mohammed El amine CHAIB. Modélisation et caractérisation de fonctions électroniques générées par des dispositifs à métamatériaux, Février 2012.
- [4] Sulton Usanova and Sheroz Usanov. Realization of a metamaterial. *Yeoju Technical Institute in Tashkent*, 2023.
- [5] Wojciech Jan Krzysztofik and Thanh Nghia Cao. Metamaterials in application to improve antenna parameters. In Josep Canet-Ferrer, editor, *Metamaterials and Metasurfaces*, chapter 4.
- [6] Miguel Durán-Sindreu, Jordi Naqui, Ferran Paredes, Jordi Bonache, and Ferran Martín. Electrically small resonators for planar metamaterial, microwave circuit and antenna design : A comparative analysis. 2012.
- [7] NACER Abdelghani. Etude et conception de structures à base de métamatériaux pour application aux circuits microondes et antennes, 2018. Soutenue publiquement, le 22/12/2018.
- [8] MAG. INGA. SILVINA BOGGI. Theoretical models and technological applications of conventional materials and metamaterials under electromagnetic fields, 2023.
- [9] Shuang Zhang and Xiang Zhang. Flipping a photonic shock wave. *Physics*, 2 :91, November 2 2009.
- [10] OURTEMACHE Hacane. Métamatériaux, application aux antennes rfid, 2012.
- [11] Mihai Andrei. Invisibility cloak could help protect cities from earthquakes. *Geology, Mathematics, News*, 2014.
- [12] Abdelkader Doulat. *Conception des antennes miniatures à base de métamatériaux pour les applications de la cinquième génération*. PhD thesis, 2020.
- [13] Adjila Fatima and Melati Nadia. *Étude et conception d’une antenne fractale reconfigurable en fréquence*. PhD thesis, 2019.
- [14] Zahir Hamouda. *Anetanne microondes souples ultra large beandes a base des materiaux composites*. PhD thesis, 2016.
- [15] Chergui Safa et Djabri Roumaissa. Conception d’une antenne patch rectangulaire à double bande avec la structure à défaut dans le plan de masse (dgs), 2021.
- [16] Raghida Hajj. Conception et réalisation de fonctions de filtrage dans les domaines millimétriques et sub-millimétriques, 2010. Le mardi 13 juillet 2010.
- [17] Aissaoui Djelloul. Analyse à l’aide de modèles Équivalents d’antennes imprimées alimentées par lignes adaptées. Master’s thesis, Université Abou Bakr Belkaid – Tlemcen, 2007. Thèse de Magister en Électronique, Département d’Électronique.
- [18] Abdelkader Doulat. Conception des antennes miniatures à base de métamatériaux pour les applications de la cinquième génération. Mémoire de Master, Septembre 2020.

- 
- [19] Alexandre Boyer. Antennes : Support de cours et énoncé de travaux dirigés. Support de cours, 5ème année Réseau et Télécom, INSA Toulouse, Année de publication.
- [20] A. Balanis. *Antenna Theory : Analysis and Design*. John Wiley & Sons, 2016.
- [21] Amina MEFTAH et Rabia OUZZIR. Conception des nouvelles topologies des antennes multi fonctionnelles. Master's thesis, 2017.
- [22] <https://www.geeksforgEEKS.org/what-is-photolithography/>.
- [23] V.G Veselago. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of permittivity and permeability. *SOVIET PHYSICS USPEKHI*, 1968.
- [24] Abdulbaset Ali, Bing Hu, and Omar M. Ramahi. Intelligent detection of cracks in metallic surfaces using a waveguide sensor loaded with metamaterial elements. 2020.
- [25] R. A. Shelby, D. R. Smith, and S. Schultz. Experimental verification of a negative index of refraction. *Science*, 292(5514) :77–79, 2001.
- [26] FEROUANI Imane and BOUFATAH Mohamed Walid. Conception d'une antenne planaire à base de métamatériaux pour des applications wimax. 2020.
- [27] Marc Zufferey and et al. Metamaterials : From design to applications. *Advanced Materials*, 24(24) :2400–2447, 2012.
- [28] OM Khan, ZU Islam, QU Islam, and FA Bhatti. Multiband high gain printed yagi array using square spiral ring metamaterial structures for s-band applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 13 :1100–1103, 2014.
- [29] Martin Ferran Marques, Ricardo and Mario Sorolla. *Metamaterials with Negative Parameters : Theory, Design, and Microwave Applications*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2008.
- [30] C. Caloz and T. Itoh. Metamaterials for high-frequency electronics. *IEEE Proceedings*, 93(10) :1745–1752, October 2005.
- [31] R.W. Ziolkowski and N. Engheta, editors. *Metamaterials : Physics and Engineering Explorations*. IEEE Press, A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2006.
- [32] W.P. Rotman. Plasma simulation by artificial dielectrics and parallel-plate media. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 10(1) :82–95, 1962.
- [33] Caloz Christophe and Tatsuo Itoh. *Electromagnetic Metamaterials : Transmission Line Theory and Microwave Applications*. John Wiley & Sons, 14-22, 2006.
- [34] R.A. Shelby, D.R. Smith, S.C. Nemat-Nasser, and S. M. Schultz. Microwave transmission through a two-dimensional, isotropic, left-handed metamaterial. *Applied Physics Letters*, 2001.
- [35] R. A. Shelby, D. R. Smith, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz. Microwave transmission through a two-dimensional, isotropic, left-handed metamaterial. *Applied Physics Letters*, 78 :489–491, 2001.
- [36] J. D. Baena and et al. Equivalent-circuit models for split-ring resonators and complementary split-ring resonators coupled to planar transmission lines. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 53(4) :1451–1461, 2005.
- [37] T. M. Grzegorzczak, C. D. Moss, J. Lu, X. Chen, J. Pacheco, and J. A. Kong. Properties of left-handed metamaterials : Transmission, backward phase, negative refraction, and focusing. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 53(9) :2956–2967, Sep. 2005.
- [38] Christophe Caloz and Tatsuo Itoh. *Electromagnetic Metamaterials : Transmission Line Theory and Microwave Application*. Wiley-Interscience, 2006.
- [39] Abdelmalek Aloui. Extraction des paramètres de permittivité et perméabilité des métamatériaux. Thème de recherche, 2013.
- [40] J. Pendry. Negative refraction makes a perfect lens. *Physical Review Letters*, 85(18) :3966–3969, Oct. 2000.

- [41] DOE/Lawrence Berkeley National Laboratory. Berkeley researchers create first hyperlens for sound waves. *Nature Materials*.
- [42] A. S. Shalin and et al. Optical cloaking with enz-metamaterials. In *2015 9th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics (METAMATERIALS)*, pages 487–489, Oxford, 2015.
- [43] D. Schurig, J. J. Mock, B. J. Justice, and et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies. *Science*, 314 :977–980, 2006.
- [44] Shah Nawaz Burokur. Structures périodiques et métamatériaux. antennes et dispositifs électromagnétiques., 2012.
- [45] M. Latrach, H. Rmili, C. Sabatier, E. Seguenot, and S. Toutain. Design of a new type of meta-material radome for low frequencies. *Microwave and Optical Technology Letters*, 52(5) :1119–1123, 2010.
- [46] Abdulbaset Ali, Bing Hu, and Omar M. Ramahi. Intelligent detection of cracks in metallic surfaces using a waveguide sensor loaded with metamaterial elements. 2020.
- [47] Abdelaouhab Kamel Eddine. Étude et conception d’une antenne micro-ruban rectangulaire adaptée par ligne quart d’onde, 2015.
- [48] Gherbi Djihene. Étude et conception d’une antenne reconfigurable en utilisant des composants actifs.
- [49] Haouzi Amel et Kriche Kawther. Conception d’antennes imprimées miniatures, 2020.
- [50] Université Badji Mokhtar Annaba. Chapitre 3 : Rayonnement des antennes. Cours.
- [51] Odile Picon and coll. *Les antennes Théorie, conception et applications*. DUNOD, Paris, 2009.
- [52] Ahmed Belguessoum. *Conception et réalisation d’une antenne multibandes alimentée par un guide d’onde coplanaire (CPW)*. M.a.sc. (génie électrique), École de technologie de l’information et du génie, Année. Études postdoctorales.
- [53] L. Yang, A. Rida, R. Vyas, and M. M. Tentzeris. Rfid tag and rf structures on a paper substrate using inkjet-printing technology. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 55(12) :2894–2901, 2007.
- [54] Bachir Becita. Antenne microruban de forme rectangulaire à substrats cristaux photoniques. Master’s thesis, Université de M’sila, Juin 2014.
- [55] Maroua Chouhbane. *Étude et conception d’une antenne reconfigurable en fréquence et en diagramme de rayonnement*. PhD thesis, 2021.
- [56] Abdelkader Dadda. Antenne microruban de forme circulaire à substrats cristaux photoniques. Master’s thesis, Université de M’sila, Juin 2014.
- [57] B. Kadri. Synthèse d’antennes microrubans en réseaux non périodiques par modélisation des circuits d’alimentation. Master’s thesis, Université Abou-Bekr Belkaid, Juin 1998. Thèse de Magister en Électronique.
- [58] Douiou Zoulikha and Roukaila Hadjira. conception d’une antenne microruban a fss, 2021.
- [59] Mohammed MESSAOUDENE. *MODÉLISATION PAR MODÈLE EQUIVALENT AMÉLIORÉ DES ANTENNES PÉRIODIQUES ET LOGPÉRIODIQUES À BASE D’ÉLÉMENTS RAYONNANTS A ENCOCHE : APPLICATIONS AUX TELECOMMUNICATIONS SANS FIL*. PhD thesis.
- [60] BELKADI BACHIR. *ÉTUDE ET CONCEPTION DE FILTRES HYPERFREQUENCES À BASE DE NOUVEAUX MATÉRIAUX*. PhD thesis, 2019.
- [61] Nur Azura Mohd SaidNur. *ELECTROCHEMICAL BIOSENSOR BASED ON MICRO-FABRICATED ELECTRODE ARRAYS FOR LIFE SCIENCES APPLICATIONS*. PhD thesis, April 2014.
- [62] Chris A. Mack. *Field Guide to Optical Lithography*. 24 January 2006.