

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب  
Université Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib  
Faculté des Sciences et de Technologie  
Département D'électronique et des Télécommunications



Projet de Fin d'Etudes  
Pour l'obtention du diplôme de Master Académique  
Domaine : Science et technologie  
Filière : Télécommunication  
Spécialité : Réseaux et Télécommunication

Thème

**CONCEPTION D'UNE ANTENNE FRACTALE MINIATURE  
ET LARGE BANDE**

Présenté Par :

1) Melle DAHEL Fatima Zahra

2) Melle BOULANOUAR Fatna

Devant le jury composé de :

Dr : ZEBENTOUT A. Djawad	MCA	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
Dr: KANOUN Ahmed-Ali	MRB	CDS (Oran)	Examineur
Dr : MOULESSEHOUL Wassila	M C B	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrante
Dr RABAH Amine	M RA	CDS (Oran)	Co-Encadrant

*Année Universitaire 2021/2022*

## ***REMERCIEMENTS:***

*Nous remercions infiniment Dieu le tout puissant pour la santé, la force et le courage qu'il nous a donnée tout au long de notre parcours.*

*Notre gratitude va à l'égard de tout le corps professoral de l'université de Belhadj Bouchaib Ain témouchent pour toutes nos connaissances acquises durant notre formation, spécialement Mme Moulessehoul Wassila pour son bon encadrement, ses conseils, sa patience et son attention qui nous ont énormément aidé dans ce travail.*

*Nos remerciements les plus vifs s'adressent aussi à messieurs le président Dr .Zebentout Djawad et à monsieur l'examineur Dr .Kanoun Ahmed d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail et l'enrichir par leurs propositions.*

*Nous remercions tous les enseignants qui ont participé à notre formation au département d'électronique et télécommunication et tout le personnel administratif de la faculté des sciences et de la Technologie.*

*Nous adressons nos remerciements à tous nos collègues, particulièrement la promotion de deuxième année Master et réseau de Télécommunication.*

*Enfin nous sommes reconnaissants à toute personne qui a contribué d'une façon ou d'une autre à la réalisation de ce présent mémoire. Merci à toutes et à tous...*

# DÉDICACES

*Je dédie ce travail à:*

*Ma très chère MAMAN qui a tout sacrifié pour que je puisse arriver jusque-là et qui m'a beaucoup soutenu durant mon cursus.*

*Mon PERE qui a consacré toute sa vie et qui travaille nuit et jour pour qu'on soit toujours les meilleurs.*

*Mes chères frères Ahmed et Mohamed , qui sont toujours à mes côtés et n'ont jamais cessé de me soutenir.*

*Mes très chers grands parents.*

*Mes chères tantes Zahra et Rabiaa.*

*Toutes la famille Dahel .*

*Mes chères amies Nariman , Nihad, Nour el houda, Farah ET Ahlem.*

*Mon très chère professeur Meradi Abd El Hafid .*

*Mon cher binôme Fatna.*

*En fin à toute ma promotion de Télécommunications et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce Projet soit possible,*

*Je vous dis Merci.*

*Fatima Zahra*

# Dédicaces

*Je dédie ce travail à:*

*A la mémoire de mon père, depuis ma tendre enfance, tu es mon plus fort repère, un être unique et magnifique, les meilleurs des pères, quand je pense à toi les larmes montent avec les souvenirs, merci pour ce que tu as été pour moi. Pais à ton âme*

*A ma très chère maman, que Dieu la protège pour moi, je ne pourrais la remercier assez pour ce qu'elle fait pour moi.*

*Mes chères frères Islem et Zaki*

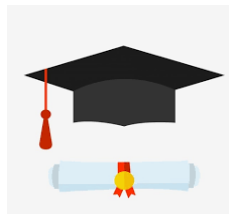
*Mes chères sœurs Ftima, Dalila et Aicha*

*À toute ma famille, ma grande famille et mes amis*

*Mon cher binôme Fatima zahra*

*À toute ma promotion de Télécommunications*

*Fatna*



## Résumé :

L'objectif de ce mémoire est d'étudier et de concevoir une antenne fractale miniature et large bande sous le logiciel de conception 3D CST Microwave Studio, alimentée avec une ligne micro-ruban simple de 50  $\Omega$ , proposée pour un fonctionnement entre 10.7 GHz et 12.7 GHz pour application spatiale. Nous avons utilisé un substrat de type FR4 d'épaisseur 1.6 mm et de permittivité 4.3. Deux techniques d'adaptations ont été utilisées dont la ligne quarte d'onde au bout de ligne d'alimentation et l'insertion des encoches sur le patch. Par la suite, la technique de structure à plan de masse irrégulier (Defected Ground Structure, DGS) est utilisée pour améliorer les performances et augmenter la bande passante pour pouvoir utiliser cette antenne dans des applications large bande. Les résultats de simulations sont très satisfaisants en termes de paramètre de réflexion  $S_{11} = -20,12$  dB, de VSWR=1,074, de bande passante  $B_p = 6,23\%$ , de gain  $G = 3,25$  dB et de directivité  $D = 3,15$  dBi. Enfin, une nouvelle forme d'antenne imprimée fractale miniature dédiée pour les applications spatiales est simulée.

**Mots clés:** Antenne patch microruban, antennes fractales, bande passante, techniques d'adaptation, transformateur quart d'onde, les encoches, miniaturisation d'antenne.

## ملخص:

الهدف من هذه الرسالة هو دراسة وتصميم هوائي كسوري مصغر وواسع النطاق بواسطة برنامج التصميم ثلاثي الأبعاد CST Microwave Studio، المدعوم بخط بسيط، مقترح للتشغيل بين 10.7 جيجا هرتز و 12.7 جيجا هرتز للتطبيقات الفضائية. استخدمنا ركيزة من نوع FR4 بسماك 1.6 مم و سماحية 4.3. تم استخدام طريقتين للتكيف، بما في ذلك خط ربع الموجة في نهاية خط التغذية وإدخال الشقوق على الرقعة. بعد ذلك، تُستخدم تقنية الهيكل مع مستوى أرضي غير منتظم (بنية أرضية معيبة، DGS) لتحسين الأداء وزيادة عرض النطاق. لهذا الهوائي في تطبيقات النطاق الواسع. نتائج المحاكاة مرضية للغاية من حيث معامل الانعكاس  $S_{11} = -12.20$  ديسيبل،  $VSWR = 1.074$ ، عرض النطاق  $B_p = 6.23\%$ ، الكسب  $G = 3.25$  ديسيبل والاتجاهية  $D = 3.15$  ديسيبل. أخيرًا، تمت محاكاة شكل جديد من الهوائيات المصغرة المطبوعة الكسورية المخصصة للتطبيقات الفضائية.

**الكلمات المفتاحية:** هوائي الشريط الصغير المطبوع، الهوائيات الكسورية، عرض النطاق الترددي، تقنيات التكيف، محول ربع الموجة، الشقوق، تصغير الهوائي.

**Abstract:**

The objective of this manuscript is to study and design a miniature and broadband fractal antenna under the 3D design software CST Microwave Studio, powered with a simple 50 micro-strip line, proposed for operation between 10.7 GHz and 12.7 GHz for space application. We used an FR4 type substrate with a thickness of 1.6 mm and a permittivity of 4.3. Two adaptation techniques were used, including the quarter-wave line at the end of the feed line and the insertion of notches on the patch. Subsequently, the structure technique with irregular ground plane (Defective Ground Structure, DGS) is used to improve the performance and increase the bandwidth to be able to use this antenna in broadband applications. The simulation results are very satisfactory in terms of reflection parameter  $S_{11} = -20.12$  dB,  $VSWR = 1.074$ , bandwidth  $B_p = 6.23\%$ , gain  $G = 3.25$  dB and directivity  $D = 3.15$  dB. Finally, a new form of miniature fractal printed antenna dedicated for space applications is simulated.

**Keywords:** Microstrip patch antenna, fractal antennas, bandwidth, adaptation techniques, quarter-wave transformer, notches, antenna miniaturization .

## Sommaire :

**Remerciement**

**Dédicace**

**Résumé**

**Table des matières**

**La liste des figures**

**La liste des tableaux**

**La liste des acronymes et abréviation**

**Introduction Générale**

***Chapitre I : Généralités sur les antennes***

I.1.Introduction .....	3
I.2. Définition d'une antenne.....	3
I.2.1. Paramètre caractéristique d'une antenne.....	4
I.2.1.1. Impédance d'entrée.....	4
I.2.1.2. Coefficient de réflexion.....	5
I.2.1.3. Diagramme de rayonnement.....	5
I.2.1.4. Directivité.....	6
I.2.1.5. Gain d'une antenne.....	6
I.2.1.6. Rendement d'une antenne.....	7
I.2.1.7. L'angle d'ouverture.....	7
I.2.1.8. La bande passante.....	7
I.2.1.9. VSWR.....	8
I.2.2. Les différents types d'antenne.....	8
I.3. Les antennes patch.....	9
I.3.1. Les forme du patch.....	9
I.3.2. Principe de fonctionnement.....	10

I .3.3. Technique d'alimentation.....	11
I.3.3.1. Alimentation par ligne micro-ruban.....	11
I.3.3.2. Alimentation par la sonde coaxial.....	11
I.3.3.3. Alimentation par couplage électromagnétique.....	12
I.3.3.4. Alimentation au travers une ouverture dans le plan du masse .....	12
I.3.4. Les techniques d'adaptation .....	13
I.3.4.1. Adaptation par ligne quart d'onde.....	13
I.3.4.2. Adaptation par stub.....	14
I.3.4.3. Adaptation avec encoches.....	14
I.3.5. Domain d'application des antennes patch.....	15
I.4. Les antennes fractales .....	15
I.4.1. Principaux avantages.....	15
I.4.2. Principaux inconvénients.....	15
I.4.3. Les différentes formes fractales.....	16
I.4.3.1. Les courbes fractales.....	16
I.4.3.2. Les surfaces fractales.....	18
I.4.3.3. Les volumes fractals.....	20
I.5. Application des fractales.....	21
I.6. Conclusion.....	21
Références bibliographiques.	

## ***Chapitre II : État de l'art sur les antennes miniatures***

II.1.Introduction.....	24
II.2.Les antennes miniatures.....	24
II.3. Avantages et inconvénients de la miniaturisation.....	25
II.4. Les techniques de miniaturisation.....	26
II.4.1. Substrat à haute permittivité.....	26
II.4.2. Les méta matériaux.....	26
II.4.3. Ajout de court-circuit antenne PIFA.....	27
II.4.4. Repliement des éléments.....	29
II.4.5. Ajout de fentes dans l'élément rayonnant.....	31



II.5. Les technique élargissement de la bande.....	31
II.5.1. La technique de fente.....	32
II.5.2. Combinaison de plusieurs éléments rayonnants.....	32
II.5.3. la technique fractale.....	32
II.6. Pourquoi en utilise une large bande.....	33
II.7. Conclusion.....	33

Références

***Chapitre III : Simulation et Résultats***

III.1 Introduction .....	38
III.2 Description de l’outil de simulation.....	38
III.3. Antenne patch rectangulaire avec ligne simple.....	39
III.3.1. Géométrie de base.....	39
III.3.2 Résultats de simulations.....	40
III.4. Technique d’adaptation .....	41
III.4.1. Adaptation de l’antenne avec une ligne quart d’onde .....	41
III.4.2 Adaptation par insertion des encoches.....	44
III.5. Miniaturisation par fractalisation de l’antenne patch rectangulaire .....	47
III.5.1. Tapis de Sierpinski.....	47
III.5.1.1. Miniaturisation de l’antenne patch rectangulaire.....	48
III.5.1.2. Technique d’élargissement de la bande de l’Antenne patch rectangulaire .....	51
III.5.2.L’antenne de Minkowski.....	55
III.5.2.1. Miniaturisation de l’antenne patch rectangulaire.....	56
III.5.2.2. Technique d’élargissement de la bande de l’Antenne patch rectangulaire .....	59
III.6. Comparaisont entre les antennes fractales simulées sous CST.....	62
III.7. Conclusion.....	62

**Conclusion générale**

## La liste des figures :

### *Chapitre I :*

Figure I.1:Principe de transmission par onde électromagnétique.....	4
Figure I. 2: Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne.....	6
Figure I .3: Bande passante et coefficient de réflexion.....	8
Figure I : 4: La structure d'une antenne patch .....	9
Figure I .5 : Les formes du patch.....	10
Figure I.6: Rayonnement d'une antenne patch rectangulaire.....	10
Figure I.7: Alimentation par ligne micro-ruban.....	11
Figure I.8: Alimentation par sonde coaxial.....	12
Figure I.9: Alimentation par couplage électromagnétique.....	12
Figure I.10: Alimentaire au travers une ouverture dans le plan de masse.....	13
Figure I.11: Adaptation par ligne quart d'onde.....	14
Figure I.12: Adaptation par stub en court-circuit.....	14
Figure I. 13 : L'équivalence en circuit.....	14
Figure I. 14: Patch adapté avec encoches.....	14
Figure I.15: Courbe de Koch.....	16
Figure I.16: La poussière de CANTOR.....	17
Figure I.17:la fractale de Minkowski.....	17
Figure I.18: la fractale d'Hilbert.....	18
Figure I.19:Génération de la courbe de Péano.....	18
Figure I.20:Génération de la boucle fractale du Le triangle de Sierpinski.....	19
Figure I.21 : Le Tapis de Sierspinski.....	19
Figure I.22: Tétraèdre de de Sierpinski.....	19
Figure I.23: L'éponge de Sierpinski-Menger - Ordre 3.....	19

### *Chapitre II :*

Figure II-1: Sphère minimale qui englobe l'antenne: sphère de Chu.....	25
Figure II-2: Structure de l'antenne PIFA.....	27
Figure II-3: Représentation du champ électrique du mode fondamental des antennes : (a) demi-onde, (b) quart onde.....	28
Figure II-4: Antenne PIFA : (a) avec languette de court-circuit, (b) avec court-circuit plan.....	28
Figure II-5: Chargement capacitive en bout d'élément.....	30
Figure II-6: Antenne PIFA : (a) avec dite débouchant, (b) avec fente non débouchant.....	31

### ***Chapitre III :***

Figure III.1 : Antenne patch rectangulaire initiale proposée.....	39
Figure III.2 : Coefficient de réflexion S11 de l'antenne initiale proposée.....	41
Figure III. 3: le rapport d'onde stationnaire.....	41
Figure III. 4 : Antenne rectangulaire adaptée avec une ligne micro-ruban quart d'onde.....	42
Figure III.5 : Paramètre S11 avec la ligne quarte d'onde.....	43
Figure III.6: Diagramme de rayonnement du gain (a) en 3D ; (b) en polaire .....	43
Figure III.7: Diagramme de rayonnement de la directivité (a) en 3D ; (b) en polaire.....	44
Figure III. 8 : Insertion des encoches .....	44
Figure III. 9: Coefficient de réflexion.....	45
Figure III.10: Rapport d'onde stationnaire.....	45
Figure III. 11: Diagramme de rayonnement du gain (a) en 3D ; (b) en polaire .....	46
Figure III.12: Diagramme de rayonnement de la directivité (a) en 3D ; (b) en polaire.....	46
Figure III.13 : rectangle de Sierpiński avec 4 itérations.....	47
Figure III.14 : Paramètre S11 de l'antenne rectangulaire 1 ère itération itération.....	47
Figure III.15 : Paramètre S11 de l'antenne rectangulaire 2 itération itération.....	48
Figure III.16 : Paramètre S11 de l'antenne rectangulaire 3ème itération .....	48
Figure III.17 : antenne miniature avec Itération 3.....	49
Figure III.18: Coefficient de réflexion .....	49
Figure III.19: Rapport d'onde stationnaire.....	49
Figure III.20: Diagramme de rayonnement du gain (a) en 3D ; (b) en polaire .....	50
Figure III.21 : Diagramme de rayonnement de la directivité (a) en 3D ; (b) en polaire.....	51
Figure III. 22: Insertion de la fente dans le plan de masse.....	52
Figure III.23 : Graphe de la bande passante en fonction de la fréquence.....	52

Figure III.24: Rapport d'onde stationnaire .....	52
Figure III. 25: Diagramme de rayonnement du gain (a) en 3D ; (b) en polaire .....	53
Figure III.26: Diagramme de rayonnement de la directivité (a) en 3D ; (b) en polaire.....	54
Figure III.27:l'île de Minkowski par l'approche de décomposition.....	55
Figure III.28 : Paramètre S11 de l'antenne rectangulaire 1 ère itération itération.....	55
Figure III.29 : Paramètre S11 de l'antenne rectangulaire 2 itération. ....	56
Figure III.30 : antenne miniaturée avec Itération 3 .....	56
Figure III.31: Coefficient de réflexion.....	57
Figure III.32: Rapport d'onde stationnaire.....	57
Figure III.33:Diagramme de rayonnement du gain (a) en 3D ; (b) en polaire.....	58
Figure III.34: Diagramme de rayonnement de la directivité (a) en 3D ; (b) en polaire.....	58
Figure III.35: Insertion de la fente dans le plan de masse.....	59
Figure III.36:Graphe de la bande passante en fonction de la fréquence.....	60
Figure III.37: Rapport d'onde stationnaire .....	60
Figure III.38 : Diagramme de rayonnement du gain (a) en 3D ; (b) en polaire.....	60
Figure III. 39: Diagramme de rayonnement de la directivité (a) en 3D ; (b) en polaire.....	61

### **La liste des tableaux :**

Tableau III.1 : Paramètres de l'antenne patch rectangulaire.....	40
Tableau III. 2: Dimensions de l'antenne patch initiale proposée .....	40
Tableau III. 3: les dimensions de l'antenne patch rectangulaire alimentée avec une ligne quart .....	42
Tableau III. 4: Dimensions de l'antenne patch miniaturisée.....	48
Tableau III.5: Différents paramètres de l'antenne patch miniaturisé.....	51
Tableau III. 6: Paramètres de l'antenne patch après l'élargissement de la bande.....	54
Tableau III.7: Dimensions de l'antenne patch miniaturisé.....	56
Tableau III.8 : Paramètres de l'antenne patch miniaturisé.....	59
Figure III.9 : Différents paramètres de l'antenne patch après l'élargissement de la bande.....	62
Figure III.10 : Comparaison entre les antennes fractales simulées sous CST.....	62

### **La liste des acronymes et abréviation :**

DGS :	Defected Ground Structure
OEM	Onde ÉlectroMagnétique
ROS	Rapport d'Onde Stationnaire
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio
RF	Radio Fréquence
AEP	Antenne Électriquement Petite
TM	Transverse Magnétique
GSM	Global System for Mobile
DCS	Digital combat simulator
UMTS	Universel Mobile Télécommunications system
WLAN	Wireless Local Network
CST	Computer Science Technology MICROWAVE STUDIO
FIT:	Finite Integration Technique
PIFA :	Plaque Inverse F Antenna
IFA :	Inverse F Antenna

## **INTRODUCTION GÉNÉRALE :**

Au cours de la dernière décennie, il y a eu des développements remarquables dans les systèmes de communication. Plus précisément, c'est une révolution dans la création de nouvelles normes et l'utilisation des antennes imprimées. Aujourd'hui, les appareils électriques jouent un rôle très important dans nos vies, utilisant des connexions sans fil principalement dans des domaines tels que les télécommunications, les transports, les satellites et les soins de santé. Ces systèmes sont constitués d'antennes, qui sont les éléments de base pour confirmer la transmission et la réception des OEM dans l'espace. En raison de son importance multidisciplinaire et de son utilisation dans de multiples applications, les chercheurs du monde des télécommunications sont vivement intéressés par des antennes miniatures à faible coût qui peuvent être facilement intégrées dans des systèmes de communication tout en gardant leurs caractéristiques et leurs bons fonctionnements.

L'objectif de notre travail est de concevoir et de miniaturiser une antenne microruban rectangulaire capables d'émettre et de recevoir à des fréquences dans la bande [10.7, 12.7] GHz. La conception et la simulation de cette antenne est basée sur l'utilisation du logiciel de simulation CST MicroWAVE Studio. Ce logiciel permet l'optimisation et la simulation de composants et systèmes électromagnétiques (OEM).

Ce manuscrit est composé de trois chapitres soigneusement présentés ci-dessous.

Dans le chapitre I, nous proposons un rappel général sur les antennes. Nous commençons par des généralités sur les antennes imprimées en présentant leurs définition, caractéristiques principales, types, techniques d'alimentation et d'adaptation. Ensuite, un état de l'art sur les antennes fractale est donnée, une étude bibliographique sur le concept des fractales, l'historique de la naissance de la géométrie fractale ainsi que les différentes formes les plus connues, l'utilisation et application des antennes fractales.

Le Chapitre II sera consacré à la miniaturisation des antennes, après une présentation de la miniaturisation, ses avantages, ses inconvénients, ses limites théoriques ainsi que la définition d'antennes miniatures. Ainsi que les techniques de miniaturisation, par la suite nous intéressons aux techniques d'élargissement de la bande passante

Le chapitre III commence d'abord par une présentation du logiciel CST, suivi par la description des différents modules à réaliser et le cahier de charge à compléter. Ensuite nous détaillons la conception de l'antenne rectangulaire et le calcul de ses paramètres géométriques.

Puis nous entamerons la partie simulation afin d'y arriver a une antenne adaptée à la fréquence désirée en présentant les techniques d'adaptation. Nous allons voir les techniques employées pour élargir la bande passante. Finalement, On va passer à la miniaturisation de cette antenne avec la technique

fractale qui nous offre l'avantage de choisir le meilleur compromis entre la taille et les performances de l'antenne résolue, en réalisant notre antenne miniature.

La fin de chapitre est consacrée à la présentation et à l'évaluation des différents résultats obtenus.

Nous avons obtenus un coefficient de réflexion  $S_{11} = -20,12$  dB; un rapport d'onde stationnaire VSWR= 1,074 ; un gain  $G= 3,25$  dB ; une directivité  $D= 6,94$  dBi et une bande passante  $B_p=6,23$  % /

Ces résultats sans satisfaisants et répondants aux exigences de la bande de fréquence désirée [10.7-12.7].

Notre travail est finalisé par une conclusion générale.

**CHAPITRE I :**  
**GÉNÉRALITÉ**  
**SUR LES ANTENNES**



### I.1. Introduction :

Au cours des dernières décennies la concurrence pour l'innovation dans les systèmes de communication ne cesse d'évoluer ce qui a poussé des études importantes dans le domaine des antennes, dont les formes aujourd'hui très diverses varient fortement d'une application à l'autre : télécommunications mobiles, télévision, radio, satellites, systèmes communicants, radars, télédétection, radioastronomie. Parmi les familles d'antennes les plus couramment utilisées: les antennes micro-rubans (appelées aussi antennes imprimées ou antennes patches). Ces antennes se caractérisent par : des faibles coûts de fabrication, une production de masse, une polarisation linéaire et circulaire, et des réseaux d'alimentation et d'adaptation fabriqués en même temps que l'antenne [1].

Dans ce chapitre, nous avons en premier lieu présenté quelques généralités sur les antennes ainsi que leurs caractéristiques. Ensuite, nous nous sommes intéressés aux antennes imprimées en citant leurs différentes formes, leurs techniques d'alimentation et d'adaptation. La deuxième partie de ce chapitre sera destinée à la présentation de la technique fractale, la géométrie fractale, et les différentes formes fractales existants dans la littérature.

### I.2. Définition d'une antenne :

Une antenne est généralement un dispositif métallique utilisé pour transmettre ou recevoir des ondes hertziennes. C'est un transducteur entre la ligne de transmission connectée à un générateur et le milieu ou l'onde rayonné. Afin d'assurer la propagation dans l'air, le dispositif est nécessaire pour générer une onde rayonnée. On peut donc définir une antenne en émission ou en réception selon son mode de fonctionnement. Le rôle de l'antenne d'émission est de convertir la puissance électromagnétique guidée, issue d'un générateur en une puissance rayonnée. En ce sens, c'est un transducteur [1]. Inversement, la puissance rayonnée peut être captée par une antenne réceptrice. En ce sens, l'antenne apparaît comme un capteur et convertit la puissance rayonnée en puissance électromagnétique guidée. Dans la plupart des cas, une antenne peut recevoir ou en émettre avec les mêmes propriétés rayonnantes. On dit que son fonctionnement est réciproque. Ceci est une conséquence du théorème de réciprocité. Dans certains cas exceptionnels où les antennes contiennent des matériaux non linéaires ou bien anisotropes, elles ne sont pas réciproques [1,2]. Du fait de la réciprocité des antennes, il n'y aura pratiquement jamais de différence entre le rayonnement en émission ou en réception. [3]

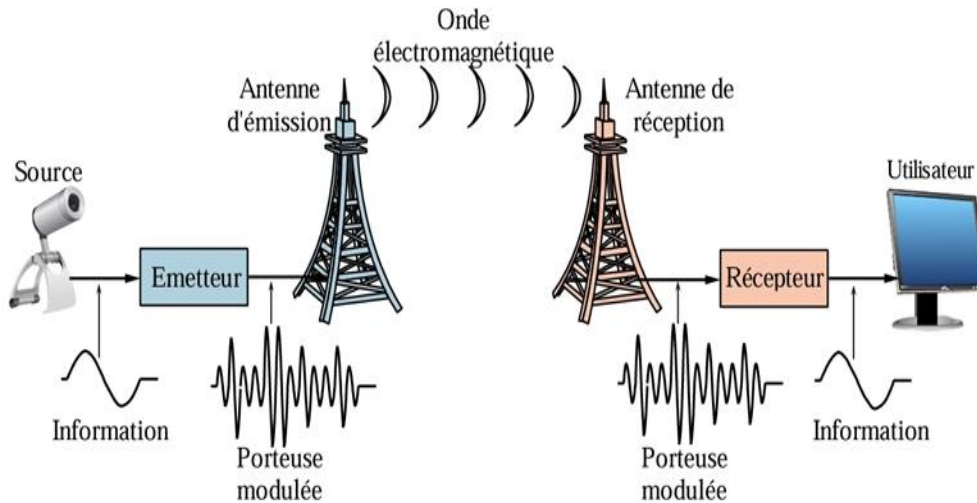


Figure I.1 : Principe de transmission par onde électromagnétique [1].

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

- Permet une adaptation précise entre l'équipement radioélectrique et le milieu de propagation.
- Assurer la transmission ou la réception d'énergie dans les directions privilégiées.
- Transmettre les informations aussi précisément qu'antennes-relais.

**I.2.1. Paramètres caractéristiques d'une antenne :**

De nombreux paramètres sont utilisés pour décrire les caractéristiques et les performances des antennes tels que l'impédance d'entrée, le coefficient de réflexion, la directivité, le gain, l'efficacité ainsi que les diagrammes de rayonnement. Ces paramètres sont classés en deux groupes. Le premier groupe caractérise l'antenne en tant qu'élément de circuit électrique ( $Z_{in}$  et  $S_{11}$ ) et le second groupe concerne ses propriétés de rayonnement, tel que le diagramme de rayonnement, la directivité et le gain. Ensuite, les performances d'une antenne peuvent être évaluées à partir de ses paramètres qui sont indiqués ci-dessous.

**I.2.1.1. Impédance d'entrée :**

Pour évaluer l'impédance d'une antenne, on suppose une antenne en émission. L'antenne est alors considérée comme une charge à l'entrée de laquelle existent un courant  $I_{in}$  et une tension  $V_{in}$ . Le rapport de ces deux grandeurs fournit l'impédance  $Z_e$  [2].

$$Z_e = \frac{V_{in}}{I_{in}} = R_a + jX_a = Z_c \frac{1+S_{11}}{1-S_{11}} \tag{I.1}$$

On considère simplement l'antenne comme un circuit électrique ayant cette même impédance lors des calculs de transfert de puissance.

Cela semble facile mais l'impédance que présentée par l'antenne a une fonction complexe et ce même pour les structures les plus simples. Comme toute impédance, d'une antenne est constituée d'une partie réelle  $R_a$  (active) et une partie imaginaire  $X_a$  (réactive) telle que :

- La partie réactive (réactance) est due aux champs d'induction au voisinage de l'antenne ; elle est capacitive pour les antennes électriquement courtes (un peu comme impédance vue près d'un circuit ouvert en régime sinusoïdale permanent) autrement, elle est inductive ou capacitive. En d'autre terme, elle est associée à une puissance réactive stockée au voisinage de l'antenne.
- La partie active est reliée aux champs (ou puissance) rayonnés et la puissance perdue par effet de joules, elle est constituée de deux composantes, l'une la résistance de rayonnement  $R_r$  et l'autre résistance de perte  $R_L$ .

La puissance associée à la résistance  $R_r$  est la responsable du rayonnement de l'antenne, tandis que la puissance dissipée par la résistance  $R_L$  est perdue au profit de la chaleur de l'antenne [4].

### I.2.1.2. Coefficient de réflexion :

Le coefficient de réflexion est un paramètre de quantification de la quantité du signal réfléchi par rapport au signal incident. De manière générale ce coefficient  $\Gamma$  est lié à l'impédance d'entrée de l'antenne et l'impédance caractéristique  $Z_c$  par cette relation:

$$S_{11} = \frac{Z_e - Z_c}{Z_e + Z_c} \quad (\text{I.2})$$

Notons que nous pouvons représenter  $\Gamma$  sous forme de paramètre  $S$  en  $dB$  tel que :

$$S_{11} (dB) = 20 \log (\Gamma) \quad (\text{I.3})$$

Le coefficient de réflexion est un paramètre important car il aide à la définition d'autres paramètres importants à la caractérisation des antennes. En effet, avec le coefficient de réflexion, il est possible de déterminer la notion d'adaptation et la bande de fréquence dans laquelle l'antenne présente un coefficient de réflexion inférieur à un certain niveau [5].

### L.2.1.3. Diagramme de rayonnement, directivité et gain :

La densité de puissance rayonnée par une antenne est répartie dans l'espace autour de celle-ci en fonction de sa géométrie et de son adaptation. Le diagramme de rayonnement est utilisé pour représenter graphiquement cette répartition. Il est donné en «zone lointaine» et généralement dans référentiel en coordonnées polaires Figure I. 2. Le champ électromagnétique est considéré en zone lointaine si la distance entre le point où il est  $2D$  calculé et l'antenne respecte la condition présentée en équation (I.4) [2, 6]:

$$R > 2D^2/\lambda \tag{I.4}$$

Où :

$D$  : est la dimension la plus grande de l'antenne et  $\lambda$  la longueur d'onde associée à la fréquence de fonctionnement de l'antenne.

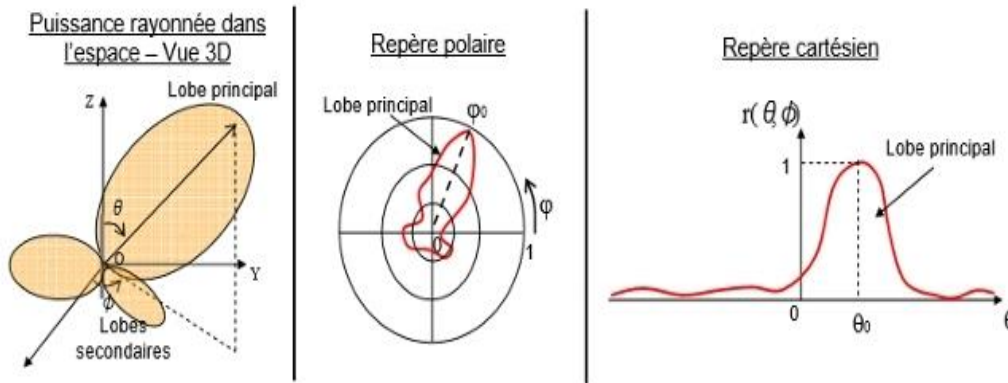


Figure I.2: Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne [2].

**1.2.1.4. Directivité :**

La directivité définit l'aptitude d'une antenne à concentrer l'énergie dans une ou plusieurs directions privilégiées. C'est un paramètre inhérent de l'antenne, sans dimension [6,7]. La directivité  $D(\theta, \varphi)$  est une mesure relative de la puissance rayonnée dans une direction  $(\theta)$  par rapport à la puissance totale rayonnée notée  $P_R$ :

$$D(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_R/4\pi} = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_R} \tag{I.5}$$

**1.2.1.5. Gain d'une antenne :**

D'une façon générale, une antenne rayonne une puissance variable en fonction de la direction considérée. On appelle gain  $G(\theta, \varphi)$  d'une antenne dans une direction  $(\theta, \varphi)$ , le rapport de la puissance  $P(\theta, \varphi)$  dans cette direction à la puissance  $P_0(\theta_0, \varphi_0)$  source isotrope de référence par unité d'angle solide avec la même puissance d'alimentation [7]. Le gain est proportionnel à la directivité. Il contient les mêmes informations sur les directions de rayonnement.

Le gain est exprimé en décibel (dB). Utilisons parfois la notation  $dB_i$  pour indiquer une référence au rayonnement isotrope. On retrouve aussi parfois le gain exprimé en  $dB_d$ , lorsqu'une antenne dipôle sert de référence. Selon la définition précédente le gain  $G$  s'écrit comme suit :

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \cdot \frac{P(\theta, \varphi)}{P_a} \tag{I.6}$$

Où :

$P$  est la puissance d'alimentation d'une antenne.

### I.2.1.6. Le rendement de l'antenne :

Le rendement de l'antenne est le rapport entre la puissance rayonnée et la puissance fournie à l'antenne, soit :

$$\eta = \frac{P}{P_a} \quad (I.7)$$

Et peut être exprimée en fonction du gain et de la directivité :

$$\eta = \text{Gain} / \text{directivité} \quad (I.8)$$

Avec :

$P$  : puissance totale rayonnée.

$P_a$  : puissance d'alimentation de l'antenne.

Ce rapport caractérise la perte à l'intérieur de l'antenne.

### I.2.1.7. L'ouverture d'une Antenne :

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

### 1.2.1.8. La bande passante :

La bande passante est définie comme étant la plage de fréquences dans laquelle les performances d'un appareil électronique se situent dans certaines spécifications. Dans le domaine des antennes pour les applications terrestres, la bande passante correspond généralement à la gamme de fréquences dans laquelle 90% de la puissance incidente est transmise. Elle correspond à  $S_{11} = -10$  dB, et sous condition que le diagramme de rayonnement, ou la répartition de l'énergie rayonné, ne modifie pas cette bande [7]. Pour connaître la largeur de bande d'une antenne relativement au rayonnement, nous traçons le paramètre  $S_{11}$  de réflexion en fonction de la fréquence. Il est généralement admis que si ce paramètre est inférieur à  $-10$  dB ou  $-15$  dB, alors la puissance de rayonnement est suffisante. Il suffit ensuite de repérer sur la courbe les valeurs des fréquences correspondant à cette valeur comme montre la figure (I.3)[8]

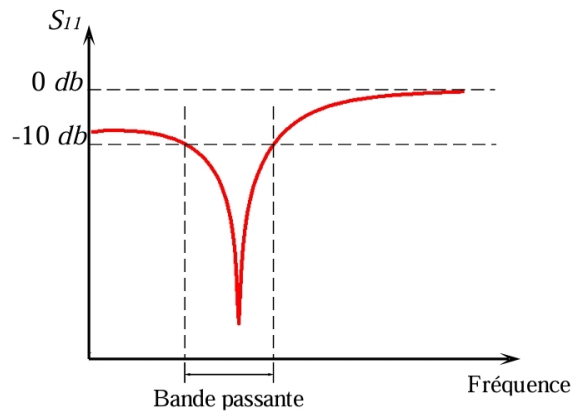


Figure I.3 : Bande passante et coefficient de réflexion [1]

### I.2.1.9. Le VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) :

Dans les notes d'application d'antennes, l'adaptation de l'antenne est souvent caractérisée par le rapport d'onde stationnaire (ROS) ou Voltage Standing Wave Ratio (VSWR). Lorsqu'il y a désadaptation, la réflexion d'une partie de l'onde incidente et l'addition avec l'onde incidente conduit à l'apparition d'une onde stationnaire dans la ligne qui relie l'antenne à la source (ou au récepteur). [8] Le VSWR est donné par :

$$VSWR = \frac{1+|S_{11}|}{1-|S_{11}|} \quad (I.9)$$

Le VSWR minimal correspondant à une bonne adaptation. Une bonne conception d'antenne doit avoir une impédance de  $50 \Omega$  à  $75 \Omega$ .

### 1.2.2. Différents types d'antennes:

Les antennes sont divisées en plusieurs catégories selon la géométrie, le gain, la forme du faisceau, et la bande passante. Ainsi, on peut les classer comme suit [1, 6] :

#### A. Selon la forme géométrique :

- antennes filaires: dipôle, boucle, spirale.
- antennes a ouvertures : cornet, fente, antenne a réflecteur .
- antennes imprimées : patch, dipôle imprimé, spirale.

#### B. Selon le gain

- gain élevé : cornet.
- gain moyen : planaire.
- gain bas : dipôle, fente, patch.

### C. Selon la forme du faisceau

- omnidirectionnelle: dipôle.
- faisceau étroit : antenne réseau.
- faisceau large : planaire.

### D. Selon la largeur de bande

- bande large : spirale.
- bande étroite : patch, fente.

#### I.3 Les antennes patchs :

L'antenne patch (ou antenne imprimée) est une antenne planaire communément réalisée sur de circuit imprimé. Elle est souvent utilisée dans les communications mobiles en raison de leur faible dimension et de leur facilité d'intégration. Elle est composée d'un élément rayonnant, d'un plan de masse et d'un substrat diélectrique de permittivité  $\epsilon_r$  et de perméabilité  $\mu_r$ . Le patch peut être excité en utilisant d'une alimentation coaxiale où en utilisant une ligne micro-ruban comme nous le constatons sur la Figure I. 4. Cependant cette antenne dispose d'une bande passante généralement réduite (inférieure à 5% à  $S_{11} < -10dB$ ), peut être étendu grâce à l'utilisation de patchs parasites. Il est possible à la fois de rendre cette structure miniature multi-bandes (par l'insertion des fentes ou l'utilisation des géométries fractales qui seront utilisés par la suite) et à la fois d'obtenir des polarisations linéaires ou circulaires selon le mode d'alimentation [9].

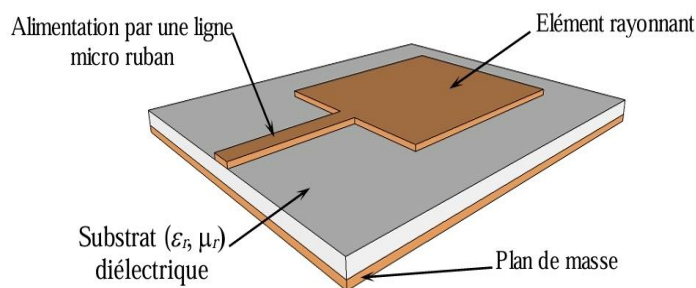


Figure I.4 : La structure d'une antenne patch [9].

#### I.3.1. Formes du patch :

L'élément rayonnant peut être rectangulaire, carré, circulaire ou simplement un dipôle (Figure I.5). Ces formes sont les plus couramment utilisées car elles sont très faciles à analyser et à fabriquer, mais elles présentent également des diagrammes de rayonnement très intéressants.[10],[11].

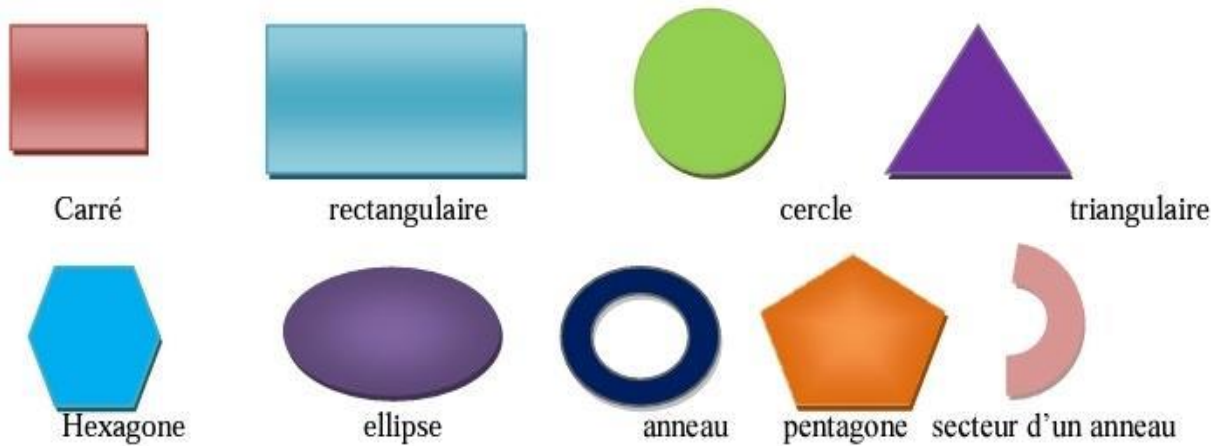


Figure I.5: Différents formes des antennes imprimées [10].

### I.3.2. Principe de fonctionnement :

Dans sa configuration originale, Le mécanisme de rayonnement d'antenne patch rectangulaire s'effectue à partir de sa forme géométrique. Une fois, la ligne d'alimentation excitée par une source RF, une onde électromagnétique se propage sur cette ligne, puis attaque l'élément rayonnant. Une distribution de charge va se mettre à l'interface substrat plan de masse, sur et sous le composant rayonnant, Figure I.6 , ce qui va provoquer :

- Une inversion des phases des composantes verticales du champ électrique sur la longueur de l'antenne.
- Inversement à précédemment, des rayonnements qui sont en phase dans le plan de l'antenne et convenable aux composantes horizontales des lignes de champ entourant l'élément imprimé.
- Une modélisation de l'antenne patch rectangulaire par une cavité à 4 murs magnétiques (bords de la cavité) et 2 murs électriques (formés par les métallisations).

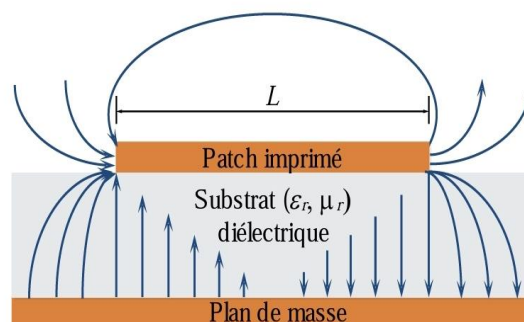


Figure I.6 : Rayonnement d'une antenne patch rectangulaire [11].



La répartition des lignes de champs étirées autour et dans la structure dépend essentiellement :

- de la largeur  $w$  des circuits métallisés.
- des propriétés du substrat : à savoir sa constante diélectrique et son épaisseur  $h$ .

### I.3.3. Les techniques d'alimentation :

Même si elle peut rayonner, l'antenne n'est utile que s'il existe un circuit d'alimentation permettant une transmission acceptable de l'énergie fournie à l'antenne. Le choix du type d'alimentation dépend de contraintes telles que la simplicité du circuit d'alimentation, la séparation entre le circuit d'alimentation et l'antenne, ou la réticulation éventuelle de l'élément rayonnant. Les antennes micro ruban ont principalement deux mécanismes d'alimentation. Alimentation avec contact (direct) et alimentation sans contact [12].

#### I.3.3.1. Alimentation via ligne micro ruban :

Pour cette alimentation, la ligne microruban est connectée au patch. Cette ligne lui apporte de l'énergie. Néanmoins, ce type d'alimentation a ses inconvénients car il amène un rayonnement parasite.

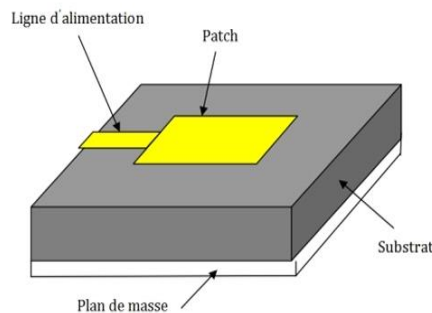


Figure I-7 : Alimentation par ligne microruban [13].

#### I.3.3.2. Alimentation par la sonde coaxiale:

Dans cette alimentation le conducteur externe du connecteur coaxial est relié au masse et le connecteur intérieur est relié au patch . Sa bande passante étroite et la difficulté de la modélisation spécialement pour des substrats épais cause une grande peine pour cette alimentation. Parmi ses avantages, elle peut être appliquée à n'importe quel emplacement du patch [14] , [15] .

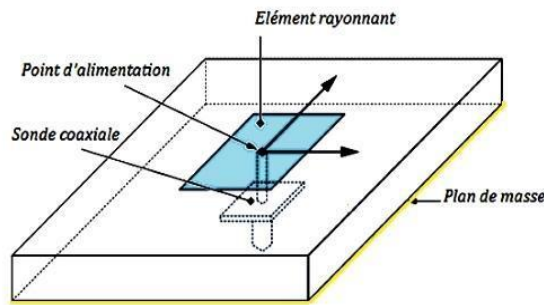


Figure I.8 : Alimentation par la sonde coaxiale [15].

**I.3.3.3. Alimentation par couplage électromagnétique :**

Comme montre la Figure I. 9 ; l'alimentation par couplage moins répandu utilise le couplage direct d'une ligne micro ruban placée entre l'élément rayonnant et le plan de masse positionné entre deux couches de diélectrique, situées l'un au-dessus de l'autre [16].

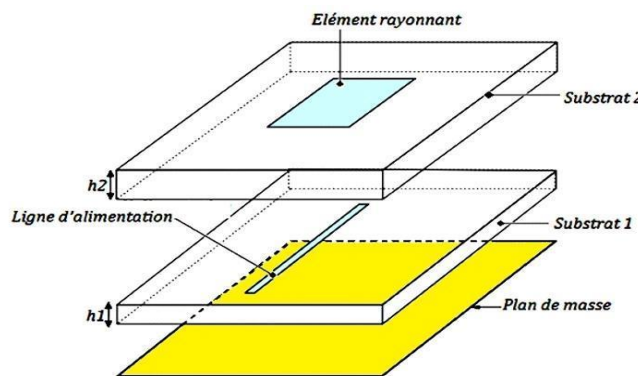


Figure I.9 : Alimentation par couplage électromagnétique [16].

**I.3.3.4. Alimentation au travers d'une ouverture dans le plan de masse :**

L'élément rayonnant et le circuit microbande sont placés de part et d'autre du plan de masse. Une ouverture dans celui-ci permet l'excitation de l'antenne, comme le montre la Figure I.10.

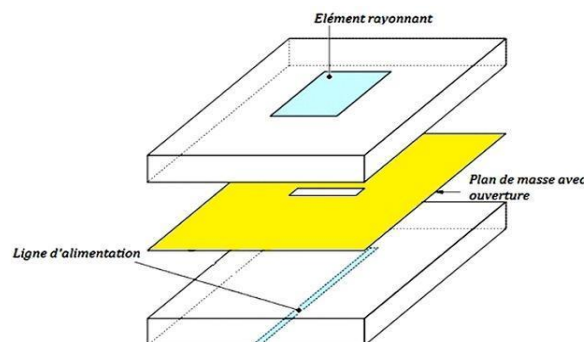


Figure I .10: Alimentation au travers d'une ouverture dans le plan de masse [16] .

L'ouverture de couplage est habituellement centrée sous le patch. La quantité de couplage à partir de la ligne d'alimentation au patch est déterminée par la forme, la taille et l'emplacement de l'ouverture. Puisque le plan de masse sépare le patch et la ligne d'alimentation, le rayonnement parasite est minimisé. Généralement, des matériaux à constante diélectrique élevée sont utilisés pour le substrat inférieur et des matériaux à faible constante diélectrique plus épais sont utilisés pour le substrat supérieur afin d'optimiser le rayonnement du patch. Le principal inconvénient de cette technique d'alimentation est qu'elle est difficile à fabriquer du fait des multiples couches qui augmentent également l'épaisseur de l'antenne. Cette technologie d'alimentation fournit également une bande passante étroite.

### I.3.4. Techniques d'adaptation des antennes imprimées :

Pour chaque système qui convertit l'énergie sur une ligne de transmission a besoin d'adaptation car la ligne convertit l'impédance de charge en une autre valeur d'impédance au droit de la source. Par conséquent, ce que voit la source dépend de l'impédance de charge, de la longueur électrique de la ligne et de son impédance caractéristique [17], [13].

#### I.3.4.1. Adaptation par ligne quart d'onde:

Lors de la conception de circuits micro-ondes, l'objectif est généralement de faire adapter, C'est-à-dire qu'elle est ramenée à une impédance (souvent caractéristique) différente de l'impédance obtenue en bout de circuit [17],[13].

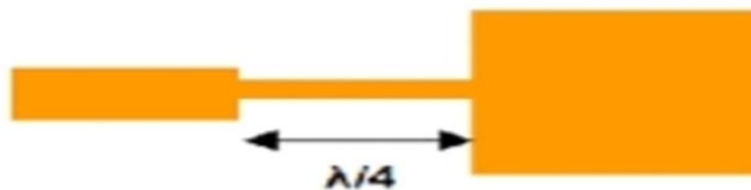
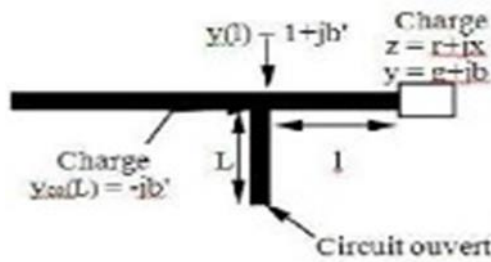


Figure I.11 : adaptation avec une ligne quart d'onde [13] , [17].

#### I.3.4.2. Adaptation par stub :

Une autre manière d'obtenir une adaptation de charge consiste à utiliser des stubs. Grâce à un stub en un circuit ouvert (open stub) ou en court-circuit (short stub). La solution retenue est éventuellement celle présentant l'encombrement le plus faible. Le raisonnement peut se faire en impédance mais il est facilement de travailler dès le départ en admittance pour faire la somme des impédances parallèles

ramenées [17], [13]. Un stub est un tronçon de ligne de longueur  $s$  que l'on branche en dérivation sur la ligne principale à une distance  $d$  de la charge [17], [13].



I.12: Stub en circuit ouvert [17], [13].

**I.3.4.3. Adaptation avec encoches :**

Pour adapter l'antenne, on utilise des encoches, il suffit de modifier la géométrie du patch. Les dimensions des encoches [17], [13].

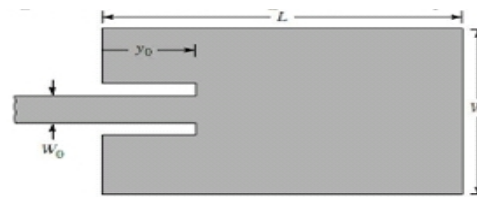
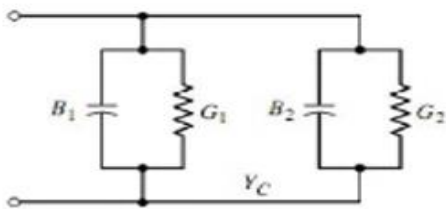


Figure I.13: L'équivalence en circuit [17], [13].

Figure I.14: Patch adapté par encoches de longueur  $y/4$

**I.3.5. Les domaines d'applications des antennes imprimées :**

Les domaines d'applications des antennes imprimées sont de plus en plus variés, les principales applications sont [18] :

- La téléphonie mobile.
- Les radars.
- Les télécommunications spatiales.
- La télémétrie des missiles et la télésurveillance.
- Guidage des missiles et télédétection.

**I.4. Les antennes fractales**

Les antennes fractales ont été innové pour la première fois en 1988 par Dr .Nathan Cohen [19].Chaque partie de la forme d'antenne fractale est une version similaire à la forme originale [20].

Elles sont façonnées à l'aide de la géométrie fractale naturelle. Les Antennes fractales peuvent produire des versions fractales de tous les types d'antennes existants, y compris dipôle, unipolaire, patch, spiral et hélicoïdal comme ainsi que des variantes compacte de chacun, possible par la technologie fractale. Les antennes patch fractales peuvent être conçues dans une variété de formes, y compris tapis de Sierpinski, boucles de Minkowski et îles Koch. Cette technique de géométrie fractale permet une réduction de taille de 20 à 40% par rapport à la taille d'origine, notez également que ce type de géométrie est idéale pour concevoir des circuits spécifiquement pour des applications multi-bandes. Cependant, cela réduit sensiblement la bande passante [21]. Elle est également utilisée dans la conception des antennes afin d'assurer une miniaturisation de taille tout en combinant l'aspect multi-bandes [22], ou large-bande et un encombrement réduit [23].

#### **I.4.1 Principaux avantages :**

- Surface occupée très réduite : la compacité résulte du caractère irrégulier des formes fractales.
- Résonances multiples : le caractère multi-bande vient du caractère d'autosimilarité. Gain très important dans certain cas.

#### **I.4.2 Principaux inconvénients :**

- Réalisation très difficile liée à la complexité des formes.
- Gain faible dans d'autres cas.

#### **I.4.3. Les différentes formes fractales**

Il y a plusieurs formes fractales, classées sous trois catégories

- Les courbes fractales
- Les surfaces fractales
- Les volumes fractals

##### **I.4.3.1. Les courbes fractales :**

###### **a. La courbe de Koch :**

Le fractale de Koch est l'une des premières courbes fractales et sa construction est très simple. On commence par une ligne de départ droite, on divise cette ligne en trois parties égales, la partie médiane sera remplacée par deux autres parties de même longueur. Il s'agit de la première transformation répétée de la géométrie, connue sous le nom de générateur ou fractale de Koch d'ordre 1. Pour chacun de ces quatre nouveaux segments, nous répétons le même processus, comme le montre la Figure I.17 [24]. La

première itération de la droite de longueur  $l$  est remplacée par 4 segments de longueur  $\frac{l}{3}$ , à la seconde  $16 \times \frac{l}{9}$  et ainsi de suite. À chaque nouvelle itération, la longueur  $\frac{l}{3}$  est multipliée par  $\frac{4}{3}$ , ce qui signifie que la longueur de la courbe de Koch tend vers l'infini en itérations infinies. [25]

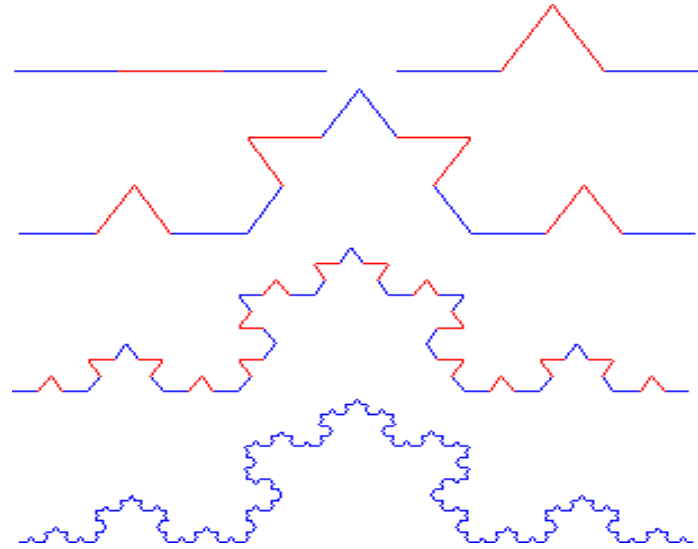


Figure I.15: Courbe de Koch [25].

**b. Ensemble de Cantor**

L'ensemble de Cantor est la poussière de Cantor, obtenue en éliminant itérativement le tiers central de chaque fragment (Figure I.16) .Afin d'avoir une représentation plus évidente d'une part, et d'introduire un lien entre mesures et ensembles d'autre part, les segments sont des barres de largeur fixe (barres de Cantor), représentant ainsi une densité uniformément répartie sur "l'ensemble support". [26], la dimension de cette fractale est :  $D = \frac{\log 2}{\log 3} = 0,6309\dots$

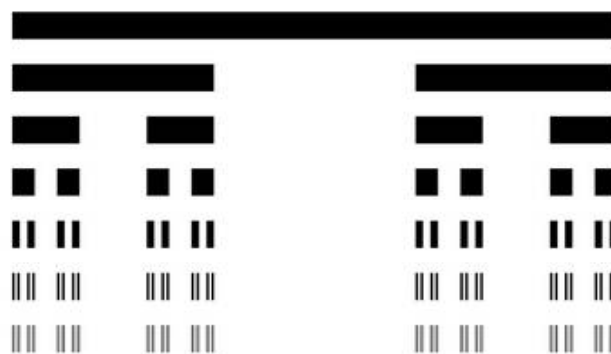


Figure I.16 La poussière de CANTOR [26].

**c. Fractale de Minkowski**

Ce type de courbe a été proposé par le mathématicien Hermann Minkowski (1864-1904). On part d'un modèle carré et on considère l'itération 0 (le modèle initial), puis on subdivise chaque partie du carré en cinq parties pour chaque partie du carré, et ainsi de suite (Figure I.17).[27]

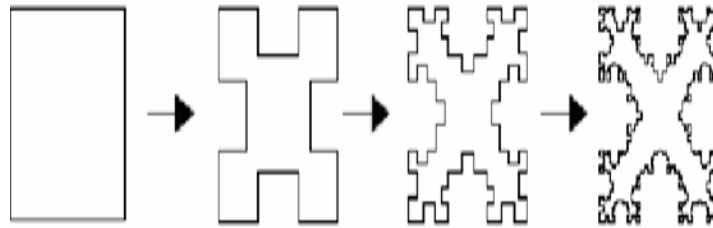


Figure I.17: la fractale de Minkowski [26]

**d. Les fractales d’Hilbert**

La construction géométrique de la courbe de Hilbert est définie par l'algorithme suivant : On divise d'abord le carré initial en 4 petits carrés égaux ; chacun de ces carrés est numéroté de manière que deux carrés successifs se touchent d'un côté, nous commençons par le carré en bas à gauche et se termine par le carré inférieur droit. On divise ensuite chacun de ces nouveaux carrés en 4 micro-carrés égaux, jusqu'à l'infini. [27]

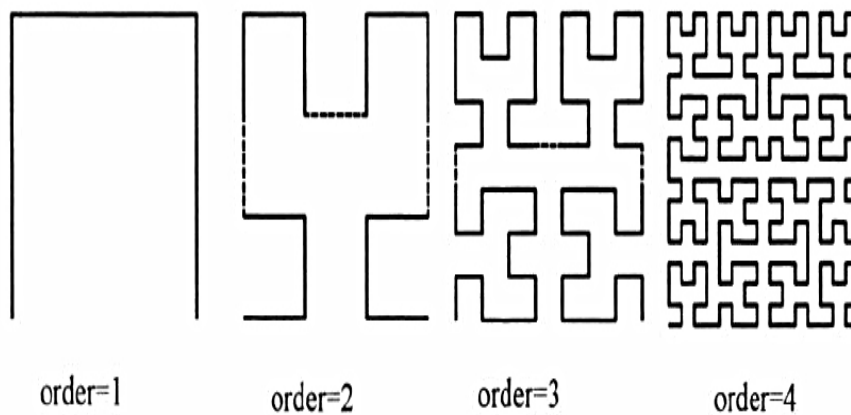


Figure I.18 fractale d'Hilbert [28].

**e. Les fractales de Peano :**

La construction géométrique la plus célèbre de la courbe de Peano commence par dessiner les diagonales d'un carré. Pour effectuer la deuxième étape, nous divisons le carré initial en neuf petits carrés congruents, puis traversons tous les carrés avec un trait au crayon passant par l'une de leurs

diagonales. De même pour chaque petit carré que nous subdivisons à nouveau, nous y traçons le même parcours. Le carré entier est réalisé dans un processus itératif jusqu'à l'infini (Figure I.19).[27]

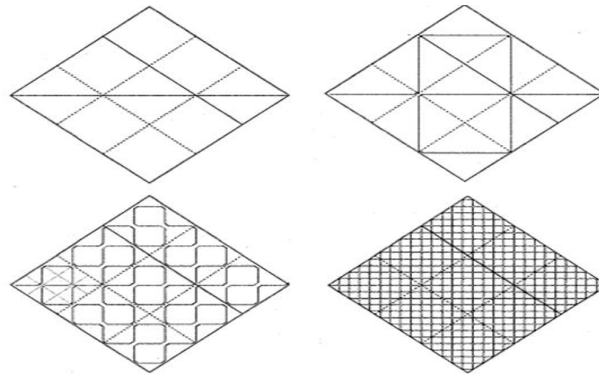


Figure I.19: Génération de la courbe de Péano [27].

### I.4.3.2. Les surfaces fractales

#### a. Le triangle de Sierpinsky :

La première fractale qui sera considérée est le fameux triangle de Sierpinsky [29]. La construction géométrique de cette fractale commence par un triangle équilatéral contenu dans un plan, comme illustré à l'itération 0 de la figure I.20. L'étape suivante du processus de construction consiste à supprimer le triangle central dont le sommet est au milieu de l'arête originale du triangle représenté à l'itération 0. Répétez ensuite le processus pour les trois triangles restants, comme indiqué dans la partie 2 de la figure I.20. Les deux étapes suivantes (étapes 3 et 4) pour construire le triangle de Sierpinski sont également illustrées à la figure I.20. Une génération [30].

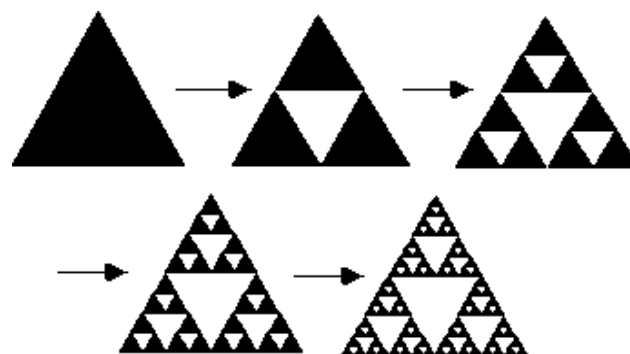


Figure I.20: Génération de la boucle fractale du triangle de Sierpinsky [30].



### b. Le tapis de SIERPINSKI:

La construction du tapis de SIERPINSKI est conçus à partir d'un carré plein et en appliquant récursivement les étapes suivantes :

- 1- On découpe le carré en neuf carrés égaux avec une grille de trois par trois,
- 2- On supprime la pièce centrale,
- 3- On applique cette procédure indéfiniment aux huit carrés restants[30].

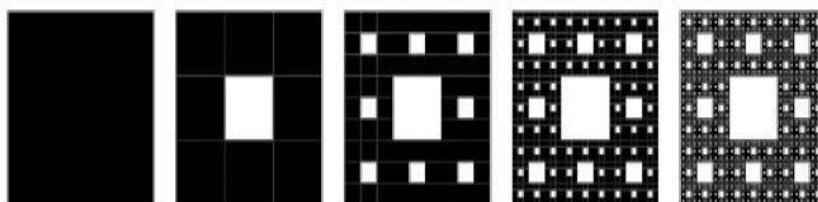


Figure I.21 : Le tapis de Sierpinski [30].

### I.4.3.3. Les volumes fractals

#### a. Le tétraèdre de Sierpinsky

Le tétraèdre de Sierpinski » est une version 3D du triangle de Sierpinski. Il S'agit de la figure que l'on obtient en partant d'un tétraèdre régulier (étape 0) et en itérant à infini opération suivante, appelée « opérateur de Hutchinson »: on passe de la figure obtenue à l'étape  $n$  à celle de l'étape  $n+1$  en lui appliquant simultanément les quatre homothéties ayant pour rapport  $\frac{1}{2}$  et pour centre chacun des quatre sommets du tétraèdre initial[26].



Figure I.22: Tétraèdre de Sierpinski [26].

#### b. L'éponge de Sierpinsky

Parfois appelée éponge de Menger-Sierpinski, est un solide fractal. C'est une extension de l'ensemble Cantor et du tapis de Sierpinski dans la troisième dimension, décrit pour la première fois par le

mathématicien autrichien Karl Menger en 1926. Pour construire une éponge Menger, vous devez d'abord construire un cube, puis couper le cube en 27 cubes de volume égal. Ensuite, nous enlevons le cube central de chaque côté et le cube central qui les touche. Vous pouvez répéter le processus à l'étape 2 pour chacun des 20 cubes restants. A chaque itération, le nombre de cubes est multiplié par 20, donc l'entité créée à la nième itération contient  $20^n$  cubes [26].

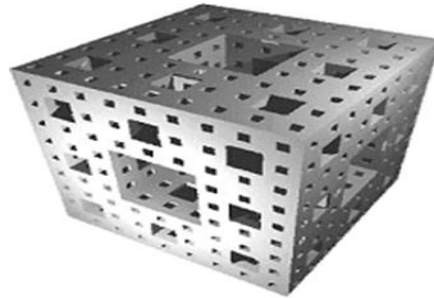


Figure I. 23: Eponge de Sierpinski-Menger - Ordre 3[26].

### I.5. Application des fractales

Les fractales connaissent aujourd'hui diverses applications dans de nombreux domaines scientifiques [1] et en plus de leurs utilités indéniables, elles permettent d'ouvrir de nouvelles perspectives de recherches.

En médecine, elles offrent la perspective de dépistage du cancer du sein, d'après les avis de plusieurs chercheurs américains, ils pensent de pouvoir établir un dépistage du cancer du sein grâce aux fractales. Ils ont prouvé que la chromatine (substance composée de molécules d'ADN, d'ARN et de protéines, contenue dans le noyau des cellules) est de structure fractale faiblement irrégulière dans les tissus sains du sein. Un autre domaine d'application est la fabrication d'antennes radio fractales où elles présentent une faible place tout en ayant un très bon rendement dans le domaine multi-bandes ou large bande d'émission [5].

### I.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons commencé par des généralités sur les antennes en présentant leurs types, principales caractéristiques. Ensuite on a présenté les antennes imprimées, leurs différentes formes, ainsi que leur principe de fonctionnement, ses techniques d'alimentation et d'adaptation. Enfin nous avons donné un aperçu sur la théorie des antennes fractales, en mettant en évidence leurs propriétés fondamentales, leurs différentes formes et leurs principales applications. De nos jours, l'antenne occupe une grande place d'où le challenge et de la réduire autant que possible. Dans le chapitre suivant nous nous intéresserons à la miniaturisation des antennes ainsi que ces différents techniques.

**Références bibliographiques du chapitre I :**

- [1] O. Picon et col, Les antennes Théorie, conception et application. Dunod, Paris, 2009.
- [2] C.A. Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design. John Wiley & Sons Inc, 1997.
- [3] X. Wang, et al., "Design and Characterization of Conformal Microstrip Antennas Integrated into 3D Orthogonal Woven Fabrics," Journal of Engineered Fibers and Fabrics, Vol. 7, pp. 76-80, 2012.
- [4] Y.-M. Lee, T. Wang, H.-C. Teng, and S. Cherng, "A Functional Microstrip Circuit Module For Annular Slot Antenna," Progress In Electromagnetics Research, Vol. 136, pp. 255- 267, 2013.
- [5] S.N. Makarov, Antenna and EM Modeling with MATLAB. John Wiley & Sons, Inc, 2002.
- [6] J.D. Kraus, Antennas. McGraw-Hill book company, New York, USA, 1950.
- [7] J.R. James, P.S. Hall, C. Wood, Microstrip antenna theory and design. Peter Peregrinus Ltd, New York, USA, 1981.
- [8] A. Boyer, « support de cours énoncé de travaux dirigés », Cours 5<sup>ème</sup> année réseau et Télécom. Institut national des sciences appliquées de Toulouse, 2011,
- [9] S. Phlaum, R. Staraj and G. Kossiavas, "Circularpolarizationwire patch antenna for RFID applications," 2012 6<sup>th</sup> European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), Prague, 2012, pp. 2997-3000.
- [10] Rouibah Ammar, « Etude d'une antenne microruban de forme arbitraire par la méthode FDTD » Magister en Electronique, 28/10/2009.
- [11] M. Titaouine, « Analyse des Antennes Microruban par le Modèle de la cavité, le Modèle de la ligne de transmission et la méthode des moments ; » Thèse de magistère université Ferhat Abbas, Sétif ; 1998.
- [12] Belabas Lynda, Chemmoun Lila : « Miniaturisation de l'antenne PATCH sous CST » ; Mémoire de Fin d'Etudes MASTER, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2017 / 2018.
- [13] Fouad Benamrane, « Conception d'une antenne Patch Microstrip » ; Master telecom hyperfréquence mémoire online; Université Sidi Mohamed Ben Abdellah (Fés) Maroc 2011.
- [14] Benazzouz Ghouti et Bensenane Ikram, « Conception et réalisation d'une antenne miniature pour l'application LTE », Université Abou bakr Belkaïd Tlemcen, 2018/2019.

- [15] S. E .Sandstrom, « A Compact Microstrip Patch Antenna For LTE Application, Master Thesis, Submitted For Degree Of Master In Electrical Engineering Specialization In Signal Processing & Wave Propagation », 22-2-2013.
- [16] R. S. G. K. A. P. C.Luxey , « Antenne imprimé-Bases et principe E3310 », Techniques de l'Ingénieur, Mai 2007.
- [17] Ben Tahar Zohra, Ben Abdesselam Sarah Yamina, « Réalisation d'une Interface graphique de Calcul des paramètres d'antennes patch et conception logicielle » Mémoire de Fin d'Etudes MASTER. Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, 2018/2019.
- [18] Amina Meftahi , Rabia Ouzzir, « Conception des nouvelles topologies des antennes multi fonctionnelles », Mémoire de Fin d'Etudes master, Université Abou bakr Belkaïd Tlemcen, 2016 / 2017.
- [19] <https://www.fractenna.com/nca-cohen-bio.html>
- [20] Fersiti Samira, Mahieddine Fatima Zahra, « Antennes à Plan de Masse Partielle de type Hilbert pour un fonctionnement Ultra Large Bande», MEMOIRE DE MASTER Université Abou Bakr Belkaïd de Tlemcen ; 26 Juin 2018
- [21] Sophie Vergerio. Recherche des caractéristiques optimales d'antennes multi-capteurs pour les systèmes MIMO. Autre. Université de Provence - Aix-Marseille I, 2007. Français. fftel-00182458f
- [22]AZZAZ RAHMAN Salima, ANALYSE ET CONCEPTION DES ANTENNES IMPRIMEES MULTIBANDES EN ANNEAUX CONCENTRIQUES POUR LES RESEAUX DE TELECOMMUNICATIONS, Juillet 2013
- [23] Sami HEBIB, Nouvelle topologie d'antennes multi-bandes pour applications spatiales, En vue de l'obtention du DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE TOULOUSE, 24 Novembre 2008.
- [24] AMEZIANE Djamel, Etude et Optimisation d'Antennes Fractales Plaquées, Mémoire de Magister de Télécommunications, UNIVERSITÉ ABOU-BEKR BELKAID-TLEMCEN ,20 mai 2009.
- [25] Carles Puente Baliarda, Member, IEEE, Jordi Romeu, Member, IEEE, and Angel Cardama, Member, IEEE , The Koch Monopole: A Small Fractal Antenna, IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION VOL.48,NO.11, NOVEMBER2000
- [26] Josiane Lajoie, “ La géométrie fractale ”, mémoire présenté à l'université du Québec, Juin 2006.
- [27]GANDOURA IBTISSEM , LAMER SOUMIA,CONCEPTION ET REALISATION DES ANTENNES FRACTALES IMPRIMEES ULTRA LARGE BANDE (ULB) A BANDE REJETEE ,Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de Master Académique ,Filière

Télécommunications ,Spécialité Systèmes des Télécommunications , Université 8Mai 1945 – Guelma, juillet 2019,p 06.

[28] Vesna Crnojević-Bengin, NOVEL COMPACT MICROSTRIP RESONATORS WITH MULTIPLE 2-D HILBERT FRACTAL CURVES Department of Electronics, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad, Trg D. Obradovica 6, 21000 Novi Sad, Serbia and Montenegro bengin@uns.ns.ac.yu

[29] L. La. Z. Wu. K. Lt. S. Yu. X. Wang. T. Li. G. La. X. Chen. and H. Zha.i. • Frequency Reconfigurable Quadrifilar Antenna Integrating With Dual-Band High-Impedance Surface. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 62, no. 9, pp. 4459-4467, Sep. 2014.

[30] Meriem HARBADJI, Contribution à l'étude d'antennes miniatures multi-bandes, faculté des sciences de la technologie, option hyperfréquences et télécommunications, université des frères Mentouri Constantine ,21 /11/2018, p 63

**CHAPITRE II:**  
**ÉTAT DE L'ART SUR LES ANTENNES**  
**MINIATURES**

**II.1. Introduction :**

De nos Jours, les antennes se retrouvent dans des objets usuels de toutes sortes. Maintes applications qui s'étendent des télécommunications (terminaux mobiles) aux moyens de transport (capteur de pression pour les pneus d'une voiture) en passant par la médecine implant auditif par exemple). Dans le cadre de généralisation des systèmes de communication sans fil, il existait un besoin de miniaturiser les antennes pour permettre leur intégration sur de petits objets. L'antenne est le composant le plus volumineux et sa miniaturisation constitue un des défis actuels les plus importants des concepteurs d'objets communicants. La multiplication des standards de communication renforce également cette intégration et cette miniaturisation puisqu'aujourd'hui près d'une dizaine d'antennes doivent coexister sur un même terminal mobile.

Ce chapitre sera consacré en premier lieu aux antennes miniatures, qui correspondent à notre étude, ainsi que les techniques qui servent à l'élargissement de la bande passante

**II.2. Les antennes miniatures :**

La miniaturisation d'une antenne consiste à réduire ses dimensions, sa surface et son volume à fréquence de résonance. Il doit être intégré le plus près possible de l'antenne du circuit d'adaptation nécessaire au fonctionnement. Les limites théoriques ont été fixées par WHEELER en 1947 et par CHU en 1948. Ce dernier précise la relation entre la taille de l'antenne et sa bande passante (ou son facteur de qualité).

D'après les travaux de Wheeler [1], une antenne est dite électriquement petite (AEP) si sa dimension maximale est inférieure à  $\frac{\lambda}{\pi}$  ( $\lambda$  étant la longueur d'onde), cette valeur est souvent appelée le radian sphère [2]. Cette définition est équivalente au fait de dire qu'une antenne est électriquement petite si elle vérifie la condition suivante [3]:

$$K_a < 1 \quad (II.1)$$

Où :

$K$  est le nombre d'onde égale  $\frac{2\pi}{\lambda}$ , et  $a$  le rayon de la sphère minimale qui inclut l'antenne (Figure II. 1).

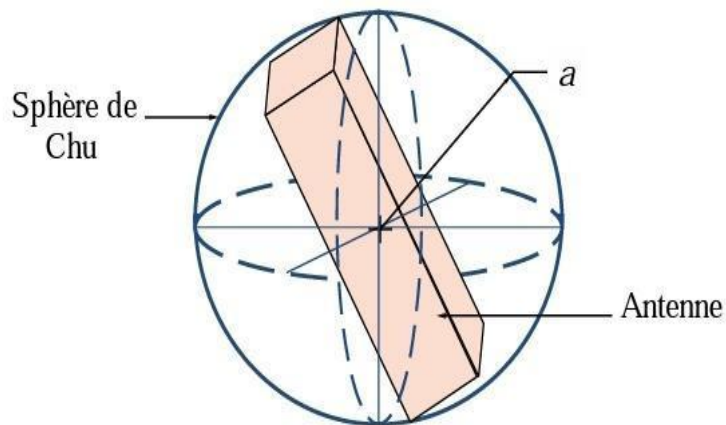


Figure II.1: Sphère minimale qui englobe l'antenne : sphère de Chu [4].

Le rayon de la sphère correspond à la distance de transition entre le champ proche ou l'énergie électromagnétique est stockée dans l'antenne et le champ lointain où elle est propagée. La réduction de la taille de l'antenne par rapport à la longueur d'onde électrique limite le rendement radioélectrique de l'antenne. Les performances d'une AEP sont caractérisées par la taille électrique  $Ka$ , le facteur de qualité  $Q$  (ou bande passante), et l'efficacité. En effet, plusieurs études ont été réalisées pour déterminer la valeur minimale du facteur de qualité (et donc maximum de bande passante) pour une taille d'antenne donnée.

### II. 3. Avantage et Inconvénient de la miniaturisation :

La miniaturisation offre de nombreux avantages dans l'air [5]. Il réduit l'encombrement, c'est-à-dire que les éléments qui prennent moins de place sont préférés aux structures de plus en plus volumineuses car plus faciles à transporter, stocké, mettre en réseau sans encombrement. Il est généralement utilisé plus pratique. Il réduit également le poids, le prix et la consommation d'énergie et de matériaux. De plus, la miniaturisation permet la production de dispositifs multifonctionnels. Comme pour de nombreuses technologies, la miniaturisation présente des avantages, mais aussi des inconvénients [6], comme la complexité des opérations de séparation des métaux lors du recyclage, qui limitent les avantages tirés des économies d'énergie. Dans le cas des nanotechnologies, le recyclage des nano éléments est quasiment impossible. A puissance égale, la génération de chaleur du circuit électronique miniaturisé est



plus importante, et la surface d'échange est réduite. D'autre part, en miniaturisant l'antenne, on sous-entend une dégradation de ses performances.

#### II.4. Les techniques de miniaturisation:

La modification de la forme et de la structure de l'antenne affecte sur le comportement du courant. Ces modifications sont toujours les moyens les plus efficaces de réduction de la taille d'antenne. En effet, l'allongement de la longueur électrique et donc l'abaissement de la fréquence de résonance des modes fondamentaux et supérieurs de l'élément est une conséquence révélée par cette technique. Cependant il existe différentes techniques pour traiter le problème de l'encombrement de l'antenne et obtenir des antennes de petites dimensions. Nous allons présenter ici les techniques les plus courantes.

##### II.4.1. Substrat à haute permittivité :

La longueur électrique peut être étendue en utilisant des matériaux à constantes diélectriques élevées. La longueur d'onde dans un matériau avec une permittivité relative  $\epsilon_r$  est donnée par l'équation (II.2) où  $\lambda$  est la longueur d'onde,  $f$  la fréquence et  $c$  la vitesse de la lumière :

$$\lambda = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{II.2})$$

L'augmentation de la permittivité du substrat réduit la longueur résonante de l'élément. Les antennes utilisant ce type de substrat souffrent souvent d'une réduction de la largeur de bande et d'une efficacité moindre. Les coûts de production ont également augmenté [7].

##### II. 4.2. Les métas matériaux :

L'utilisation de méta matériaux est une approche relativement nouvelle de la miniaturisation. Ces matériaux artificiels à permittivité et perméabilité uniformes ont des propriétés électromagnétiques inhabituelles [8]. Ils apportent de nouvelles propriétés physiques qui permette le confinement des ondes électromagnétiques dans des dimensions réduites (propriétés basées sur les lois de Snell-Descartes inversées: indice de réfraction du milieu négatif). Ce sont des structures périodiques de dimensions inférieures à la longueur d'onde.

##### II.4.3. Ajout de court-circuit - antennes PIFA :

L'ajout d'un court-circuit reste une bonne solution pour réduire la taille de l'antenne. Cette méthode est principalement utilisée pour les antennes PIFA [9]. Ils se composent d'une plaque métallique rayonnante qui est court-circuitée à la terre. La largeur du short peut être plus ou moins grande selon les propriétés recherchées. Le radiateur est alimenté par une alimentation électrique verticale, qui est la mieux adaptée à ce moment. L'air est généralement le diélectrique utilisé entre le plan de masse et la plaque rayonnante, (Figure II.2) Cependant d'autres matériaux peuvent être utilisés pour assurer un meilleur maintien mécanique de la structure (comme de la mousse par exemple). Ces antennes sont compactes et leurs coûts de fabrication sont faibles. Réalisées sur un circuit métallique flexible découpé et plié ou en matière plastique métallisée, qui peut être replié sur elles-mêmes pour réduire les dimensions du plateau rayonnant. L'insertion des fentes dans cette plaque fait apparaître d'autres fréquences de résonance. Le rayonnement de ce type d'antenne se produit généralement dans toutes les directions de l'espace.

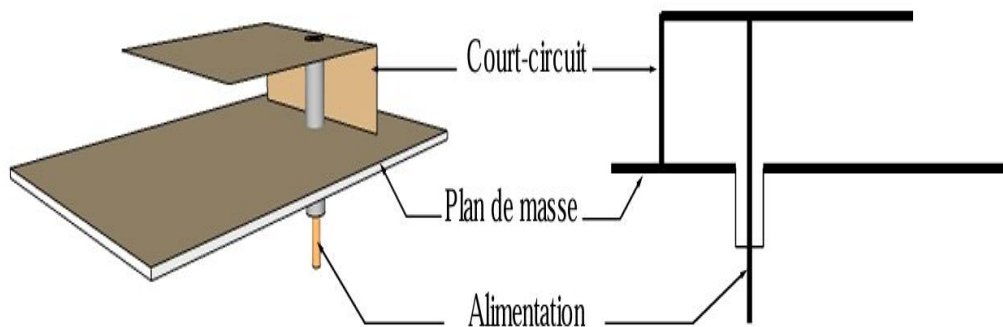


Figure II.2 : Structure de l'antenne PIFA [9].

Par rapport aux antennes demi-onde, les antennes PIFA sont également de taille réduite. En effet, ajouter un court-circuit entre l'élément rayonnant et le plan de masse le long de la ligne où le champ électrique est nul réduit la taille de l'antenne. Comme le montre la Figure II.3,

l'emplacement où le court-circuit se trouve sur la PIFA est celui où le champ électrique de l'antenne demi-onde est maximal. Ainsi, tous les modes supérieurs pairs du résonateur sont supprimés, le champ  $E$  est nul dans ce point. Seules les modes impairs (mode (1,0), mode 3 (3,0), ...) resteront.

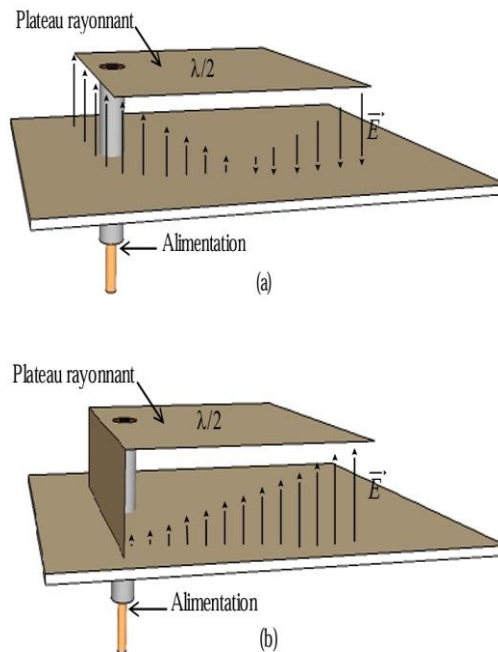


Figure II.3 : Représentation de champ électrique du demi-onde, (b) quart-onde [9].

Ainsi, afin de réduire la taille de l'antenne, les courts-circuits ajoutés peuvent être de type verticaux, plan [10, 11] et filaire [12], généralement réalisé par une structure de type languette centre l'élément rayonnant et le plan de masse (Figure II.4)

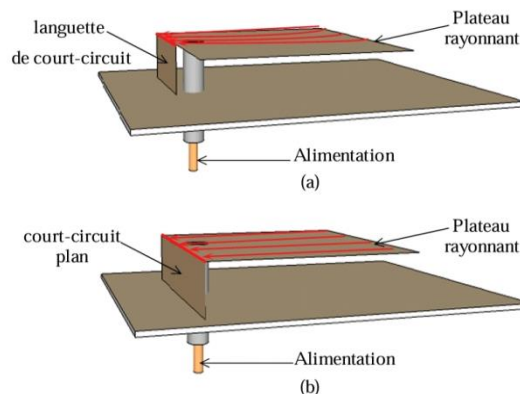


Figure II.4: Antenne PIFA : (a) avec languette de court-circuit (b) avec court-circuit plan [12].

Lorsque le court-circuit est placé au coin de la plaque rayonnante (a), le trajet des courants est incurvé. Il est plus long que dans le cas où le court-circuit est plan (b) et où la trajectoire du courant est linéaire. La fréquence de résonance fondamentale des deux structures est différente. En effet pour un court-circuit de type languette, nous obtenons une fréquence de résonance plus faible, que l'on peut calculer par:

$$f_r = \frac{c}{4(L+W+H)} \quad (\text{II.3})$$

Où :

$c$  : est la vitesse de la lumière,  $L$  : la longueur du plateau rayonnant,  $W$  : est la largeur du plateau rayonnant,  $H$  : est la hauteur du plateau rayonnant.

Avec un court-circuit plan nous avons :

$$f_r = \frac{c}{4(L+H)} \quad (\text{II.4})$$

L'ajout de court-circuit produit un effet inductif dépendant de sa dimension. En augmentant la partie imaginaire de l'impédance d'entrée de l'antenne puis en supprimant certains des modes de la cavité, ces effets ont un réel impact sur les performances de l'antenne. La fréquence de résonance varie selon le type de court-circuit utilisé. Elle varie également en fonction de sa distance par rapport à la source d'alimentation [13]. L'antenne PIFA ou IFA présentée précédemment minimise la spécificité des objets de communication. Elles se sont avérées être une solution efficace pour réduire de moitié la taille sans atténuer indûment l'efficacité du rayonnement ou la bande passante. Ces performances sont à l'origine de leur utilisation dans les objets de communication [14-15]. Cependant, lorsque l'en veut couvrir les basses fréquences, il ne suffit plus d'utiliser une PIFA ou une IFA.

#### **II.4.4. Repliement des éléments :**

Le repliement est également une technique pour apporter des modifications à la forme d'originale de l'antenne. Ceci ayant comme but la réduction de ses dimensions. Les deux configurations sont représentées sur la Figure II.5 [16]. (a) charge capacitif avec l'ajout d'un élément vertical comme élément rayonnant. (b) le chargement capacitif avec repliement des éléments.

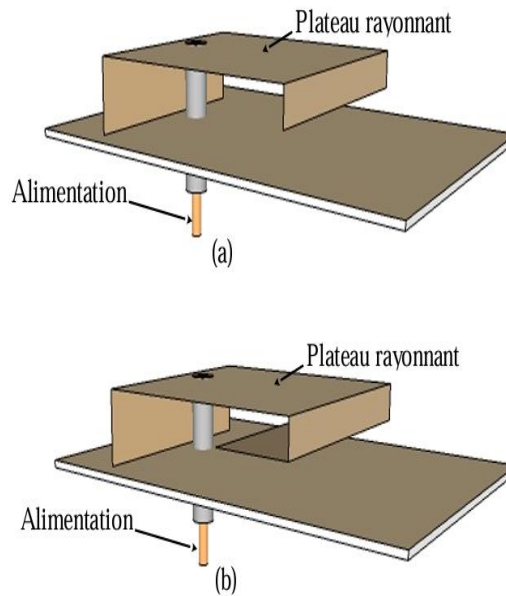


Figure II.5: Chargement capacitif en bout de l'élément : (a) avec l'ajout d'un élément vertical, (b) par repliement de l'élément [16].

Le principe de la réduction est d'interférer avec le trajet du courant, abaissant ainsi la fréquence de résonance. Le pliage de la plaque rayonnante réduit non seulement l'encombrement de la structure, mais crée également un effet capacitif, qui contribue également à abaisser la fréquence de résonance. Cet effet capacitif peut être contrôlé en réglant certains paramètres de l'antenne comme indiqué dans l'équation (II.5).

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot S}{h} \quad (\text{II.5})$$

Où :

$\epsilon_0$  est la permittivité du vide  $8,85 \cdot 10^{-12} \text{F.m}^{-1}$ ,  $\epsilon_r$  est la Permittivité relative,  $S$  l'aire des surfaces métalliques en regard l'une de l'autre et  $h$  est la distance entre les deux plateaux métallique. L'augmenter de la distance entre les deux plaques métallique et/ou l'augmenter les surfaces métallique se faisant face, va donc augmenter la valeur de la capacité et baisser ainsi que la fréquence de résonance. Cependant, en augmentant la capacité équivalente du circuit, la bande passante et l'efficacité peuvent d'être dégradées.

#### II.4.5. Ajout de fentes dans l'élément rayonnant :

Nous définissons une "fente" comme une coupure ouverte dans une surface métallique conductrice [17] qui force les courants de surface à allonger leur trajet pour la contourner. Par conséquent, l'insertion d'une fente dite débouchant ou non débouchant (Figure II.6) réduira la fréquence de résonances à un volume d'antenne constant. L'insertion de fentes est une étape fondamentale vers la miniaturisation des prototypes d'antennes.

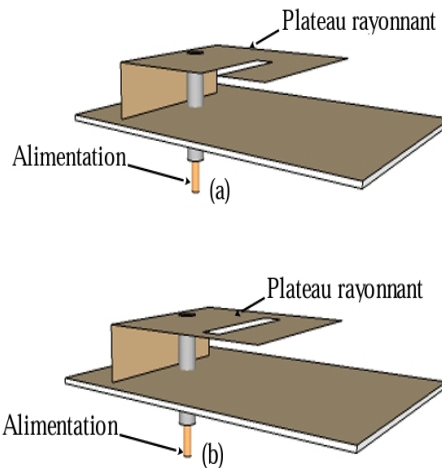


Figure II.6 : Antenne PIFA : (a) avec fente débouchante, (b) avec fente non débouchante [17].

Une autre solution consisterait également à insérer quelques fentes débouchantes de part et d'autre de l'élément rayonnant, qui agit sur le courant en étirant, les obligeant également à les contourner. La généralisation de ce principe à plusieurs fentes doit tenir compte du fait que certaines antennes présentent des méandres latéraux [18]. En effet en "méandrant" un monopôle simple, on augmente, sans changer la longueur du conducteur. Les fréquences de résonance passent aux basses fréquences. En réduisant la fréquence de résonance [19], ce principe va créer des effets capacitifs, qui se répartissent autour de la fente.

## II.5. Les techniques d'élargissement de la bande :

Les antennes micro ruban, très étudiées depuis de nombreuses années, présentent plusieurs avantages, comme leur faible poids et encombrement, leur facilité de fabrication, leur capacité à être conformée, etc. Elles constituent donc une solution intéressante pour obtenir une antenne unidirectionnelle. Néanmoins, un des inconvénients majeurs est leur faible bande passante, qui est de l'ordre de quelques pourcents. De nombreux travaux ont été effectués pour élargir la bande passante. Nous pouvons citer par exemple, les techniques suivantes :

**II.5.1. La technique de la fente :**

À l'heure actuelle, la diversité des normes de communication mobile sans fil, telles que : GSM, DCS, UMTS, WLAN, Bluetooth, TV numérique et ainsi de suite. Le besoin urgent d'antennes compactes multifréquences et/ou large bande, notamment pour assurer la compatibilité de différentes normes ou accéder à plusieurs services à partir du même appareil, a motivé les chercheurs à trouver plus de modèles d'antennes. Les modes supérieurs peuvent être réduits à l'aide de structures de court-circuit ou de fentes rayonnantes. Nous définissons une "fissure" comme une coupure ouverte dans la surface conductrice d'un métal, provoquant l'allongement du trajet du courant de surface autour de lui. L'insertion d'une fente dans l'élément rayonnant est une solution intéressante pour réduire la taille de l'antenne.

L'insertion d'une fente peut créer de nouvelles résonances lorsque le courant circule à travers l'élément rayonnant. Le choix de la forme et de la longueur de ces fentes déterminera la fréquence de fonctionnement et l'impédance d'entrée de l'antenne. [20]

**II.5.2. Combinaison de plusieurs éléments rayonnant :**

L'association de deux ou plusieurs éléments rayonnants mono bande (résonateurs) de même type ou de type différent est une technique classique d'obtention d'antennes large bande, l'alimentation des éléments qui composent ces antennes peut être assurée de deux manières différentes : alimentation directe au port d'excitation et alimentation par couplage électromagnétique. Les différents éléments génèrent leurs propres fréquences de résonance fondamentales et supérieures, et le choix de la longueur de résonance des éléments rayonnants de ces antennes du même ordre de grandeur permet d'obtenir une large bande passante. Dans le cas des antennes imprimées, l'association de plusieurs éléments rayonnants est assurée en juxtaposant les éléments dans un même plan ou en les empilant les uns sur les autres. [20]

**II.5.3. Les technique fractales :**

La Technologie fractale est bien connu que le périmètre de l'antenne est le facteur décisif pour déterminer la fréquence de résonance, et l'une des solutions pour augmenter le périmètre de la surface est d'utiliser des fractales, de sorte que les antennes aux formes fractales peuvent atteindre un fonctionnement à large bande. Parmi les fractales les plus couramment utilisées figurent celles de Von Kock, Hilbert et Sierpinsky. [21]

**II.6. Pourquoi on utilise une large bande ?**

On cherche à couvrir un large spectre de fréquence pour atteindre les objectifs suivants :

- Offrir des débits importants.
- Multiplier les normes accessibles.
- Faible susceptibilité à l'évanouissement du a la propagation par trajets multiples.
- Une sensibilité moindre au brouillage.
- Communications protégées.
- Faible puissance.
- Propriétés de pénétration.
- Capacité d'un canal de transmission.

**II.7 Conclusion :**

A l'heure actuelle, tout système de communication fonctionnel doit être qualifié de performant et de taille miniature. L'un des principaux composants d'une chaîne de transmission sans fil est l'antenne. Pour cet effet, Les concepteurs en hyperfréquences sont amenés à mettre en œuvre des technologies « faible coût, aspect faible poids en volume et épaisseur. Dans le cadre de ce chapitre, nous nous intéresserons aux antennes miniatures, ainsi que les techniques de miniaturisation. Dans la deuxième partie, nous avons donné brièvement les techniques d'élargissement de la bande passante d'une antenne imprimée ainsi que leur utilité dans les systèmes de communications. Le prochain chapitre sera consacré à la conception d'une antenne patch fractale miniature et large bande destinée à des applications satellitaires à travers la bande Ku.



**Références bibliographiques du chapitre II :**

- [1] H. A. Wheeler, "Fundamental Limitations of Small Antennas," Proceedings of the IRE, vol. 35, no. 12, pp. 1479-1484, 1947.
- [2] H. A. Wheeler, "The Radian sphere around a Small Antenna," Proceedings of the IRE, vol. 47, no. 8, pp. 1325-1331, 1959.
- [3] R. C. Hansen, "Fundamental limitations in antennas," Proceedings of the IEEE, vol. 69, no. 2, pp. 170-182, 1981.
- [4] L. J. Chu, « Physical Limitations of Omni-Directional Antennas,» Journal of Applied Physics, vol. 19, no. 12, pp. 1163-1175, 1948.
- [5] A. Chami « Miniaturisation Et Intégration D'antennes Imprimées Pour Systèmes ULB Pulsés » Université Nice Sophia Antipolis. France. 2011
- [6] K.R. Carver And J. W. Mink « Microstrip Antenna technology » IEEE Trans. Antennas Propagat , Vol AP-29, PP2-24, JAN 1981.
- [7] J. L. Volakis, C.-C. Chen, and K. Fujimoto, Small antennas: miniaturization techniques & applications. New York: McGraw-Hill, 2010.
- [8] V. Veselago, «The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$ ,» Soviet Physics Uspekhi, vol. 10, pp. 509-514, 1968.
- [9] S.J. Liao, K.-L. Wong and L.-C. Chou, «Small-size uniplanar coupled-fed PIFA for 2.4/5.2/5.8 GHz WLAN operation in the laptop computer,»; Microw. Opt. Technol. Let., vol.51, pp. 1023-1028, 2009.
- [10] J R. Chair, K. M. Luk, and K. F. Lee, « ;Small dual patch antenna,»; Electronics Letters, vo.35, pp. 762-764, 1999.
- [11] R. Chair, K. M. Luk, and K. F. Lee, «;Bandwidth and cross-polarization characteristics of quarter-wave shorted patch antennas,»; Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 22, n°2, pp. 101-103, July 1999.
- [12] R. B. Waterhouse, S. D. Targonski, D. M. Kokotoft, «;Design and performance of small printed antennas,»; IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 46, n°11, pp. 1629-1633, November 1998.

- [13] T. Taga, «;Analysis of planar inverted-F antennas and antenna design for portable radio equipment,»; in *Analysis, Design, and Measurement of Small and Low Profile Antennas* K. Hirasawa and M. Haneishi, Eds. Boston, MA: Artech, 1992, ch. 5.
- [14] K. Wong, *Planar antennas for wireless communications*. Wiley New York, 2003.
- [15] S. A. Bokhari, J. F. Zurcher, J. R. Mosig, and F. E. Gardiol, «;A small microstrip patch antenna with a convenient tuning option,»; *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 44. pp. 1521-1528, 1996.
- [16] S. Villeger, P. Le Thuc, R. Staraj, G. Kossiavas, «;Dual-band planar inverted-F antenna,»; *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 38, n°1. pp. 40-42, 2003.
- [17] S. Drabowitch, C. Ancona, *Antennes 2. Applications*. Editions Masson, pp. 155-159, 1986.
- [18] J. W. Wu, C. R. Lin, J. H. Lu, «;A planar meander-line antenna for triple-band operation of mobile handsets,»; *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 41, n°5, pp. 380-386, 2004.
- [19] Serrano-Vaello, D. Sanchez-Hernandez, «;Printed antennas for dual-band GSM/DCS 1800 mobile handsets,»; *Electronics Letters*, Vol. 34, n°2, pp. 140-141, 1998.
- [20] M. K. OMAR, «Conception et modélisation d'une antenne pour les communications ULB» Oran, 2013.
- [21] A. KAMLI, conception d'une antenne patch ultra-large bande (3.1 Ghz-10.6 Ghz) Thème de M.Sc, Université du Québec, 2011.

# **CHAPITRE III :**

## **SIMULATION ET RÉSULTATS**

**III.1. Introduction :**

Ces dernières années, des antennes large bande ont fait l'objet de plusieurs travaux de recherche. En effet, l'utilisation de dispositifs à large bande passante permet l'obtention d'une meilleure précision, des débits élevés et une qualité de transmission améliorée. Par ailleurs, les antennes large bande permettent de réduire l'encombrement du moment qu'elles peuvent remplacer plusieurs antennes à bande passante réduite.

Ce chapitre présente la démarche de conception logiciel, et les résultats de simulation d'une antenne fractale miniature et large bande . Nous allons commencer par la simulation d'une antenne patch rectangulaire résonnant à la fréquence 11.7Ghz en utilisant le logiciel CST. Notre contribution pour cette antenne sera de la faire résonner dans la bande [10.7-12.7] GHz en utilisant les techniques appropriées( techniques d'adaptation, techniques d'élargissement de la bande ) ce qui la rend plus intéressante pour les applications Large Bande.

**III.2. DESCRIPTION DU LOGICIEL DE SIMULATION :**

CST MicroWave Studio est un logiciel de simulation électromagnétique de structure passive en 3 Dimensions basée sur la résolution des équations de Maxwell suivant la technique des équations intégrales (Finite Intégration Technique). Cette méthode numérique offre une discrétisation de l'espace permettant la description directement en 3 Dimensions de tous les composants des systèmes décrits, ce qui lui permet d'être appliqué à de nombreux problèmes électromagnétiques allant de la statique aux hyperfréquences en analyses temporelle et fréquentielle. De plus, contrairement à la plupart des logiciels de simulation électromagnétique, CST, d'une part sa méthode, discrétise la forme intégrale des équations de Maxwell plutôt que leurs formes différentielles. La méthode est une caractéristique clé de CST Microwave qui approche est donné le choix de type de simulateur ou un treillis qui est le mieux adapté à un problème particulier [1].

CST Microwave Studio fait partie de la CST DESIGN STUDIO suite, et offre un certain nombre de solveurs différents pour différents types d'applications. Étant donné, aucune méthode ne fonctionne aussi bien dans tous les domaines d'application.

**Un solveur fréquentiel :** Comme le solveur transitoire, il est constitué d'un solveur général basé sur une méthode fréquentielle. Selon la structure étudiée, le maillage peut être cartésien [2].

**Un solveur temporel :** Le solveur temporel permet la simulation des structures de comportements à large plage de fréquence [3].

Un solveur multi-layer (multicouche) : le solveur multicouche est un résolveur plein onde 3D basé sur la méthode des moments (MOM). Le solveur multicouche utilise une technique intégrale de surface et il est optimisé pour la simulation de structure hyperfréquences planaires. Le solveur multicouche inclut une fonction d'analyse de mode caractéristique(CMA) qui calcule les modes pris en charge par une structure [4].

III.3 Antenne patch rectangulaire avec ligne simple :

III.3.1 Géométrie de base :

L'antenne proposée est une antenne patch, alimentée et adaptée par une ligne microruban (50 Ω) simple, avec un substrat de type FR4 ( Verres epoxy) d'une permittivité relative  $\epsilon_r=4.3$  et d'une épaisseur  $h=1.6\text{mm}$ . Cette dernière fonctionne à la fréquence 11,7 GHz. Les paramètres géométriques de l'antenne rectangulaire sont représentés dans la figure (III.3).

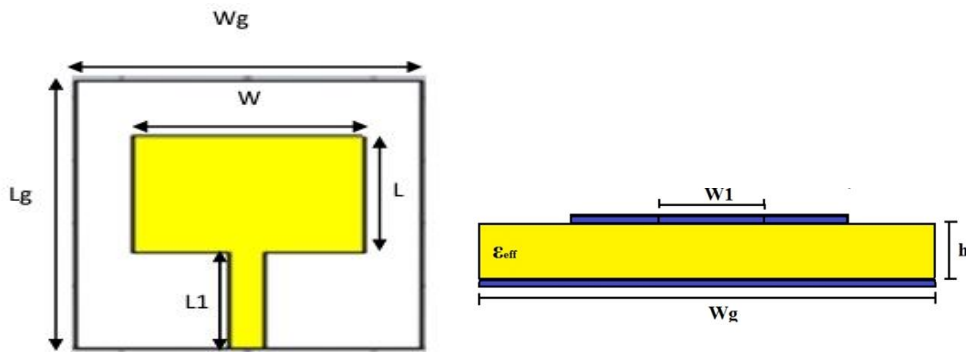


Figure III.1 : Antenne patch rectangulaire initiale proposée

Les paramètres de calcul de cette antenne sont donnés sur le tableau III.1.

Paramètre d'antenne	Équation
Largeur efficace de l'antenne W	$W = \frac{1}{2f_r \sqrt{u_0 \epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$
Constante diélectrique $\epsilon_{eff}$	$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{-\frac{1}{2}}$
L'extension de la longueur ( $\Delta L$ )	$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_r \epsilon_{eff} + 0.3) \left( \frac{w}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_r \epsilon_{eff} - 0.258) \left( \frac{w}{h} + 0.8 \right)}$
Longueur réel (L)	$L = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_r \epsilon_{eff}} \sqrt{u_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L$
Largeur du substrat et plan de masse $W_g$	$W + 6h$
Longueur du substrat et plan de masse $L_g$	$L + 6h$

Tableau III.1 : Paramètres de l'antenne patch rectangulaire

Tel que :

$\epsilon_r$  : Permittivité effective du substrat

h: l'épaisseur du substrat

$f_r$  : fréquence de résonance.

Les dimensions de la ligne simple étant données par les relations suivantes :

$$L_1 = \frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda_0}{2\sqrt{\epsilon_{reff}}} \tag{III. 1}$$

Tel que :  $\lambda_0 = \frac{c}{f}$

C : la vitesse de la lumière

f : Fréquence du travail de l'antenne.

Le tableau III.2 montre les valeurs des paramètres d'antenne initiale proposée calculés à partir des équations du tableau III.1 :

W	L	W <sub>g</sub>	L <sub>g</sub>	W <sub>1</sub>	L <sub>1</sub>
7.87	5.42	17.47	15.02	3.11	3.54

Tableau III.2: Dimensions (mm) de l'antenne patch initial proposée.

**III.3.2 Résultats de simulation :**

- **Le Coefficient de réflexion S [1,1] :**
- Nous allons représenter le coefficient de réflexion S<sub>11</sub> (Figure III .2). Ce paramètre permet de visualiser le niveau de l'adaptation et la bande passante à la fréquence de résonance de cette antenne initiale proposée.

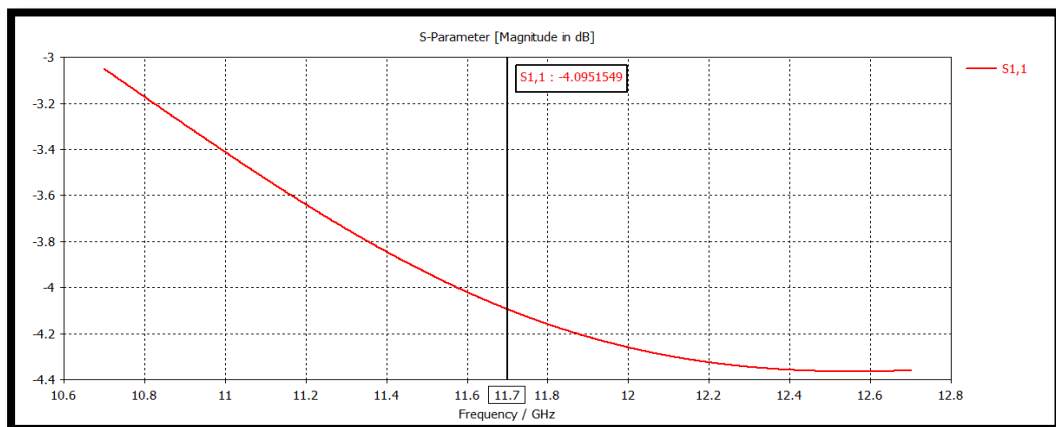


Figure III.2 : Coefficient de réflexion S<sub>11</sub> de l'antenne initiale proposée.

- **Le VSWR :**

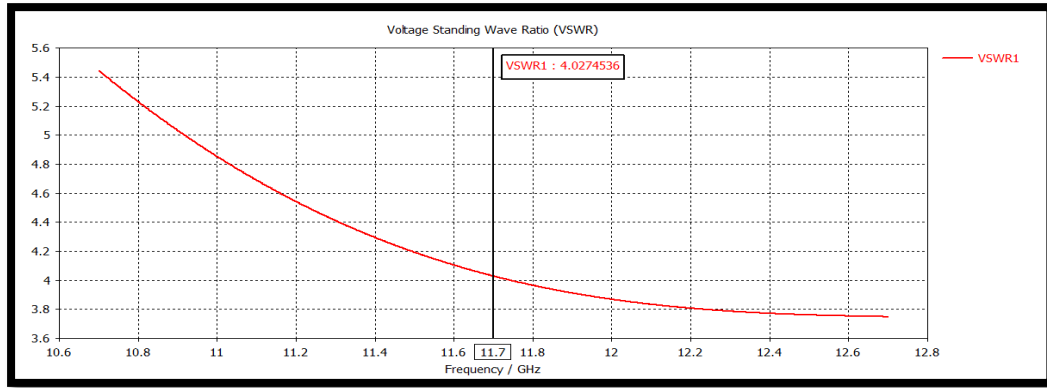


Figure III.3 : Rapport d'onde stationnaire.

Nous remarquons qu'après simulation notre structure n'est pas du tout adaptée dans la bande de fréquence souhaitée, par ce que le coefficient de réflexion est supérieur à -10 dB , ( d'une façon général l'antenne est adaptée lorsque la fréquence de résonance de cette dernière qui vaut 11,7 Ghz est celle où le coefficient de réflexion est minimale) pour cela nous allons donc effectuer des techniques pour son adaptation sous CST, les résultats de cette étude sont présentés ci-dessous:

### III.4. Technique d'adaptation :

#### III.4.1. Adaptation de l'antenne avec une ligne quarte d'onde :

Nous devons adapter le paramètre  $S_{11}$  de la figure III.2 à une valeur supérieure à -10dB, pour cela nous allons alimenter notre antenne par une ligne micro ruban quart d'onde reliée au bord de l'antenne. Dans ce cas, le transformateur quart d'onde doit être placé entre la ligne micro ruban et l'antenne pour l'assortiment de l'impédance  $50\Omega$ . La largeur de la ligne quart d'onde peut être déduite à partir de L'impédance caractéristique de la ligne micro ruban :

$$Z_c = \frac{119.1}{\sqrt{2(\epsilon_r + 1)}} \left[ \ln \left( 4 \frac{h}{w_1} + \sqrt{16 \left( \frac{h}{w_1} \right)^2 + 2} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \right) \left( \ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{\epsilon_r} \ln \frac{4}{h} \right) \right] \quad (III.2)$$

L: Largeur de la ligne micro ruban ;

h : Épaisseur du substrat diélectrique ;

$\epsilon_{r\text{eff}}$  : Permittivité effective du substrat.

La longueur  $L_2$  du transformateur quart d'onde (transition) peut être calculée par :

$$L_2 = \frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda_0}{4\sqrt{\epsilon_r \text{eff}}} \quad (III. 3)$$

- **Le Coefficient de réflexion S [11] :**

Les dimensions de l'antenne rectangulaire sont données sur le tableau III.3 et sur la figure III. 6:

W	L	W <sub>g</sub>	L <sub>g</sub>	W <sub>1</sub>	L <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	L <sub>2</sub>
7.87	5.42	17.47	15.02	3.11	3.54	0.8	1.77

Tableau III. 3 : les dimensions de l'antenne patch rectangulaire (en mm) alimentée avec une ligne quart d'onde.

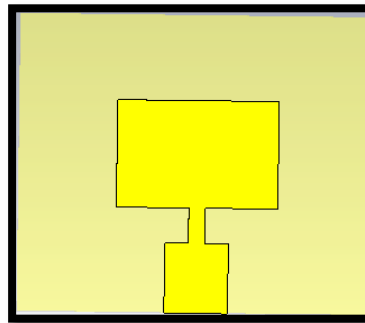


Figure III. 4 : Antenne rectangulaire adaptée avec une ligne micro-ruban quart d'onde.

Les résultats du coefficient de réflexion obtenue par le logiciel CST Microwave studio sont présentés dans la figure (III.5).

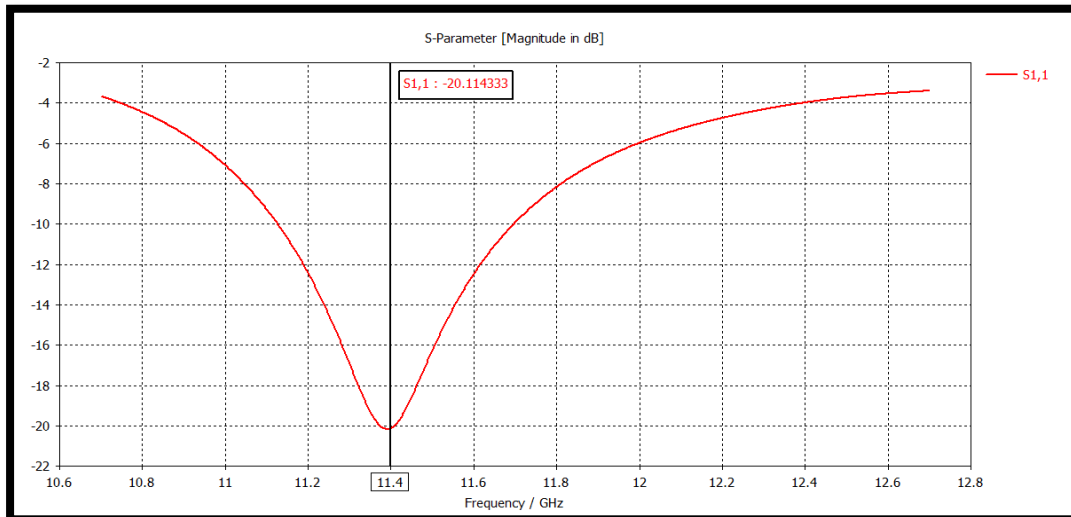


Figure III.5 : Paramètre S<sub>11</sub> avec la ligne quarte d'onde.

Nous avons obtenu un coefficient de réflexion de -20,11 dB à la fréquence de résonance 11.4 GHz, mais ce n'est pas la fréquence désirée de 11.7GHz.

- **Le Diagramme de rayonnement :**



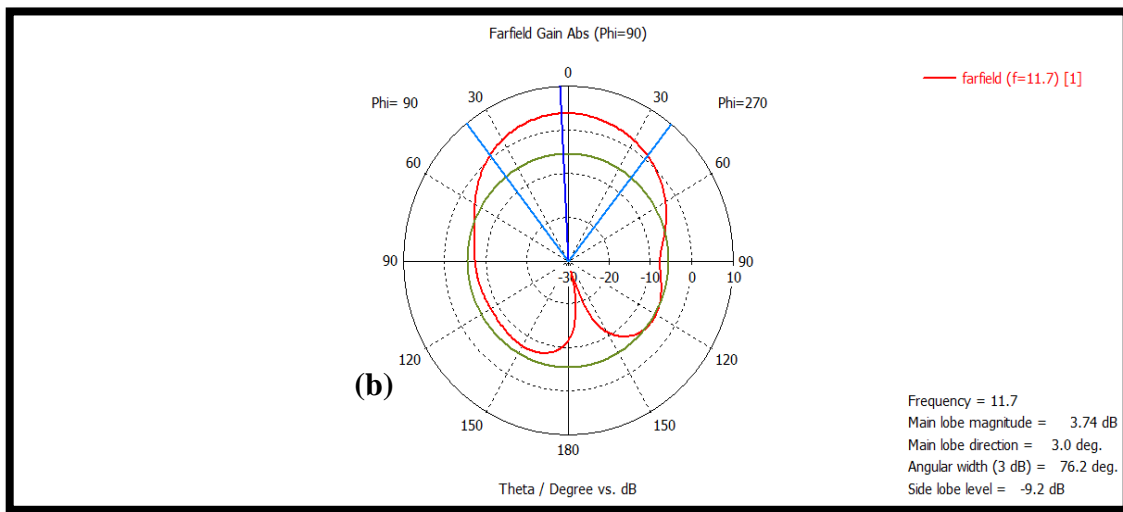
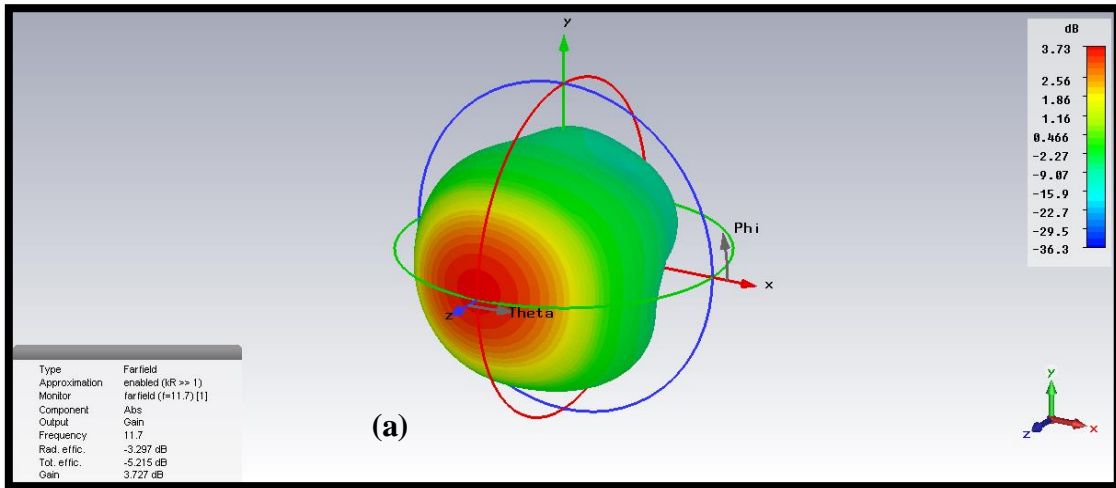
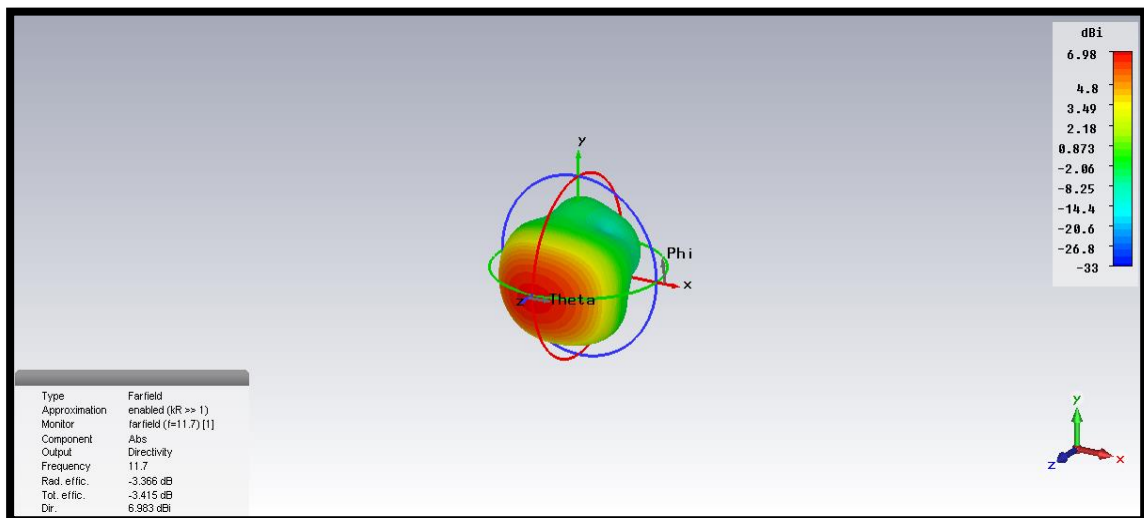
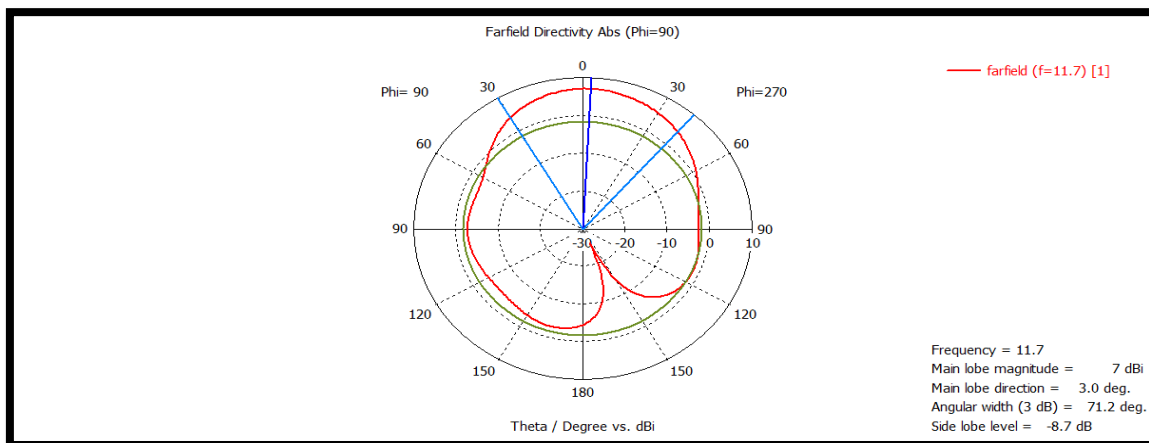


Figure III.6: Diagramme de rayonnement du gain (a) en 3D ; (b) en polaire



(a)



(b)

Figure III.7: Diagramme de rayonnement de la Directivité (a) en 3D ; (b) en polaire.

**III.4.2. Adaptation avec encoches :**

Pour adapter l'antenne à la fréquence désirée, on utilise des encoches, il suffit de modifier la géométrie du patch. Et les dimensions des encoches [6], [7].

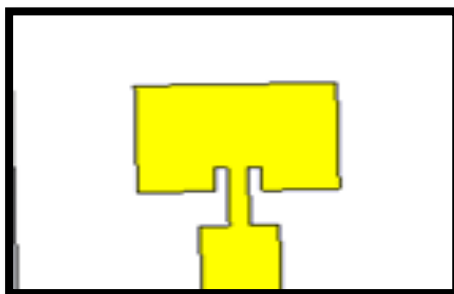


Figure III. 8 : Insertion des encoches

- le Coefficient de réflexion :

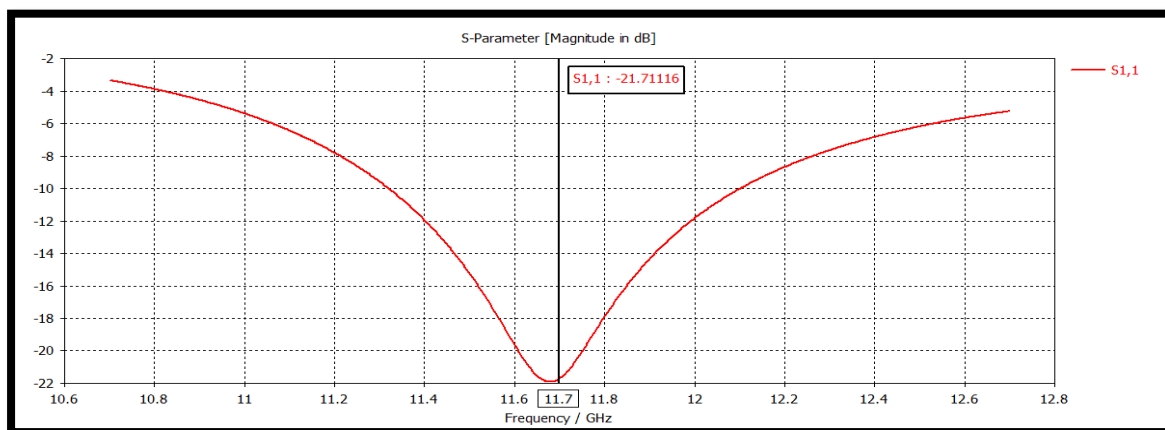


Figure III. 9: Coefficient de réflexion

- Le VSWR :

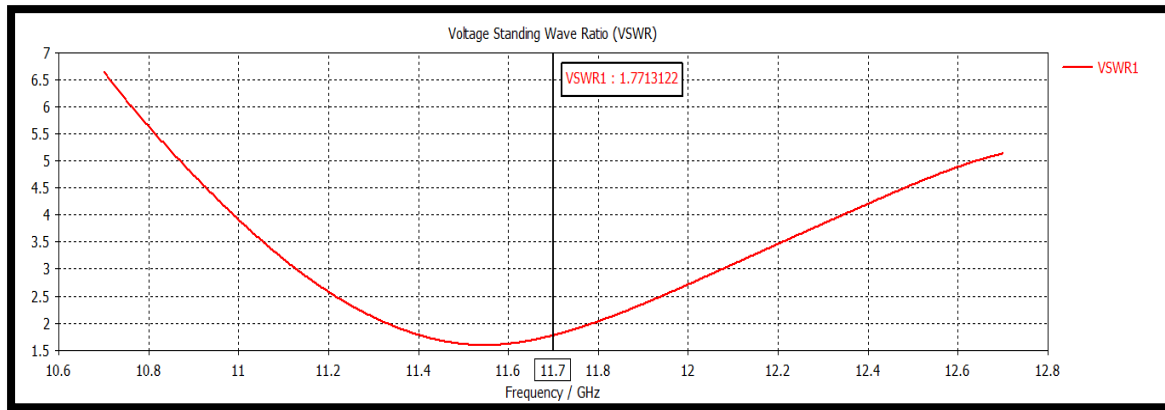
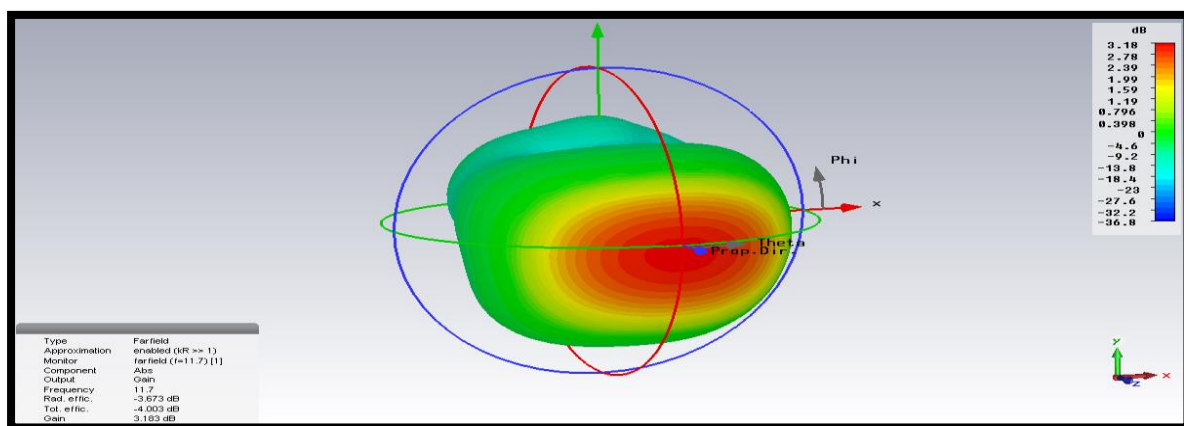


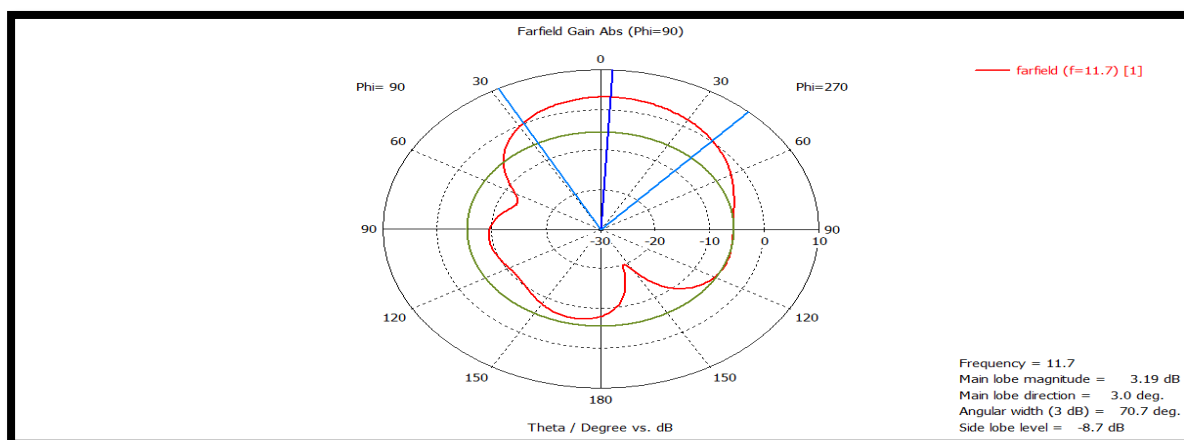
Figure III.10 : Rapport d'onde stationnaire.

Nous remarquons qu'après avoir ajouté les encoches, nous obtenons bien l'adaptation avec un coefficient de réflexion qui vaut - 21.71 dB à la fréquence désirée de 11.7 GHz, et rapport d'onde stationnaire < à 2 et qui vaut 1.77, donc notre antenne est bien adaptée.

- **Le Diagramme de rayonnement :**

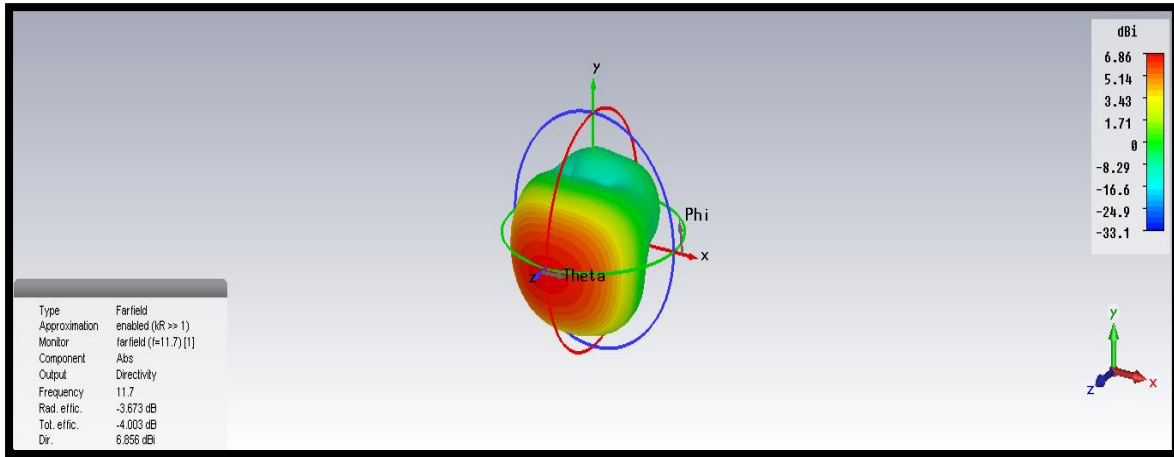


(a)

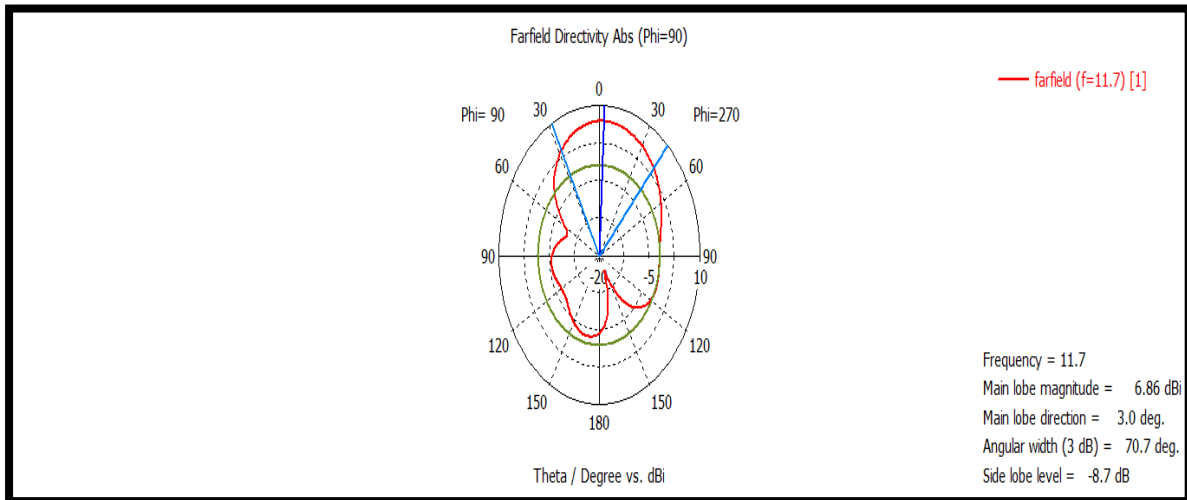


(b)

Figure III.11: Diagramme de rayonnement du gain (a) en 3D ; (b) en polaire .



(a)



(b)

Figure III. 12: Diagramme de rayonnement de la directivité (a) en 3D; (b) en polaire.

Cette antenne à une Directivité égale à 6.86 dBi et un gain égal à 3.19dB.

### III.5. Miniaturisation par fractalisation de l'antenne patch rectangulaire

#### III.5.1 Tapis de Sierpiński :

Nous allons fractaliser notre antenne rectangulaire de la figure III.8 afin de miniaturiser ses dimensions, en utilisant le principe du rectangle de Sierpinski (chapitre I).

Le rectangle de Sierpiński de la figure III.13 a une dimension fractale égale à  $\ln_8/\ln_3=1.89$ . C'est comme si nous avons fait huit copies de ce dernier, chacune étant réduite d'un facteur de 1/3.

Le principe de fractalisation du rectangle de Sierpiński est montré sur la figure III.13 :

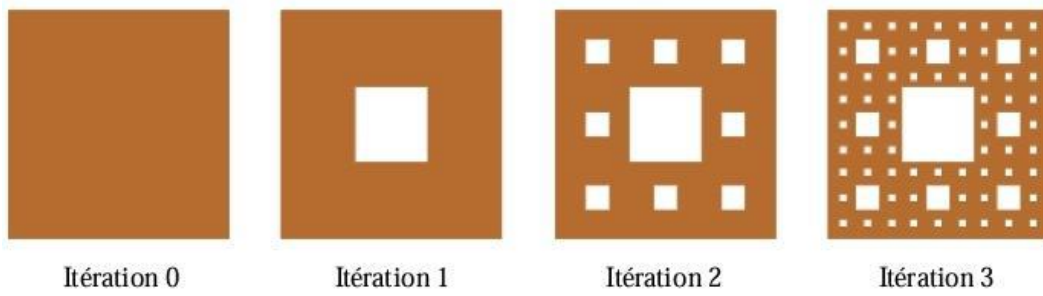


Figure III.13 : Génération du rectangle de Sierpinski par l'approche de décomposition

• Le Paramètre de réflexion  $S_{11}$  :

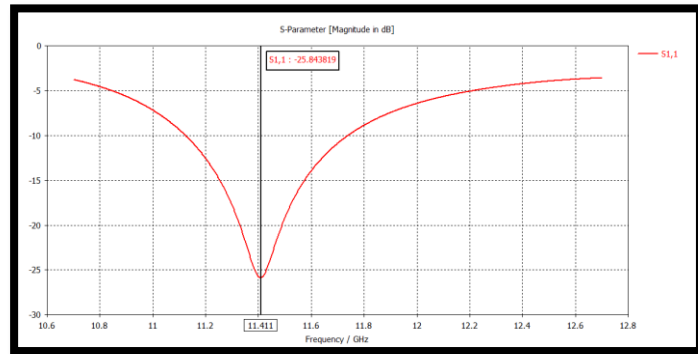
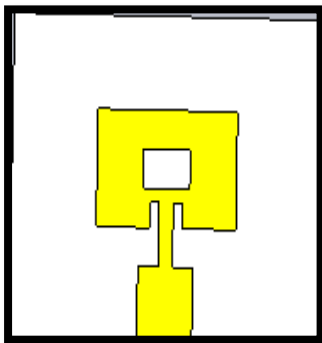


Figure III.14 : Paramètre  $S_{11}$  de l'antenne rectangulaire 1 ère itération itérations.

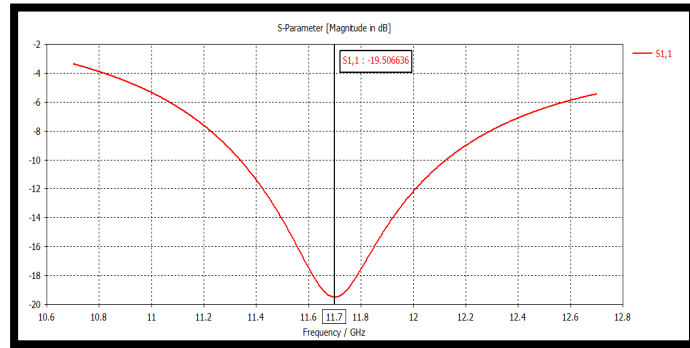
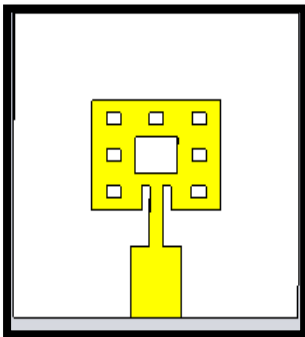


Figure III.15 : Paramètre  $S_{11}$  de l'antenne rectangulaire 2 ère itération itérations.

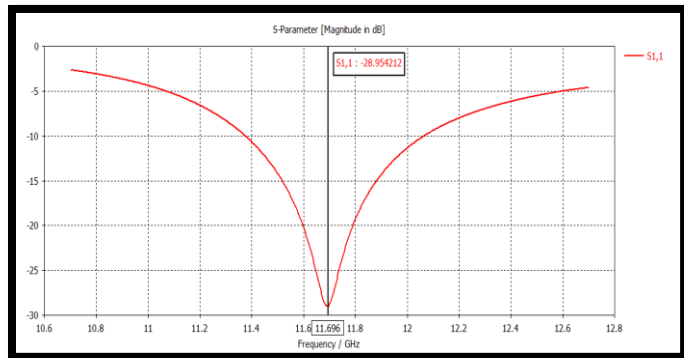
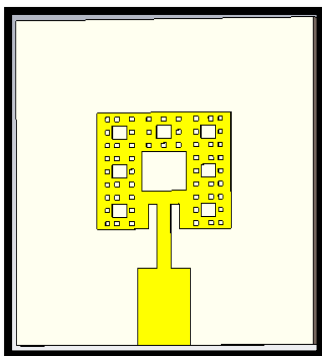


Figure III.16 : Paramètre  $S_{11}$  de l'antenne rectangulaire 3 ère itérations.

**III.5.1.1. Miniaturisation de l'antenne patch rectangulaire :**

Nous allons miniaturiser notre antenne rectangulaire en minimisant les valeurs du patch, plan de masse et substrat pour garder les mêmes caractéristiques de l'antenne rectangulaire initiale à savoir la bande [10.7-12.7]GHz. Nous avons choisi la troisième itération simulée dans la figure III.16 pour miniaturiser notre antenne. Les meilleures valeurs obtenues sont données dans le tableau III.4.

W	L	W <sub>g</sub>	L <sub>g</sub>	W <sub>1</sub>	L <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	L <sub>2</sub>
5.87	3.42	15.47	13.02	1.11	2.54	0.4	1.77

Tableau III.4: Dimensions de l'antenne patch (en mm) miniaturisée

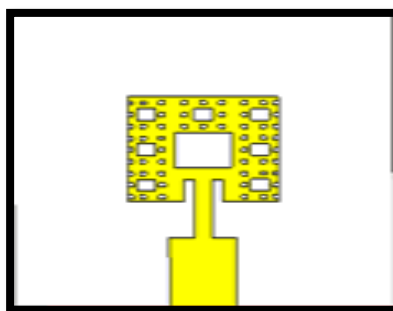


Figure III.17 : antenne miniaturé avec Itération 3.

- **Le paramètre de réflexion S<sub>11</sub>:**

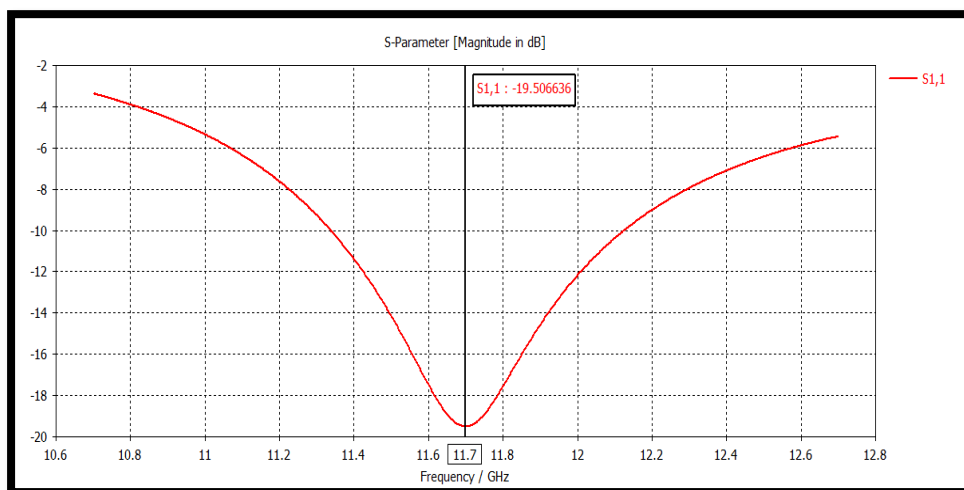


Figure III.18 : Coefficient de réflexion

- **Le VSWR :**

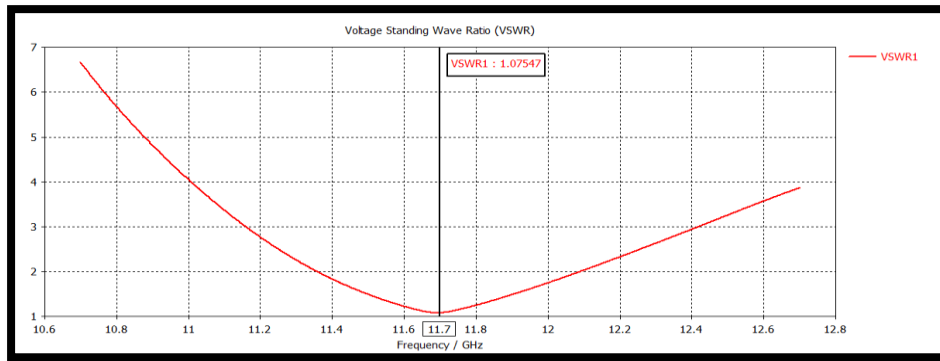
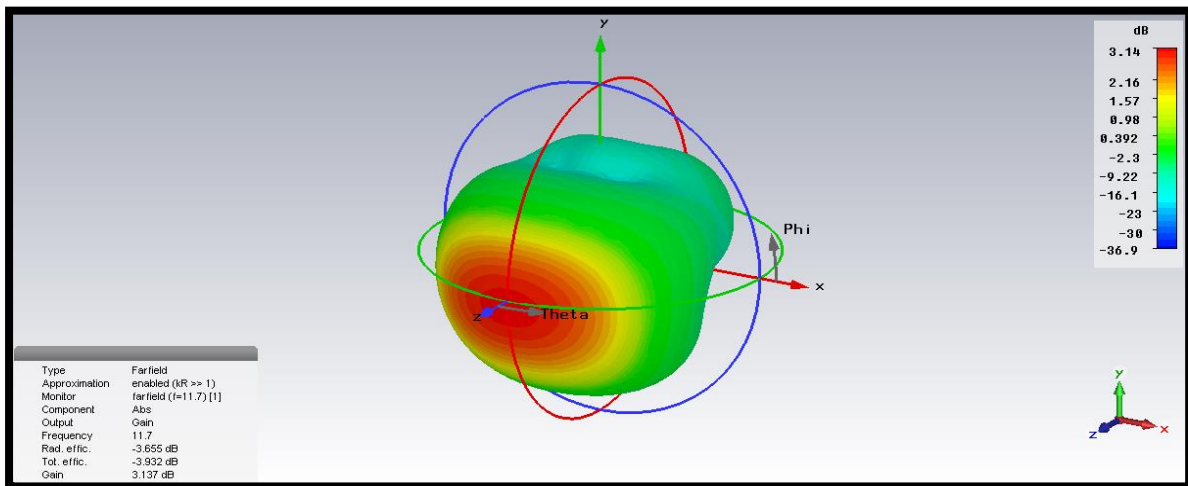


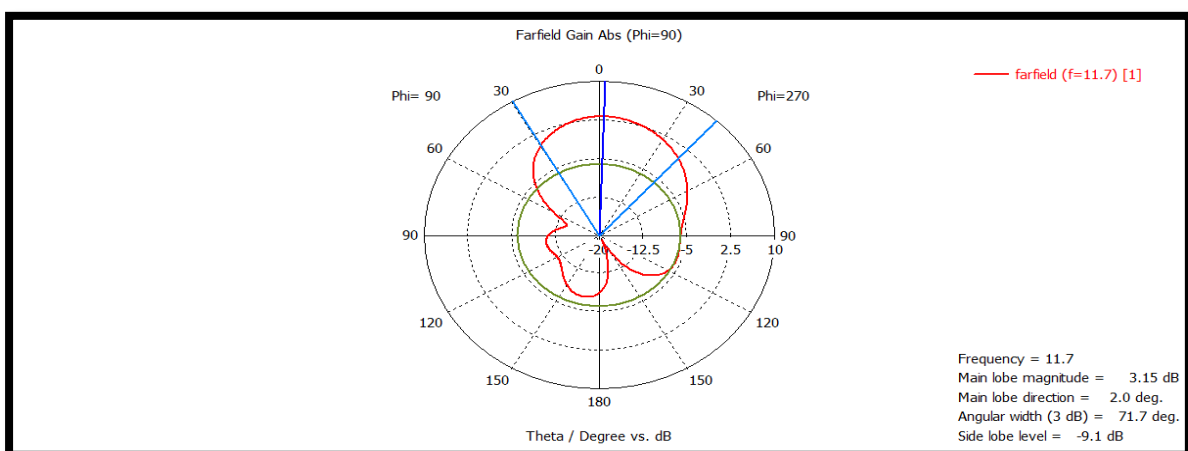
Figure III.19: Rapport d'onde stationnaire

Donc l'antenne fractale est miniature avec une bonne adaptation à la fréquence désirée de 11.7GHz, avec un coefficient S11 qui vaut -19.56 dB, et un VSWR qui vaut 1.07.

• Diagrammes de rayonnement:

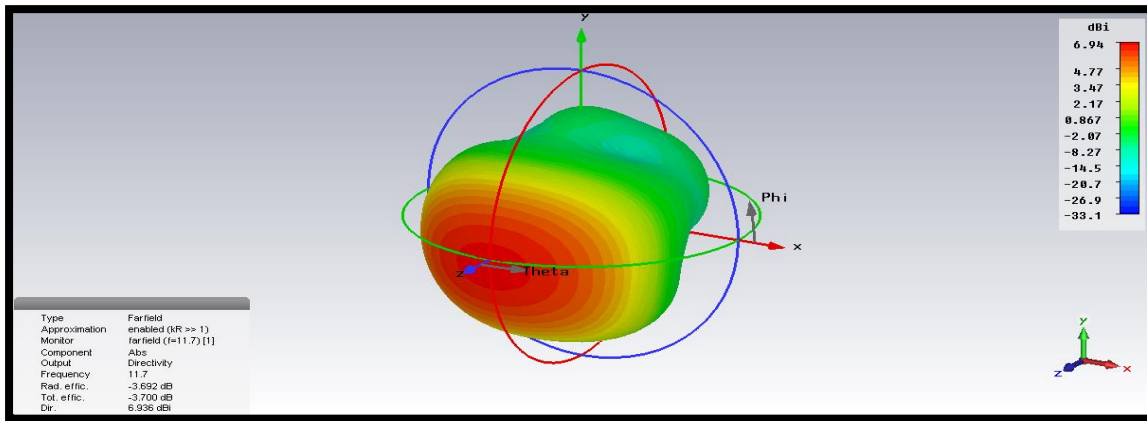


(a)

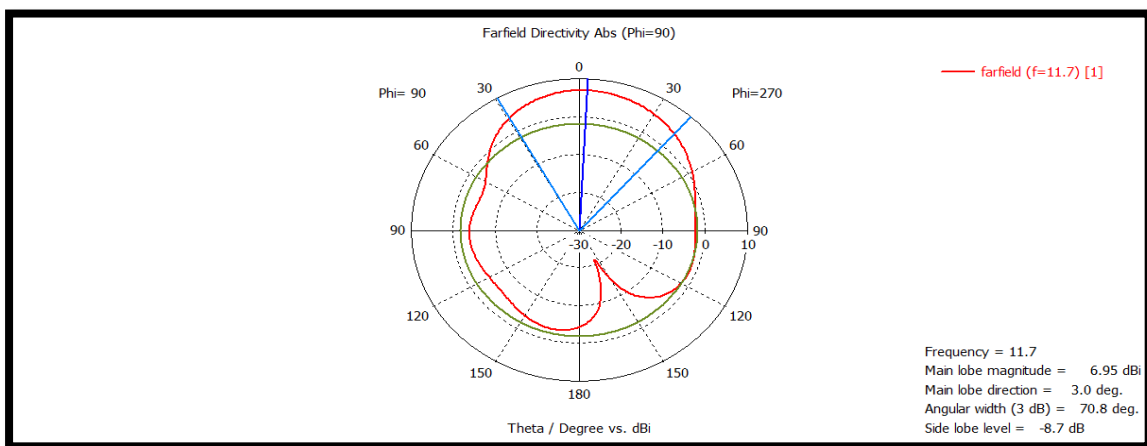


(b)

Figure III.20: Diagramme de rayonnement du gain (a) en 3D ; (b) en polaire.



(a)



(b)

Figure III.21 : Diagramme de rayonnement de la directivité (a) en 3D ; (b) en polaire. D’après les figures (III.20) (III.21), nous voyons bien que les diagrammes de rayonnement 3D et polaires de l’antenne simulée sous CST sont presque directionnel, avec un gain de 3.15dB, et une Directivité de 6.94dBi.

Fréquence	Gain	Directivité	VSWR	BP
11.7	3.15Db	6.94dBi.	1.07	5.22

Tableau III. 5 : Paramètres de l’antenne patch après la miniaturisation

### III.5.1.2. Technique d’élargissement de la bande de l’Antenne patch rectangulaire:

Notre objectif principal est de trouver une technique permettant d’élargir la bande passante obtenue dans notre simulation de l’antenne patch rectangulaire avec la lignequart d’onde. Cette dernière doit respecter la BP [10.7 à 12.7 GHz]. Nous allons



faire varier les paramètres du plan de masse afin de voir son influence sur la bande passante.

- **Coefficient de réflexion  $S_{11}$**

Nous avons essayé de créer des fentes dans le plan de masse afin d'élargir la bande passante. La figure III.22 montre bien ce principe :

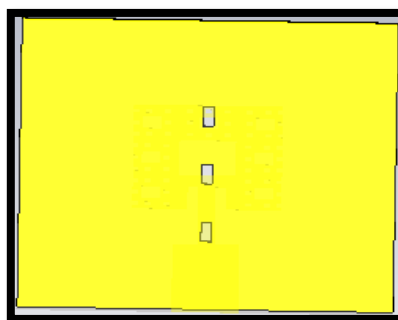


Figure III. 22: Insertion des fentes dans le plan de masse.

La meilleure adaptation sur toute la bande a bien été obtenue avec la largeur de la fente  $W_f=0,5\text{mm}$ . Le résultat finale est montré sur la figure III.22 avec  $L_f=1\text{mm}$  et  $W_f=0,5\text{ mm}$ :

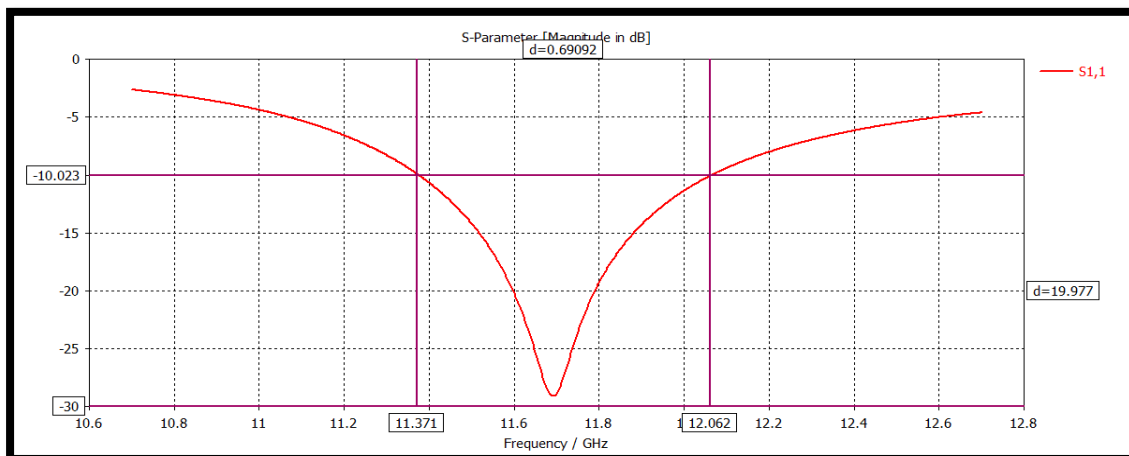


Figure III.23 : Graphe de la bande passante en fonction de la fréquence.

Nous obtenons une amélioration de bande passante dans [11.37-12.062] GHz qui est de 6.23%.

- **Le VSWR :**

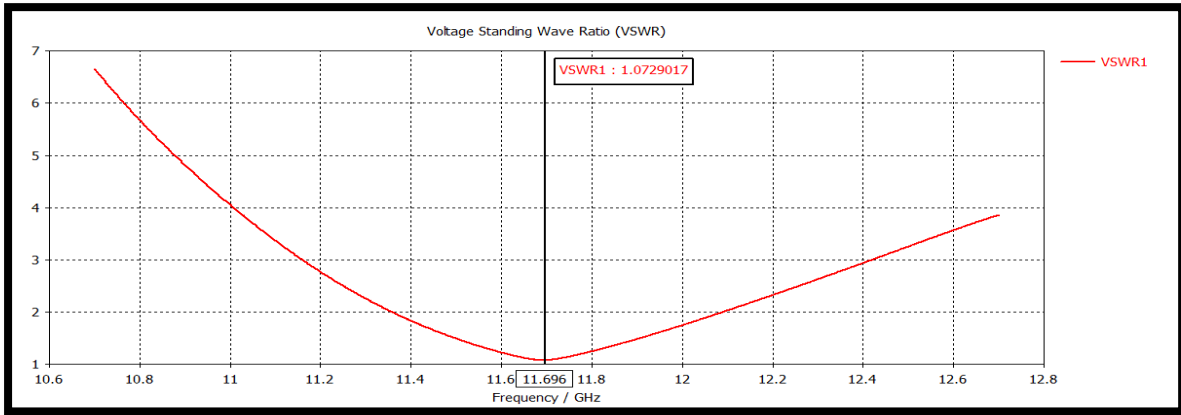
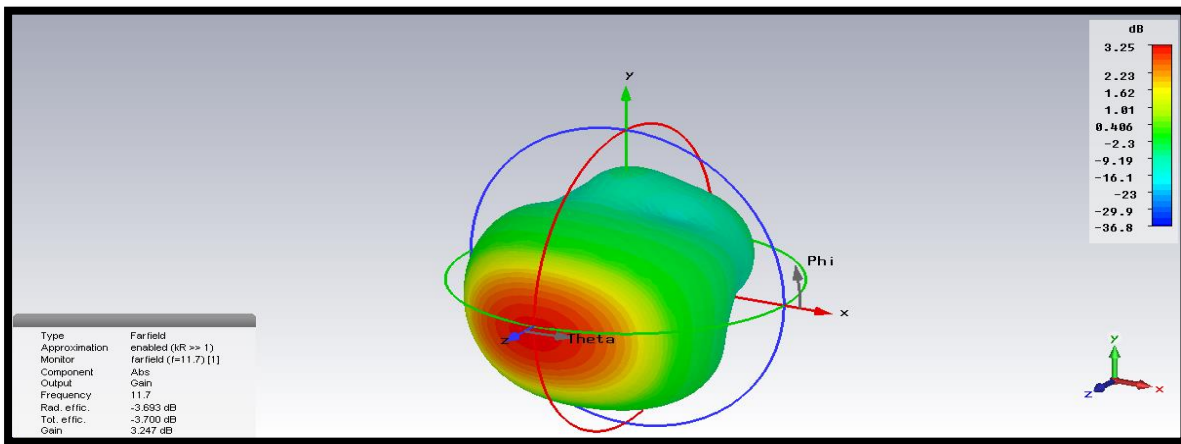


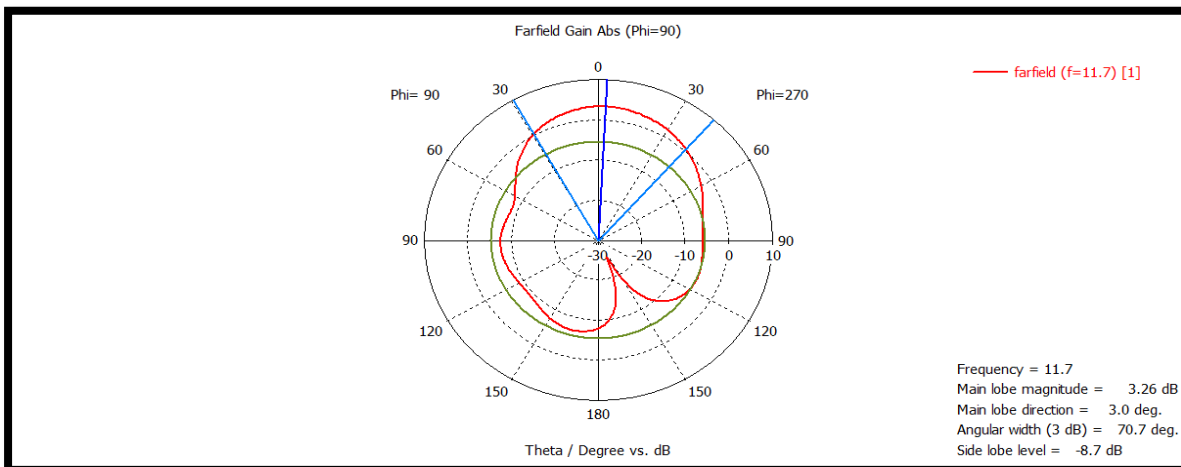
Figure III.24 : Rapport d'onde stationnaire

- **Le Diagramme de rayonnement:**

La figure III.25 montre les diagrammes de rayonnements 3D et polaire de notre simulations pour la fréquence [ 10.7;12,7] GHz

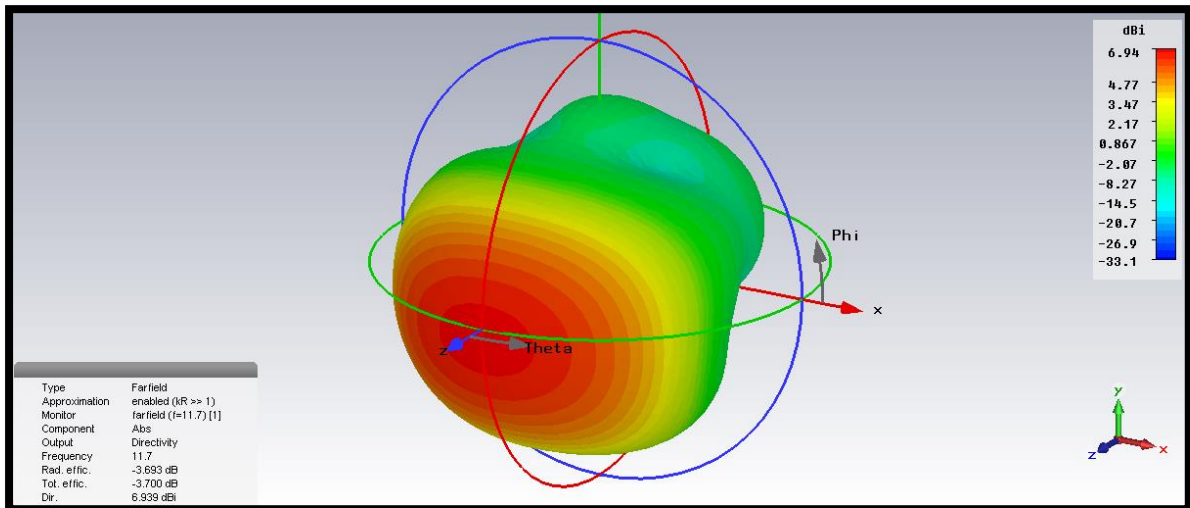


(a)

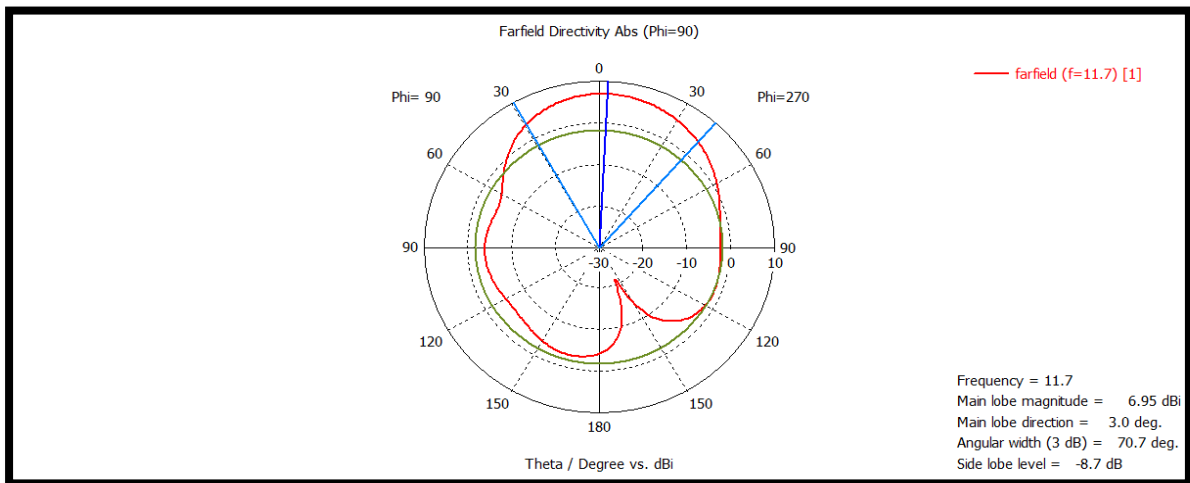


(b)

Figure III. 25 : Diagramme de rayonnement du gain (a) en 3D ;(b) en polaire



(a)



(b)

Figure III.26: Diagramme de rayonnement de la directivité (a) en 3D ;(b) en polaire  
 D’après la figure III.26, nous voyons bien que les diagrammes de rayonnement 3D et polaires de l’antenne simulée sous CST sont presque directionnel.

Le tableau III.6 Donne les différents résultats de gain, directivité, bande passante

Fréquence	Gain	Directivité	VSWR	BP
11.7GHz	3.25Db	6.94dBi	1.074	6.23%

Tableau III.6: Différents paramètres de l'antenne.

### III.5.2. Antenne de Minkowski

Le fractale de l'île de Minkowski illustrée à la figure III.27 est obtenue. Initialement, l'initiateur est un carré, qui peut être considéré comme l'ordre zéro de la fractale de l'île de Minkowski. La première itération de la fractale de l'île de Minkowski consiste à supprimer le tiers central de chaque côté et d'appliquer la même procédure pour produire la fractale de l'île de Minkowski pour la deuxième itération.

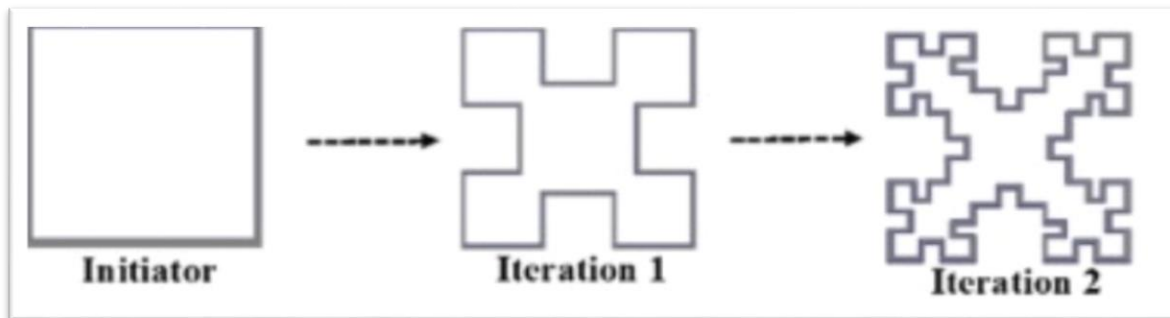


Figure III.27 : Îles de Minkowski

Résultats de  $S_{11}$  pour les deux itérations :

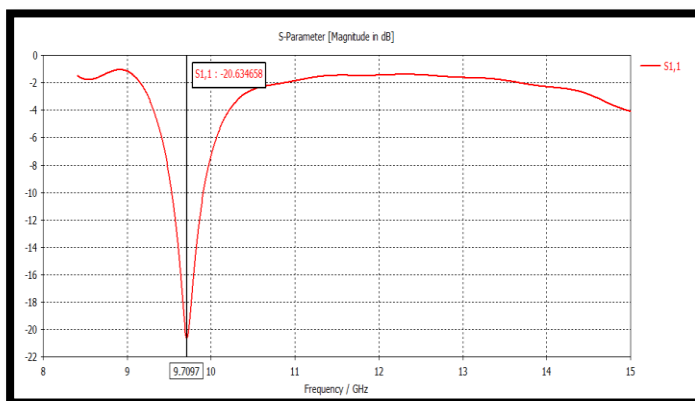
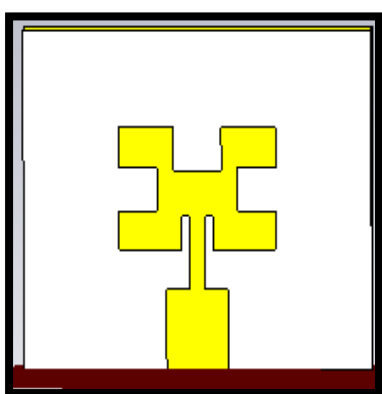


Figure III.28 : Paramètre  $S_{11}$  de l'antenne rectangulaire 1<sup>ère</sup> itérations.

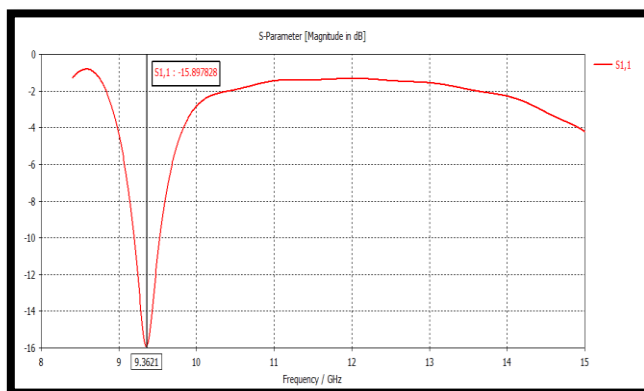
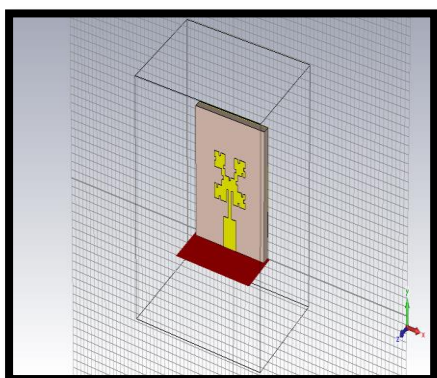


Figure III.29 : Paramètre  $S_{11}$  de l'antenne rectangulaire 2<sup>ème</sup> itérations.

**III.5.2.1. Miniaturisation de l'antenne patch rectangulaire :**

Nous allons miniaturiser notre antenne rectangulaire en minimisant les valeurs du patch, plan de masse et substrat pour garder les mêmes caractéristiques de l'antenne rectangulaire initiale à savoir la bande [10.7-12.7]GHz. Nous avons choisi la deuxième itération simulée dans la figure III.29 pour miniaturiser notre antenne. Les meilleures valeurs obtenues sont données dans le tableau III.7.

W	L	W <sub>g</sub>	L <sub>g</sub>	W <sub>1</sub>	L <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	L <sub>2</sub>
5.318	3.42	17.47	15.02	3.1	3.54	0.8	1.89

Tableau III.7: Dimensions de l'antenne patch (en mm) miniaturisée (2ème structure)

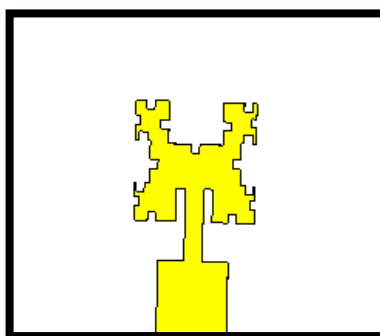


Figure III.30 : Antenne miniaturé avec Itération 2.

- Paramètre de réflexion  $S_{11}$

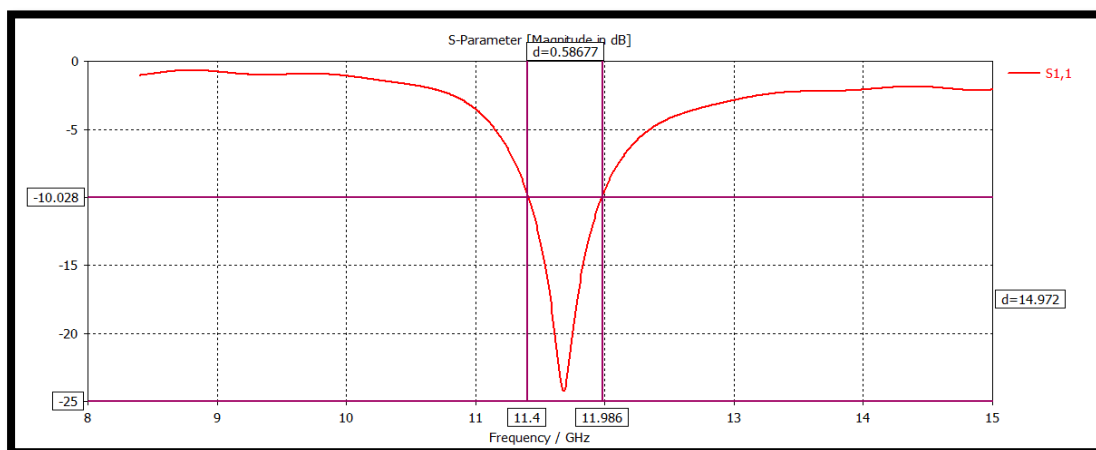


Figure III.31 : Coefficient de réflexion.

- Le VSWR :

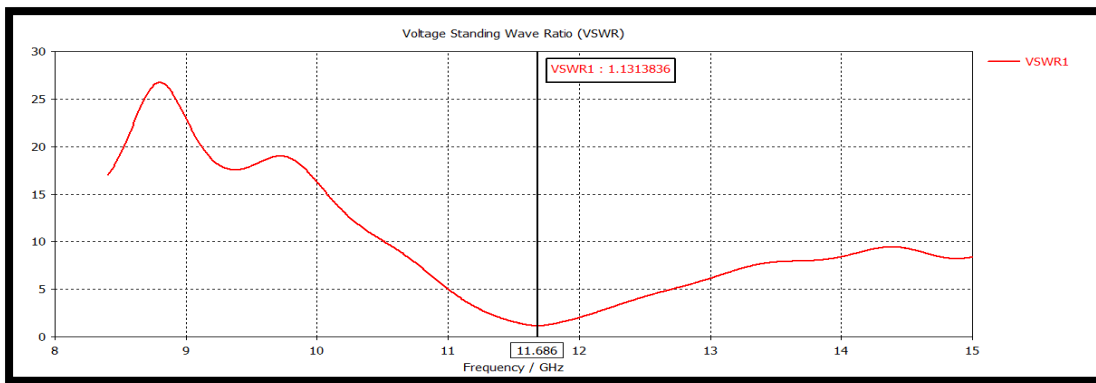
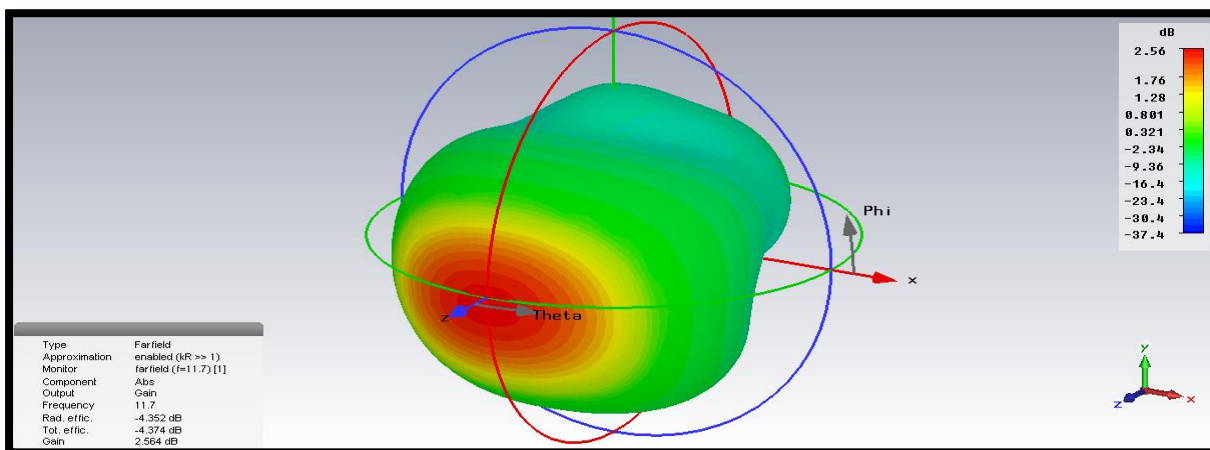


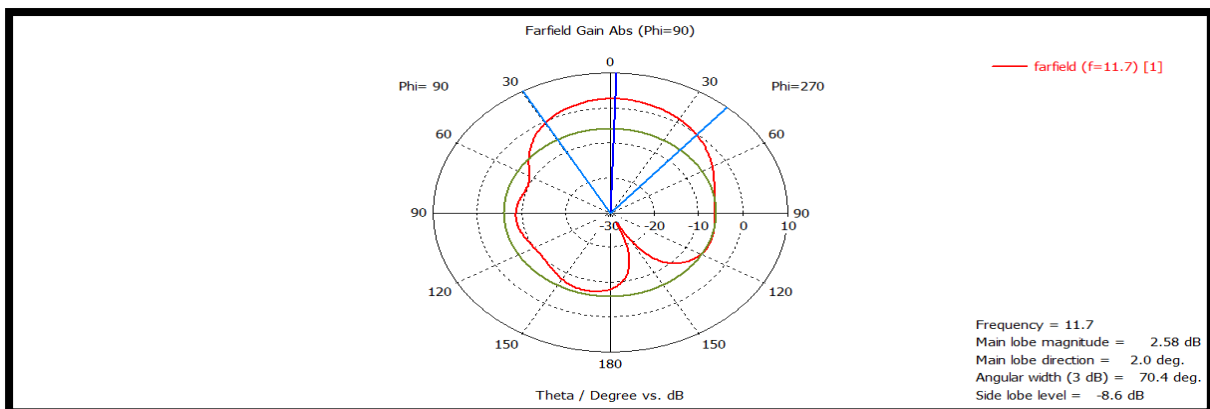
Figure III.32: Rapport d'onde stationnaire.

Le coefficient de réflexion vaut -24. dB à la fréquence de 11.7GHz, et le VSWR vaut 1.12, donc nous avons une bonne adaptation, avec une largeur de bande de 4.95%, donc cette structure fractale est miniature et opérationnelle dans la bande Ku.

- Diagrammes de rayonnement

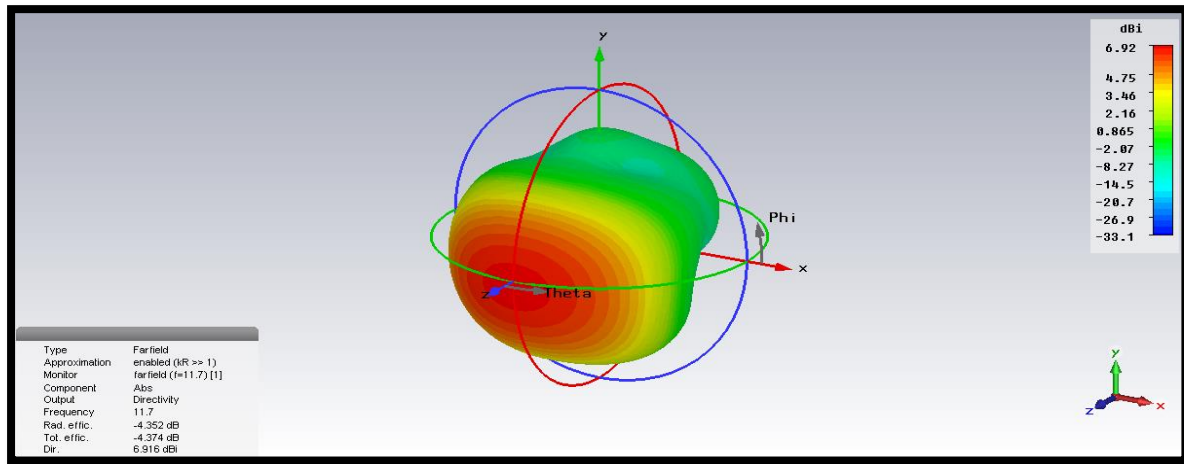


(a)

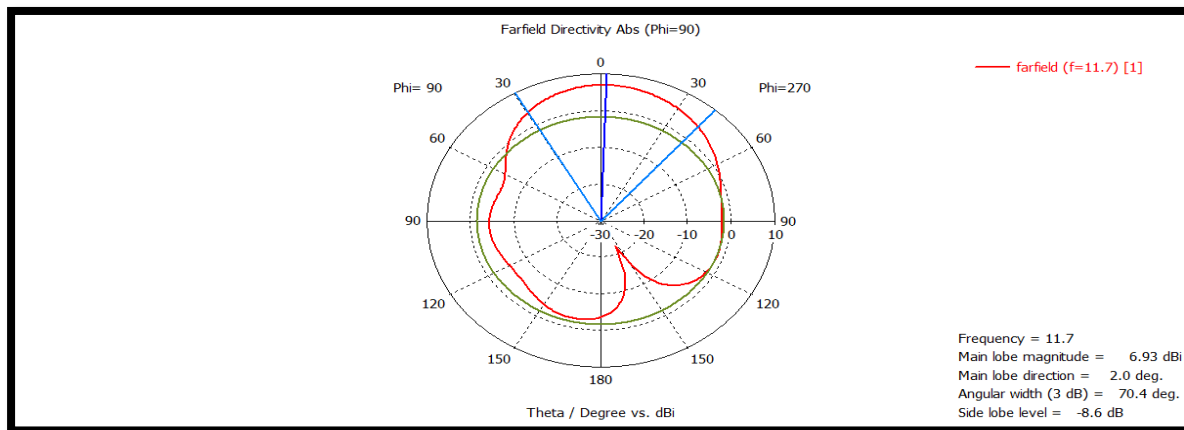


(b)

Figure III .33 : Diagramme de rayonnement du gain(a) en 3D ;(b) en polaire



(a)



(b)

Figure III.34 : Diagramme de rayonnement de la directivité (a) en 3D ;(b) en polaire  
 D’après la figure (III. 34), nous voyons bien que les diagrammes de rayonnement 3D et polaires de l’antenne simulée sous CST sont presque directionnel.

Notre objectif dans ce travail est de garder la même bande de fréquence initiale [10.7-12.7] GHz, nous allons essayer d’élargir la bande passante en utilisant quelques techniques d’élargissement de la bande.

Fréquence	Gain	Directivité	VSWR	BP
11.7 GHz	2.58Db	6.93dBi	1.13	4.95%

Tableau III.8 : Paramètres de l'antenne patch après la miniaturisation

**III.5.2.2. Technique d’élargissement de la bande de l’Antenne patch rectangulaire :**

On va essayer de créer des fentes dans le plan de masse afin d’élargir la bande passante.



Figure III. 35 : Insertion de la fente dans le plan de masse.

La meilleure adaptation sur toute la bande a bien été obtenue avec la largeur de la fente  $W_f=9.37\text{mm}$ . Le résultat finale est montré sur la figure III.35 avec  $L_f=10.02\text{mm}$  et  $W_f=9.37\text{mm}$ .

- Le Coefficient de réflexion  $S_{11}$  :

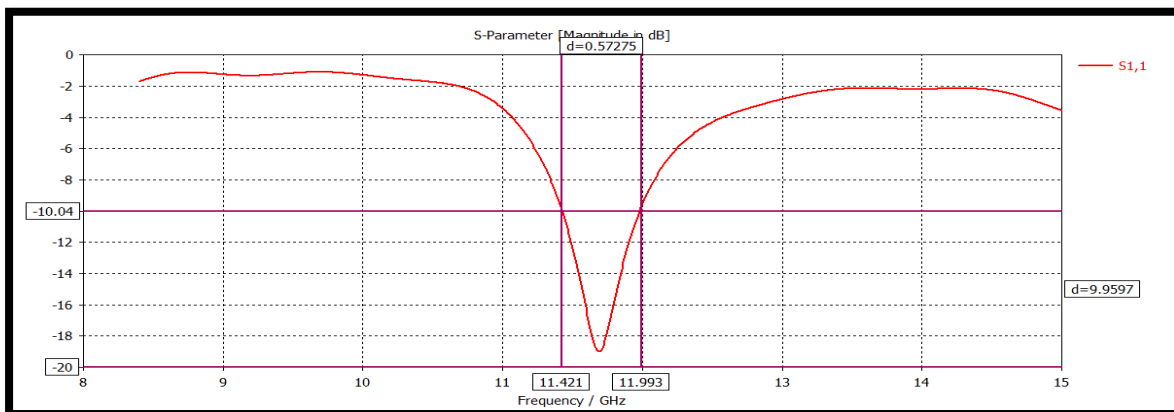


Figure III.36 : Graphe de la bande passante en fonction de la fréquence

- Le VSWR :

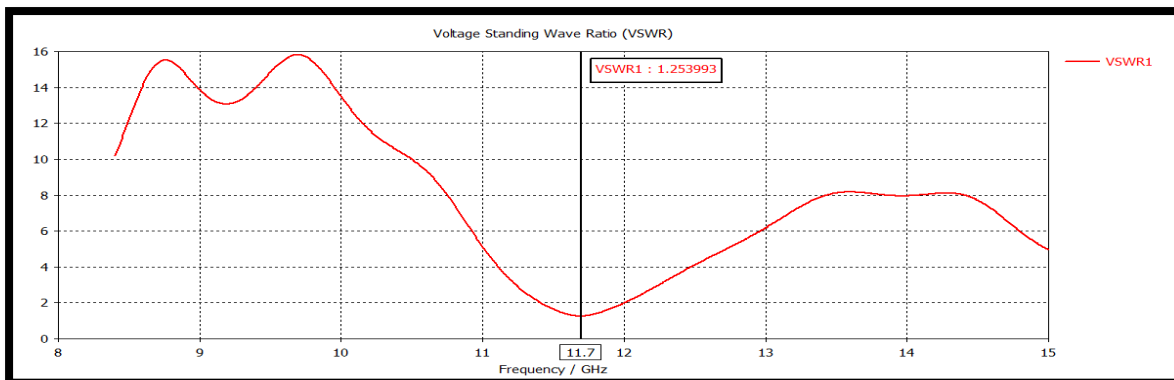
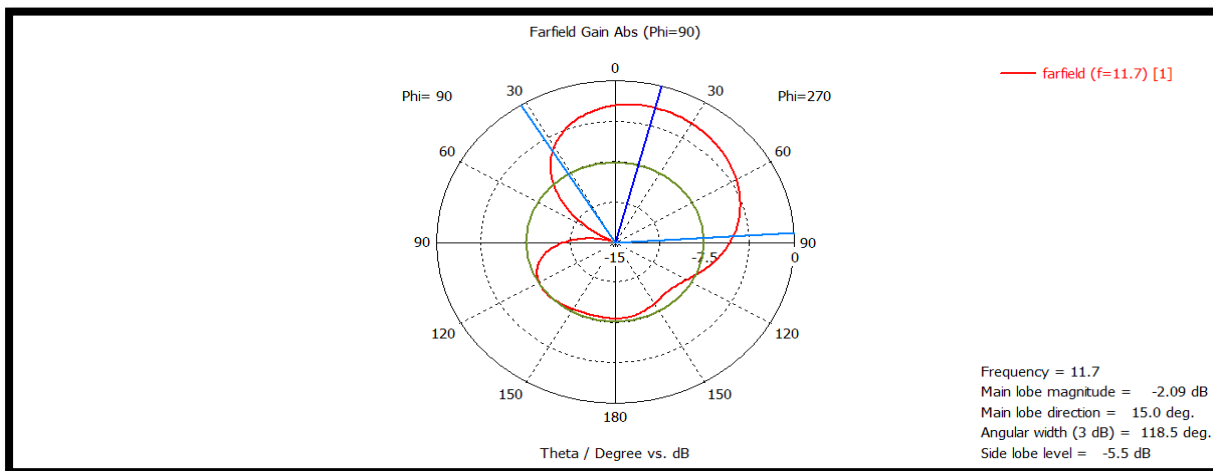


Figure III.37 : Rapport d'onde stationnaire

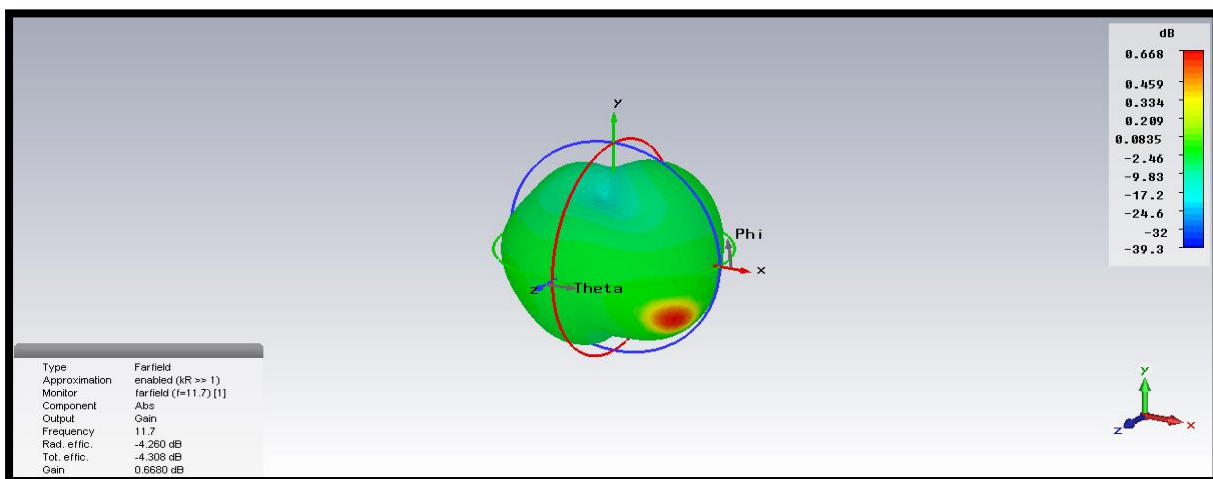
- Le Diagramme de rayonnement



La figure III.38 montre les diagrammes de rayonnements 3D et polaire de notre simulations pour la fréquence [ 10.7;12,7] GHz

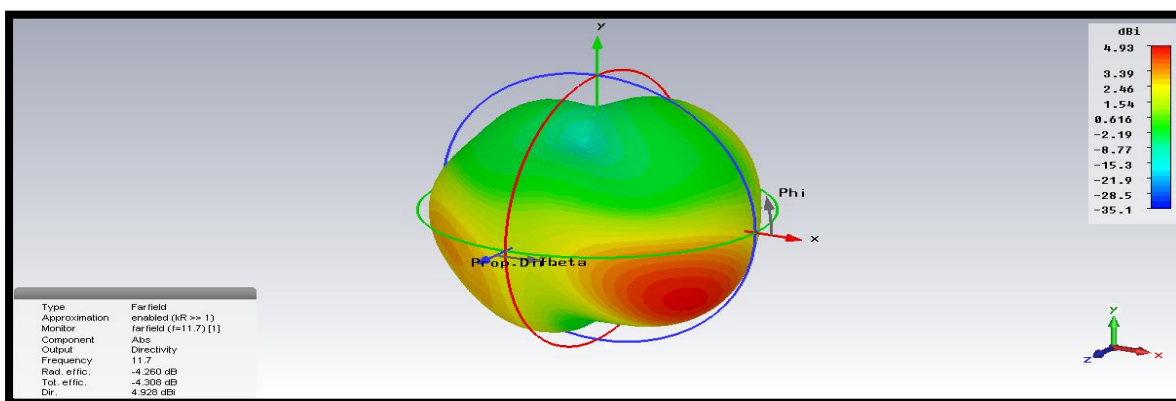


(a)

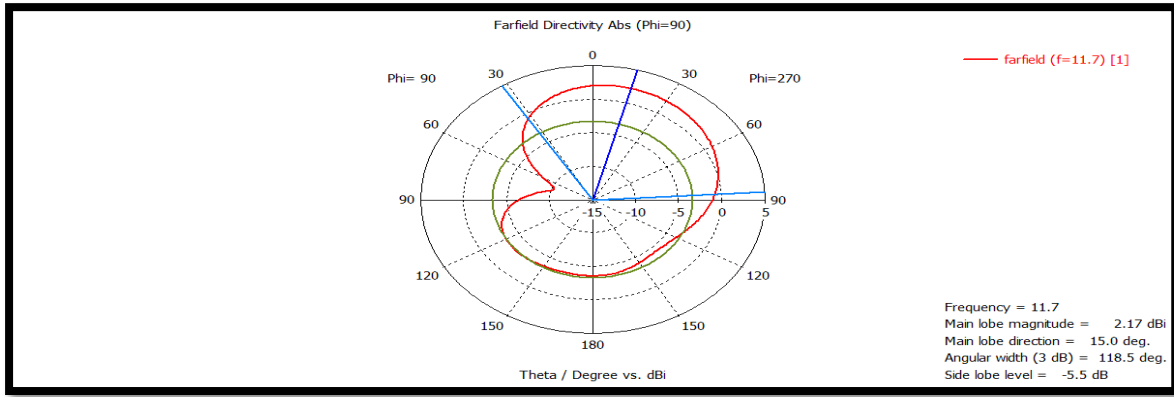


(b)

Figure III.38 : Diagramme de rayonnement du gain (a) en 3D ;(b) en polaire



(a)



(b)

Figure III.39: Diagramme de rayonnement de la directivité (a) en 3D ;(b) en polaire  
 Le tableau III.9 Donne les différents résultats de gain, directivité, ouverture d’angle à 3dB obtenues .

Fréquence	Gain	Directivité	VSWR	BP
11.7	0.668	4.93	1.25	4.88%

Tableau III.9: Différents paramètres de l'antenne.

Après plusieurs techniques utilisées pour l’élargissement de la bande passante, nous remarquons que la bande passante et les autres performances de l'antenne sont détériorées après la modification dans le plan de masse. Donc nous allons se contenter du résultat de l'antenne fractale 2ème structure sans la technique de l’élargissement de la BP, qui représente de bonnes performances et qui reste opérationnelle pour des applications spatiales.

**III.6. Comparaison entre les antennes fractales simulées sous CST :**

Le tableau III.10. Donne les différents résultats de gain, directivité, coefficient de réflexion, rapport d'onde stationnaire et bande passante obtenues pour les deux antennes fractales miniatures et large bande simulée sous CST

	Gain (dB)	Directivité (dBi)	S <sub>11</sub> (dB)	VSWR	Bp (%)
1èr structure	3,25	6,94	-20,12	1,074	6,23
2ème structure	0,668	4.93	-17,20	1,77	4,88

Tableau III.10 : Comparaison entre les antennes fractales simulées sous CST.

**III.7. Conclusion:**

Ce chapitre est consacré à la simulation des antennes patches rectangulaires dans le but d'obtenir une antenne miniature et large bande. Nous avons tout d'abord utilisé quelques techniques d'adaptation à savoir la ligne quart d'onde et les encoches sur le patch pour arriver à un bon transfert d'énergie de la ligne vers le patch, par la suite nous avons développé deux structures fractales: Le tapis de Sierpinski et le rectangle de Minkowski, pour arriver à une miniaturisation de cette antenne, et une largeur de bande acceptable. Les meilleurs résultats de simulations sont obtenues avec la 1ère structure de l'antenne patch rectangulaire (Tapis de Sierpinski), nous avons obtenus un Coefficient de réflexion  $S_{11} = -20,12$  dB, un rapport d'onde stationnaire  $VSWR = 1,074$ , un gain  $G = 3,25$  dB, une directivité  $D = 6,94$  dBi et une bande passante  $bp = 6,23$  %. Ces résultats sont satisfaisants et répondent aux exigences de la bande de fréquence désirée [10.7-12.7] GHz.

**Références bibliographiques :**

[1] CST 1998-2010 CST – Computer Simulation Technology AG.

[2] BELGACEM Nassima « CONCEPTION DES ANTENNES PIFA MONOBANDE ET MULTI-BANDES GSM, DCS,PCS, UMTS ET WIFI» Mémoire A L'UNIVERSITÉ DE TLEMCEM, Juin 2013

[3] Nabila Aouabdia, «Etude d'un capteur à base de résonateur planaire pour applications au contrôle non destructive » thèse de doctorat ,université Mentouri de Constantine et de l'université de pierre et marie curie , juillet 2012.

[4] <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/solvers>.

[5] Bruno Delorme, « Les antennes dans les réseaux de téléphonie mobile », Paris,2010.

[6] Ben Tahar Zohra, Ben Abdesselam Sarah Yamina, "Réalisation d'une Interface graphique de calcul des paramètres d'antennes patch et conception logicielle " Mémoire de Fin d'Études MASTER. Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, 2018/2019.

[7] Fouad Benamrane, «Conception d'une antenne Patch Microstrip »; Master telecom hyperfréquence memoireonline; Université Sidi Mohamed Ben Abdellah (Fés) maroc 2011.

## Conclusion générale :

L'antenne est un élément indispensable de tout système de communication et sa miniaturisation est un défi pour la réduction de la taille globale des objets communicants sans fils. Les techniques de miniaturisation ont reçu une attention considérable ces dernières années principalement en raison de leur capacité à rétrécir les dimensions physique de l'antenne sans que cela n'intervienne sur les performances de l'antenne.

L'objectif principal de ce travail était de simuler, et concevoir une antenne patch rectangulaire miniature et large bande sous le logiciel de conception CST MWS. Dans un premier temps, nous avons donné des généralités sur les antennes en parlant de leurs caractéristiques, leurs techniques d'alimentations ainsi que les techniques d'adaptation, après nous avons détaillé les techniques de miniaturisations à savoir l'utilisation de la technique Fractale, ainsi que les techniques utilisées pour l'élargissement de la bande passante.

Nous avons ensuite simulés deux structures d'antennes fractales miniatures : le tapis de sierspinski et l'antenne de Minkowski, la 1ère structure possède une bonne qualité d'adaptation en termes : de miniaturisation nous avons réduire jusqu'au 30% des dimensions de l'antenne initial proposée, de paramètre de réflexion  $S_{11} = -20,12$  dB, de rapport d'onde stationnaire  $VSWR = 1,074$ , de gain  $G = 3,25$  dB, de directivité  $D = 6,94$  dBi et de bande passante  $B_p = 6,23$  % . Ces résultats sans satisfaisants et répondants aux exigences de la bande passante désirée qui opèrent dans la bande Ku utilisée pour des applications satellitaires allant de [10.7-12.7] GHz.