



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de génie électrique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies  
Télécommunications  
Réseaux et Télécommunications

Réf. : Entrez la référence du document

---

Présenté et soutenu par :  
**ZANOUDA Karima**

Le : dimanche 24 juin 2018

## *Conception d'antenne Micro-ruban à l'aider d'un Conducteur Magnétique Artificiel*

---

### Jury :

Mr	ABDESSELAM Salim	MAA	Université de Biskra	Président
Mme	HAMAIZIA Zahra	MCA	Université de Biskra	Encadreur
Mr	BOUKREDINE Salah Eddine	MAA	Université de Biskra	Examineur

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : Télécommunications  
Option : Réseaux et Télécommunications

Mémoire de Fin d'Etudes  
En vue de l'obtention du diplôme:

**MASTER**

*Thème*

*Conception d'antenne Micro-ruban à l'aider d'un  
Conducteur Magnétique Artificiel  
(AMC)*

**Présenté par :**

*ZANOUDA Karima*

**Avis favorable de l'encadreur :**

*Dr HAMAIZIA Zahra*

**Avis favorable du Président du Jury**

**Mr ABDESSELAM Salim**

**Cachet et signature**



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : Télécommunications  
Option : Réseaux et Télécommunications

***Thème :***  
***Conception d'antenne Micro-ruban à l'aider d'un  
Conducteur Magnétique Artificiel  
(AMC)***

**Proposé par : ZANOUDA Karima**

**Dirigé par : Dr HAMAIZIA Zahra**

**Résumé**

Les surfaces à haute impédance (SHI) ou conducteurs magnétiques artificiels (AMC) sont une classe de méta matériaux avec des propriétés électromagnétiques uniques. Elles suppriment la propagation des ondes de surface et elles sont utilisées comme plan réflecteur en phase. La surface à haute impédance fonctionne comme le plan de masse d'antenne patch idéal pour les applications sans fil car il améliore simultanément le gain de l'antenne, l'avantage de la structure AMC est qu'il offre une propriété intéressante pour la réalisation d'antenne compacte et double l'efficacité de l'antenne.

Le but de ce travail est de concevoir une antenne micro bande en utilisant une surface AMC comme réflecteur sous l'antenne proposée, afin d'améliorer les performances de l'antenne patch. Les conceptions d'antenne sur des surfaces AMC sont simulées à l'aide d'un logiciel électromagnétique CSTMSW.

Notre objectif est d'améliorer les caractéristiques de rayonnement et la bande passante de l'antenne compacte proposée fonctionnant en bande C en utilisant un réflecteur magnétique AMC.

Dans ce travail, une antenne patch hexagonale alimentée par ligne micro ruban est proposée, elle est conçue et simulée par le logiciel CST MWS en utilisant la surface AMC comme réflecteur d'antenne. Le couple antenne-AMC proposé présente une amélioration au niveau du gain et de la bande passante par rapport à l'antenne seule. La structure complète (antenne+AMC) a donné un gain égale à 6.36 dB à la fréquence 7.6 GHz, une bande passante de 55.3% , tandis que le gain de l'antenne sans l'AMC est de 0.711 dB sa bande passante égale à 42.8% .

**Mot -clés : antenne micro ruban-patch-conducteur magnétique artificiel -met matériel-logiciel CST MWS.**

## **Remerciements**

---

---

*Tout d'abord, je remercie **DIEU** le tout puissant et miséricordieux de nous avoir donné la chance, le courage, la volonté, la force et la patience pour mener ce travail.*

*En second lieu, je tiens à remercier mon encadreur : **Dr. HAMAIZIA Zahra** pour ses précieux conseils et son aide durant toute la période du travail.*

*Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury, le président: **Mr.ABDESSELAM Salim** et l'examineur: **Mr BOUKREDINE Salah Eddine** pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs propositions.*

*Comme je tiens à remercier toutes les travailleurs du département du génie électrique, de l'université de **Biskra**.*

*Je tiens également à remercier toute personne ayant participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail , sans oublier **S.ABBACI, BADREDDINE LABIADE M.AMMAAR , S.ABDELHAMID, F.HASSANI** et madame **M.GHUFRAN**. Ainsi à tous les collègues de ma promotion.*

**Karima**

Dédicace

---

---

---

## *Dédicace*

---

---

*Je dédie ce modeste travail*

*A mes très chers parents mon père et ma mère.*

*Pour leur patience, leur amour, leur soutien et leurs*

*encouragements.*

*A mes frère, mes sœurs*

*A mes chères amis*

*Sans oublier tous les professeurs que ce soit du primaire, du moyen, du secondaire et de  
l'enseignement supérieur.*

*A tous les étudiants de deuxième année de master de spécialité Réseaux et  
Télécommunication promotion 2018.*

*Karima*

---

# ABSTRACT

---

## Abstract

---

---

### ABSTRACT

High impedance surfaces (SHI) are a class of meta materials with unique electromagnetic properties. In addition, it suppresses the propagation of surface waves and used as a reflective plane in phase.

It functions as the ideal antenna ground plane for wireless applications as it simultaneously enhances antenna gain as it removes associated surface waves (thereby reducing unwanted back lobe and responsive circuitry coupling relatives).in this work, a hexagonal patch antenna powered by micro-ribbon line has been proposed by CST MWS.and uses the AMC surface as antenna reflector.

The purpose of this work for comparison between the proposed antenna alone and the proposed antenna with the AMC surface, was carried out. As a result, it was proposed by CST MWS software, the gain has been improved over the entire antenna band 0.71 dB without the AMC surface at 5.84 dB with the AMC surface, and show an excellent improvement of the band, without the AMC surface at 42.8% with the AMC surface, ie an increase of 55.30%.

### ملخص

تعتبر أسطح المقاومة العالية SHI صنف من المواد الخارقة ذات خصائص كهرومغناطيسية فريدة من نوعها و بالإضافة إلي ذلك فإنها تمنع انتشار الموجات السطحية ,حيث تمثل سطح عاكس في الطور , وهو يعمل كهوائي مثالي من مستوى ارضي للتطبيقات اللاسلكية حيث تعمل في الوقت نفسه علي تحسين كسب الهوائي في الوقت الذي تمنع الموجات السطحية المقترنة بها مما يؤدي الي التقليل من الفص الخلفي الغير مرغوب به و بالتالي يحسن من الأداء .

في هذا العمل ،تم اقتراح هوائي سداسي الرقعة مدعوم بخط شريط صغير .و قد تم تصميمه بواسطة برنامج CST MSW.و استخدم سطح AMC كسطح عاكس للهوائي . عن طريق المقارنة بين الهوائي المقترح وحده و الهوائي مع سطح AMC حيث أظهرت النتائج تحسين في الكسب لهوائي مع السطح العاكس عند 0.71 dB وبدون السطح العاكس عند 5.84dB و إظهار تحسن ممتاز في النطاق للهوائي بدون السطح العاكس بالنسبة 42.8% و مع السطح العاكس بالنسبة 55.3% أي بزيادة قدرها 12.5%.

*Table de matière*

---

---

**Remerciement**  
**Dédicace**  
**Abstract**  
**Table de matière**  
**Liste des figures**  
**Liste des abréviation**  
**Liste des tableaux**  
**Introduction générale**

*Chapitre 1 :Généralité sur les antennes micro ruban*

---

1.1 Introduction	04
1.2 Lignes de transmission	04
1.2.1 La ligne coaxiale	04
1.2.2 La ligne bifilaire	05
1.2.3 La ligne micro-ruban	05
1.2.4 La ligne coplanaire	05
1.3 Description des antenne patch	06
1.4 Les avantages et les inconvénients	07
1.5 Les caractéristiques d'antenne micro ruban	08
1.5.1 Diagramme de rayonnement	08
1.5.2 Bande passante	08
1.5.3 Directivité	09
1.5.4 Gain	10
1.5.5 L'impédance d'entres	10
1.5.6 Coefficient de réflexion $S_{11}$	11
1.5.7 Rendement	11
1.6 Différentes techniques d'alimentation	11
1.6.1 Alimentation directe par une ligne micro ruban	12
1.6.2 Alimentation par câble coaxial (sonde)	13
1.6.3 Alimentation couplée par ouverture	13
1.6.4 Alimentation couplée par proximité	14
1.7 Les applications d'antenne micro-ruban	15
1.8 Conclusion	15

---

*Chapitre 2 : Conducteur magnétiques artificiels (AMC)*

---

2.1 Introduction	16
2.2 Conducteur électrique et magnétique parfait	17
2.2.1 Conducteur électrique parfait	17
2.2.2 Conducteur magnétique parfait	19
2.3 Meta matériaux	21



## Table de matières

---

2.4 Classification des matériaux	22
2.5 Bande Interdite Electromagnétique (BIE)	24
2.6 Conducteur Magnétique Artificiel (CMA)	25
2.6.1 Généralité	25
2.6.2 Définition d'AMC	25
2.6.3 Performance d'AMC	27
2.6.4 Paramètre d'AMC	28
2.7 La structure périodique en forme de champignon	30
2.8 Comparaison (PEC/PMC/HIS)	32
2.9 Application	33
2.10 Conclusion	33

---

### *Chapitre 3 :Les résultats de simulation*

---

3.1 Introduction	35
3.2 CST MICRO WAVE STUDIO (MWS)	35
3.3 Conception et Simulation	36
3.3.1 Conception et Simulation d'antenne	36
3.3.2 Conception et simulation de cellule d'AMC	40
3.3.3 Conception et simulation d'antenne avec AMC	42
3.4 Influence du nombre de cellule élémentaire d'AMC $N \times N$	49
3.5 L'influence de l'épaisseur du substrat de l'antenne patch	50
3.6 Interprétation et récapitulation des résultats	51
3.7 Conclusion	52

---

### *Conclusion générale*

---

<b>Conclusion</b>	53
<b>Bibliographie</b>	56
<b>Annexe</b>	

---



---

## *Liste des figures*

---



---

### *Chapitre 1 : Généralités Sur Les Antennes Micro Ruban*

<b>Figure 1.1</b>	La ligne coaxiale	05
<b>Figure 1.2</b>	La ligne bifilaire	05
<b>Figure 1.3</b>	La ligne micro-ruban	05
<b>Figure 1.4</b>	Présentation d'antenne micro ruban	06
<b>Figure 1.5</b>	Structure rectangulaire d'antenne patch	06
<b>Figure 1.6</b>	Différentes formes d'antennes imprimées	07
<b>Figure 1.7</b>	Diagramme de rayonnement cartésien et polaire	08
<b>Figure 1.8</b>	Antenne patch alimentée par une ligne micro ruban	12
<b>Figure 1.9</b>	Ligne micro ruban avec transformateur quart d'onde	12
<b>Figure 1.10</b>	Antenne micro ruban alimenté par sonde	13
<b>Figure 1.11</b>	Méthode d'alimentation par couplage d'ouverture	14
<b>Figure 1.12</b>	Alimentation couplée par proximité	14

### *Chapitre 2 : Conducteur Magnétiques Artificiels (AMC)*

<b>Figure 2.1</b>	Plan de masse PEC (a) hauteur $h \ll \lambda/4$ (b) $h = \frac{\lambda}{4}$	19
<b>Figure 2.2</b>	Onde de surface	19
<b>Figure 2.3</b>	Plan de masse PMC	21
<b>Figure 2.4</b>	Classification des matériaux	22
<b>Figure 2.5</b>	Une réflexion négative	23
<b>Figure 2.6</b>	Géométrie d'une cellule AMC	26
<b>Figure 2.7</b>	La phase du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence d'une cellule	27
<b>Figure 2.8</b>	Circuit équivalent LC	28
<b>Figure 2.9</b>	Un exemple de la courbe d'impédance de surface pour une structure HIS en champignon	29
<b>Figure 2.10</b>	Modèle pour le calcul de la phase de réflexion	30
<b>Figure 2.11</b>	Deux exemples de CMA	31
<b>Figure 2.12</b>	La courbe de phase pour une structure HIS en champignon	31
<b>Figure 2.13</b>	Géométrie d'une structure hexagonale en forme de champignon	32

<b>Figure 2.14</b>	FDTD simulé résultats de perte de retour d'une antenne dipôle sur le PEC, PMC et Avions au sol EBG	33
--------------------	--	----

### *Chapitre 3 :Résultat et Simulation*

<b>Figure 3.1</b>	Interface graphique de micro-ondes Studio	36
<b>Figure 3.2</b>	Structure de l'antenne patch proposée	36
<b>Figure 3.3</b>	Coefficient de réflexion $S_{11}$ de l'antenne patch	38
<b>Figure 3.4</b>	Diagramme de rayonnement polaire à $f = 7.5$ GHz, (a) $\phi = 90^\circ$ . (b) $\phi = 0^\circ$	39
<b>Figure 3.5</b>	Diagramme de rayonnement en 3D a la $f=7.5$ GHz	39
<b>Figure 3.6</b>	Le Gain d'antenne patch sans AMC	40
<b>Figure 3.7</b>	La cellule élémentaire AMC proposée	41
<b>Figure 3.8</b>	La phase du coefficient de réflexion de la cellule AMC	41
<b>Figure 3.9</b>	Surface AMC composée de 7x7 cellules unitaires	42
<b>Figure 3.10</b>	Antenne patch avec AMC	43
<b>Figure 3.11</b>	Coefficient de réflexion simulé de l'antenne proposée avec surface AMC pour différentes valeurs de la hauteur de la couche d'air	44
<b>Figure 3.12</b>	Coefficient de réflexion simulé de l'antenne proposée avec et sans surface AMC	45
<b>Figure 3.13</b>	Le gain simulé de l'antenne proposée sur l'AMC pour différentes valeurs $h_z$ entre l'antenne et la cellule de l'unité AMC	45
<b>Figure 3.14</b>	Gain simulé de l'antenne proposée avec et sans surface AMC	46
<b>Figure 3.15</b>	Diagramme de rayonnement d'antenne avec AMC a la $f=7.5$ GHz (a) $\phi = 0^\circ$ , (b) $\phi = 90^\circ$	47
<b>Figure 3.16</b>	Diagramme de rayonnement en 3D à $f=7.5$ GHz	48
<b>Figure 3.17</b>	Le rendement simule de l'antenne avec et sans surface AMC	48
<b>Figure 3.18</b>	Comparaison du coefficient de réflexion et le gain de la structure complète simulé pour différentes surfaces formées de NxN cellules AMC (3x3, 7x7, 9x9)	49
<b>Figure 3.19</b>	Le coefficient de réflexion pour différentes valeurs de l'épaisseur du substrat de l'antenne	51
<b>Figure 3.20</b>	Le gain pour différentes valeurs de l'épaisseur du substrat de l'antenne	51

*Liste des abréviations*

---

---

**ROS** : Rapport d'Onde Stationnaire

**TOS** : Taux Onde Stationnaire

**RFID** : Identification par Radio Fréquence

**BIE** : Bande Interdite Electromagnétique

**CMA** : Conducteur Magnétique Artificiel

**PEC** : Conducteur Electrique Parfait

**PMC** : Conducteur Magnétique Parfait

**SHI** : Surface a Haute Impédance

**MTM**: Méta Matériaux

**DPS**: Double Positif

**ENG**: Epsilon Négatif

**IR**: l'nfra-Rouge

**MNG** : Mu Négative

**DNG**: Double Négative

**LH**: Left Handed

**BWM**: «Backward Wave Media»

**HF**: Haute Fréquence

**CST**: Computer Simulation Technologie

**TE** : Transverse Electrique

## Liste des abréviations

---

**TM** : Transverse Magnétique

**MWS** : « Microwave studio » - Studio micro-ondes

**CEM** : Compatibilité électromagnétique

**NRI** : Indice de réfraction négatif

**ULB** : Ultra large Bande

**CPW** : Coplanar Waveguide.

**WiFi** : « Wireless Fidelity »

**WLAN** : « Wireless Local Area Network » - les réseaux "locaux" sans fil

**GSM** : « Global System for Mobile communication »

**GPS** : *Global Positioning System*.

**EBG** : Electromagnetic Band Gap.

**AMC** : Artificial Magnetic Conductor.

*Liste des Tableaux*

---

---

<b>Tableau 3.1</b>	Les dimensions de l'antenne proposée	37
<b>Tableau 3.2</b>	Dimensions de la cellule unité AMC	40
<b>Tableau 3.3</b>	variation de la bande passante en fonction de la hauteur hz	44
<b>Tableau 3.4</b>	Valeurs du gain de l'antenne avec et sans AMC, pour différentes fréquences	46
<b>Tableau 3.5</b>	Les valeurs du rendement de l'antenne avec et sans AMC, pour différentes fréquences	49
<b>Tableau 3.6</b>	les valeur du gain de cellule AMC(7x7, 3x3, 9x9)	50
<b>Tableau 3.7</b>	Paramètres caractéristiques de la structure complète (Antenne+AMC) pour différentes épaisseurs du substrat de l'antenne	50

---

# **Introduction générale**

---

## *Introduction générale*

---

---

Les télécommunications se sont banalisées au cours de ces dernières années. Poussés par l'engouement du public, les systèmes de réception sont devenus portables et les antennes se sont miniaturisées, l'utilisation d'antennes imprimées est devenue usuelle dans les systèmes de radiocommunications [1].

La transmission de données à haut débit, liée à la demande toujours croissante des dispositifs mobiles, a généré un grand intérêt pour les antennes microbandes et qui sont les antennes les plus utilisées dans les conceptions commerciales compactes. Les avantages principaux de ces antennes sont le faible poids ; faible volume et épaisseur, le faible coût, la simplicité de fabrication .Cependant, ce type d'éléments présente des limites, notamment la bande passante étroite, le faible gain et la possibilité de résonner avec une seule fréquence [1].

Une antenne à éléments rayonnants , communément appelée « antenne patch», est une ligne micro ruban de forme particulière. Elle est importante par rapport aux appareils des communications (l'émetteur et récepteur), et en d'autres termes est le concepteur pour transporter et émettre les ondes l'électromagnétiques. Elle est également utilisée dans les systèmes tels quel es radiocommunications, les réseaux de communications, les satellites et les systèmes de la détection et les d'aviation civile et les radars .

Le développement rapide des systèmes des télécommunications a permis de créer et innover plusieurs technologies. D'une part, il y a une tendance vers la miniaturisation des composants liés aux dispositifs mobiles.

D'autre part, il y a une demande croissante concernant le transfert rapide des données qui exige alternativement des composants large-bande et/ou multi-bande. Ces deux contraintes contradictoires doivent être surmontées avec des solutions peu coûteuses et fournissant un rendement élevé.

Une des solutions proposées pour répondre à ces besoins est bien l'exploitation de la nouvelle classe des matériaux connue sous le nom de "méta matériaux". Les méta-matériaux sont des matériaux composites artificiels, dont la structure interne est souvent périodique .

Ils sont donc assimilables à des matériaux homogènes et peuvent être décrits par des paramètres dits « effectifs », comme la permittivité électrique et la perméabilité magnétique.



Ce dernier réduit spectaculairement l'interférence et améliore, en effet, le fonctionnement des dispositifs micro-ondes.

Les méta-matériaux constituent une thématique de recherche prometteuse dans différents domaines, dont en particulier l'électromagnétisme, que ce soit pour des applications circuits (filtres, déphaseurs, etc.) ou pour des applications de rayonnement (antenne, diffraction). Ils sont des milieux constitués de structures artificielles composées d'un empilement de deux ou plusieurs réseaux d'inclusion métalliques périodiques. Le pas de périodicité des réseaux est très petit devant la longueur d'onde, ce qui permet de considérer le milieu homogène. La structure possède deux résonances, l'une électrique et l'autre magnétique. A la résonance électrique le matériau possède une permittivité relative effective de partie réelle négative ( $\epsilon_{\text{eff}}$ ). De même à la résonance magnétique le matériau possède une perméabilité effective relative de partie réelle négative ( $\mu_{\text{eff}}$ ). La combinaison de ces deux résonances simultanées donne un matériau à indice de réfraction négative ( $n$ ) sur une bande de fréquence relativement étroite. L'intérêt de ces nouveaux matériaux est très grand pour l'électromagnétisme et les applications possibles sont nombreuses.[2]

Parmi les méta-matériaux utilisés on trouve les surfaces à hautes impédances (SHI), ces matériaux portent aussi le nom de conducteur magnétique artificiel (AMC). Le conducteur magnétique artificiel (AMC) a évolué comme une alternative à profil bas au réflecteur métallique conventionnel réduisant considérablement la taille des antennes. Il a également la capacité d'augmenter le rapport avant-arrière et le gain lorsqu'il est utilisé comme réflecteur arrière pour les antennes [3-4]. La limitation principale de l'AMC classique est la bande passante étroite et la dimension de cellule unitaire plus élevée, ce qui limite son utilisation aux applications de station de base à large bande. Ces dernières années, plusieurs techniques ont été proposées pour améliorer la bande passante des structures AMC comme les anneaux carrés minces [4], et le chargement de matériaux magnétiques

Les structures électromagnétiques sont des objets périodiques artificiels qui empêchent ou aident la propagation d'ondes électromagnétiques dans une bande de fréquence pour tous les angles d'incidence et tous les états de polarisation. Les conducteurs magnétiques artificiels (AMC), où surfaces à haute impédance, ont reçu une attention considérable ces dernières années. Une surface AMC est un type de bande interdite électromagnétique (EBG) avec une surface de conducteur magnétique pour une bande de fréquence spécifiée. Les structures

AMC sont typiquement réalisées sur la base de substrats diélectriques périodiques et de divers motifs de métallisation, et plusieurs types de plans de masse AMC ont déjà été étudiés

Dans ce travail, une surface AMC est utilisée comme réflecteur sous l'antenne proposée, afin d'améliorer les performances de l'antenne patch . Les conceptions d'antenne sur des surfaces AMC sont simulées à l'aide d'un logiciel électromagnétiques CSTMSW.

Notre objectif est d'améliorer le gain et la bande passante de l'antenne compacte proposée fonctionnant en bande C en utilisant une surface AMC.

Ce mémoire commence par le premier chapitre, qui se propose de présenter les caractéristiques des antennes patches, la description des antennes patches, les techniques d'alimentation, ainsi leurs avantages et leurs inconvénients, et leurs applications.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons des généralités sur le Conducteur magnétique parfait (PMC), le conducteur électrique parfait (PEC), un aperçu général sur les matériaux à bande interdite électromagnétique (BIE ou EBG : (électromagnétique Band Gap)) et étudier le conducteur magnétique artificiel (AMC) , ses performances et son utilisation.

L'objectif du troisième chapitre est de présenter la structure de l'antenne proposée , les résultats et la discussion de notre travail. Dans ce chapitre, un conducteur magnétique artificiel (AMC) est utilisé pour améliorer le gain de l'antenne patch microruban. La conception de notre antenne est réalisée à l'aide d'un logiciel de simulation TCAD (CSTMWS) basée sur la technique d'intégration finie (FIT). Notre mémoire est finalisé par une conclusion générales.

---

# Chapitre 1

---

---

---

## Chapitre 1

---

---

---

---

### *Généralités Sur Les Antennes Micro Ruban*

---

---

#### 1.1 Introduction

Les communications hertziennes, les télécommunications spatiales et les radars utilisent le plus souvent des antennes à réflecteurs. Ce sont des dispositifs performants qui possèdent un bon rendement, une grande pureté de polarisation et une large bande de fréquences.

Dans le cas des applications mobiles, leur poids et leur encombrement deviennent deux inconvénients majeurs. Bien avant d'être appliquée aux antennes microbandes, dans les années soixante, la technologie dite de circuit imprimé avait été largement mise à contribution notamment dans le domaine de l'électronique. Cette technologie est actuellement appliquée aux antennes (ou antennes patch). Dans sa forme la plus simple, une antenne microbandes est constituée d'un élément conducteur appelé patch imprimé.

Dans ce chapitre, nous présentons quelque définitions et quelques caractéristiques des antennes imprimées, leurs avantages ainsi que leurs inconvénients. Finalement nous examinerons les différentes techniques d'alimentations, ainsi les domaines d'application.

#### 1.2 Lignes de transmission

Une ligne de transmission est un ensemble de deux ou plusieurs conducteurs acheminant de concert un signal électrique, d'une source (ou émetteur) vers une charge (ou récepteur).

On s'intéresse aux phénomènes de propagation prenant naissance dans les câbles ou des structures de propagation en mode TEM, lors de leur utilisation pour le transport des signaux sur une distance grande devant la longueur d'onde.

Les lignes de transmission les plus courantes sont la ligne coaxial, ligne bifilaire, ligne micro ruban et la ligne coplanaire

##### 1.2.1 La ligne coaxiale

Elle est constituée d'un conducteur intérieur et d'un conducteur extérieur comme le montre la figure 1.1 :

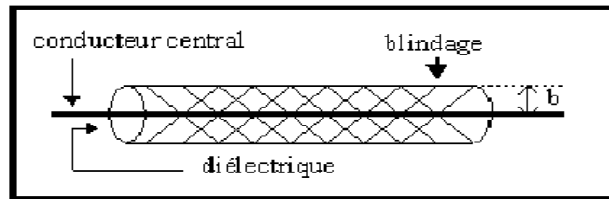


Figure 1.1: La ligne coaxiale [5]

### 1.2.2 La ligne bifilaire

Elle est constituée de 2 fils conducteurs cylindriques identiques parallèles comme le montre la figure 1.2 :

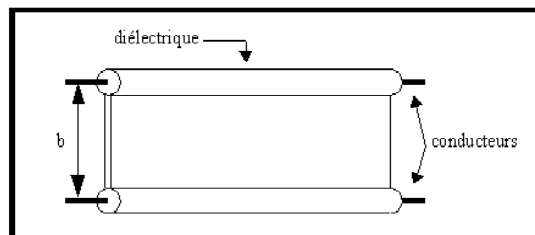


Figure 1.2: La ligne bifilaire [5]

### 1.2.3 La ligne micro-ruban

Elle est constituée d'un substrat en diélectrique (époxy, téflon,..) entièrement métallisé sur une de ses faces (plan de masse), comportant une piste conductrice sur l'autre face comme le montre la figure 1.3 :

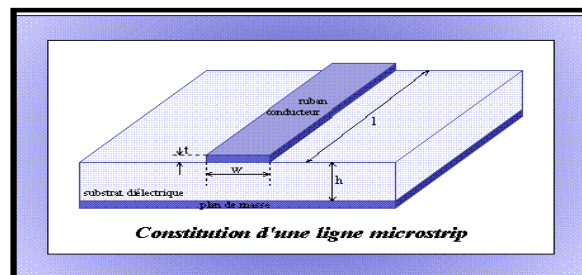


Figure 1.3: La ligne micro-ruban [5]

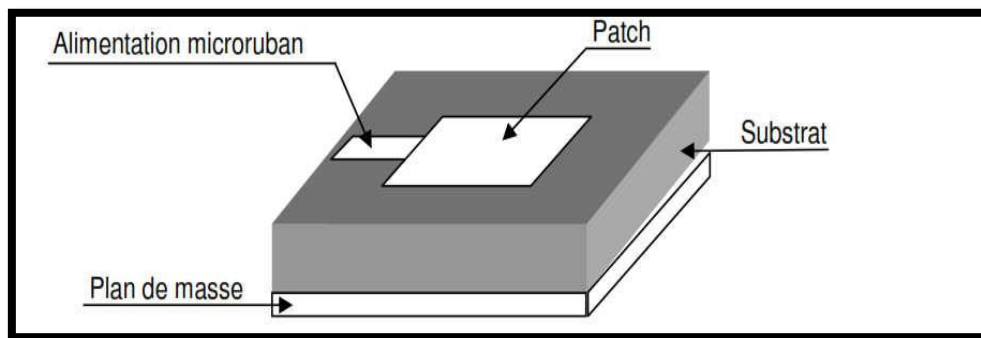
### 1.2.4 La ligne coplanaire

La ligne coplanaire est un guide d'onde souvent utilisé dans les circuits intégrés. Il ressemble à la ligne micro ruban, sauf que les mises à terre sont placées de chaque côté du conducteur [5].

### 1.3 Antennes patch

Les antennes microbandes, construites par la technique des circuits imprimés, ont en général des bandes de fréquence étroites dans leur structure de base [6].

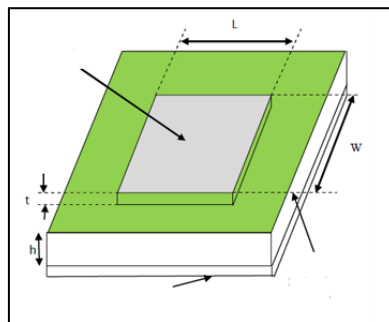
Une antenne micro ruban est un dispositif rayonnant constitué d'un ou plusieurs éléments métalliques (plan de masse, antenne, directeur,...) séparés par des couches de substrats diélectriques dont les épaisseurs sont faibles par rapport à la longueur d'onde[7], comme le montre la figure 1.4.



**Figure 1.4:** Présentation d'antenne micro ruban [6]

Dans sa configuration la plus simple, l'antenne à micro ruban est constituée d'une pièce rayonnante sur un côté d'un substrat diélectrique qui a un plan de masse de l'autre côté.

Les conducteurs de patch sont normalement en cuivre ou en or. Le patch rayonnant et les lignes d'alimentation sont généralement photo gravés sur le substrat diélectrique, La figure 1.5 montre la structure de l'antenne patch micro ruban [8].

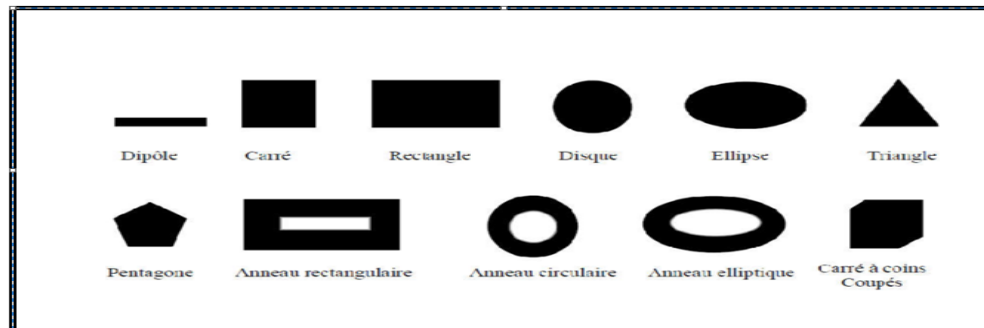


**Figure 1.5:** Structure rectangulaire d'antenne patch [8]

Basé sur la figure 1.5, il montre la structure d'antenne à micro ruban commune où  $W$  est la largeur du patch,  $L$  est la longueur du patch,  $t$  est l'épaisseur du patch et  $h$  est la hauteur du substrat.

Pour atteindre la grande performance d'antenne, un diélectrique épais qui a un constant diélectrique bas est nécessaire. Cela fournira une efficacité plus élevée, une plus grande bande passante et une plus grande radiation [8].

Dans une structures micro ruban les conducteurs se présentent sous la forme de ruban très mince découpé suivant différentes géométries (rectangle, cercle, triangle ...) comme le montre la figure 1.6



**Figure 1.6:** Différentes formes d'antennes imprimées [8]

Parmi toutes les formes des éléments rayonnants, le rectangle est le plus facile à appréhender pour la compréhension des mécanismes de rayonnement des antennes micro bandes.

#### 1.4 Les avantages et les inconvénients

Des nombreux systèmes de communication utilisent les antennes microbandes non seulement comme des éléments indispensables pour assurer le couplage entre les équipements et le milieu de propagation, [9-10] mais aussi puisque elles offrent certains avantages tel que:

- ✓ Faible poids, encombrement réduit, faible profile et structure plane ;
- ✓ Faible volume et épaisseur réduite ;
- ✓ Faible coût de fabrication ;
- ✓ Facile à fabriquer en masse on utilisant les techniques des circuits imprimés dont le faible cout ;
- ✓ Compatibilité avec des circuits intégrés (antennes actives) ;
- ✓ Réseaux d'alimentation et d'adaptation fabriqués simultanément avec l'antenne ;
- ✓ Antennes multi bandes multi polarisations possibles ;

Ces antennes présentent malheureusement, également des inconvénients :

- ✓ Bande passante étroite ;
- ✓ Faible gain ;
- ✓ Supporte uniquement des faibles puissances ;
- ✓ Faible efficacité de rayonnement ;
- ✓ La bande passante reste toujours un obstacle devant des divers systèmes de communication.

## 1.5 Les caractéristiques d'antenne micro ruban

L'antenne est un dispositif permettant de transformer l'énergie électrique en énergie électromagnétique en émission ou en réception.

Les performances de l'antenne peuvent être déterminées par ces paramètres importants: diagramme de rayonnement, directivité, gain, , largeur de bande, impédance d'entrée, coefficient de réflexion, rapport d'onde stationnaire de tension et perte de retour.

### 1.5.1 Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement d'une antenne patch est une onde électromagnétique, Il représente la variation du champ électrique en fonction de l'angle et comporte deux composantes de champ: un vecteur de champ électrique  $E$  et un vecteur de champ magnétique  $H$  [11].

Le diagramme de rayonnement peut être représenté en coordonnées cartésiennes comme le montre la figure 1.7.

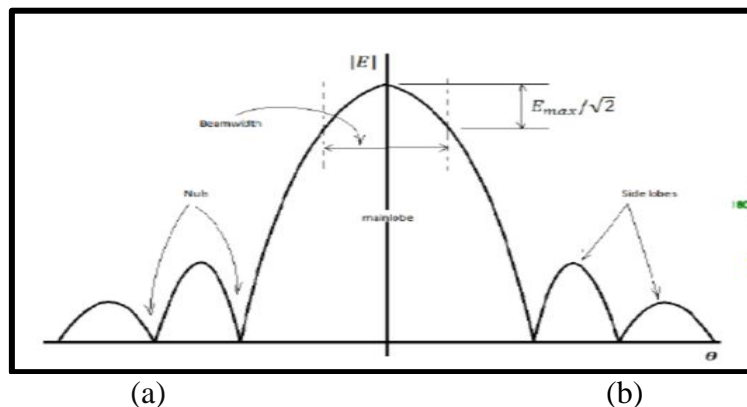


Figure 1.7: Diagramme de rayonnement: (a) représentation cartésienne, [11]

### 1.5.2 Bande passante

Le terme de largeur de bande est défini comme la plage de fréquences à l'intérieur de laquelle la performance de l'antenne, par rapport à certaines caractéristiques, est conforme à une norme spécifiée. Pour l'antenne à bande étroite, la bande passante est exprimée en pourcentage de la différence de fréquence par rapport à la fréquence centrale de la bande passante.

Les caractéristiques telles que l'impédance d'entrée, le gain et la polarisation de l'antenne n'affectent pas nécessairement la fréquence. Donc, il n'y a pas de caractérisation unique de la bande passante.

Il n'y a pas de distinction entre les variations d'impédance de motif et de l'entrée. La bande passante du motif et la bande passante de l'impédance sont utilisées pour souligner cette



distinction. Le gain, le niveau du lobe latéral, l'ouverture du faisceau, la polarisation et la direction du faisceau sont associés à la bande passante tandis que l'impédance d'entrée et l'efficacité du rayonnement sont associées à la bande passante de l'impédance

### 1.5.3 Directivité

La directivité peut être définie comme le rapport de l'intensité de rayonnement dans une direction donnée de l'antenne à l'intensité de rayonnement moyenne de toutes les directions.

L'intensité de rayonnement moyenne est égale à la puissance totale rayonnée par l'antenne divisée par  $4\pi$ .

Si la direction n'est pas spécifiée, la direction de l'intensité maximale du rayonnement est implicite [12], peut être exprimée comme suit :

$$D_{max} = D_0 = \frac{U_{max}}{U_0} = 4\pi \left( \frac{U_{max}}{P_{rad}} \right) \quad (1.1)$$

Où :

$D_{max}$  = directivité

$D_0$  = directivité maximale

$U$  = intensité du rayonnement ( $W/unit\ solid\ angle$ )

$U_{max}$  = intensité maximale du rayonnement ( $W/unit\ solid\ angle$ )

$P_{rad}$  = puissance totale rayonnée ( $W$ )

$U_0$  = intensité de rayonnement de la source isotrope ( $W/unit\ solid\ angle$ )

Les antennes de référence sont généralement des radiateurs isotropes où l'énergie rayonnée est la même dans toutes les directions et a une directivité qui peut être définie comme

$$D = \frac{F_{max}}{F_0} \quad (1.2)$$

Où:  $F_{max}$  = énergie rayonnée maximale

$F_0$  = énergie du radiateur isotrope

### 1.5.4 Gain

En général, une antenne rayonne une puissance qui varie en fonction de la direction considérée. On appelle gain  $(\theta, \varphi)$  d'une antenne dans une direction  $(\theta, \varphi)$ , le rapport de la puissance  $P(\theta, \varphi)$  dans cette direction à la puissance  $P_0(\theta_0, \varphi_0)$  d'une source isotrope de référence par unité d'angle solide avec la même puissance d'alimentation.

Le gain est proportionnel à la directivité, il porte la même information sur les directions de rayonnement, Le gain s'exprime en décibel dB.

On utilise quelquefois la notation *dBi* pour préciser la référence au rayonnement isotrope. On trouve aussi parfois le gain exprimé en *dBd*, lorsqu'une antenne dipôle est utilisée comme référence. Si l'antenne est omnidirectionnelle et sans pertes, son gain vaut **1** ou **0dB**. [13-14]

Le gain  $G$  peut s'écrire comme suit:

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \cdot \left( \frac{P(\theta, \varphi)}{PA} \right) \quad (1.3)$$

$PA$  : puissance alimentation

$P(\theta, \varphi)$ : puissance d'une source isotrope

### 1.5.5 L'impédance D'entrée

L'impédance d'entrée peut être définie comme l'impédance présentée par l'antenne à ses bornes ou le rapport de la tension au courant à une paire du rapport des composantes appropriées du champ électrique au champ magnétique en un point. Elle peut être déterminée par le transfert de puissance maximum entre la ligne de transmission et l'antenne.

Lorsque l'impédance d'entrée, d'antenne et la ligne de transmission correspondent, le transfert de puissance maximum est atteint, une onde réfléchi sera générée sur le terminal de l'antenne et retournera vers la source d'énergie si elle ne correspond pas. Cela entraînera une réduction de l'efficacité globale du système [15] L'impédance d'entrée peut être décrite comme

$$Z_1 = Z_0 \left| \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}} \right| \quad (1.4)$$

Où:  $Z_1$  = Impédance d'entrée

$Z_0$  = Impédance caractéristique

$S_{11}$  = Coefficient de réflexion

### 1.5.6 Coefficient de réflexion $S_{11}$

Le coefficient de réflexion est un paramètre qui permet de quantifier la quantité du signal réfléchi par rapport au signal incident. Généralement ce coefficient  $\Gamma$  est lié à l'impédance d'entrée  $Z_e$  de l'antenne et l'impédance caractéristique  $Z_c$  par la relation [16-17].

$$\Gamma = \frac{Z_e - Z_c}{Z_e + Z_c} \quad (1.5)$$

On peut représenter le coefficient  $\Gamma$  en dB tel que :

$$S_{11}(dB) = 20 \log |\Gamma| \quad (1.6)$$

Dans la pratique, l'adaptation est caractérisée par le module du coefficient de réflexion ou, le plus souvent, par le "Rapport d'Onde Stationnaire" (**R.O.S** ou **VSWR**) défini par :

$$ROS = \frac{(1 + |\Gamma|)}{(1 - |\Gamma|)} \quad (1.7)$$

Le terme de **TOS** (Taux Ondes Stationnaires) peut être utilisé à la place de **ROS**.

### 1.5.7 Rendement

Le rendement de l'antenne est le rapport entre la puissance rayonnée  $P_R$  et la puissance d'alimentation  $P_A$  à l'antenne.

Dans le sens de l'émission, la puissance rayonnée est inférieure à la puissance d'alimentation [18], l'antenne est un transformateur imparfait. Il y a des pertes lors de la transformation d'énergie comme dans tout système. L'efficacité de l'antenne est définie par

$$\eta = \frac{P_R}{P_A} \quad (1.8)$$

Elle permet de mesurer le taux de transformation, c'est un rendement au sens thermodynamique du terme :  $\eta \leq 1$

Le rendement est lié aux pertes dans le réseau de polarisation et dans les éléments rayonnants. Le rendement relie le gain et la directivité par l'équation 1.9 [19] :

$$P_R = \eta \cdot P_A \Rightarrow G = \eta \cdot D \quad (1.9)$$

## 1.6 Différentes techniques d'alimentation

Les antennes micro ruban peuvent être alimentées par une variété de méthodes. Ces méthodes peuvent être classées en deux catégories:

- ✓ Contact.
- ✓ Sans contact.

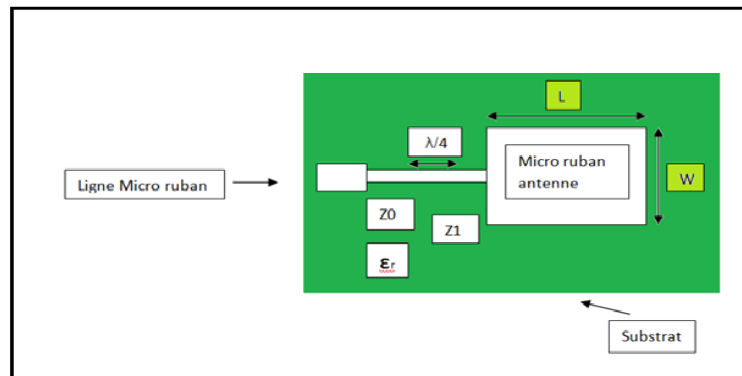
Dans la méthode de mise en contact, la puissance RF est envoyée directement au patch rayonnant en utilisant un élément de connexion tel qu'une ligne micro ruban.

Dans le schéma sans contact, le couplage de champ électromagnétique est fait pour transférer la puissance entre la ligne micro ruban et le patch rayonnant.

Les quatre techniques d'alimentation les plus populaires utilisées sont la ligne micro ruban, la sonde coaxiale, le couplage d'ouverture et le couplage de proximité [20].

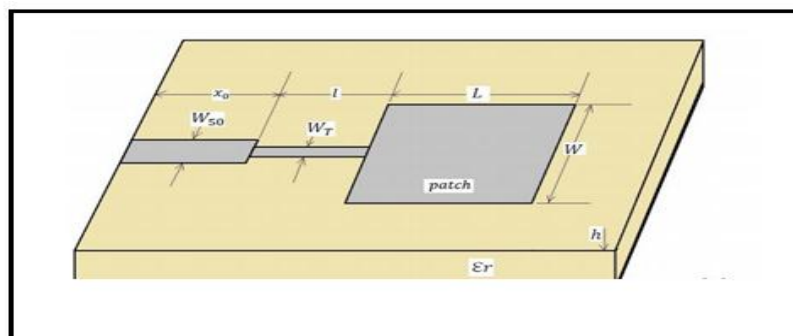
### 1.6.1 Alimentation directe par une ligne micro ruban

Cette méthode d'alimentation est très largement utilisée car elle est très simple à concevoir et à analyser, et très facile à fabriquer. La figure 1.8 montre un patch avec une ligne micro ruban provenant du côté du patch [17],[21]



**Figure 1.8:**Antenne patch alimentée par une ligne micro ruban [17]

L'impédance est généralement supérieure à 50 ohms. Pour éviter les différences d'impédance, des sections de transformateurs quart d'onde peuvent être utilisées pour transformer une grande impédance d'entrée en ligne de 50 ohms, comme le montre la figure 1.9.



**Figure 1.9:**Ligne de micro ruban avec transformateur quart d'onde [17]

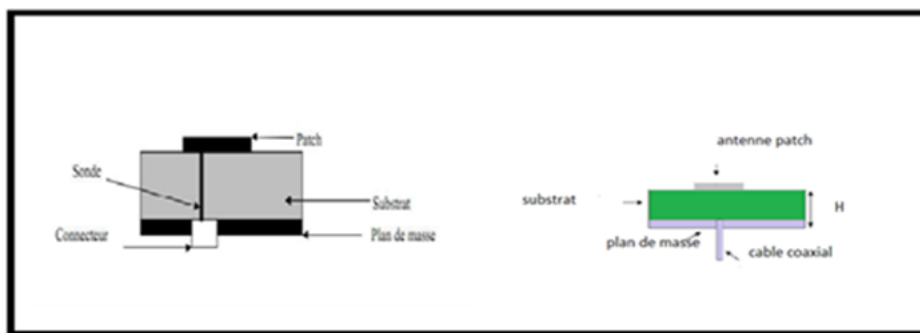
Un transformateur quart d'onde utilise une section de ligne d'impédance caractéristique  $Z_t$  de  $\lambda/4$ .

$$l = \frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda_0}{4\sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (1.10)$$

### 1.6.2 Alimentation par câble coaxial (sonde)

La figure 1.10 montre une antenne microbande rectangulaire excitée par un câble coaxial via une sonde. La connexion coaxiale est implantée à la face arrière du circuit imprimé, alors que le câble coaxial est fixé à la plaque conductrice de l'antenne.

L'alimentation par câble coaxial peut être représentée comme étant un courant électrique filiforme, allant du plan de masse vers la plaque conductrice de l'antenne [21].



**Figure1.10** :Antenne micro ruban alimenté par sonde [21]

L'avantage principal de ce type d'alimentation est qu'elle peut être placée à n'importe quel endroit désirée du patch afin d'assurer l'adaptation d'impédance.

Cette méthode d'alimentation est facile à fabriquer et a un rayonnement parasite faible [16].[20]

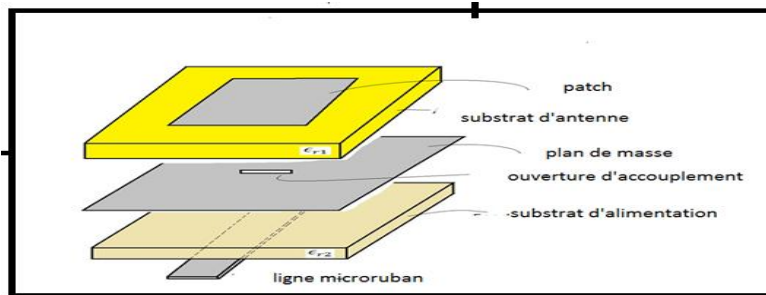
Cependant, son inconvénient principal est qu'elle fournit une bande passante étroite et elle est difficile à modéliser car un trou doit être foré dans le substrat et le connecteur sort en dehors du plan de masse, ce qui ne la rend pas complètement plane pour les substrats .

### 1.6.3 Alimentation couplée par ouverture

Le transfert d'énergie de la ligne à l'élément se fait par couplage depuis la ligne à travers une fente figure 1.11.

Le plan de masse a une ouverture en forme de cercle ou rectangulaire , et sépare deux substrats: le substrat supérieur avec le patch, et le substrat inférieur avec la ligne d'alimentation micro ruban en dessous.

Ce type de couplage donne une bande passante plus large. Une autre propriété de ce type est la radiation de la ligne de bande d'alimentation est réduite par l'effet de blindage de la plan de masse. Cette caractéristique améliore la pureté de la polarisation [5].



**Figure1.11:** Méthode d'alimentation par couplage d'ouverture [5]

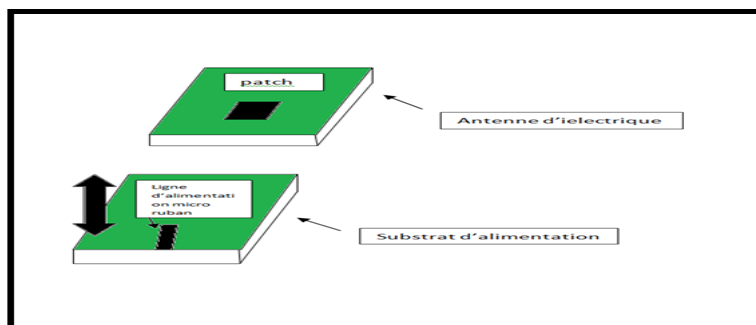
#### 1.6.4 Alimentation couplée par proximité

Cette technique d'alimentation est connue également sous le nom de couplage électromagnétique.

Deux substrats diélectriques sont employés tels que la ligne d'alimentation est située entre les deux substrats et le patch est imprimé sur le substrat supérieur comme il est montré à la figure 1.12.

L'avantage principal de cette technique d'alimentation est qu'elle élimine le rayonnement parasite due à l'alimentation et fournit une largeur de bande très élevée (au-delà de 13%), en raison de l'augmentation globale de l'épaisseur de l'antenne microbande.

Cette technique fournit également des choix entre deux milieux diélectriques différents, un pour le patch et un pour la ligne d'alimentation pour optimiser les performances de l'antenne [20].



**Figure1.12:** Alimentation couplée par proximité [20]

### 1.7 Les applications d'antenne micro ruban

Les antennes microbandes (patch) sont bien connues pour leurs performances, leur conception robuste, leur fabrication et leur utilisation étendue. L'utilisation des antennes microbande (patch) se répand largement dans tous les domaines et maintenant ils sont en plein essor dans les aspects commerciaux en raison de leur faible coût du matériau de substrat et de la fabrication. Ils a plusieurs applications comme par exemple :

- ✓ Les télécommunications par satellites;
- ✓ Applications du système de positionnement global ;
- ✓ Application radar ;
- ✓ Identification par radiofréquence (RFID) ;
- ✓ Application medicinal du patch;

### 1.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté des généralités sur les antennes micro-ruban, ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients. Nous avons montrés également différentes techniques d'alimentation et les application utilisées de ce type d'antenne.

---

# Chapitre 2

---



---

---

## Chapitre 2

---

---

---

---

# Généralités Sur Le Conducteur Magnétique Artificiel

---

---

### 2.1 Introduction

L'électromagnétisme a reçu beaucoup d'attention de la part des chercheurs du monde en raison de ses immenses applications de militaire . L'utilisation du radar et par la suite l'utilisation large des systèmes de communication par micro-ondes a facilité la transformation de la radio à la fréquence hyperfréquence. Ce changement a exigé des matériaux plus avancés pour des performances à haute fréquence et a ouvert de nouvelles dimensions dans le domaine des matériaux électromagnétiques.

Maintenant, les installations de fabrication modernes peuvent permettre des matériaux plus avancés avec des caractéristiques supérieures qui ne peuvent être obtenues dans la nature. Ces matériaux artificiels avec des propriétés qui ne peuvent pas être trouvés dans la nature sont appelés métamatériaux .

Nous allons présenter un bref aperçu sur les **métamatériaux** qui sont des matériaux artificiels n'existant pas dans la nature et qui présentent des caractéristiques importantes pour améliorer les performances des antennes de patch micro ruban tels que le gain et la bande passante d'impédance. La périodicité de la cellule unitaire est beaucoup plus petite que la longueur d'onde de fonctionnement, les structures à bande interdite électromagnétique (**EBG**) et à conducteur magnétique artificiel (**AMC**) sont considérées comme des méta matériaux.

En raison de leurs propriétés électromagnétiques souhaitables, ils ont été largement étudiés pour des applications potentielles dans l'ingénierie des antennes. Le filtrage par micro-ondes s'est également avéré être un domaine important dans lequel les matériaux à bande interdite électromagnétique jouent un rôle important.

Dans ce chapitre une démonstration sur un conducteur magnétique artificiel (**AMC**) est présentée. La structure AMC est une nouvelle technologie qui sera reliée à la terre des antennes patches afin d'améliorer les performances des antennes microbandes.

On commence tout d'abord par les structures artificielles (**PMC** et **PAC** ) et les structures à bande interdite électromagnétique (**EBG**), par la suite des généralités sur la structure AMC et leur définition et leurs performances ont été décrites. On clôture le chapitre

par un bref aperçu sur les propriétés de la surface **AMC**, les formes d'une cellule AMC et ses applications.

## 2.1 Conducteur Electrique et Magnétique Parfait

### 2.1.1 Conducteur Electrique Parfait

Des plans métalliques sont fréquemment utilisés comme plan de masse pour une antenne. Ces plans fonctionnent comme un réflecteur qui puisse diriger les ondes émises vers l'autre côté et sont habituellement utilisés pour agir comme plans de masse d'antenne. Elle consiste à rediriger le rayonnement arrière vers l'avant en utilisant un plan réflecteur métallique assimilé à un conducteur électrique parfait infini **PEC**.

A la surface du plan réflecteur infini PEC, le champ électrique lui est normal tandis que le champ magnétique est tangentiel à cette surface ainsi que la densité de courant. La composante tangentielle du champ électrique est nulle. Mathématiquement ces conditions aux limites se traduisent par :

$$\vec{n} \wedge \vec{E} = \vec{0} \quad (2.11)$$

$$\vec{n} \wedge \vec{H} = \vec{J} \quad (2.12)$$

$$Et_{(totale)} = Et_{(incident)} + Et_{(reflechi)} = 0 \quad (2.13)$$

$$Et_{(incident)} = -Et_{(reflechi)} \quad (2.14)$$

Le champ électrique réfléchi est déphasé de **180°** par rapport au champ électrique incident. Le coefficient de réflexion en champ électrique est égale à -1 pour un conducteur PEC :

$$\Gamma = \frac{Et_{(reflechi)}}{Et_{(incident)}} = -1 \quad (2.15)$$

$$Z_s \ll \eta \quad (2.16)$$

$\eta = 377$  est l'impédance d'onde du vide en champ lointain

On considère maintenant l'antenne en présence d'un plan réflecteur PEC. Lorsque la distance les séparant est petite devant quart de la longueur d'onde, on remarque :

- l'antenne est « court-circuitée » et son rayonnement est détérioré.
- Des interférences destructives entre le rayonnement arrière réfléchi et le rayonnement avant ont lieu comme le montre la figure 2.1-a.

Pour obtenir le rayonnement arrière réfléchi en phase avec le rayonnement avant, c'est-à-dire avoir des interférences constructives, nous devons lui faire subir encore un autre déphasage de  $180^\circ$ , par un autre moyen quelconque. C'est le cas lorsque nous plaçons l'antenne à une distance égale au quart de la longueur d'onde de travail du plan de masse réflecteur PEC. En effet, l'onde parcourt une distance égale au quart de la longueur en un quart de la période, ce qui entraîne un déphasage  $\omega\Delta t$  exprimé en radians, donné par :

$$\Delta\varphi = \omega\Delta t = \frac{2\pi T}{T} \frac{T}{4} = \frac{\pi}{2} \quad (2.17)$$

Le déphasage total  $(\Delta\varphi)t$  en radians, entre le rayonnement arrière réfléchi et le rayonnement avant est alors égal à

$$(\Delta\varphi)t = \frac{\pi}{2}_{(dephasage\ aller)} + \pi_{(dephasage\ PEC)} + \frac{\pi}{2}_{(dephasage\ retour)} \quad (2.18)$$

Les interférences entre les rayonnements émis par l'antenne deviennent alors constructives comme le montre la figure 2.1-b. Le principal inconvénient de cette solution est que la distance  $h$  séparant l'antenne du plan de masse doit être égale au quart de la longueur d'onde. Pour les antennes compactes, cette distance peut ne pas être acceptable surtout pour les fréquences relativement basses [22]. Un autre inconvénient est que les réflecteurs métalliques supportent des courants de surface appelés aussi ondes de surface. Ces ondes électromagnétiques restent localisées à l'interface entre le métal et le milieu diélectrique. Elles se propagent le long du plan de masse.

Comme en pratique ce dernier est de dimensions finies, ces courants rayonnent par effet de bord et dégradent les performances de l'antenne comme le montre la figure 2.2[23].

De plus les courants de surface vont aussi rayonner au-delà du côté arrière du réflecteur réduisant ainsi le rapport avant-arrière. Si maintenant plusieurs antennes partagent le même plan de masse pour former un réseau, les courants de surface en plus du couplage dans l'espace libre, causeront un couplage mutuel indésirable entre elles [24].

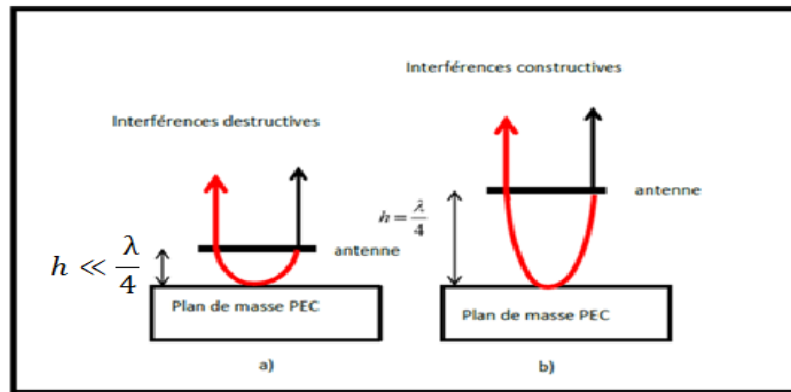


Figure 2.1: Plan de masse PEC (a) hauteur  $h \ll \lambda/4$  (b)  $h = \lambda/4$  [24]

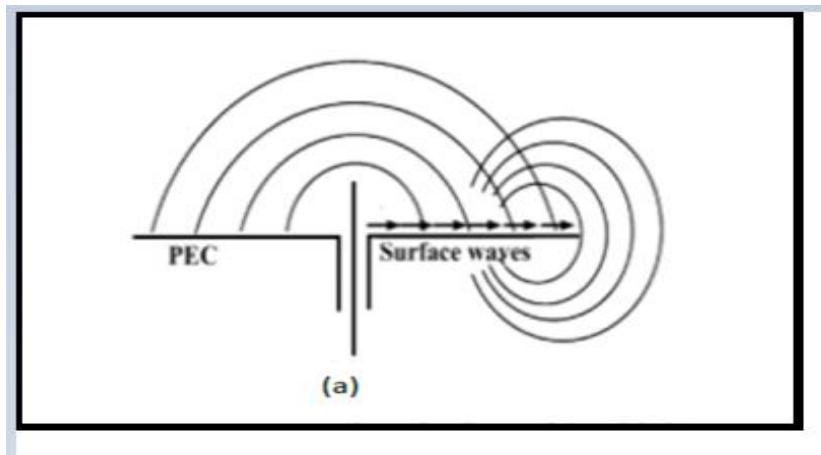


Figure 2.2 : Onde de surface[24]

### 2.1.2 Conducteur Magnétique Parfait

Une autre solution consistant à récupérer le rayonnement arrière tout en minimisant les inconvénients du plan de masse réflecteur PEC est l'utilisation d'un conducteur magnétique parfait (**PMC**). En effet un PMC présente des conditions aux limites différentes de celles d'un PEC ; le champ magnétique est normal à la surface et le champ électrique est tangentiel à la surface ,autrement dit la composante tangentielle du champ magnétique est nulle . Nous pouvons traduire mathématiquement ces conditions aux limites par [2]

$$\vec{n} \wedge \vec{H} = \vec{0} \quad (2.19)$$

$$\vec{n} \wedge \vec{E} = -\vec{M}_s \quad (2.20)$$

où  $M_s$  est la densité surfacique de courant magnétique.

A l'inverse du PEC, le PMC génère un courant image en phase avec le courant réel lorsqu'une antenne horizontale est placée au-dessus de ce PMC. Ce courant image va donc renforcer l'effet du courant dans l'antenne et par conséquent le rendement de l'antenne.

Comme la composante tangentielle du champ magnétique est nulle, l'impédance de surface d'un PMC est très grande devant l'impédance d'onde du vide et le coefficient de réflexion est égal à l'unité mathématiquement nous avons :

$$Z_s \gg \eta \quad (2.21)$$

$$\Gamma = 1 \quad (2.22)$$

L'onde réfléchiée par le PMC étant en phase avec l'onde incidente, elles vont se combiner de façon constructive. L'onde incidente ne subissant pas de déphasage supplémentaire dû à la présence du réflecteur PMC, la distance optimale du quart de la longueur d'onde n'est plus nécessaire. En effet, ce matériau nous permet de positionner l'antenne très proche du plan réflecteur réduisant ainsi de façon significative l'épaisseur globale de l'antenne comme le montre la figure 2.3. De plus, cette distance n'étant pas fixée pour une longueur d'onde particulière, l'utilisation du PMC permet un fonctionnement large bande.

Enfin, comme indiqué par l'équation 2.21 et 2.22, un PMC présente l'avantage de ne pas supporter de courant de surface.

Cependant, de telles surfaces conductrices magnétiques n'existent pas dans la nature mais des récents travaux ont montré qu'il est possible de réaliser ce comportement de conducteur magnétique parfait, au moins dans une bande de fréquence restreinte. Ces matériaux portent le nom de conducteur magnétique artificiel (AMC) et comme leur impédance de surface est très haute, on les appelle aussi surface à haute impédance (**SHI**) [6]. Ils portent enfin le nom de métamatériaux car ils possèdent des propriétés originales, inexistantes dans la nature, [25-26]

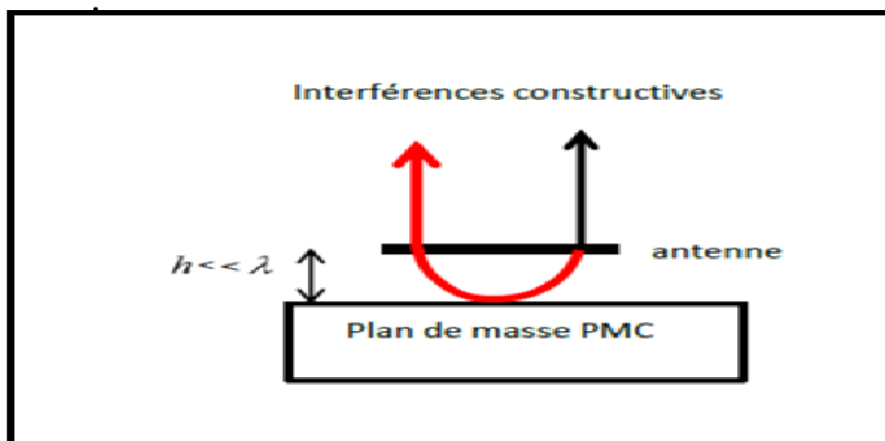


Figure 2.3 : plan de masse PMC [25]

### 2.3 Méta matériaux

Le mot "méta", en grec, signifie au-delà. Cela implique que la réponse électromagnétique des métamatériaux (MTM) est irréalisable ou indisponible dans les matériaux conventionnels. De nombreux efforts ont été déployés pour rechercher une définition adéquate des MTM [2].

En 2002, J.B. Pendry a écrit dans un article de conférence: "méta-matériaux, matériaux dont la perméabilité et la permittivité dérivent de leur structure". Plus tard, en 2006, C. Caloz et T. Itoh ont écrit: "Les métamatériaux électromagnétiques sont largement définis comme des structures électromagnétiques artificielles effectivement homogènes avec des propriétés inhabituelles qui ne sont pas facilement disponibles dans la nature "[2-22]. Peut-être, un obstacle sérieux sur la voie d'une définition universelle du terme MTM est le fait que les chercheurs travaillant avec ces objets ne sont pas généralement d'accord sur leurs caractéristiques les plus essentielles.

Les MTM couvrent un domaine scientifique extrêmement vaste qui va de l'optique à la nanoscience et de la science des matériaux à l'ingénierie des antennes.

Les méta matériaux électromagnétiques sont des matériaux artificiellement structurés conçus pour interagir avec les ondes électromagnétiques et les contrôler [27].

Le terme "artificiel" se réfère au fait que la réponse électromagnétique de ces matériaux est minée par diffusion à partir d'inclusions placées périodiquement (par exemple, des sphères métalliques, diélectriques, des fils et des boucles) [27].

## 2.4 Classification des matériaux

La réponse d'un système à la présence de champ électromagnétique est déterminée par les propriétés des matériaux impliqués. Ces propriétés sont décrites en définissant la permittivité effective  $\epsilon_{\text{eff}}$  et la perméabilité effective  $\mu_{\text{eff}}$  des matériaux, la classification du milieu peut être illustrée graphiquement comme le montre la Figure 2.4.

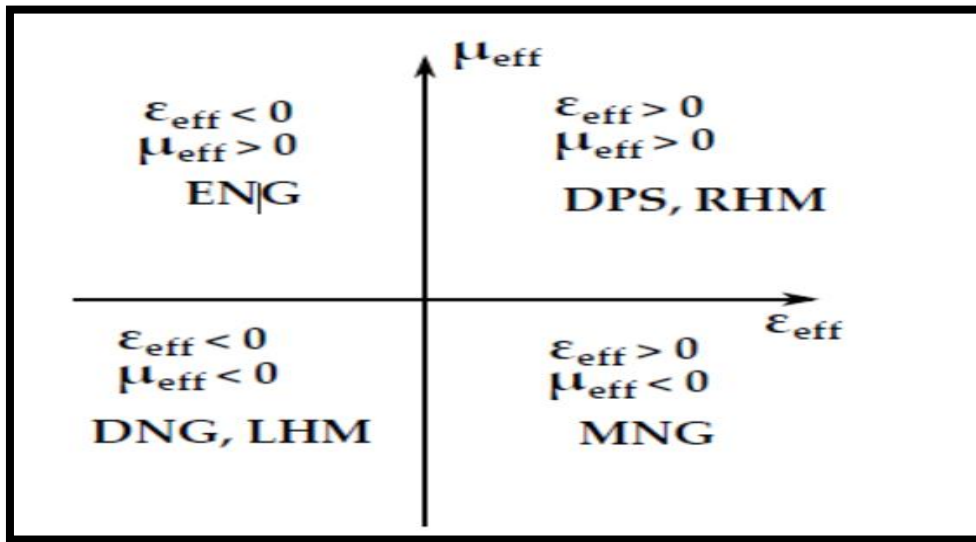


Figure 2.4: Classification des matériaux [27]

Un milieu ayant à la fois une permittivité effective et une perméabilité supérieure à zéro ( $\epsilon_{\text{eff}} > 0, \mu_{\text{eff}} > 0$ ) est appelé double positif (DPS) ou main droite «Right Handed Materials» (RHM).

Le double cas positif se rapporte à la propagation d'onde directe habituelle dans les milieux communs (comme les diélectriques) avec un indice de réfraction positif.

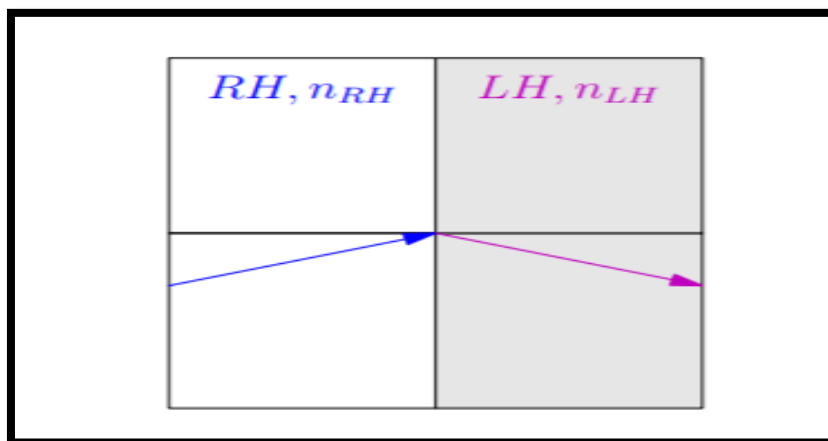
Un milieu avec une permittivité effective inférieure à zéro et une perméabilité effective supérieure à zéro ( $\epsilon_{\text{eff}} < 0, \mu_{\text{eff}} > 0$ ) s'appelle Epsilon négatif (ENG). Dans certains régimes de fréquence de nombreux plasmas présentent cette caractéristique. Par exemple, les métaux nobles (tels que l'argent, l'or) se comportent de cette manière dans l'infrarouge (IR) et domaines fréquentiels visibles. Lorsqu'un seul paramètre constitutif est négatif, l'indice de réfraction est un imaginaire pur qui se traduit par la propagation d'ondes évanescentes avec pertes dans le milieu. Lorsque les deux composants constitutifs sont positifs ou négatifs, la propagation d'onde libre est activée.

Un milieu avec une permittivité effective supérieure à zéro et une perméabilité effective inférieure à zéro ( $\epsilon_{\text{eff}} > 0$ ,  $\mu_{\text{eff}} < 0$ ) s'appelle Mu négatif (**MNG**) moyen. Dans cette catégorie de matériaux ferroélectriques peuvent être trouvés.

Un milieu avec à la fois une permittivité effective et une perméabilité inférieure à zéro ( $\epsilon_{\text{eff}} < 0$ ,  $\mu_{\text{eff}} < 0$ ) est appelé Double négatif (**DNG**) ou main gauche (**LHM**). la dernière classe de matériaux n'a été démontrée qu'avec des constructions artificielles .

Les médias «gauchers» (**LH**) ont suscité énormément d'intérêt .Ce concept a été proposé pour la première fois par un physicien russe, Victor Veselago, en 1968, pour qui le milieu se caractérise par une permittivité électrique et une perméabilité magnétique négatives[26]. Veselago a soutenu que de tels médias sont autorisés par les équations de Maxwell et que les ondes planes électromagnétiques peuvent se propager à l'intérieur d'elles, mais la vitesse de phase d'une telle onde plane est dans la direction opposée du vecteur de Poynting.

Par conséquent, certains chercheurs utilisent le terme «backward wave media» (**BWM**) pour décrire ces matériaux LH [28] , comme le montre la Fig. 2.5. Néanmoins, la conjecture de Veselago a été essentiellement ignorée pendant trente ans en raison de l'absence de matériaux naturels ou de composés qui possèdent simultanément une permittivité et une perméabilité négatives.



**Figure 2.5:** Une réflexion négative [28]

Les métamatériaux possédant ces propriétés sont aussi fréquemment appelés «indice de réfraction négatif (**NRI**)» et «matériau double négatif (**DNG**)». En plus des matériaux avec une permittivité négative et une perméabilité négative, les méta-matériaux négatifs uniques ont également suscité un grand intérêt.

Des applications sont trouvées pour ces matériaux soit avec une permittivité négative "Epsilon Négative (**ENG**)" ou une perméabilité négative "Mu Négative (**MNG**)"[29].



## 2.5 Bande interdite électromagnétique (EBG)

Le concept de structures à bande interdite électromagnétique (**EBG**) provient de la physique à l'état solide et du domaine optique, où des cristaux photoniques à bande interdite pour les émissions lumineuses ont été proposés en 1987 [4].

Les matériaux à bande interdite électromagnétique (BIE), généralement appelés cristaux électromagnétiques, sont partie intégrante de la vaste famille des métamatériaux.

Leur périodicité permet l'ouverture de bandes de fréquence pour lesquelles la propagation des ondes est impossible, à l'image du miroir de Bragg [30].

Une première étude sur la structure EBG / AMC aux hyperfréquences a été menée par le professeur Yablanovitch et qui a expliqué plusieurs de ses propriétés (suppression du courant de surface[31]). De plus, la forte anisotropie qui les caractérise permet le contrôle de la propagation des ondes électromagnétiques, Les structures EBG peuvent être utilisées pour améliorer l'efficacité de rayonnement de l'antenne. Puisque ces structures suppriment des ondes de surface, elles peuvent être utilisées également dans le but de réduire le couplage mutuel entre deux antennes micro-rubans.

Il est également une solution intéressante pour réduire la perte de puissance à travers le substrat d'une antenne conventionnelle. Ils offrent ainsi des propriétés de filtrage à la fois spectral et spatial. Les applications courantes des cristaux photoniques et électromagnétiques incluent, sans toutefois y être limitées, les structures antennaires millimétriques et centimétriques, les surfaces haute impédance, les cavités résonantes, ou encore[32]

Les structures à bande interdite électromagnétique (**EBG**) et à conducteur magnétique artificiel (**AMC**) sont typiquement des milieux artificiels périodiques, présentant des propriétés qui empêchent respectivement la propagation des ondes électromagnétiques dans des directions et des gammes de fréquences spécifiées (caractérisant un EBG) et présentant des propriétés de réflexion de surface et de phase haute impédance (caractérisant un AMC).

## 2.6 Conducteur Magnétique Artificiel (AMC)

### 2.6.1 Généralités

Une "surface à haute impédance" est un matériau ou structure artificiel formé par des réseaux métalliques périodiques imprimés sur un substrat métallique [33], qui présente une impédance extrêmement élevée (espace  $Z_{HIS} \gg Z_{free}$ ) dans une ou plusieurs plages de fréquence. Ce matériau artificiel peut jouer le même rôle qu'un plan de masse conducteur dans le système d'antenne, tout en évitant la propagation des ondes de surface et en réduisant l'épaisseur de l'ensemble du système.

L'étude de ces surfaces artificielles remonte au début des années 1950 [34-35]. Au début, la recherche en Amérique a prétendu minimiser la visibilité des avions par les systèmes radar. Afin d'absorber le rayonnement électromagnétique, certaines structures, impliquant des réseaux de métal conducteur (qui agissaient comme des composants de circuits résistifs, capacitifs ou inductifs), ont été conçues. Avant l'existence de structures HIS, surfaces ondulées ont été intensivement étudiés sous une variété de formes.

P. S. Kildal a identifié une feuille ondulée unidimensionnelle comme une surface molle, par analogie avec les conditions aux limites acoustiques. S. Lee et W[33]. Jones ont analysé une surface ondulée bidimensionnelle ressemblant à un réseau de tuyaux métalliques rectangulaires, et ont dérivé la relation de dispersion d'onde de surface pour une telle structure. L'inconvénient de telles structures est qu'elles sont lourdes et difficiles à fabriquer [36].

En 1978, E. Yablonovitch a publié un travail pionnier sur les cristaux photoniques. Il a constaté que l'émission spontanée par les atomes peut être inhibée dans une cavité micro-ondes par une recombinaison radiative [37]. En outre, il a également suggéré qu'une structure périodique spatiale tridimensionnelle peut aboutir à un espace interdit dans le spectre électromagnétique, tout comme le spectre électronique à une bande interdite dans les cristaux. Inspiré par cette idée, un conducteur presque plat recouvert d'un treillis bidimensionnel de petites bosses est issu d'une feuille plate. et la première structure de «haute impédance» était née. Cette structure a été proposée par D. Sievenpiper en 1999.

### 2.6.2 Définition de la surface AMC

Les conducteurs magnétiques artificiels (AMC), également connus sous le nom de surfaces à haute impédance (SHI), sont de nouveaux réflecteurs basés sur les métamatériaux. Une cellule AMC est un type de matériau à bande interdite électromagnétique (EBG) ou un matériau artificiel avec une surface de conducteur magnétique pour une bande de fréquence spécifiée[38].

La structure AMC est en fait une simple cellule unitaire répétée plusieurs fois pour former une surface. Chaque cellule unitaire comprend trois parties : la couche inférieure de plan de masse métallique, le chapeau métallique sur le dessus et une voie conductrice entre les deux, comme le montre la figure 2.6. Les dimensions du chapeau sont soigneusement déterminées de telle sorte qu'il existe un espace spécifique [39].

La cellule AMC est généralement réalisée sur la base de substrats diélectriques périodiques et de divers schémas de métallisation [40] , et plusieurs types de plans de masse AMC ont déjà été largement étudiés.

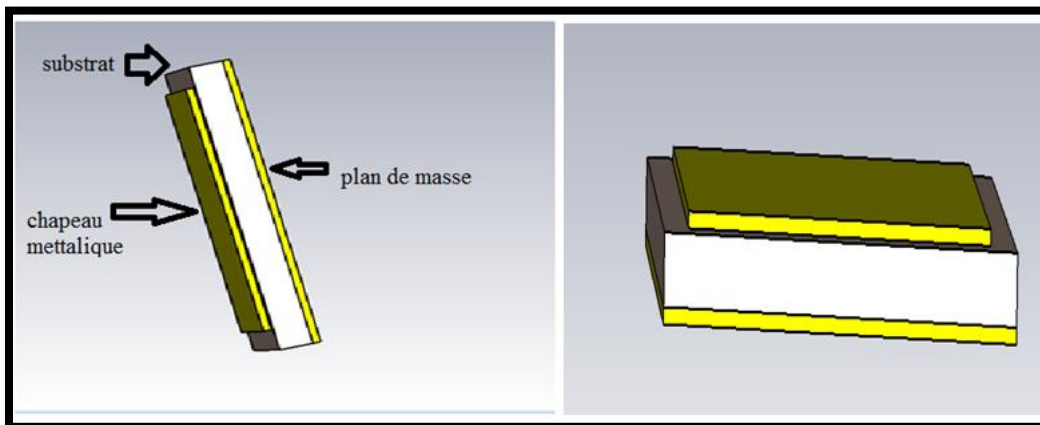


Figure 2.6: Géométrie d'une cellule AMC.

Une structure AMC est conçue pour limiter le comportement d'un conducteur magnétique parfait (PMC) et reflète les ondes électromagnétiques sans inversion de phase dans le champ électrique . La structure périodique artificielle qui met en œuvre la cellule AMC pourrait également bloquer la propagation des ondes électromagnétiques dans certaines bandes de fréquences et présenter ainsi un comportement de bande interdite électromagnétique (EBG) [41].

### 2.6.3 Performances d'AMC

Les surfaces AMC ont deux propriétés importantes et intéressantes qui ne se produisent pas dans la nature et ont conduit à une large gamme d'applications de circuits micro-ondes[42]

Premièrement, les surfaces AMC ont une bande de fréquence interdite sur laquelle les ondes de surface et les courants ne peuvent pas se propager, ce qui les rend utiles comme plans de masse et filtres.

Deuxièmement, les surfaces AMC ont une impédance de surface très élevée dans une plage de fréquences spécifique limitée, où le champ magnétique tangentiel est petit, même avec un grand champ électrique le long de la surface. Par conséquent, une surface AMC peut avoir un coefficient de réflexion de +1 (réflexion en phase).

Une cellule AMC est caractérisée par la phase de réflexion est définie comme la phase du champ électrique réfléchi qui est normalisée par rapport à la phase du champ électrique incident sur la surface réfléchissante. En pratique, la phase de réflexion d'une surface AMC varie continuellement de +180° à -180° par rapport à la fréquence.

$$\frac{-\pi}{2} \leq \Delta\Gamma \leq \frac{\pi}{2} \quad (2.23)$$

En dehors de cette bande de fréquences le réflecteur se comporte comme un réflecteur CEP [43]. La fréquence  $f_0$  correspondant à la phase du coefficient de réflexion nulle, est appelée fréquence de résonance, La bande passante utile d'un AMC est généralement définie entre +90° et -90° de chaque côté de la fréquence centrale comme figure 2.7.



**Figure 2.7** :La phase du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence d'une cellule.[43]

Ainsi, en raison de cette condition limite inhabituelle, contrairement à un plan métallique conventionnel, une surface AMC peut fonctionner comme un nouveau type de plan de masse pour des antennes filaires à profil bas, ce qui est souhaitable dans de nombreux systèmes de communication sans fil [44].

#### 2.6.4 Paramètre d'AMC

Les structures HIS présentent une valeur d'impédance élevée autour de la résonance. L'impédance de surface des structures HIS peut être obtenue analytiquement ou numériquement, nous donnons une définition générale de l'impédance de surface des structures HIS en utilisant le circuit équivalent présenté dans la figure 2.8 [45]. Puisque le circuit équivalent est une combinaison parallèle de composants L et C, l'impédance de surface peut être formulée comme suit:

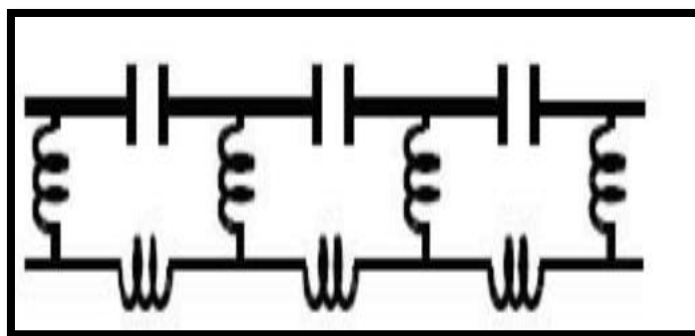


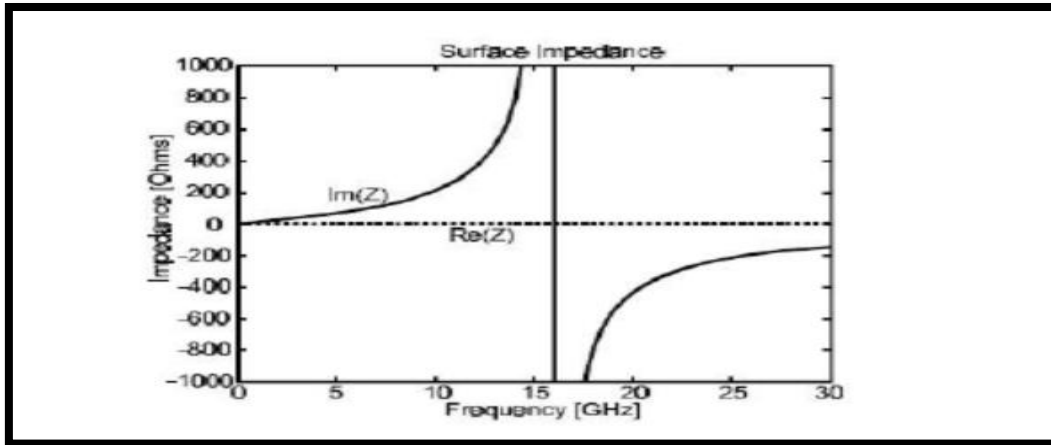
Figure 2.8: Circuit équivalent LC. [45]

$$Z_{HIS} = \frac{j\omega L}{1 - \omega^2 Lc} \quad (2.24)$$

L : l'inductance effective

C : capacité effective de la structure HIS.

La figure 2.9 montre le comportement général de l'impédance de surface en termes de fréquence de fonctionnement pour une structure HIS donnée. Seule la première résonance principale de la structure est présentée (d'autres résonances apparaissent à des fréquences plus élevées).



**Figure 2.9:** Un exemple de la courbe d'impédance de surface pour une structure HIS en champignon.[45]

On peut observer que, par rapport à l'impédance de l'espace libre, l'impédance de surface est extrêmement élevée dans une région étroite près de la résonance. En dessous de la résonance, l'impédance de surface présente un comportement inductif, qui favorise la propagation des ondes TE; au-dessus de la résonance, il montre un comportement capacitif, qui favorise la propagation des ondes TM. La fréquence de résonance des structures HIS peut être lue à partir de la courbe d'impédance de surface, et elle sert à concevoir les dimensions de la structure dans la phase de conception.

Cependant, un problème se pose: l'impédance de surface ne peut pas être mesurée directement dans des expériences. Par conséquent, nous choisissons un paramètre d'observation alternatif: le coefficient de réflexion qui peut être déterminé pour une surface d'impédance arbitraire en considérant l'onde stationnaire formée par une onde de marche avant frappant la surface de HIS et une onde de marche arrière réfléchi par celle-ci. Il peut également être obtenu en considérant un modèle de ligne de transmission, comme indiqué sur la figure 2.10, et calculé à partir des équations suivantes:

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_P}{Z_L + Z_P} \quad (2.25)$$

$Z_P$  : est identique à l'impédance de l'espace libre ( $Z_0 = 377$  ohms)

$Z_L$  : est l'impédance d'entrée vue à une distance de la surface supérieure des structures HIS

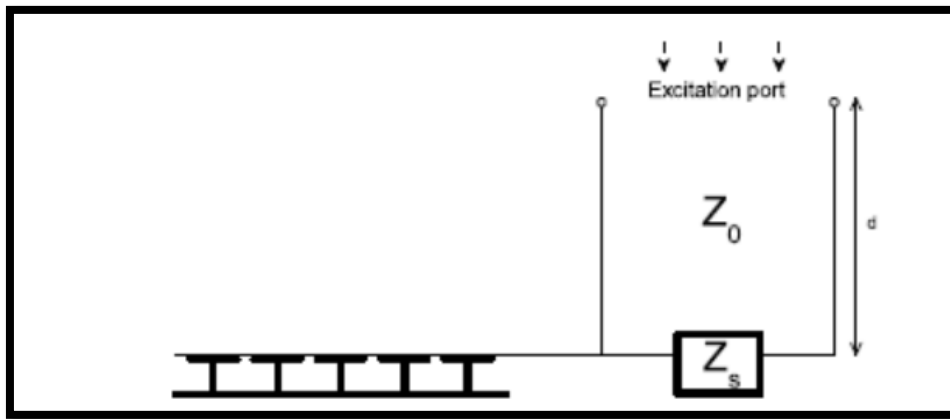
$$Z_L = Z_0 * \left( \frac{Z_S + j \tan(\beta d)}{Z_0 + Z_S j \tan(\beta d)} \right) \quad (2.26)$$

$Z_S$  : est l'impédance de surface de la structure HIS.

$d$ : la distance entre le port d'excitation et la surface de la structure HIS.

$\beta$  : la constante de propagation dans l'espace libre.

Si le vecteur d'onde incident est perpendiculaire à la surface HIS et que la surface d'observation est située sur la surface supérieure de HIS, alors le coefficient de réflexion de l'équation 2.27 peut être simplifié



**Figure2.10** : Modèle pour le calcul de la phase de réflexion[45]

$$\Gamma_{HIS} = \frac{Z_S - Z_0}{Z_S + Z_0} \quad (2.27)$$

La phase  $\theta_{HIS}$  peut être formulé comme :

$$\theta_{HIS} = \tan^{-1} \left( \frac{Z_S - Z_0}{Z_S + Z_0} \right) \quad (2.28)$$

## 2.7 Structure périodique en forme de champignon

La structure périodique en forme de champignon carré peut être considérée comme les structures HIS classiques, qui ont été étudiées en premier et largement la figure 2.11 [46].

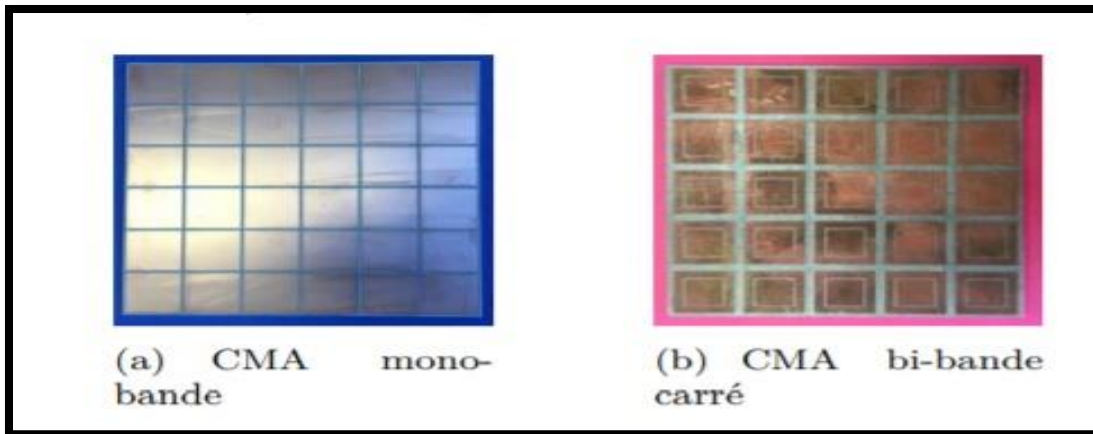


Figure 2.11 : Deux exemples de CMA [46]

Ceci est principalement dû à sa simplicité, flexibilité et une bande passante relativement plus large par rapport à d'autres géométries simples [47]. Comme mentionné, le mécanisme de fonctionnement des structures HIS peut être expliqué par un réseau LC équivalent.

La Figure 2.12 montre une courbe de phase pour une structure HIS en champignon. Autour de la résonance, il arrive que  $Z_S$  soit beaucoup plus grand que  $Z_0$ , pour que la valeur de  $Z_0$  puisse être négligée. Cela signifie que l'onde réfléchie par les structures HIS, en comparaison avec l'onde incidente, peut avoir  $\Gamma_{\text{HIS}} \approx 1$  et  $\theta_{\text{HIS}} \approx 0^\circ$  dans une certaine plage [45].

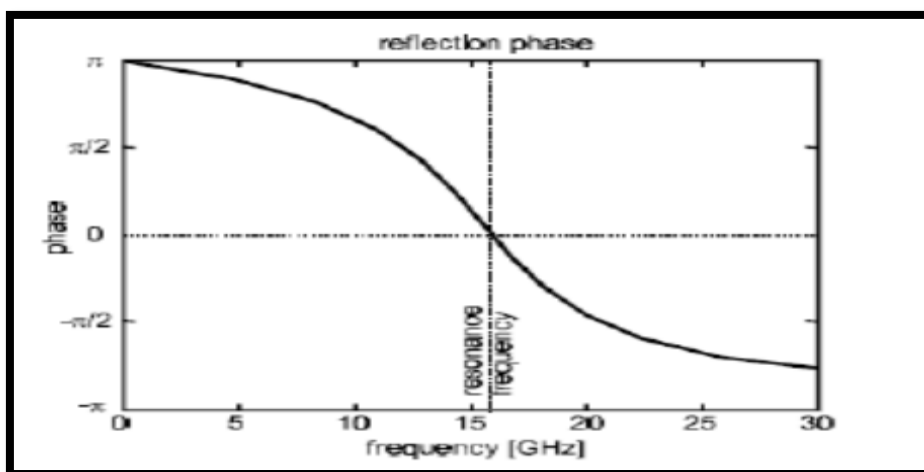
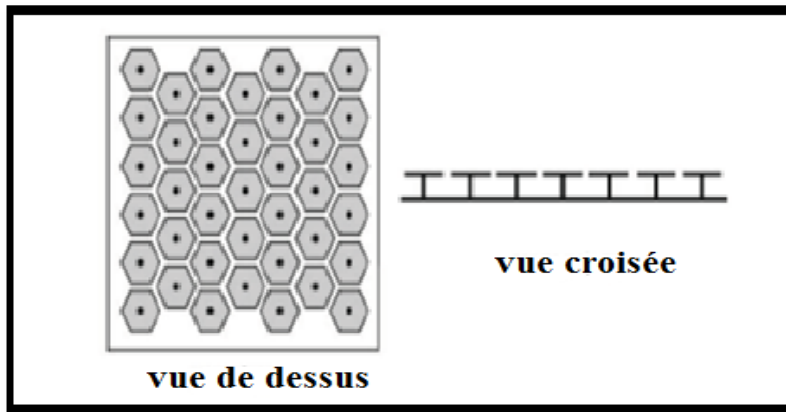


Figure 2.12 : Courbe de phase pour une structure HIS en champignon [45]

La résonance de la structure peut être réglée en modifiant la capacité effective et l'inductance effective, qui dépendent des paramètres géométriques. Afin d'obtenir une



résonance plus faible, une structure HIS avec des taches hexagonales sur le dessus est proposée dans [48], comme le montre la figure 2.13.



**Figure 2.13:** Géométrie d'une structure hexagonale en forme de champignon [48]

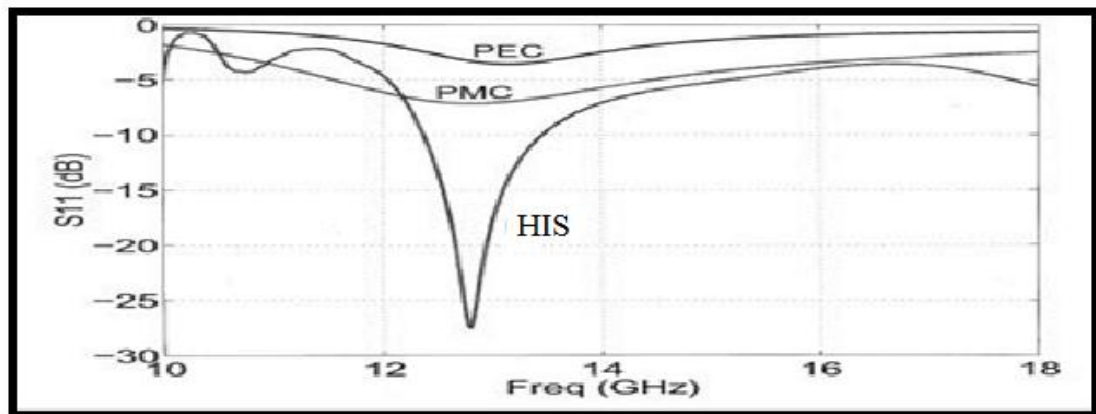
Pour une structure de champignon, une résonance plus faible peut être acquise par la configuration de grandes pièces avec un espace extrêmement petit entre les pièces voisines. En effet, un espace long et mince entre les patches voisins donne une capacité plus élevée que l'espace court et large.

Cependant, ce type de structures HIS ne sont pas dans une bonne immunité à la variation de l'angle d'incidence. Puisque la surface supérieure de cette structure est presque entièrement recouverte de matériau métallique, l'onde incidente ne peut pas facilement pénétrer dans le substrat à travers les fentes minces sur le dessus. Par conséquent, une petite variation de l'angle peut provoquer un grand changement dans les résultats.

## 2.8 Comparaison (PEC/PMC/HIS)

Les surfaces PEC, PMC et HIS / EBG sont chacune utilisées comme plan de masse pour la conception d'une antenne à profil bas. Pour certains travaux de recherches des auteurs ont comparé la perte de retour d'une antenne patch sur ces trois plans de masse par une simulation numérique. Leurs résultats sont présentés à la Figure 2.14 comme mentionné précédemment. Le plan de masse PEC peut provoquer un courant d'image inversé qui entrave l'efficacité du rayonnement du patch, conduisant à une perte de rendement. Pour le plan de masse PMC bien que la réflexion sur le plan soit en phase, un fort couplage mutuel se produit entre le courant d'image et le patch, en raison de leur proximité [3].

Parmi ces trois cas, la meilleure perte de retour est obtenue dans le cas d'un plan à haute impédance (HIS). Sur une certaine plage de fréquences, la structure HIS se comporte comme un conducteur magnétique parfait avec une bonne adaptation d'impédance à une entrée normale. C'est pourquoi les structures à haute impédance sont également connues sous le nom de "Conducteurs Magnétiques Artificiels (AMC)".



**Figure 2.14:** FDTD simulé résultats de perte de retour d'une antenne dipôle sur le PEC, PMC et Avions au sol HIS [3]

## 2.9 Applications

Il est connu que les structures HIS peuvent restreindre la propagation des courants de surface, tout en se comportant simultanément comme des parois magnétiques proches de leurs résonances. En raison de ces deux caractéristiques remarquables, les structures HIS sont appliquées dans toutes sortes d'antennes, telles que les antennes GPS dans les systèmes de télécommunication [49], dans l'aéronautique, etc. Surtout, ils ont été très utilisés comme plans de masse dans la conception d'antennes à profil bas. La structure HIS elle-même peut fonctionner comme une antenne.

De plus, en compatibilité électromagnétique (CEM), ils peuvent servir à supprimer le bruit de commutation, réduire le couplage mutuel entre éléments adjacents, ou améliorer le taux d'absorption spécifique de l'antenne sans fil [3].

## 2.10 Conclusion

Au cours des dernières années, un nombre croissant de chercheurs ont prêté attention aux matériaux électromagnétiques artificiels en raison de leur fonction particulière. Les matériaux électromagnétiques artificiels tels que le conducteur magnétique artificiel (**AMC**), qui jouent un rôle important dans l'ingénierie des micro-ondes et des antennes.

Dans un ce chapitre, nous avons présenté des structures artificielles ( un conducteur électrique parfait (CEP ,PEC) et un conducteur magnétique parfait (CMP, PMC) ) qui sont la base de l'apparition de la cellule AMC, leur paramètres ,leur performances. Nous avons étudié, une structure AMC périodique en forme de champignon, ensuite nous fait une étude comparative entres les structures (**PEC/PMC/AMC** ).

---

# Chapitre 3

---

---

---

## -Chapitre 3

---

---

### *Les résultats de simulation*

---

---

#### 3.1 Introduction

Les antennes patch sont préférées dans la plupart des applications commerciales et militaires en raison de leurs propriétés comme conformabilité, profil bas, poids léger, structure plane, diagramme de rayonnement latéral et faible coût. Ils ont des limites comme une largeur de bande d'impédance étroite, un faible gain et l'opérabilité seulement dans les applications de faible puissance [50].

Au cours des dernières années, les conducteurs magnétiques artificiels (AMC) ont attiré l'attention de la communauté de la recherche en raison de leur applicabilité en augmentant le gain, en réduisant le rayonnement du lobe arrière, élargissement de la bande passante et réduction de la taille de l'antenne [51]

Les conducteurs sont de bons réflecteurs. Comme le plan de masse de l'antenne est généralement un bon conducteur, il agit comme un réflecteur pour les rayonnements qui frappent sa surface; améliorant ainsi le gain d'antenne.

Dans ce chapitre, un conducteur magnétique artificiel (AMC) est utilisé pour améliorer le gain de l'antenne patch micro ruban. La conception est analysée à l'aide de la technique d'intégration finie (FIT) intégrée dans le progiciel Computer Simulation Technologie (CST).

#### 3.2 CST MICROWAVE STUDIO

CST MICROWAVE STUDIO (CST MWS) est un outil spécialisé pour la simulation électromagnétique 3D de composants hautes fréquences. CST MWS permet l'analyse rapide et précise des dispositifs à hautes fréquences (HF) tels que les antennes, les filtres, les coupleurs, les structures planaires et multicouches. Exceptionnellement convivial, CST MWS nous donne rapidement un aperçu du comportement EM de nos conceptions hautes fréquences.

CST favorise la technologie complète pour la 3D EM. Les utilisateurs de ce logiciel disposent d'une grande flexibilité pour aborder une large gamme d'applications grâce à la variété des technologies de solveur disponibles.

De plus, CST MWS peut être intégré à divers flux de production standard de l'industrie via l'interface utilisateur CST STUDIO SUITE [52]. CST MICROWAVE STUDIO est considéré par un nombre croissant d'ingénieurs comme un outil de développement standard.

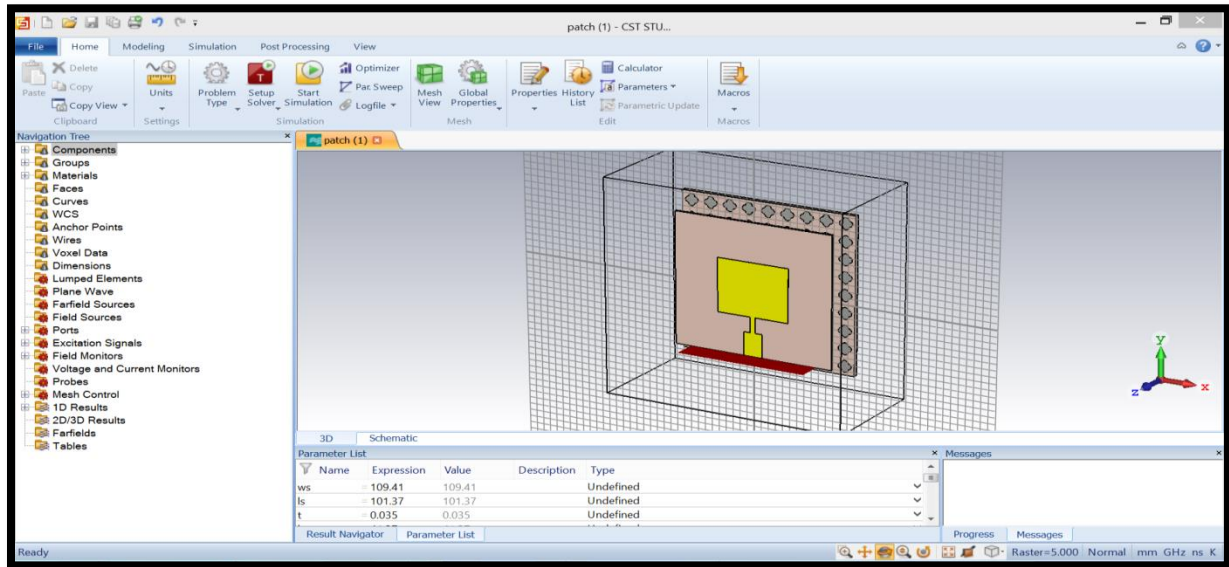


Figure 3.1: Interface graphique de micro-ondes Studio.

### 3.3 Conception et Simulation

#### 3.3.1 Conception et Simulation d'antenne patch

La structure de l'antenne patch proposée est représentée sur la figure 3.2. Dans ce travail, l'antenne patch de forme hexagonal est conçue sur le substrat époxy FR-4 avec une épaisseur  $h = 1.6$  mm, une permittivité diélectrique relative de  $\epsilon_r = 4,3$  et une tangente de perte de  $0,025$ ). L'impédance caractéristique de la ligne de transmission est  $50\Omega$ .

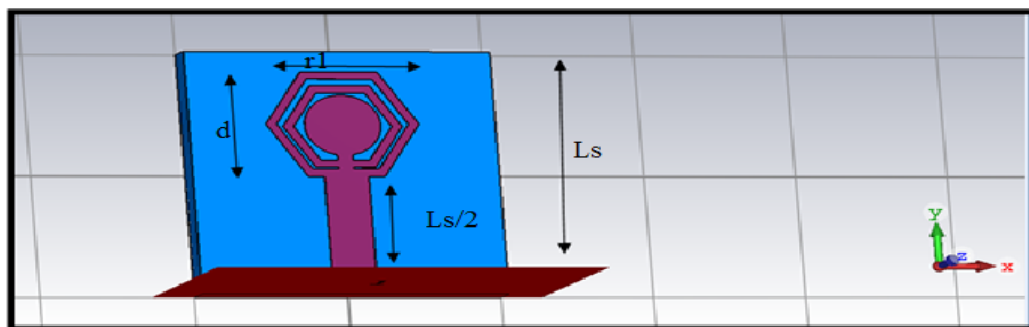


Figure 3.2: Structure de l'antenne patch proposée

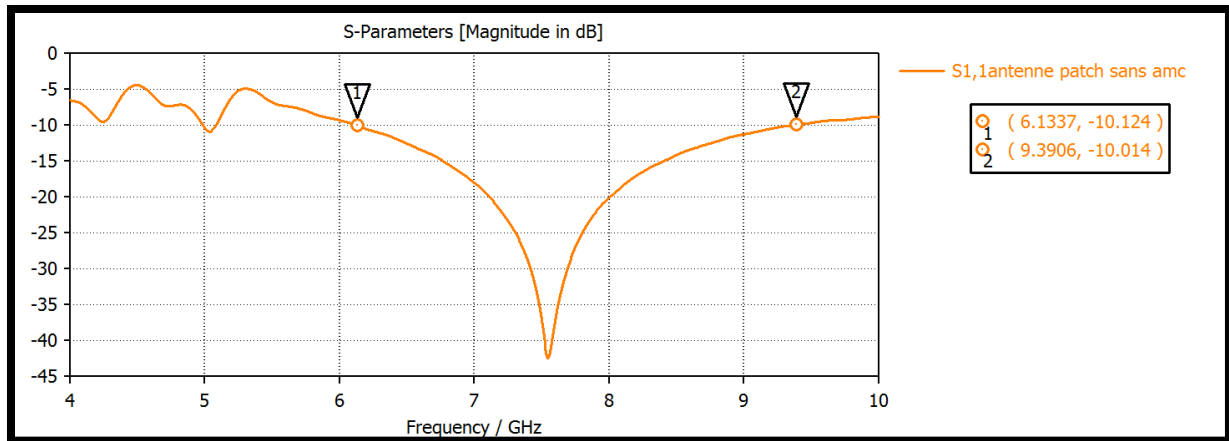
Les dimensions de l'antenne patch sont présentées sur le tableau 3.1

**Tableau 3.1:** Les dimensions de l'antenne proposée

Paramètres	Dimensions (mm)
Ls	20
T	0.017
h	1.6
r1	5
r2	4.3
r3	3.9
r4	3.2
r5	2.5
D	4
d1	3.8
d2	3.9
W	2.9
Wp	1
K	7.04

Le coefficient de réflexion est un paramètre qui permet de quantifier la quantité du signal réfléchi par rapport au signal incident.

Le coefficient de réflexion de l'antenne patch sans AMC comme est indiqué dans la figure 3.3, la perte de retour est inférieure à -10 dB dans la bande passante comprise entre 6.13 GHz et 9.39 GHz. Ce qui est suffisant pour couvrir l'antenne patch de 7.6 GHz avec une bande passante d'impédance comprise entre l'application de détermination radio et système de défense. Cette antenne a trouvé des applications pour l'application en bande C.



**Figure 3.3 :** Coefficient de réflexion  $S_{11}$  de l'antenne patch.

Pour calculer la fréquence de résonance d'antenne, on utilise l'équation suivante :

$$F_0 = \frac{F_1 + F_2}{2} \quad (3.1)$$

Donc :

$$F_0 = 7.6 \text{ GHz}$$

La bande passante de cette antenne est donnée par :

$$\Delta F = F_2 - F_1 \quad (3.2)$$

$$\text{Alors } \Delta F = 3.26 \text{ Ghz}$$

$$FBP\% = \frac{\Delta F}{F_0} \times 100 \quad (3.3)$$

Donc :

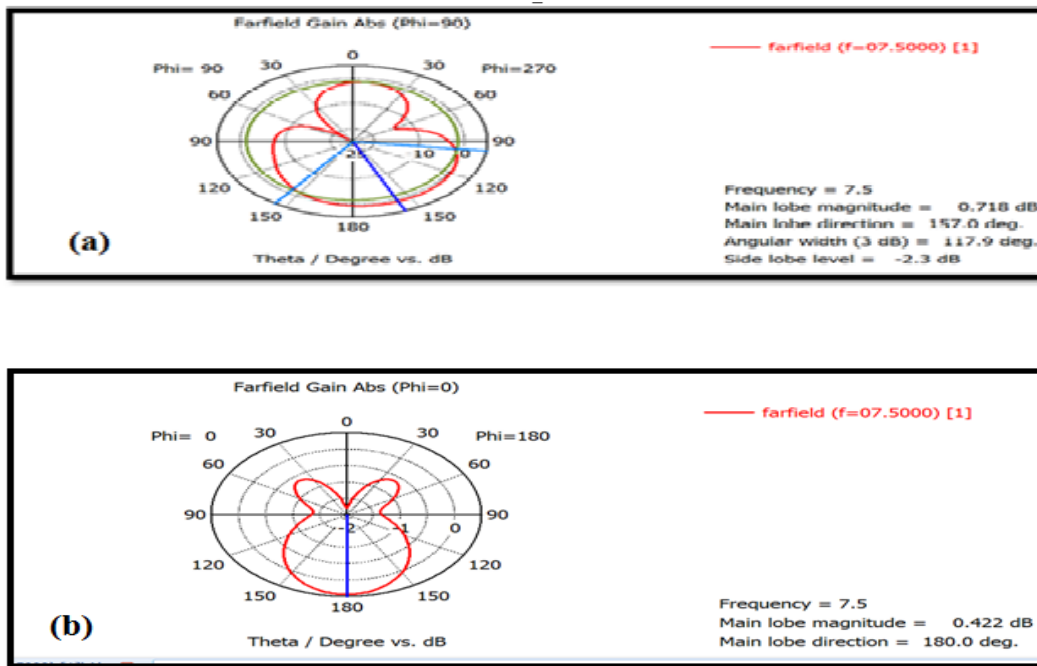
$$FBP\% = 42.8\%$$

Dans la figure 3.4, on trace le diagramme de rayonnement du gain en coordonnées polaires à la fréquence 7.5 GHz pour  $\phi = 90^\circ$  et  $\phi = 0^\circ$ .

Dans le cas pour  $\phi = 90^\circ$ , un lobe principal a la direction  $\theta = 157^\circ$  et possède un gain égale 0.718 dB.

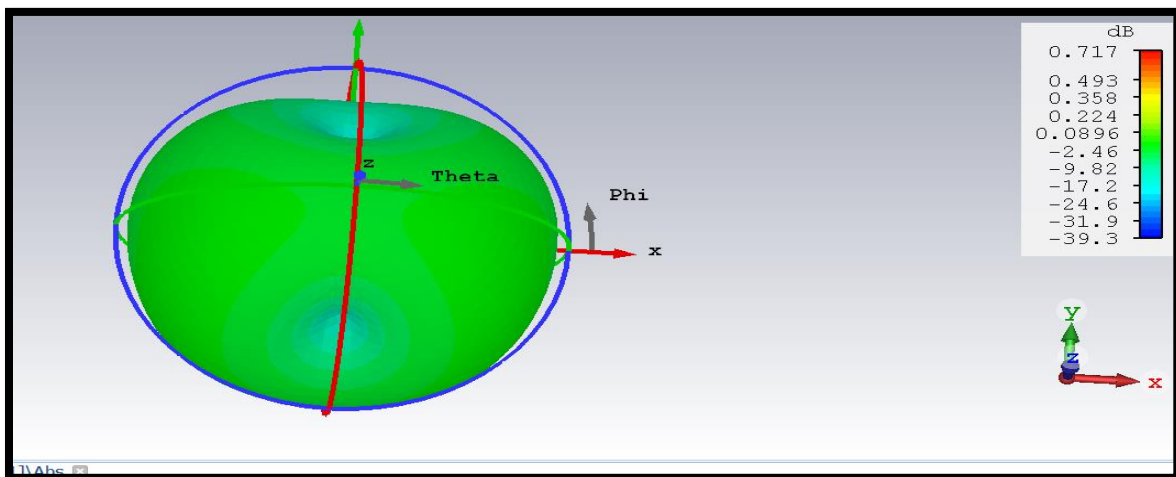
Pour  $\phi = 0^\circ$ , le lobe principal présente une direction  $\theta = 180^\circ$  et un gain faible de 0.422 dB.





**Figure 3.4:** Diagramme de rayonnement polaire à  $f = 7.5$  GHz, (a)  $\phi = 90^\circ$ .  
 (b)  $\phi = 0^\circ$ .

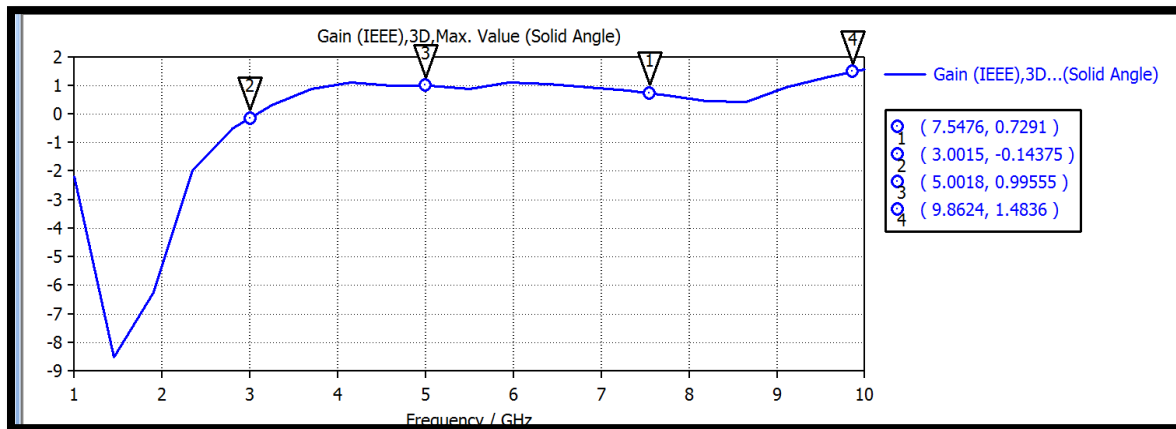
La figure 3.5 illustre le diagramme de rayonnement en 3D à la fréquence  $f = 7.5$  GHz, on remarque qu'à cette fréquence, la valeur de gain maximale est égale 0.717 dB.



**Figure 3.5 :** Diagramme de rayonnement en 3D a la  $f=7.5$  GHz

Dans la figure 3.6, on représente la courbe du gain en fonction de la fréquence de l'antenne patch seul sans AMC, on remarque que le gain dans la bande passante (5 -10 GHz)

varie entre 0.99 dB et 1.48 dB, la valeur maximale atteinte du gain réalisé est d'environ de 1.48 dB à la fréquence 9.86 GHz.



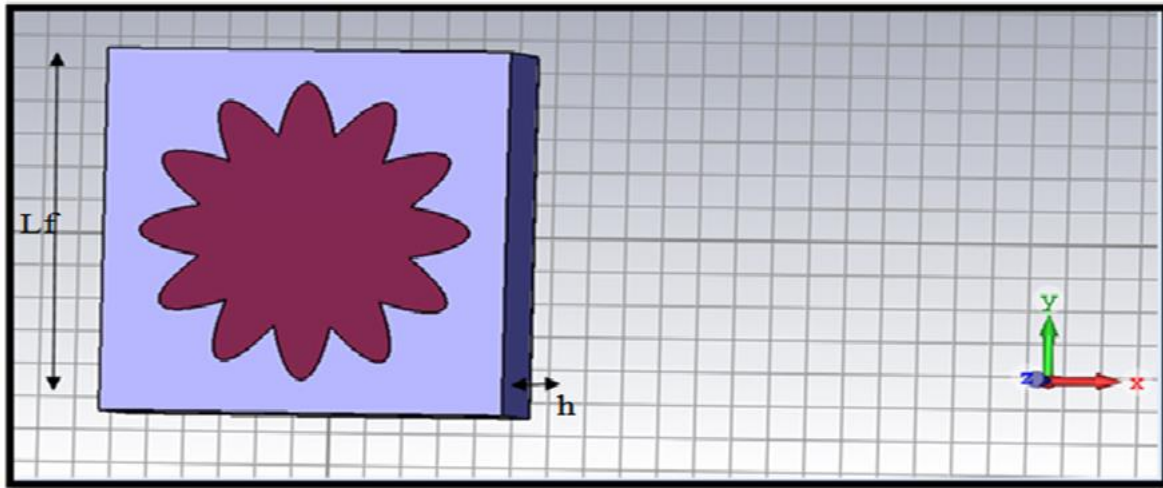
**Figure 3.6 :** Le Gain d'antenne patch sans AMC.

### 3.3.2 Conception et simulation de cellule d'AMC

La cellule AMC est conçu sur le substrat RT5880 de Rogers avec une épaisseur de  $h=3,5$  mm, une permittivité relative de 2,2 et une tangente de perte de 0,0009. La topologie d'AMC est constituée d'élément circulaire avec des éléments elliptiques combinées ensemble comme illustré à la Figure 3.7. Les dimensions de la cellule unité AMC proposées sont indiquées dans le tableau ci-dessous 3.2.

**Tableau 3.2:** Dimensions de la cellule unité AMC

Paramètre	Dimension (mm)
Lf	11
A1	2.2
A2	1
T	0.017
h	3.5

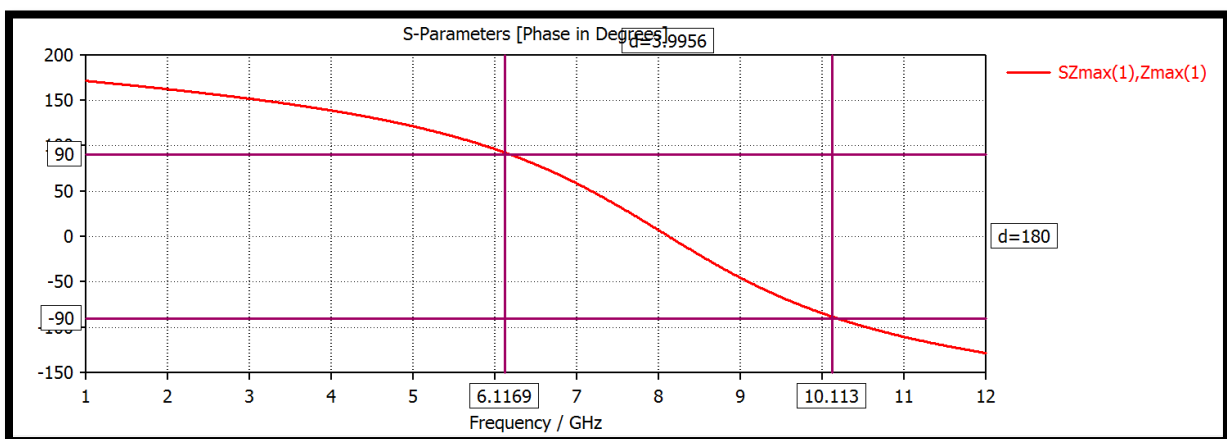


**Figure 3.7 :** La cellule élémentaire AMC proposée.

Un conducteur magnétique artificiel (CMA) est défini dans la bande de fréquence à l'intérieur de laquelle, la phase du coefficient de réflexion est comprise entre  $-90^\circ$  et  $90^\circ$ , c'est-à-dire dans la bande de fréquence où se produisent des interférences constructives entre l'onde incidente et l'onde réfléchie.

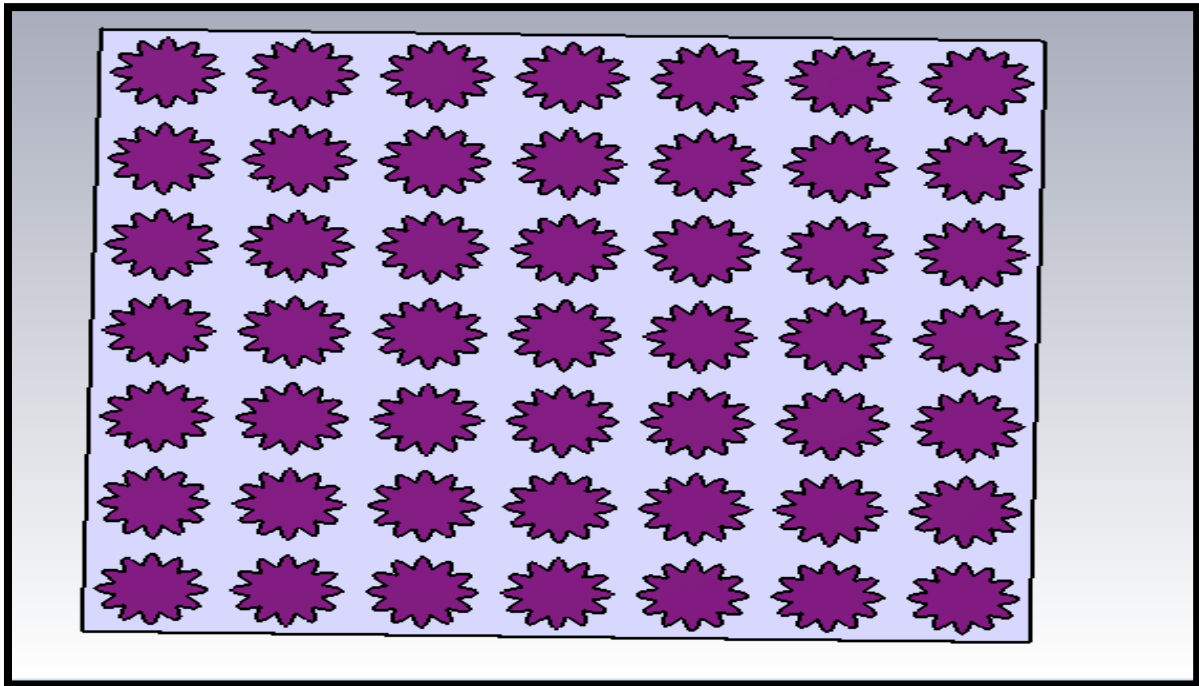
La fréquence de résonance est obtenue lorsque la phase du coefficient de réflexion est égale à  $0^\circ$ . de 8.11 GHz. La bande passante d'une cellule d'unité AMC est généralement définie entre les deux côtés de la fréquence centrale. Dans ce travail, la bande passante entre  $+90$  et  $-90$ , est 6.11GHz et 10.11 GHz

Donc la bande passante de la surface de AMC est : **FBP %=49.32%**



**Figure 3.8 :** La phase du coefficient de réflexion de la cellule AMC.

Le plan AMC utilisé est formé d'un réseau de  $7 \times 7$  cellules unitaires, comme illustré à la Figure 3.9.

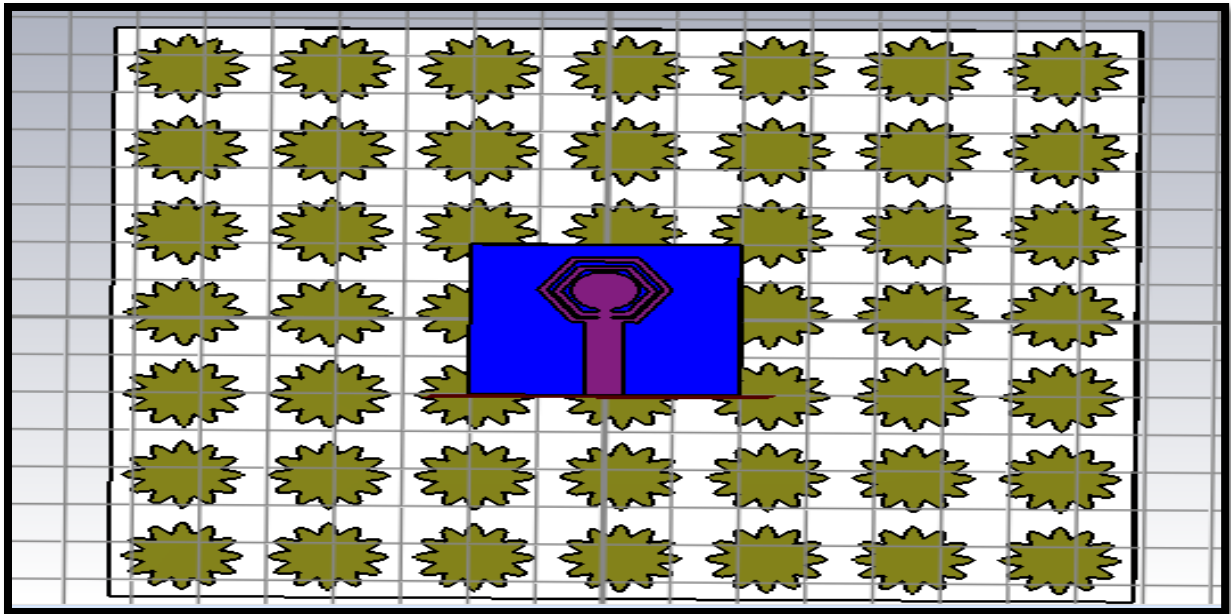


**Figure 3.9 :** Surface AMC composée de  $7 \times 7$  cellules unitaires.

### 3.3.3 Conception et simulation d'antenne avec AMC

L'antenne patch hexagonal présentée dans la figure 3.2 est placée au-dessus de la structure AMC proposée formée par un réseau de  $7 \times 7$  cellules unitaires Figure 3.9 .Pour atténuer la transmission de l'onde électromagnétique et renforcer d'avantage le rayonnement direct, un surface AMC agissant comme un réflecteur en phase pour l'antenne proposée est ajouté.

Comme le montre la Figure 3.10, une couche d'air d'espacement  $hz$  entre le sommet de la surface de l'AMC et le bas de l'antenne est ajouté pour contrôler les performances de l'antenne.



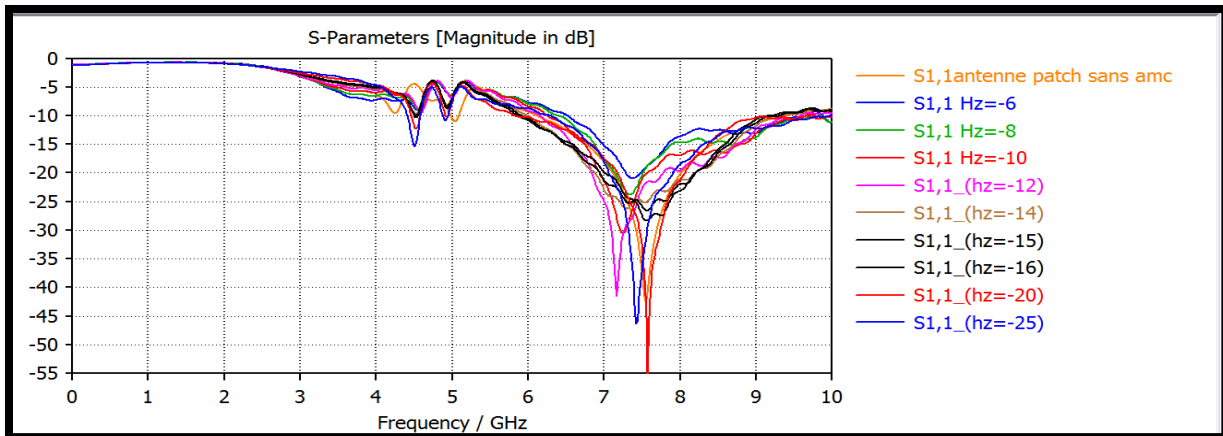
**Figure 3.10:** Antenne patch avec AMC.

### 3.3.3.a Etude de l'effet de la couche d'air entre antenne et la surface AMC

Cette antenne convient à la plupart des bandes C, elle est adaptée pour les télécommunications de radio, Wi-Fi, sans fil communications et radar.

Dans cette partie, on étudie l'influence de l'espacement entre l'antenne et la surface AMC en mm. La figure 3.11 montre l'évolution du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence de l'ensemble antenne-surface AMC pour différentes valeurs de la hauteur en mm dans le but d'améliorer la bande passante.

L'AMC joue le rôle de réflecteur de l'antenne en boucle adossée au rayonnement direct et ce avec une distance optimale entre l'antenne et la cellule AMC, la distance entre l'antenne et la surface AMC a un grand effet sur l'amélioration et l'ajustement de la bande passante de l'antenne.



**Figure 3.11 :** Coefficient de réflexion simulé de l'antenne proposée avec surface AMC pour différentes valeurs de la hauteur de la couche d'air.

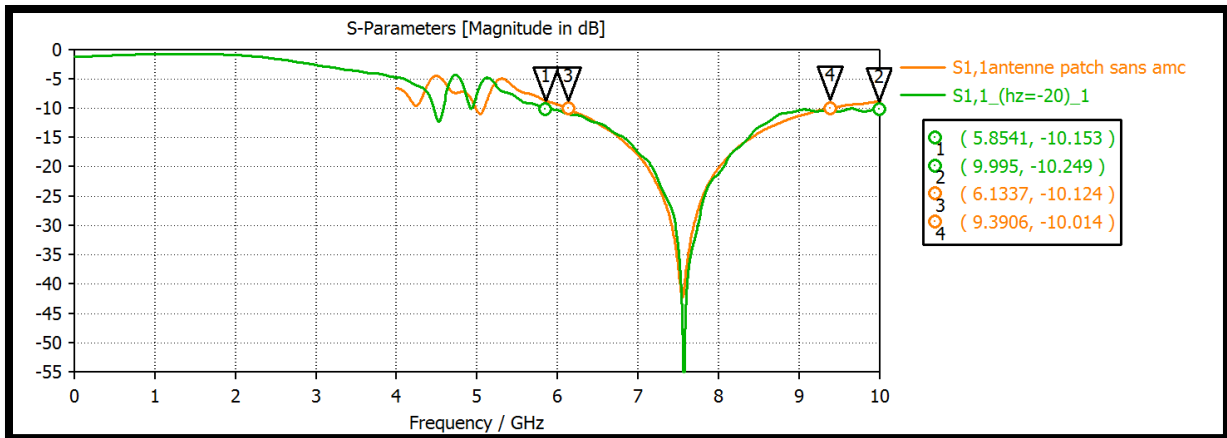
Dans le tableau 3.3 , on donne les résultats de l'influence de la hauteur de couche d'air ,entre la cellule AMC et l'antenne patch hexagonale, on remarque plus l'espacement hz augmente plus la largeur de la bande passante d'antenne est améliorée.

**Tableau 3.3:** variation de la bande passante en fonction de la hauteur hz

La couche d'air Hz(mm)	6	8	10	12	14	16	20
Bande passante (%)	41.68%	43.67%	45.20%	45.08%	43.42%	42.83%	55.30%

Le meilleur résultat obtenue de la bande passante de l'ensemble (antenne+AMC ) est de 55.3% pour un espacement optimal de 20 mm.

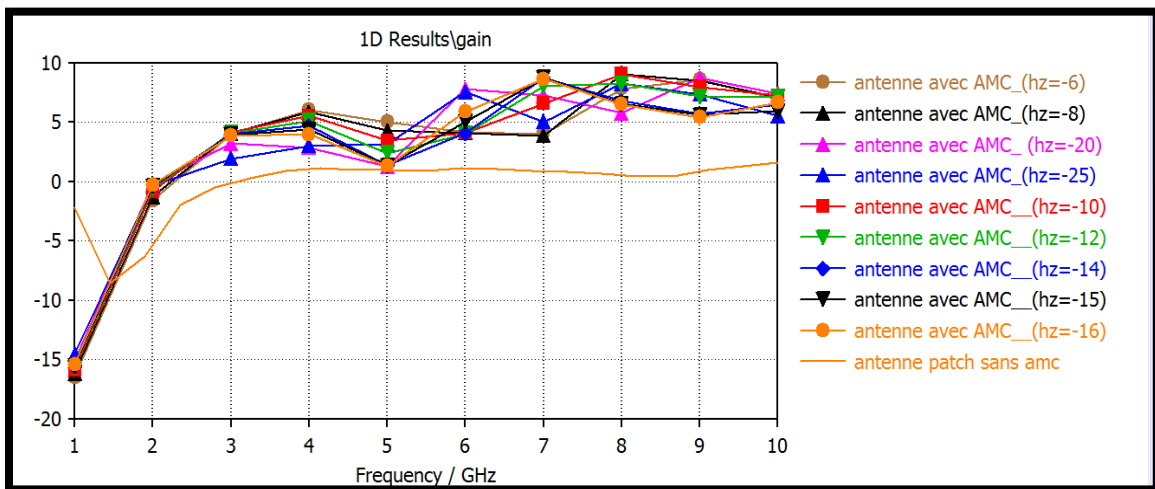
On remarque qu'après l'ajout d'une couche AMC distante de 20 mm de l'antenne , la bande passante fréquentielle passe de 42.8% à 55.3%. Les performances (adaptation, bande passante) de la structure complète ( antenne+AMC) sont meilleurs par rapport à celles de l'antenne seule (Figure 3.12).



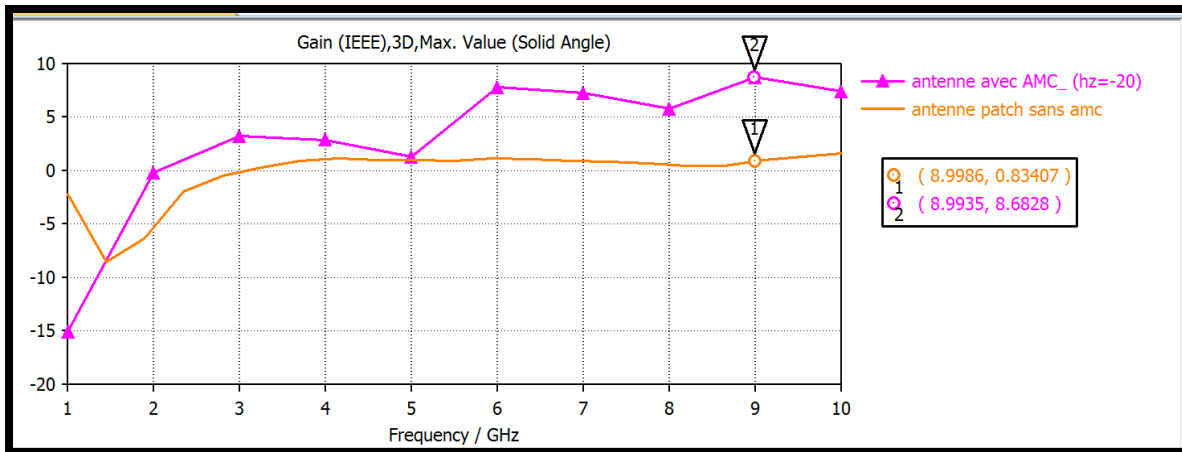
**Figure 3.12:** Coefficient de réflexion simulé de l'antenne proposée avec et sans surface AMC

Le gain simulé en fonction de la fréquence pour la structure complète (antenne+AMC) pour différentes valeur d' espacement entre l' antenne et la surface AMC et celui de l' antenne seul sont présentés dans la figure 3.13.

On remarque que le gain du couple antenne+AMC augmente d' une façon significative par rapport à l'antenne sans AMC .



**Figure 3.13:** Le gain simulé de l'antenne proposée sur l'AMC pour différentes valeurs *hz* entre l'antenne et la cellule de l'unité AMC



**Figure 3.14** : Gain simulé de l'antenne proposée avec et sans surface AMC.

La figure 3.14 montre une comparaison entre les résultats de l'antenne avec et sans surface AMC du gain pour une hauteur optimisée de la couche d'air choisie de valeur 20 mm. L'antenne au-dessus de l'AMC assure de bonnes performances. La surface AMC améliore le gain. Les valeurs du gain en fonction de la fréquence de l'antenne avec et sans AMC sont résumées dans le tableau suivant 3.4 :

**Tableau 3.4** : Valeurs du gain de l'antenne avec et sans AMC, pour différentes fréquences

Fréquence (GHz)	Gain (avec AMC) (dB)	Gain (sans AMC) (dB)
5	1.29	1.29
6.13	7.71	1.09
6	7.78	1.10
7	7.23	0.89
7.6	6.36	0.71
9	8.70	0.83
9.39	8.19	1.16

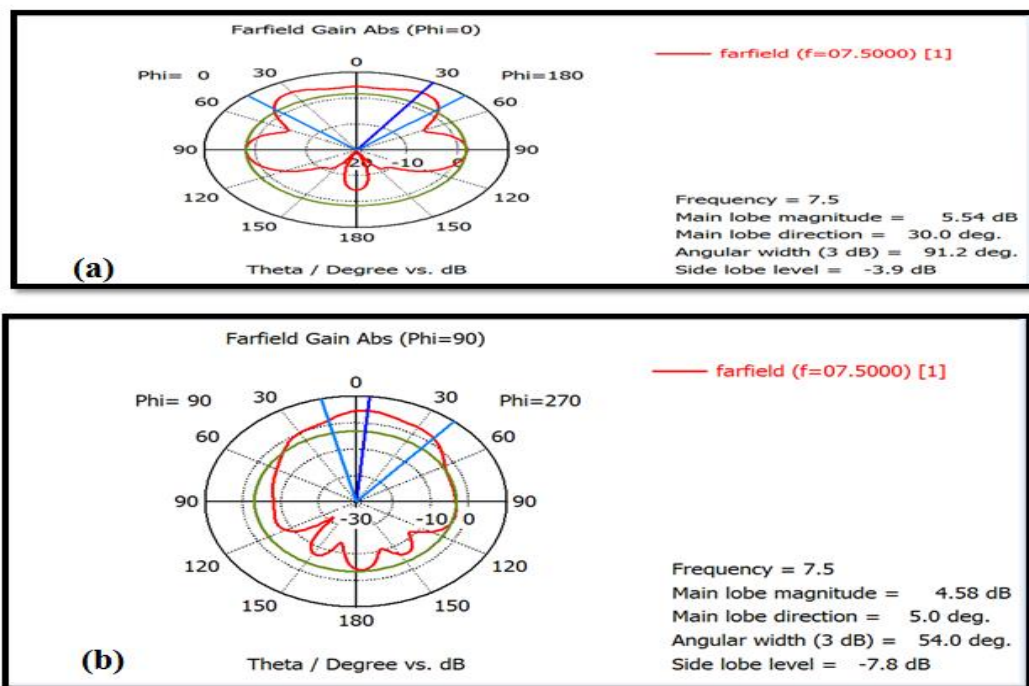
Le gain maximum atteint est d'environ 8.19 dB dans la bande de fonctionnement. Le gain maximum de l'ensemble de la structure (antenne+AMC) varie de 1.29 dB à 8.19 dB dans la bande de fonctionnement, ce qui donne une amélioration moyenne du gain d'environ 7 dB



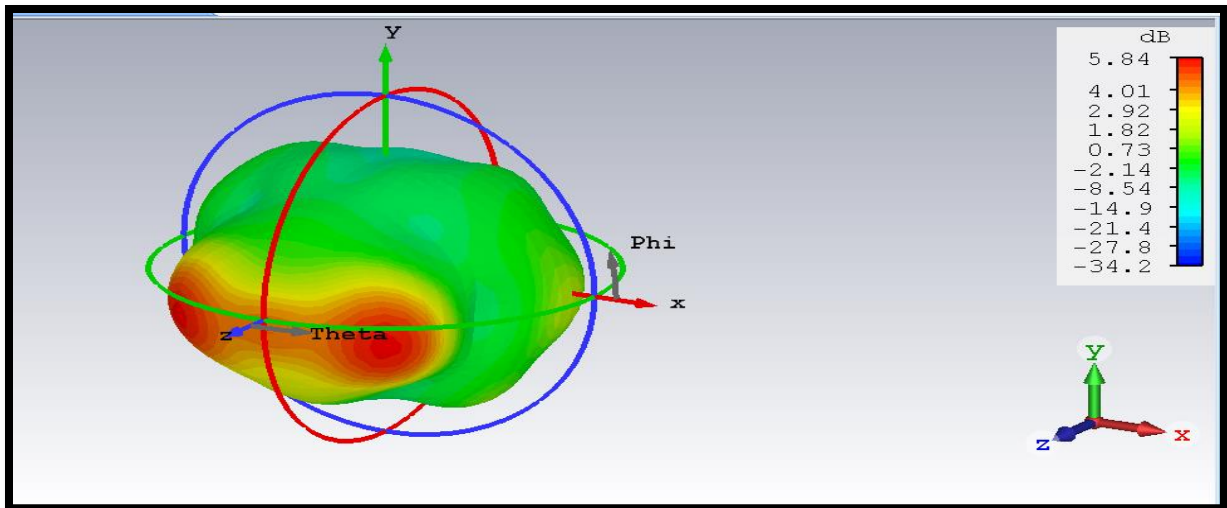
Le diagramme de rayonnement d'une antenne permet de visualiser les lobes dans deux ou trois dimensions, dans le plan horizontal ( $\phi=0^\circ$  ou dans le plan vertical ( $\phi=90^\circ$ ) incluant le lobe le plus important.

Les Figures 3.15 (a,b) illustrent le diagramme de rayonnement simulé de l'antenne avec AMC à  $f = 7,5$  GHz dans le plan H XY ( $\phi=0$ ) et plan E YZ ( $\phi=90$ ). Le diagramme de rayonnement en 3D est présenté dans la Figure 3.15.

- ✓ Pour  $\phi = 0^\circ$  le lobe principale de l'ensemble antenne+ AMC présente une amplitude de 5.54 dB (avec AMC) par rapport à l'antenne sans AMC qui possède un lobe principal dont l'amplitude est égale  $=0.422$  dB.
- ✓ Pour  $\phi = 90^\circ$  le lobe principal de la structure complète a une amplitude de 4.58 dB par rapport à celui de l'antenne seul qui est faible ( 0.71 dB).
- ✓ Le niveau du lobe secondaire est égal -3.9 pour  $\phi=0$  dB et -7.8 pour  $\phi=90$



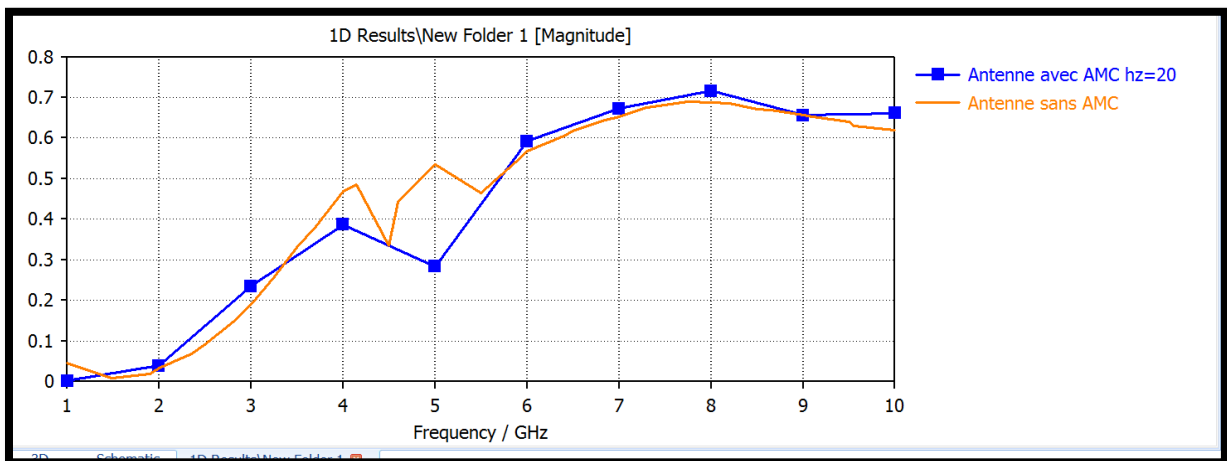
**Figure 3.15 :** Diagramme de rayonnement d'antenne avec AMC a la  $f=7.5$  GHz (a)  $\phi = 0^\circ$ .(b)  $\phi = 90^\circ$ .



**Figure 3.16** : Diagramme de rayonnement en 3D à  $f=7.5$  GHz

Nous remarquons d'après les résultats de simulations (Figure 3.16 ) que la structure complète (Antenna+AMC) présente un diagramme de rayonnement directif. En observant le diagramme de rayonnement 3D, on peut constater que la plupart du rayonnement est concentré dans la direction z .

Les résultats du rendement simulé de l'antenne avec et sans AMC sont résumés dans le tableau 3.5



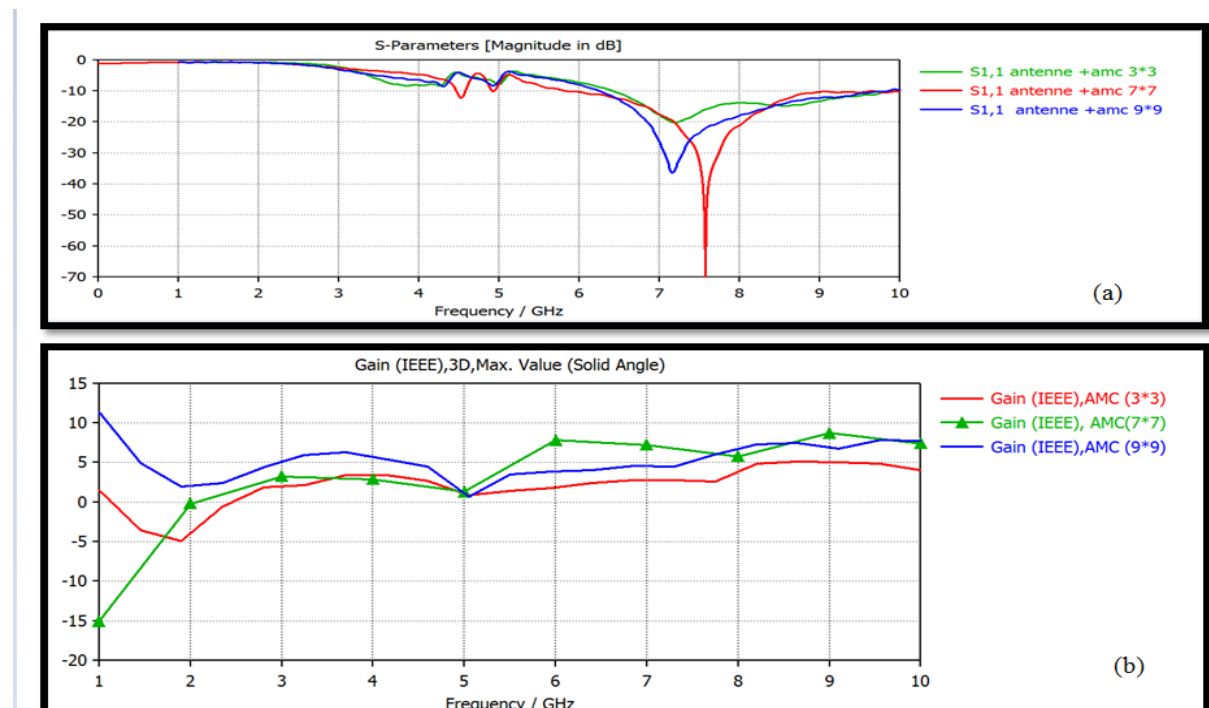
**Figure 3.17** :Le rendement simule de l’antenne avec et sans surface AMC

**Tableau 3.5 :** Les valeurs du rendement de l'antenne avec et sans AMC, pour différentes fréquences

Fréquence (GHZ)	Rendement ( sans AMC %)	Rendement ( avec AMC %)
5	53	28
7	65	67
7.5	68	69
8	69	71
10	61	66

### 3.4 Influence du nombre de cellule élémentaire d'AMC NxN

Dans cette section, on va étudier différents AMCs composés de plusieurs cellules unitaires des surfaces AMC composées de NxN cellules unitaires ont été réalisée (N=3, 7, 9). La figure 3.17 représente une comparaison entre les trois réseaux de cellule AMC (3x3, 7x7 et 9x9). On remarque que la surface AMC 7x7 donne un gain important dans la bande [5-8] par rapport aux cas 3x3 et 9x9



**Figure 3.18:** Comparaison du coefficient de réflexion et le gain de la structure complète simulé pour différentes surfaces formées de NxN cellules AMC (3x3, 7x7 , 9x9)

**Tableau 3.6:** les valeur du gain de cellule AMC(7x7)et cellule AMC(3x3) et cellule (9x9)

Fréquence (Ghz)	(Gain (AMC 3*3)(dB)	Gain (AMC 7*7)(dB)	Gain (AMC 9*9)(dB)
6	1.83	7.78	3.86
7.4	2.70	6.65	4.84
7.6	2.63	6.36	5.52
8	3.84	5.78	6.76
9	5.07	8.70	6.19
8	4.39	7.65	7.80

D'après les résultats du tableau 3.6 , La plus grande valeur du gain réalisé est de 8.70 dB à la fréquence 9 GHz et à la fréquence de résonance (6.65 dB) pour le réseau (7x7) .

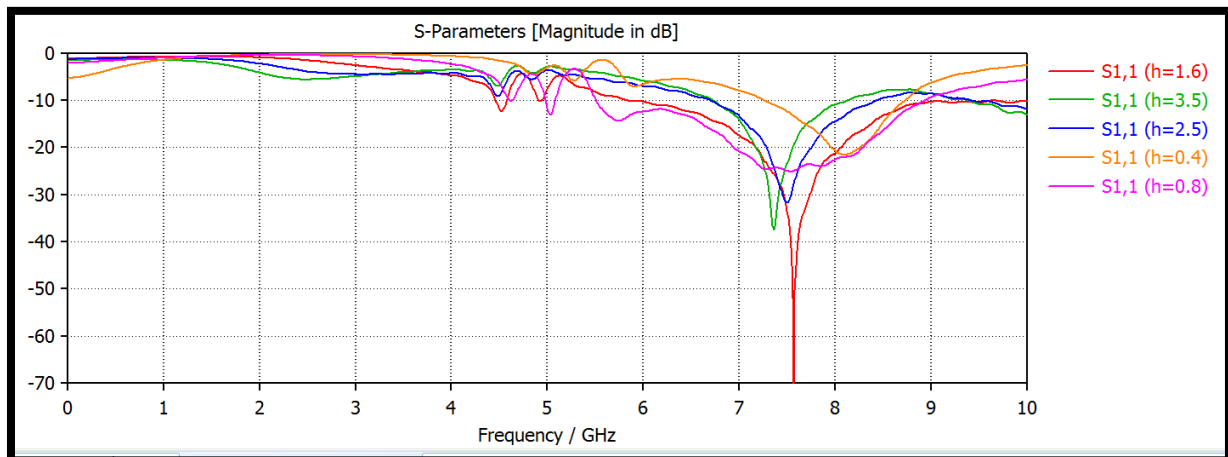
### 3.5 L'influence de l'épaisseur du substrat de l'antenne

Dans cette partie on va étudier l'effet de l'épaisseur du substrat epoxy FR-4 sur les caractéristiques et les performances de l'antenne (le coefficient de réflexion, la fréquence de résonance, bande passante et le gain). Les épaisseurs choisies de ce substrat sont : (h=0.4  $\mu\text{m}$ , h=0.8  $\mu\text{m}$  et h=1.6  $\mu\text{m}$ , h=2.5  $\mu\text{m}$  et h=3.5 $\mu\text{m}$ ).

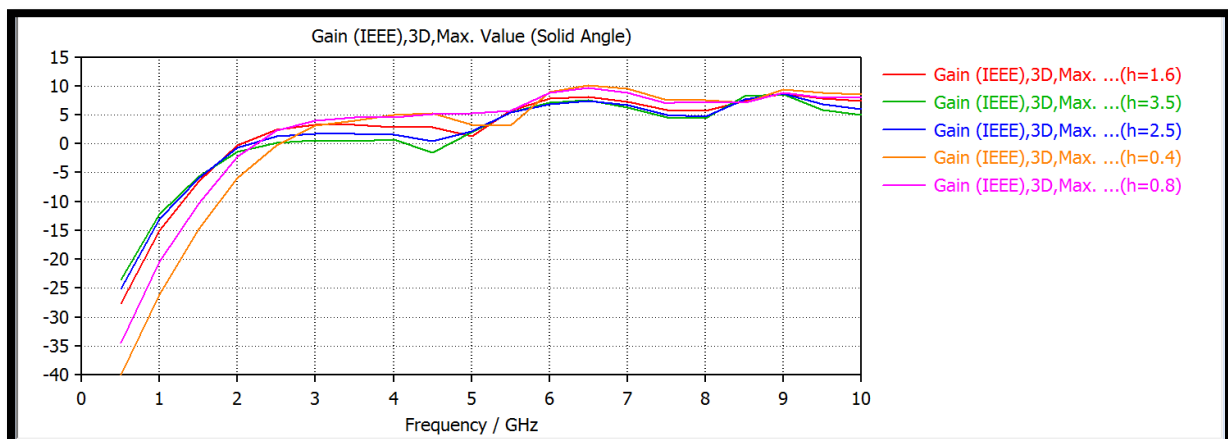
On observe une amélioration des résultats au niveau de l'adaptation, la bande passante, le diagramme de rayonnement du gain et le rendement pour les faibles épaisseurs (h=0.4  $\mu\text{m}$ , h=0.8  $\mu\text{m}$  et h=1.6  $\mu\text{m}$ ) (Tableau 3.7) .

**Tableau 3.7 :** Paramètres caractéristiques de la structure complète (Antenne+AMC) pour différentes épaisseurs du substrat de l'antenne.

Hauteur (mm)	Fréquence (Ghz)	S <sub>11</sub> (dB)	Gain max (dB)	Rendement (%)	BP %
0.4	7.6	-22	7.5	64	19.41
0.8	7.6	-25	7.09	77	45.33
1.6	7.6	-70	7.36	71	42.80
2.5	7.6	-31	7.39	58	23.37
3.5	7.6	-37	6.87	57	19.58



**Figure 3.19 :** Le coefficient de réflexion pour différentes valeurs de l' épaisseur du substrat de l' antenne



**Figure 3.20:** Le gain pour différentes valeurs de l' épaisseur du substrat de l' antenne

### 3.6 Interprétation et récapitulation des résultats

- ✓ L'antenne patch hexagonal sur le substrat époxy FR-4 d'épaisseur 1.6 mm a présenté une bande passante de 3.26 GHz (42.8%) et un gain faible (1.48 dB)
- ✓ Dans le but d'améliorer les caractéristiques de cette antenne, on a conçu une cellule AMC sur le DUROID 5880 d'épaisseur 3.5 mm dont la bande passante est 49.23%
- ✓ L'antenne est placée au dessus d'un plan réflecteur AMC optimal composé 7x7 cellules unitaires qui a assuré une amélioration des paramètres caractéristiques de l'antenne à savoir : un bon coefficient de réflexion, un gain satisfaisant, une bande

passante large comprise entre 5Ghz – 10GHz correspondant à 55.30% par rapport à l'antenne seule.

- ✓ De plus ,la structure complète a un diagramme de rayonnement directif .
- ✓ Elle a un gain important maximum 8.7dB.
- ✓ Le meilleur rendement atteint est égal à 71.5%.
- ✓ Le rayonnement est important pour les faibles épaisseurs du substrat de l' antenne
- ✓ En observant les diagrammes de rayonnement 3D, on peut constater que la plupart du rayonnement va dans la direction Z
- ✓ Les résultats simulés montrent que le gain d'antenne est amélioré par l'utilisation d'une surface AMC.

### 3.7 Conclusion

Dans ce chapitre , un conducteur magnétique artificiel (AMC) a été proposé. La structure AMC a été placée au-dessous de l'antenne patch hexagonale alimentée par une ligne microbande dans le but d' assurer de bonnes performances .La structure complète (antenne +AMC) présentant une configuration à faible épaisseur conçue et simulée à l'aide du simulateur CSTMWS a donné des résultats satisfaisants et a assuré une amélioration des caractéristiques de l' antenne . L' ajout de la surface AMC a améliorer énormément la bande passante , le gain, les performances de rayonnement de l'antenne tout en maintenant une bonne adaptation et une efficacité raisonnable.

---

# **Conclusion générale**

---

## Conclusion générale

---

---

Le domaine des télécommunications a connu un progrès technologique au cours des dernières années grâce à la forte demande de la population et de l'industrie. Parmi les applications de ce domaine qui ont attiré plus d'attentions sont les antennes. Elles sont des éléments indispensables pour assurer une opération d'émission ou de réception des ondes électromagnétiques dans l'atmosphère terrestre ou dans l'espace. Elles sont présentées dans tous les systèmes de communication sans fil.

Par conséquent, récemment, de nombreuses antennes patch ont été proposées pour des systèmes de communication tels que WIFI, WIMAX, WLAN, Radar, et ainsi de suite. Cependant, ce type d'antennes souffre de plusieurs problèmes, tels qu'une bande passante étroite, un faible gain, un faible niveau d'isolation et une polarisation croisée élevée.

Les structures périodiques artificielles électromagnétiques (AMC, BIE) qui empêchent ou aident la propagation d'ondes électromagnétiques dans une bande de fréquence pour tous les angles d'incidence et tous les états de polarisation ont reçu une attention considérable ces dernières années.

Ces surfaces conductrices magnétique artificielle (AMC) peuvent apporter des évolutions très intéressantes. Ces structures sont développées, pour répondre aux besoins d'amélioration des paramètres caractéristiques de l'antenne, des découplages entre éléments rayonnants et de miniaturisation des antennes.

Elles ont également la capacité d'augmenter le gain, d'élargir la bande passante lorsqu'il est utilisé comme réflecteur arrière pour les antennes. La cellule AMC pourrait également bloquer la propagation des ondes électromagnétiques dans certaines bandes de fréquences.

En effet, l'une des principales applications des structures AMC, connue aussi comme surface à haute impédance (HIS : High Impedance Surface), est de concevoir des antennes à faible épaisseur et de hautes performances (large bande passante, amélioration de gain, ...). Dans ce cas, ces structures artificielles servent de plan de masse pour l'antenne. En effet, les plans de masse sont nécessaires dans de nombreux systèmes de communication pour protéger les appareils électroniques, situés sous l'antenne et aussi pour augmenter le gain de l'antenne.



Ce travail avait pour but d'étudier l'effet d'une cellule conductrice magnétique artificielle AMC qui est utilisée comme un réflecteur au-dessous de l'antenne imprimée proposée, sur les performances de l'antenne .

En premier lieu, une conception d'une antenne de forme hexagonal a été proposée, mais, les résultats obtenus sont insuffisant et inacceptables, car cette antenne souffre d'un rétrécissement de la bande passante et de la faiblesse du gain (Gain maximal de 1.16 dB) . Pour résoudre et surmonter ces problèmes, on a opté à utiliser des structures périodiques conductrices magnétiques artificielles qui servent comme réflecteurs ou plan de masse pour l'antenne .

Pour ce faire, on a utilisé un logiciel de simulation électromagnétique CSTMWS qui est basé sur la méthode d'intégration finie qui nous a facilité la construction et le développement d'une cellule AMC de forme quelconque sur le DUROID 5880 d'épaisseur 3.5 mm qui présente une large bande passante de valeur 49.23% .

Ensuite, l' antenne est placée au dessus d' un plan réflecteur AMC composé 7x7 cellules unitaires. Une couche d'air est insérée entre l'antenne et la structure AMC pour améliorer le coefficient de réflexion et le gain.

Les résultats de simulation obtenus de la structures complète (antenne+AMC) montrent que les diagrammes de rayonnement sont plutôt directifs pour certaines fréquences, le couple antenne-AMC rayonne dans la direction de l'axe Z avec un angle d'ouverture de 91.2 deg ,le gain est de l'ordre de 6.36 dB à la fréquence de résonance 7.6 GHz et 8.19 à la fréquence 9.36 GHz pour la structure complète (Antenne+AMC). Le coefficient de réflexion qui a une valeur -55 dB à la fréquence 7.6 GHz, ce qui confirme que la structure complète est bien adaptée. Une bonne amélioration de la bande passante est obtenue, elle atteint 55.30% par rapport a celle de l'antenne seule sans AMC 42.8%.

On a étudié l' influence de l'épaisseur du substrat de l'antenne sur les performances de l' ensemble antenne patch-AMC , les résultats obtenus ont montré que les antennes ayant des faibles épaisseurs conçues présentent de très bonnes performances en termes de largeur de bande, gain et efficacité .Finalement, on a associé différents structures AMCs composés par un réseaux (NxN) cellules unitaire (N=3,7,9) à l' antenne conçu, on a remarqué que la structure AMC optimale 7x7 donne des bons résultats par rapport aux surfaces de réseaux ( 3x3 )et( 9x9 ).

A partir de ce travail quelques perspectives peuvent être envisagées :

- ✓ L'application des structures SHI dans le domaine de la compatibilité électromagnétique
- ✓ La réduction des couplages entre antennes
- ✓ Conception d'antenne compacte
- ✓ Utilisation de l'alimentation par ligne coplanaire CPW
- ✓ L'ajout d'une reconfiguration de l'antenne.

---

# **Bibliographie**

---

*Bibliographie*

---

---

- [1] BENAMANE Fouad, "Conception d'un Patch Microstrip ", Master Télécoms hyperfréquence, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah (Fès) Maroc, Maroc, 2011.
- [2] Kanane Hocine, "Etude Des Métamatériaux Pour Antennes Intégrées Soumises A Des Perturbations Electromagnétiques", Thèse De Doctorat, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, Décembre 2015
- [3] Sarawuth Chaimool, Chawalit Rakluea and Prayoot Akkaraekthalin , " Compact wideband microstrip thinned array antenna using EBG superstrate", AEU- Int. J.
- [4] M. Mantash, A. C. Tarot, S. Collardey, and K. Mahdjoubi, "Dual-band CPW-fed G-antenna using an EBG structure", in Antennas and Propagation Conference (LAPC), pp. 453–456, Loughborough, UK, 2010.
- [5] Gabriel Cormier, "Propagation d'ondes", Université de Moncton, Hiver 2012.
- [6] G. Kumar and K. P. Ray, "Broadband micro strip antennas," ArtechHouseBoston. London 2003.
- [7] V. Planisamy and R. Garg, "Analysis of arbitrarily shaped microstrip patch antennas using segmentation technique and cavity model ", IEEE Transactions on Antennas and Propagations, Vol. AP-34, N°. 10, Octobre 1986.
- [8] Ahmad Mabrook Ali Saad, "Chapter 3, Dual-Band Microstrip Loop Antenna for Wireless Application", (Unpublished), 2013.
- [9] H. Pues and A. Van de Capelle, "Accurate transmission-line model for the rectangular microstrip antenna", ZEE Proc., pt. H, vol. 131, pp. 334-340, Dec. 1984
- [10] A. K. Bhattacharyya and R. Garg, , " Generalised transmission line model for microstrip patches ", ZEE Proc., pt. H., vol. 132, pp. 93-98, Apr. 1985.
- [11] Ahmed Fatthi Alsager, "Design and Analysis of Microstrip Patch Antenna Arrays", Thesis of Master , university of Science with a Major in Electrical Engineering Communication and Signal processing. *Thesis No. 1/2011.*

- [12] Constantine A. Balanis, "Antenna Theory" JohnWiley& Sons, INC, (2nd Edition), Canada, 1997.
- [13] Odile Picon et coll, "Les antennes Théorie, conception et applications", Dunod, Paris,2009.
- [14] G. Duchiron, "Analyse et conception de résonateurs saphir à modes de galerie pour des applications de métrologie et de filtrage microondes", Thèse du doctorat de l'université de Limoges, Juin 2001.
- [15] LALMI Hadda , " Conception et simulation d'un réseau d'antennes microrubans circulaires pour les applications radar ", Mémoire de Master Université de Biskra,2015.
- [16] Ahmed Benomar," Etude des Antennes à Résonateurs Diélectriques. : Application aux Réseaux de Télécommunications. Electronique", Université de Limoges, 2015. Français .
- [17] AMEZIANE Djamel, "Etude et Optimisation d'Antennes Fractales Plaquées ", Mémoire de Magister, universite abou-bekr belkaid-tlemcen , 2009.
- [18] J.D. Kraus, "Antennas, " McGraw-Hill book company, New York, USA, 1950.
- [19] J.R. James, P.S. Hall, C. Wood, "Microstrip antenna theory and design", Peter Peregrinus Ltd ,pp. 103-109, New York, USA, 1981.
- [20] Ahmed Belguessoum; "Conception et réalisation d'une antenne multi bandes alimentée par un guide d'onde coplanaire CPW" ; University of Ottawa ,2008.
- [21] RafikAddaci, "Evaluation de la fréquence de résonance complexe et de la bande passante d'une antenne microbande rectangulaire par la méthode neurospectrale", Thèse de Magister en Micro-Ondes, Université de Constantine.2006.
- [22] A. Sihvola, "Electromagnetic emergence in metamaterials. Deconstruction of terminology of complex media", Advances in Electromagnetics of Complex Media and Metamaterials, NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry, Kluwer Academic Publishers, vol. 89, pp. 1 - 17, 2009.
- [23] D.F.Sievenpiper, " High impedance electromagnetic surfaces ", PhD Dissertation, University of California, Los Angeles, USA, 1999.

- [24] A. Azarbar, J. Ghalibafan, "A compact low-permittivity dual-layer EBG structure for mutualcoupling reduction", *Int. J. Antennas Propagation*. June 2011.
- [25] O.Vanbesien, " Matériaux artificiels ", édition Lavoisier, 2012.
- [26] V.G. Veselago, " The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$  " *Soviet Phys. Usp.*10, pp.509-514, 1968.
- [27] D. R. Smith, "What are Electromagnetic Metamaterials?, " *Novel Electromagnetic Materials*, Retrieved August, 2010.
- [28] I. V. Lindell, S. A. Tretyakov, K. I. Nikoskinen, and S. Ilvonen, " BW Media– Media with Negative parameters, Capable of Supporting Backward Waves"*Microwave Opt. Tech. Lett.*, vol. 31, no.2, pp. 129-133, 2001.
- [29] A. Alu, and N. Engheta, " Polarizabilities and Effective Parameters for Collections of Spherical Nanoparticles Formed by Pairs of Concentric Double-Negative, Single-Negative, and/or Double-Positive Metamaterial Layers, " *Journal of Applied Physics*, vol. 97, no. 9, pp. 094310 1 - 12, 2005.
- [30] <http://www.theses.fr/2011TOU30079> ,(accédé janvier 2018).
- [31] Ramona Cosmina Hadarig," Design of electromagnetic band-gap structures using planar technology for rfid and microwave applications ",Programa de Doctorado en Tecnologas de la Informacion y Comunicaciones en Redes Moviles,2014.
- [32] Xavier BEGAUD ,Anne Claire LEPAGE : "Antenne Versatile Intriquée ", Lana DAMAJ le 13 mars 2013
- [33] W. Barnes, T. Priest, S. Kitson, J. Sambles, " Photonic Surfaces for Surface-Plasmon Polaritons", *Phys. Rev. B*, vol. 54, pp. 6227, 1996.
- [34] S. Lee, and W. Jones, "Surface Waves on Two-Dimensional Corrugated Surfaces", *Radio Science*, vol. 6, pp. 811, 1971.
- [35] E. Yablonovitch, " Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics, " *Physical Review Letters*, vol. 58, no. 20, pp. 2059-2062, 1987.
- [36] S. Kitson, W. Barnes, J. Sambles, " Full Photonic Band Gap for Surface Modes in theVisible ", *Phys. Rev. Lett.* , vol. 77, pp. 2670, 1996.

- [37] L. Brillouin, " Wave Propagation in Periodic Structures; Electric Filters and Crystal Lattices", 2nd ed., Dover Publications, New York (1953).
- [38] B. A. Munk, "Frequency Selective Surfaces: Theory and Design", John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 2000.
- [39] Shruti Karkare, Kavita Tewari, "Design of a Rectangular Microstrip Antenna with Artificial Magnetic Conductor Ground Plan", Chembur, Mumbai, November 2014.
- [40] Y Coulibali, "Étude et réalisation d'antenne hybride à base de résonateur diélectrique pour les systèmes de communications sans fils" thèse de doctorat. INRS 20.
- [41] Yu Zhu. "Modeling of High Impedance Surface Structures", these de doctorat, Université Paris Sud - Paris XI, 2011
- [42] Haoued Mouissa Nawel ,Madoui Souad,"L'effet d'une cellule AMC sur la bande passante d'une antenne patch", Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2017.
- [43] F. Yang, and Y. Rahmat-Samii, " Reflection Phase Characterizations of the EBG Ground Plane for Low Profile Wire Antenna Applications" *IEEE Trans. on Antennas Propag.*, vol. 51, no. 10, Oct. 2003.
- [44] DJANI Abdelouahab ,HASSANI Mohammed Fouad " Microstrip Patch Antenna Gain Enhancement Using AMC Structures", Memory of Master University of KASDI MERBAH ,OUARGLA, 2017.
- [45] Mélusine Pigeon Etude , " réalisation d'antennes ultra-compactes à base de métamatériaux", Institut National Polytechnique de Toulouse, 2011 .
- [46] Anthony Presse, "Conception d'antennes souples et de conducteurs magnétiques artificiels en bande UHF ", Université Rennes 1, 2015.
- [47] J. R. Sohn, H. S. Tae, J. G. Lee, and J. H. Lee, "Comparative Analysis of Four Types of High Impedance Surfaces for Low Profile Antenna Applications", *Ant. and Propagat. Society International Symposium*, vol. 1A, pp. 758 - 761, 2005.
- [48] D. F. Sievenpiper, "*High Impedance Electromagnetic Surfaces*", Ph.D. dissertation, University of California, Los Angeles, 1999.

- [49] S. P. Benham, T. J. Murphy, E. J. Totten, D. J. Knights, and M. Schick, "EM Modelling Design of a Conformal IFF system on an Aircraft", 2010 Proceedings of the European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Barcelona, Spain, April 2010.
- [50] Constantine A. Balanis, "Antenna theory: analysis and design", 3rd ed., New Jersey: John Wiley & Sons, 2005, pp. 811-820.
- [51] K. Agarwal, Y. X. Guo, and A. Alphones, "Dual-band circularly polarized stacked microstrip antenna over RIS for GPS applications" ,In Wireless Symposium (IWS), 2013 IEEE International, pp. 1-4. IEEE,2013.
- [52] <http://www.a-powergroup.com/prodotto/cst-studio-suite> ,(accédé mai 2018).



---

# Annexe

---

## Annexe

### - Creation de l'antenne patch

Dans le menu Démarrer, sélectionnez Programmes> CST STUDIO SUITE 2016 et après trouve cette fenêtre.

Dans la fenêtre principale, cliquez sur-Créer un nouveau projet, une nouvelle fenêtre pop-up apparaîtra, à partir de cette fenêtre qui apparaît dans la figure1

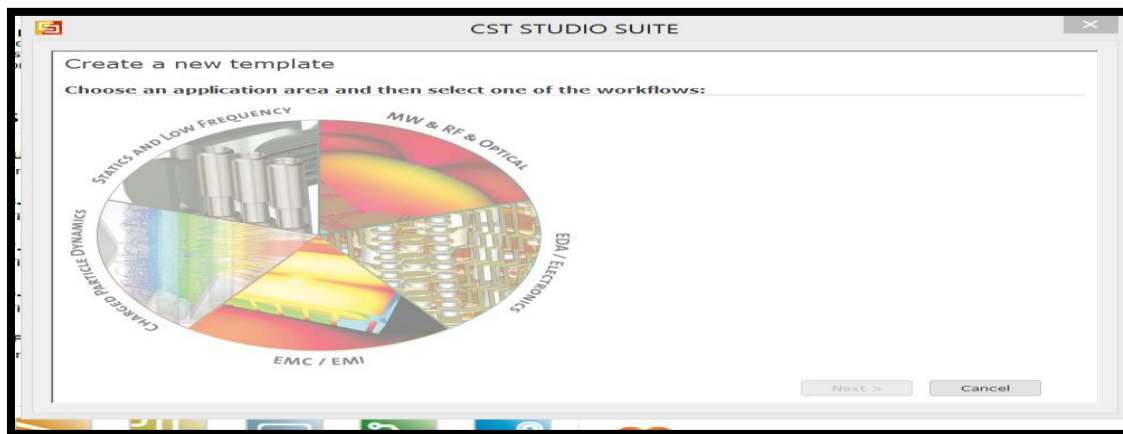


Figure 1

vous pouvez sélectionner le type de projet sur lequel vous travaillez, par exemple Antenne (sur un substrat plan) Figure.2.

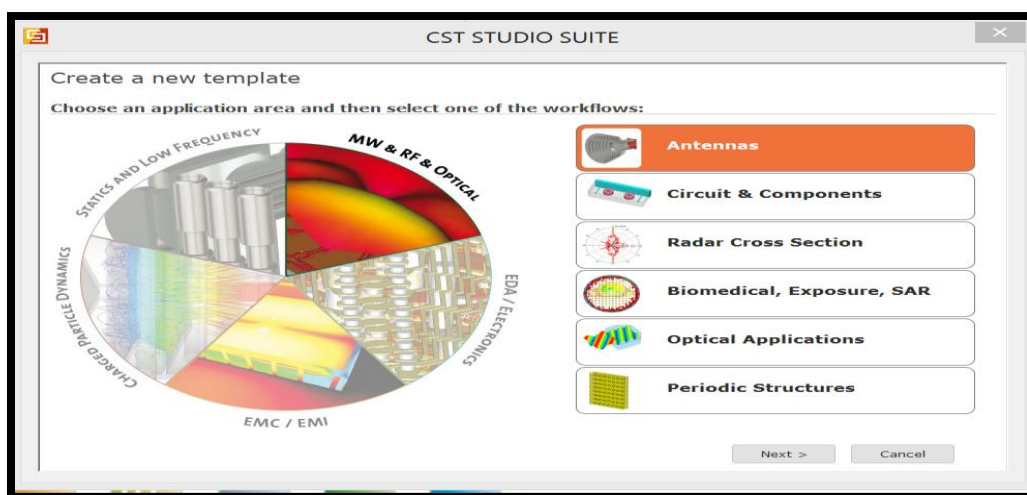


Figure 2

Nous avons choisi planer (Patch, Slot, etc.) En cas de conception de l'antenne patch micro ruban comme figure 3.

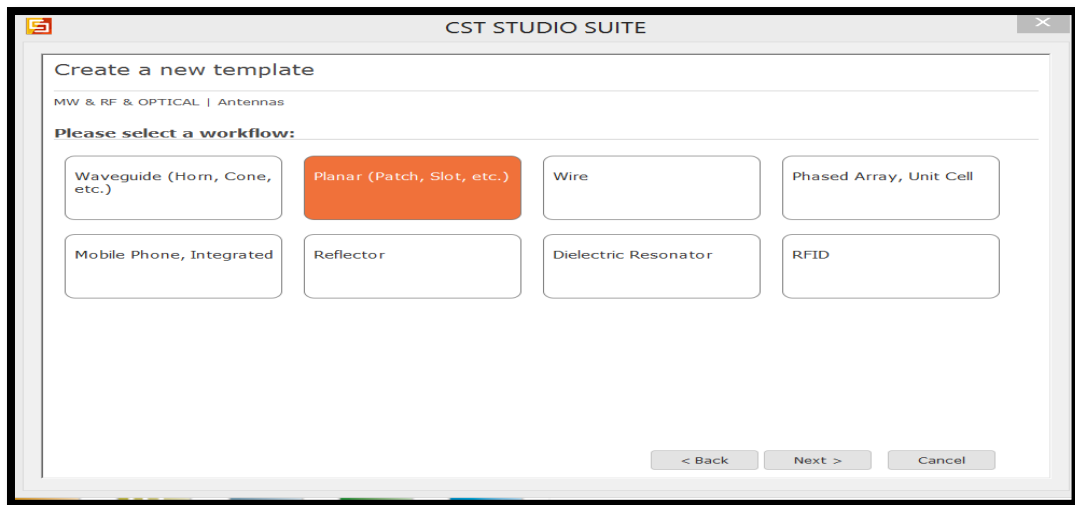


Figure 3

Ensuite Choisissez les paramètres qui font définir les unités des dimensions, fréquences, temps et température...etc comme figure 4.

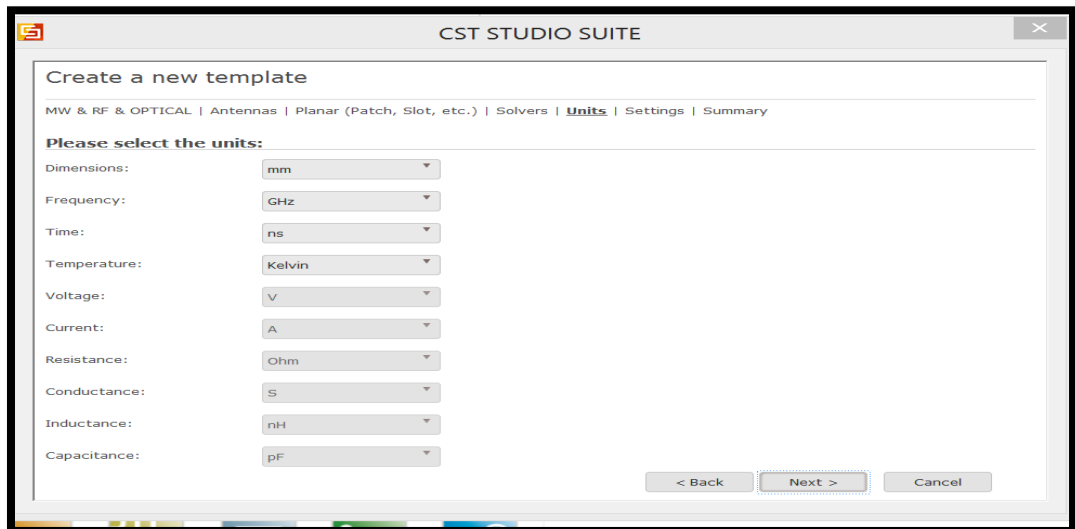


Figure 4

Nous avons choisi le domaine temporel comme figure 5

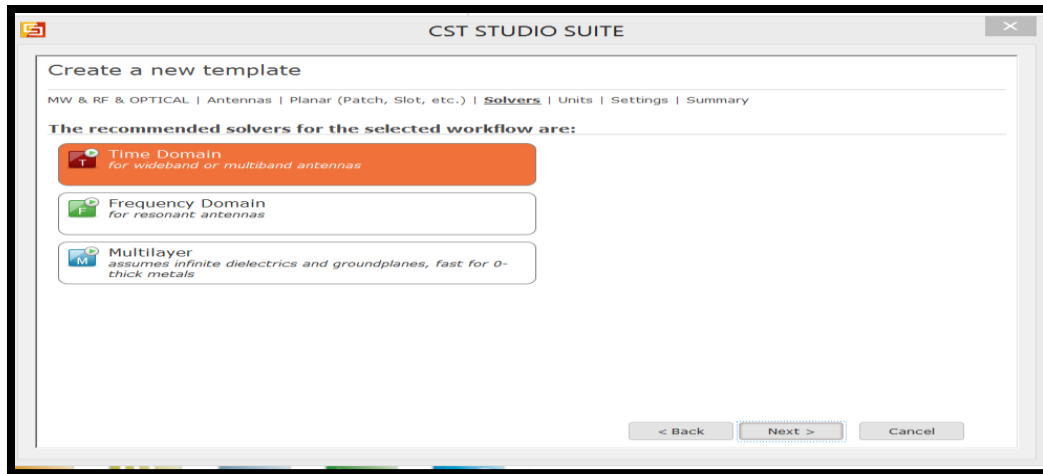


Figure 5

- Dessiner la structure

Pour dessiner la structure d'antenne patch il y'a 3 étape :

- Créations le plan de masse
- Créations le substrat
- Créations le patch comme utilise dans les figure dessues

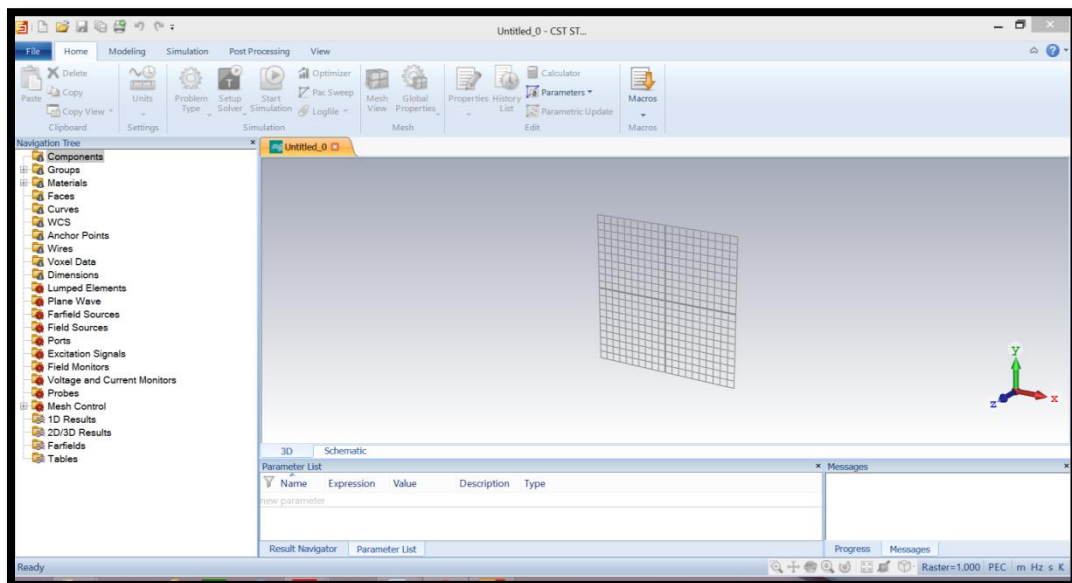


Figure 6

Pour dessiner le substrat et plan de masse par exemple :

- sélectionnez> Modélisation> Formes de base> Brique, puis double-cliquez sur la zone de travail et faites glisser la souris et double-cliquez à nouveau pour terminer le mode de dessin figure 7,8

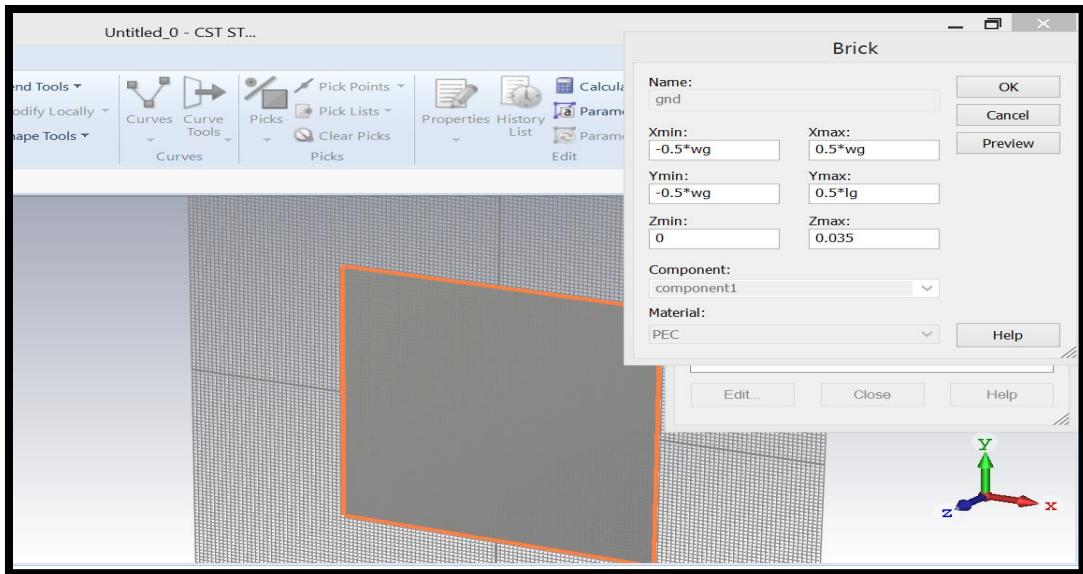


Figure 7

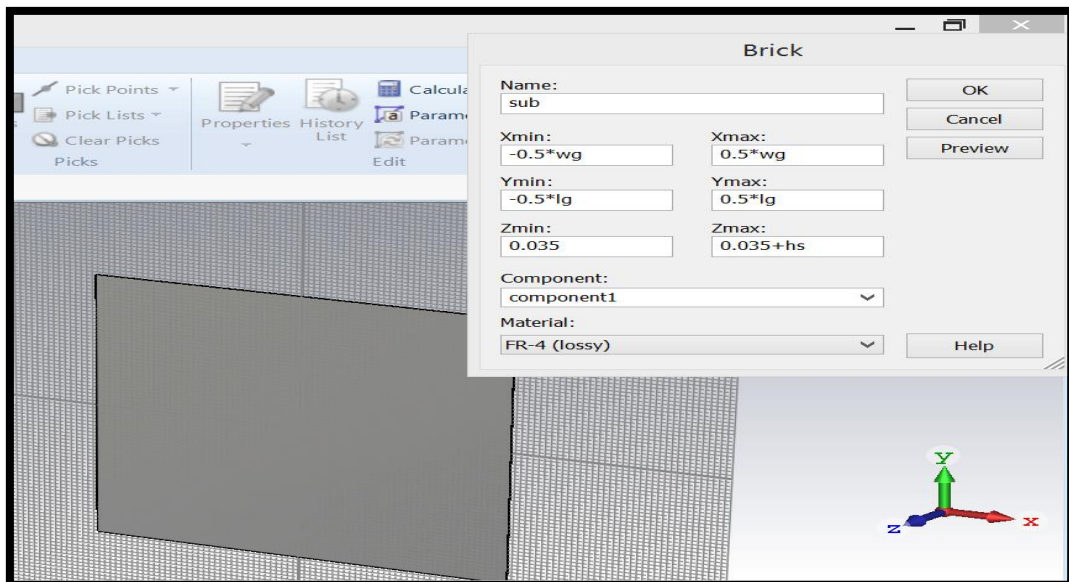


Figure 8

- **Définir le port d'onde pour l'antenne**
- Dans le menu principal, sélectionnez > Simulation > ports de guide d'ondes ou cliquez sur l'icône des ports de guide d'ondes dans la barre d'outils
- Dans la fenêtre du port du guide d'ondes, sélectionnez Normal pour être Y
- Sélectionnez libre dans la case de position et entrez vos dimensions pour le port d'onde.
- Cochez la case "position normale" dans la case de position et changez Y pose à la position de votre port d'onde comme indiqué dans la Figure 9.
- Après avoir cliqué sur OK, vous devriez voir le port 1 défini comme indiqué dans la Figure 9

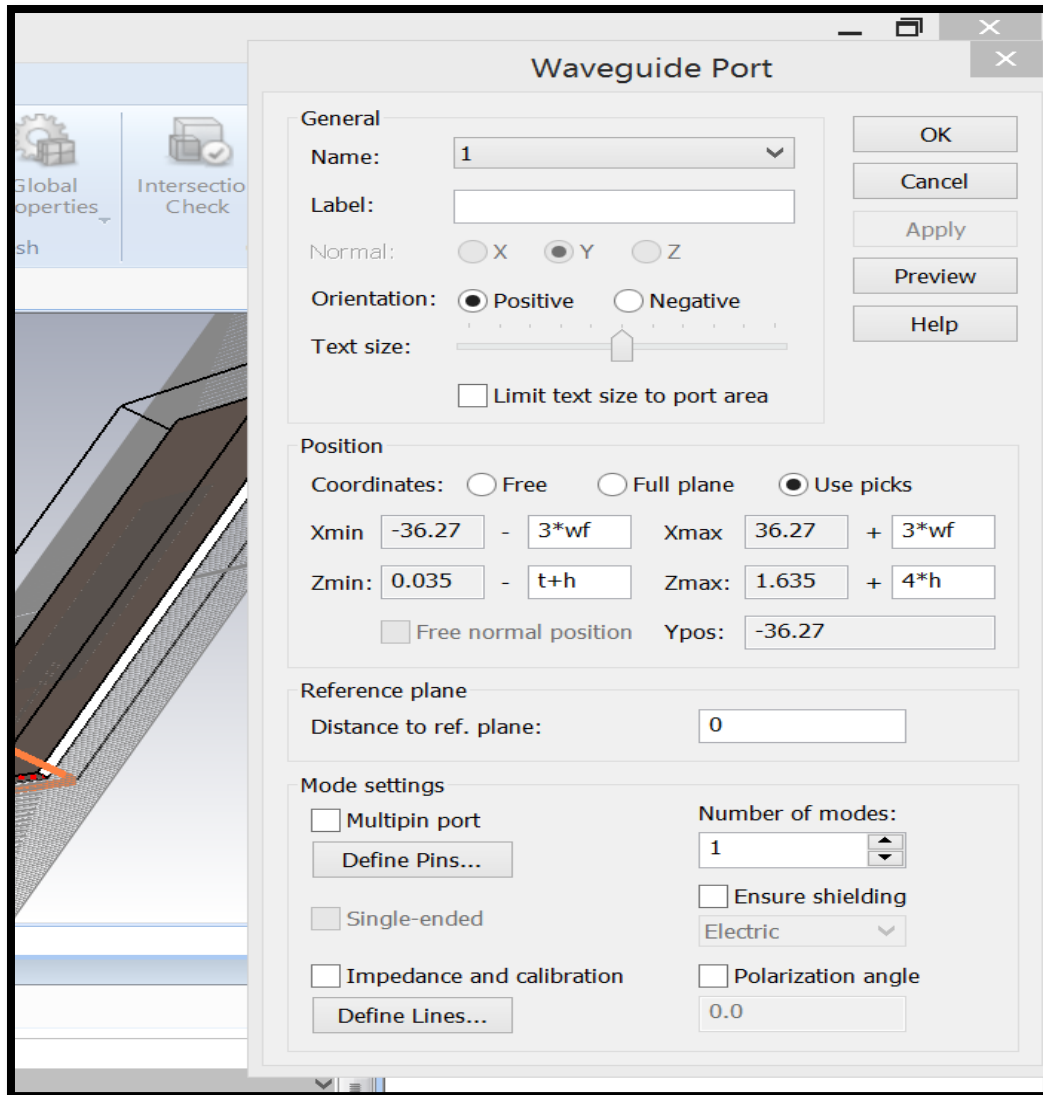
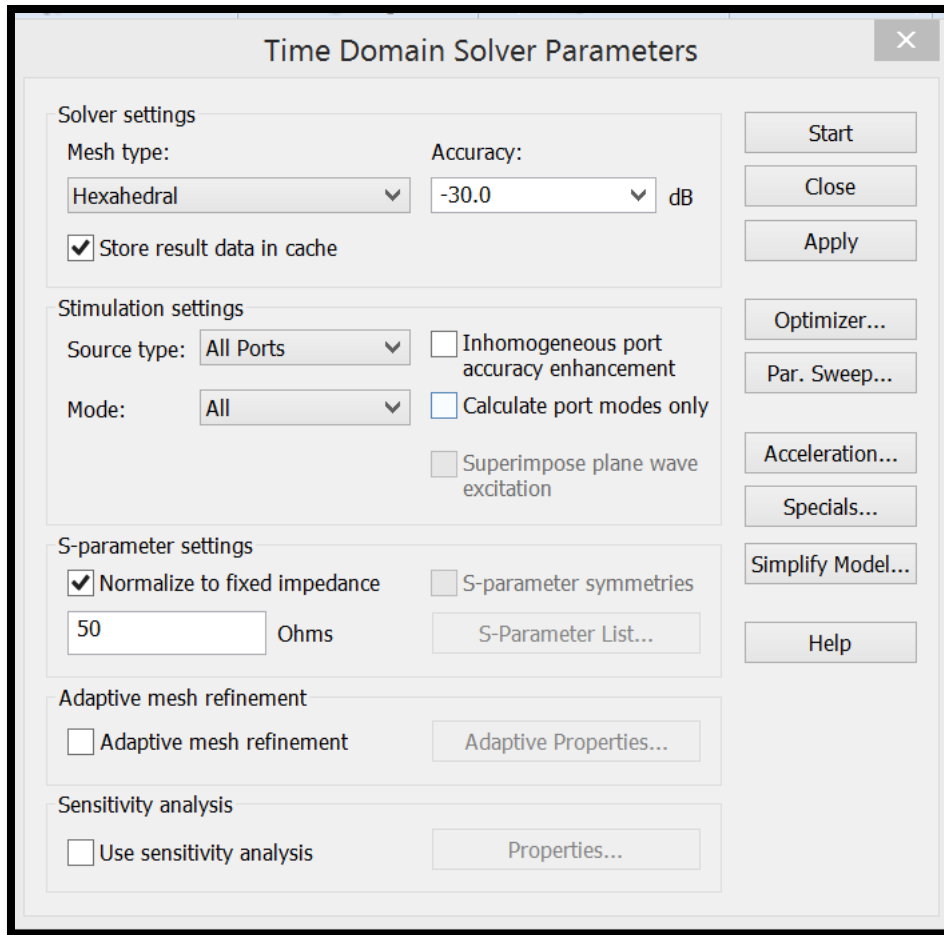


Figure 9

- **Exécuter la simulation**

A partir du menu principal, sélectionnez > simulation > solveur d'installation

Et Formez la fenêtre du solveur transitoire, vous pouvez ajuster la précision du solveur comme la figure 10.

**Figure 10****- Afficher les résultats de la simulation**

Pour afficher les courbes du paramètre S (linéaire, dB, phase, graphique smith, ... ..), Les différentes graphes que nous pouvons visualiser telle que le coefficient de Réflexion comme figure 11-12.

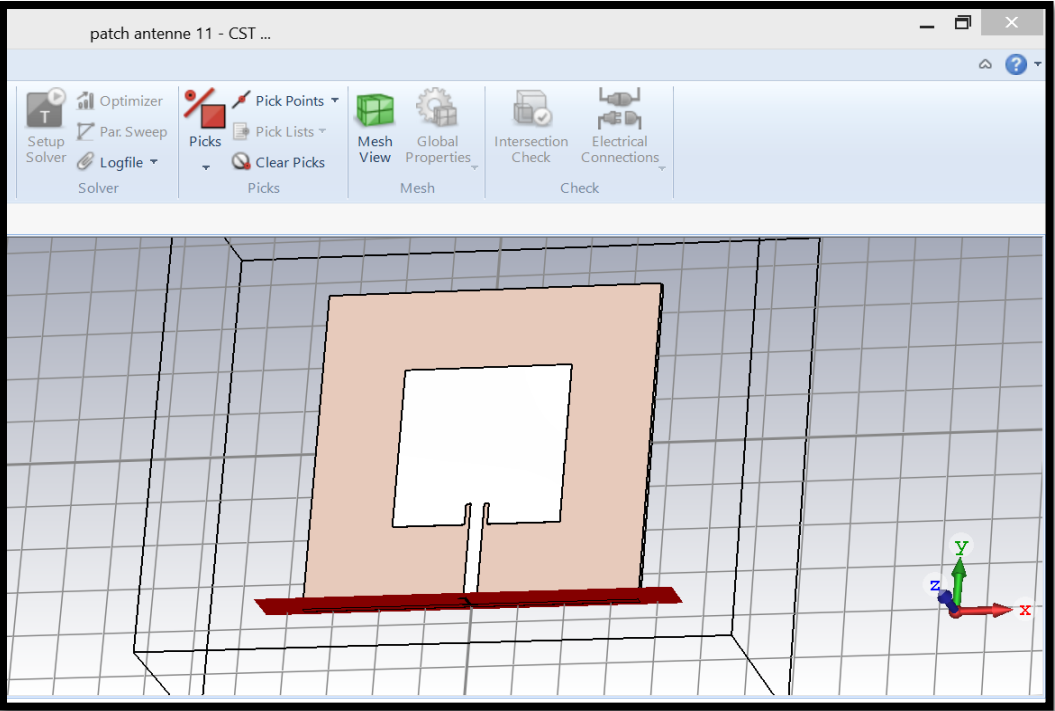


Figure 11

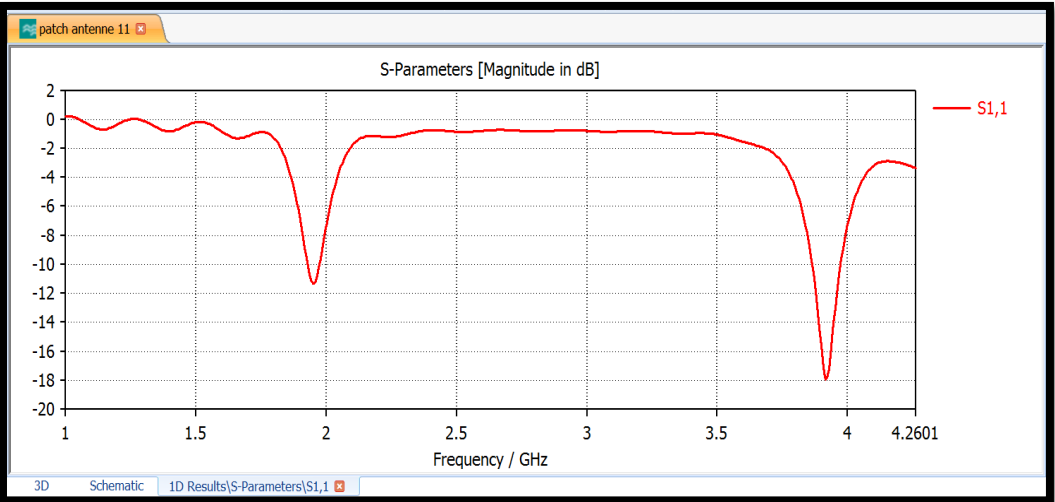


Figure 12