

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 la Technologie
Département Électronique et Télécommunication



Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme de Master en : Réseaux et
Télécommunications
Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Télécommunications
Spécialité : Réseaux et Télécommunications
Thème

Antenne imprimée Agile en Fréquence pour le LTE

Présenté Par :

1) Mlle BOUKREDIMI Nor El Houda

2) Mlle BELKHEIR Chaima

Devant le jury composé de :

Dr BELKACEM Hachemi MCB UAT.B.B (Ain Témouchent) Président

Dr FEROUANI Souheyla MCA UAT.B.B (Ain Témouchent) Examinatrice

Dr MOULESSEHOUL Wassila MCA UAT.B.B (Ain Témouchent) Encadrante

MLLE BELGACEM Wahiba MRA CDS (Oran) Co-Encadrante

Année universitaire 2023/2024

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier **ALLAH** le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné le courage et la force pour mener ce modeste travail jusqu'au bout.

Nous profitons de l'occasion pour remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet de fin d'études.

Nos remerciements les plus sincères s'adressent à notre Encadrante **Madame MOULESSEHOUL Wassila** Enseignante à l'Université Ain-Temouchent- Belhadj Bouchaib et **Mlle BELGACEM Wahiba** Maitre de Recherche au Centre de développement des Satellites, qui nous ont donné l'opportunité de réaliser ce travail, nous les remercions de tout cœur pour la patience et la confiance qu'elles nous ont toujours accordé durant ces mois de travail. Leurs précieux conseils scientifiques et leurs encouragements.

Nos vifs remerciements vont aux membres du Jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail en acceptant d'examiner ce mémoire et de l'enrichir par leurs suggestions. **Monsieur BELKACEM Hachemi** Enseignant l'Université Ain-Temouchent pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant de présider le Jury, veuillez trouver ici le témoignage de notre reconnaissance et notre respect le plus profond. Nos remerciements les plus respectueux vont à **Madame FEROUANI Souheyla** Enseignante à l'Université Ain-Temouchent, qui a bien voulu examiner ce travail et de siéger parmi ce Jury.

Dédicace

D'un profond amour et d'une immense gratitude je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents qui ont été toujours à mes côtés, pour leurs générosités, leur sacrifice et pour leurs soutiens moraux et matériels durant toutes les étapes de ma vie et surtout durant mon parcours éducatif de ma première année primaire jusqu'à maintenant.

A ma chère grande sœur Wissem pour son soutien moral et ses conseils précieux durant tout au long de mes études.

A la mémoire de mes grand-mères, Qu'elles reposent en paix.

A mes chères cousines Assia, Wafaa, Ikram et Lina Qui m'ont toujours soutenu.

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire. Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fait de votre soutien infailible, Merci d'être toujours là pour moi.

A toutes mes chères amies et surtout Chaima, Bouchra, Manel, Fatima et Farah.

A toutes les personnes qui m'ont aidée de près ou de loin pour la réalisation de ce travail. Et à A et tous ceux que j'aime.

Nor El Houda

Dédicace

D'un profond amour et d'une immense gratitude je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents qui ont été toujours à mes côtés, pour leurs générosités, leur sacrifice et pour leurs soutiens moraux et matériels durant toutes les étapes de ma vie et surtout durant mon parcours éducatif de ma première année primaire jusqu'à maintenant.

Ames chères sœurs Bouchra et Kawter et mon petit frère Abderazak pour leurs soutien moral et leurs conseils précieux durant tout au long de mes études.

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire. Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fait de votre soutien infailible, Merci d'être toujours là pour moi.

A toutes mes chères amies et surtout Houda, Bouchra, Manel, Fatima, Farah et Rahmouna .

A toutes les personnes qui m'ont aidée de près ou de loin pour la réalisation de ce travail. Et à tous ceux que j'aime.

Chaima

Résumé

Les antennes imprimées agiles en fréquence représentent une innovation clé dans le domaine des communications sans fil, offrant des solutions pour une utilisation plus efficace du spectre, une performance améliorée et une flexibilité accrue. Ce projet de fin d'étude vise à simuler une antenne imprimée rectangulaire agile en fréquence pour le LTE2600, LTE 1800 et le LTE 700-900, en utilisant la technique des diodes PIN sur les fentes. L'alimentation est de type micro-ruban à 50 Ohm et la simulation est réalisée par le logiciel CST Microwave studio.

Mot clés : antenne imprimée, agilité, technique d'insertions des fentes, diode PIN.

Abstract

Printed Frequency Agile Antennas Represent a Key Innovation in Wireless Communications, Offering Solutions for More Efficient Spectrum Utilization, Improved Performance, and Increased Flexibility. This final project aims to simulate a rectangular printed frequency agile antenna for LTE2600, LTE1800, and LTE700-900, using PIN diodes on slots. The power supply is 50 Ohm micro strip and the simulation is performed using the CST Microwave Studio software.

Key words: Printed antenna, agility, slot insertion technique, PIN diode.

ملخص

تمثل الهوائيات المطبوعة المتغيرة التردد مبتكرة رئيسية في مجال الاتصالات اللاسلكية، حيث تقدم حلاً لاستخدام الطيف الكفاء بشكل أفضل، وتحسين الأداء، وزيادة المرونة. يهدف هذا المشروع الختامي إلى محاكاة هوائي مطبوع متغير التردد بشكل مستطيل لنطاقات LTE 700-900 ، و LTE 1800 ، و LTE2600 باستخدام تقنيات توقيت الصمامات ذات الدبوس النشطة. يتم تغذية الهوائي بتغذية مجسمة بمقاومة 50 أوم، ويتم النمذجة باستخدام برنامج CST Microwave Studio.

الكلمات الرئيسية: هوائي مطبوع، ثنائية تقنية الإدخال، التماسك، الشريحة الدبوسية.

Sommaire

Remerciement	I
Dédicace	II
Dédicace	III
Résumé	IV
Sommaire	V
Liste des figures	IX
Liste des tableaux	XI
Listes d'abréviations	XII
Introduction générale	1
Chapitre 1 : Les antennes imprimées agiles en fréquence	3
I-1 Introduction	4
I-2 Définition.....	4
I-3 Caractéristiques des antennes imprimées	5
I.3.1 La directivité.....	5
I.3.2 Coefficient de réflexion.....	5
I.3.3 Impédance d'entrée de l'antenne	6
I.3.4 Rendement de l'antenne	6
I.3.5 Le gain.....	6
I.3.6 Polarisation de l'antenne.....	7
I.3.7 Taux d'onde stationnaire (VSWR).....	7
I.3.8 Diagramme de rayonnement.....	8
I.3.9 Angle d'ouverture	8
I-4 Les techniques d'alimentation des antennes	9
I.4.1 Alimentation directe par une ligne micro ruban	9
I.4.2 Alimentation coaxiale	10
I.4.3 Alimentation couplée par ouverture.....	10
I.4.4 Alimentation couplée par proximité	11
I-5 Les techniques d'adaptations.....	12
I.5.1 L'adaptation par quart d'onde	12
I.5.2 Adaptation avec encoches	12

I-6	Avantages, limitations et domaines d'applications des antennes imprimées	13
I-7	Les Antennes Agiles	14
I.7.1	Définition	14
I.7.2	Avantage des antennes agiles	14
I.7.3	Techniques d'agilités	14
a)	Diode Varicap	15
b)	Diode PIN	15
c)	MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)	16
d)	Commutateurs Optiques	16
e)	Matériaux Agiles	17
I.7.4	Classification des antennes agiles	17
a)	Antennes agile en Fréquence :	17
b)	Antennes Agiles en Diagramme de Rayonnement :	18
c)	Antennes Agiles en Polarisation :	18
I-8	Conclusion	18
	Chapitre 2 : Généralités sur la technologie LTE	19
II-1	Introduction	20
II-2	Évolution des réseaux mobiles	20
II-3	La technologie LTE (4G)	21
II-4	Objectifs de la 4G	21
II-5	Caractéristiques de la 4G/LTE	22
II.5.1	Les débits	22
II.5.2	La latence	22
II.5.3	L'agilité en fréquence	23
II.5.4	Codage et sécurité	23
II.5.5	Multiplexage	23
II-6	Les bandes de fréquences en LTE	23
II-7	Conclusion	24
	Chapitre 3 : Simulation et Résultats	25
III-1	Introduction	26
III-2	Choix de l'outil de simulation	26
III-3	Le cahier de charge	26
III-4	Calcul des dimensions de l'antenne	27
III-5	Résultats de simulation	28
a)	Coefficient de réflexion S [1,1]	28
III-6	Structure de l'antenne imprimée pour le LTE 2600	29

III-6-1	Dimensions des Fentes et Encoches sur le patch	29
III-6-2	Résultats de simulation	30
1.	Le Coefficient de réflexion S [1,1].....	30
2.	Le Taux d'onde stationnaire (VSWR).....	30
3.	Le gain	31
4.	La directivité	32
III-7	Structure du réseau d'antenne de 2 éléments.....	33
1.	Le Coefficient de réflexion S11	34
2.	Le gain	35
3.	La Directivité	36
III-8	Conception d'une antenne patch rectangulaire pour le LTE2600, et le LTE 700-900	36
III-8-1	Antenne proposée à double bande	37
III-8-2	Résultats de simulation de l'ajout du stub	37
a.	Le Coefficient de réflexion S11	37
b.	Le Gain	38
III-8-3	Circuit équivalant pour les modes (on/off) de la diode pin.....	39
□	Les valeurs de la diode pin	39
III-8-4	Résultats de simulation	39
□	Pour la diode OFF	39
1.	Le Coefficient de réflexion S11	39
2.	Le Gain pour la fréquence 2.53 GHz	40
3.	La Directivité pour la fréquence 2.53 GHz.....	41
□	Pour la diode ON.....	41
1.	Le Coefficient de réflexion S11	41
2.	Le Gain pour la fréquence 2.53 GHz	42
3.	La Directivité pour la fréquence 2.53 GHz.....	43
4.	Le Gain à la fréquence 0.84 GHz.....	43
III-8-5	Augmentation du gain en ajoutant des fentes sur le plan de masse.....	44
III-8-6	Résultats avec fentes sur PM	45
□	Pour diode OFF	45
1.	Le Coefficient de réflexion S11	45
2.	Le Gain à 2.6 GHz avec fentes sur PM	45
3.	La Directivité pour la fréquence 2.6 GHz avec fentes sur PM	46
4.	Le Gain à la fréquence 1.8 GHz avec fentes sur PM	47
5.	La Directivité à la fréquence 1.8 GHz avec fentes sur PM	47
6.	Le Gain à la fréquence 0.8 GHz avec fentes sur PM	48

7. La Directivité pour la fréquence 0.8 GHz avec fentes sur PM	48
□ Pour diode ON	49
1. Le Coefficient de réflexion S11	49
2. Le Gain à 2.6 GHz avec fentes sur PM	49
3. La Directivité à 2.6 GHz avec fentes sur PM	50
4. Le Gain à la fréquence 0.8 GHz avec fentes sur PM	50
5. Le Gain à la fréquence 0.9 GHz avec fentes sur PM	51
6. La Directivité pour la fréquence 0.8 GHz avec fentes sur PM	51
Conclusion	52
Conclusion générale.....	53
Références	55
Annexe	58

Liste des figures

FIGURE I-1 - STRUCTURE D'UNE ANTENNE IMPRIMEE	4
FIGURE I-2 - LES FORMES DE PATCHS	5
FIGURE I-3 - LES DIFFERENTES SORTES DE POLARISATION	7
FIGURE I-4 - REPRESENTATION DU DIAGRAMME DE RAYONNEMENT	8
FIGURE I-5 - ALIMENTATION PAR LIGNE MICRO RUBAN	9
FIGURE I-6 - ANTENNE PATCH ALIMENTEE PAR CABLE COAXIAL	10
FIGURE I-7 - ANTENNE PATCH ALIMENTEE PAR OUVERTURE	11
FIGURE I-8 - ANTENNE PATCH ALIMENTEE PAR PROXIMITE	11
FIGURE I-9 - ADAPTATION PAR QUART D'ONDE	12
FIGURE I-10 – ADAPTATION AVEC ENCOCHES	13
FIGURE I-11 – DIODE VARICAP	15
FIGURE I-12 – DIODE PIN	15
FIGURE I-13 – LE SYSTEME MICRO-ELECTRO MECHANICAL	16
FIGURE I-14 –PRINCIPE D'UN COMMUTATEUR OPTIQUE 4*4 : 4 FIBRES OPTIQUES EN ENTREE ET 4 FIBRES OPTIQUES EN SORTIE	16
FIGURE I-15 –ANTENNES AGILE EN FREQUENCE	17
FIGURE II-1 - ÉVOLUTION DES RESEAUX MOBILES	20
FIGURE II-2 - LA TECHNOLOGIE LTE (4G)	21
FIGURE III -1- LA REPRESENTATION DE L'ANTENNE PATCH INITIALE	28
FIGURE III- 2 - LE COEFFICIENT DE REFLEXIONDE L'ANTENNES PATCH INITIALE	29
FIGURE III -3- LA REPRESENTATION DE L'ANTENNE PATCH PROPOSEE	29
FIGURE III-4 - LE COEFFICIENT DE REFLEXION DE L'ANTENNE PROPOSEE	30
FIGURE III-5- LE VSWR DE L'ANTENNE FINALE	31
FIGURE III-6- LA REPRESENTATION 3D DU GAIN DE L'ANTENNE IMPRIMEE	31
FIGURE III-7- LA REPRESENTATION POLAIRE DU GAIN DE L'ANTENNE IMPRIMEE	32
FIGURE III-8- LA REPRESENTATION 3D DE LA DIRECTIVITE DE L'ANTENNE IMPRIMEE	32
FIGURE III-9-CONFIGURATION DE LA LIGNE D'ALIMENTATION POUR LE RESEAU D'ANTENNES	33
FIGURE III-10- STRUCTURE DU RESEAU D'ANTENNE DE 2 ELEMENTS	34
FIGURE III- 11- COEFFICIENT DE REFLEXION S11 DE RESEAU D'ANTENNE	35
FIGURE III-12- DIAGRAMME DE RAYONNEMENT DU RESEAU D'ANTENNE EN 3D	35
FIGURE III-13- DIAGRAMME DE RAYONNEMENT POLAIRE DE RESEAU D'ANTENNE	36
FIGURE III-14- DIRECTIVITE DU RESEAU D'ANTENNE EN 3D	36
FIGURE III-15-STRUCTURE DE L'ANTENNE A DOUBLE BANDES AVEC L'INSERTION DE LA DIODE PIN ET STUB SUR LE PATCH	37
FIGURE III- 16 -COEFFICIENT DE REFLEXION S11 D'ANTENNE AVEC L'AJOUT DU STUB	37
FIGURE III-17- DIAGRAMME DE RAYONNEMENT D'ANTENNE AVEC L'AJOUT DU STUB EN 3D	38
FIGURE III-18- DIAGRAMME DE RAYONNEMENT POLAIRE D'ANTENNE AVEC L'AJOUT DU STUB	38
FIGURE III-19- LA CONFIGURATION DES DIODES PIN RF : (A) MODELES DE CIRCUITS EQUIVALENTS POUR LES ETATS ON ET OFF DU COMMUTATEUR. (B)CST MODEL	39
FIGURE III- 20 -COEFFICIENT DE REFLEXION S11 D'ANTENNE A DOUBLE BANDES (DIODE OFF)	40
FIGURE III-21- DIAGRAMME DE RAYONNEMENT D'ANTENNE A DOUBLE BANDES (DIODE OFF) EN 3D POUR LA FREQUENCE 2.53 GHZ	40
FIGURE III-22- DIAGRAMME DE RAYONNEMENT POLAIRE D'ANTENNE A DOUBLE BANDES (DIODE OFF) POUR LA FREQUENCE 2.53 GHZ	41
FIGURE III-23- DIRECTIVITE D'ANTENNE A DOUBLE BANDES (DIODE OFF) EN 3D POUR LA FREQUENCE 2.53 GHZ	41
FIGURE III- 24 -COEFFICIENT DE REFLEXION S11 D'ANTENNE A DOUBLE BANDES (DIODE ON)	42

FIGURE III-25 -DIAGRAMME DE RAYONNEMENT D'ANTENNE A DOUBLE BANDES (DIODE ON) EN 3D POUR LA FREQUENCE 2.53 GHZ.	42
FIGURE III-26 -DIAGRAMME DE RAYONNEMENT POLAIRE D'ANTENNE A DOUBLE BANDES (DIODE ON) POUR LA FREQUENCE 2.53GHZ.	43
FIGURE III-27 - DIRECTIVITE D'ANTENNE A DOUBLE BANDES (DIODE ON) EN 3D POUR LA FREQUENCE 2.53 GHZ.	43
FIGURE III-28 - DIAGRAMME DE RAYONNEMENT DU GAIN (DIODE ON) EN 3D POUR LA FREQUENCE 0.84 GHZ.	44
FIGURE III-29 - STRUCTURE DU PLAN DE MASSE DE L'ANTENNE AVEC L'INSERTION DES FENTES.	44
TABLEAU III-8 : DIMENSIONS DES FENTES SUR LE PLAN DE MASSE.	45
FIGURE III- 30 - COEFFICIENT DE REFLEXION S11 DE L'ANTENNE PROPOSEE (DIODE OFF) AVEC FENTES SUR PM.	45
FIGURE III-31 - LE GAIN (DIODE OFF) AVEC FENTES SUR PM EN 3D ET EN COORDONNEES POLAIRES POUR LA FREQUENCE 2.6 GHZ.	46
FIGURE III-32 - DIRECTIVITE E L'ANTENNE (DIODE OFF) AVEC FENTES SUR PM EN 3D POUR LA FREQUENCE 2.6 GHZ.	46
FIGURE III-33 - LE GAIN (DIODE OFF) AVEC FENTES SUR PM EN 3D ET EN COORDONNEES POLAIRES POUR LA FREQUENCE 1.8 GHZ.	47
FIGURE III-34 - DIRECTIVITE DE L'ANTENNE (DIODE OFF) AVEC FENTES SUR PM EN 3D POUR LA FREQUENCE 1.8 GHZ.	47
FIGURE III-35 - LE GAIN D'ANTENNE (DIODE OFF) AVEC FENTES SUR PM EN 3D ET EN COORDONNEES POLAIRES POUR LA FREQUENCE 0.8 GHZ.	48
FIGURE III-36 - DIRECTIVITE D'ANTENNE (DIODE OFF) AVEC FENTES SUR PM EN 3D POUR LA FREQUENCE 0.8 GHZ.	48
FIGURE III- 37 - COEFFICIENT DE REFLEXION S11 D'ANTENNE (DIODE ON) AVEC FENTES SUR PM.	49
FIGURE III-38 - DIAGRAMME DE RAYONNEMENT DU GAIN (DIODE ON) AVEC FENTES SUR PM EN 3D ET EN COORDONNEES POLAIRES POUR LA FREQUENCE 2.6 GHZ.	49
FIGURE III-39 - DIRECTIVITE DE L'ANTENNE A L'ETAT ON AVEC FENTES SUR PM EN 3D POUR LA FREQUENCE 2.6 GHZ.	50
FIGURE III-40 -LE GAIN DE L'ANTENNE (DIODE ON) AVEC FENTES SUR PM EN 3D ET EN COORDONNEES POLAIRES POUR LA FREQUENCE 0.8 GHZ.	50
FIGURE III-41 -LE GAIN DE L'ANTENNE (DIODE ON) AVEC FENTES SUR PM EN 3D ET EN COORDONNEES POLAIRES POUR LA FREQUENCE 0.9 GHZ.	51
FIGURE III-42 - DIRECTIVITE DE L'ANTENNE (DIODE ON) AVEC FENTES SUR PM EN 3D POUR LA FREQUENCE 0.8 GHZ.	51

Liste des tableaux

TABLEAU III-1 : LE CAHIER DE CHARGE	26
TABLEAU III-2 : PARAMETRES DE L'ANTENNE IMPRIMEE RECTANGULAIRE.	27
TABLEAU III-3 : RESULTATS DES CALCULS SIMULE DE L'ANTENNE PATCH INITIALE.	28
TABLEAU III-4 : DIMENSIONS DES FENTES ET ENCOCHES SUR LE PATCH PROPOSE.	30
TABLEAU III-5 : PARAMETRES DU RESEAU D'ANTENNES PATCH.	34
TABLEAU III-6: DIMENSIONS DE LA LIGNE D'ALIMENTATION POUR LE RESEAU D'ANTENNE.	34
TABLEAU III-7 : LES VALEURS DE LA DIODE PIN.	39
TABLEAU III-8 : DIMENSIONS DES FENTES SUR LE PLAN DE MASSE.	45

Listes d'abréviations

ADSL: Asymmetric Digital Subscriber Line.	25
CST (MWS): Computer Science Technology MICROWAVE STUDIO.	28
dB: décibels.....	32
GHz: Giga Hertz.	29
LTE: Long Term Evolution.	21
S11: Coefficient of reflexion.	30
TOS : Taux d'onde Stationnaire.	28
VSWR: The Voltage Standing Wave Radio.	28
WIFI: Wireless Fidelity.	25
1G: première génération.....	21
2G: deuxième génération.	21
3G: troisième génération.	21
4G: quatrième génération.	21
3D: trois Dimensions.	28

Introduction générale

L'utilisation des antennes imprimées dans les télécommunications a été facilitée par l'évolution des systèmes de télécommunications, qui a créé le besoin de dispositifs abordables et compacts utilisant une technologie simple et économique. La technologie micro-strip utilisée dans ces antennes a permis le développement de caractéristiques innovantes, les rendant largement utilisées dans divers domaines d'application.

Les antennes imprimées, également appelées antennes patch, sont largement utilisées dans les télécommunications en raison de leurs nombreux avantages. Elles ont été proposées pour la première fois en 1953 par Deschamps et leur utilisation s'est répandue dans les années 1970 avec l'avènement de substrats diélectriques à faible perte. Ces antennes se composent d'un patch métallique sur un côté d'un support diélectrique, avec un plan de masse sur l'autre côté. Elles présentent de nombreux avantages, notamment leur légèreté, leur compacité, leur faible coût et leur compatibilité avec les circuits intégrés. On les retrouve dans de nombreuses applications telles que les communications mobiles, les communications par satellite, l'aéronautique, la téléphonie, l'identification sans contact, les dispositifs biomédicaux et l'Internet des objets.

Le processus de conception des antennes imprimées implique de définir leurs caractéristiques électriques telles que le gain, le diagramme de rayonnement, la largeur du faisceau, la polarisation, la fréquence de résonance, l'impédance d'entrée et la bande passante. Ensuite, l'antenne est conçue et simulée à l'aide de logiciels de modélisation électromagnétique, et les résultats sont vérifiés par des mesures. Des ajustements sont effectués si nécessaire pour respecter les spécifications de conception.

Le principal objectif de ce mémoire est de concevoir une antenne imprimée pour le LTE2600, LTE1800 et le LTE700-900, en utilisant la technique de l'insertion des fentes et diode PIN, ce travail est réparti en trois chapitres.

Le premier chapitre est consacré aux principes fondamentaux des antennes, en premier temps on va présenter une définition des antennes imprimées suivie d'un bref historique. Dans un second temps, les caractéristiques vont être détaillées avec leurs formules. Ensuite on va s'étaler vers une explication de l'adaptation et de la façon d'alimentation des antennes patch, décrire

quelques avantages et inconvénients de ces antennes et ces domaines d'application, et pour conclure notre chapitre nous allons présenter les antennes agiles à savoir les types d'agilités et leurs classifications.

Dans le deuxième chapitre nous allons discuter de la technologie LTE, ces caractéristiques et ces bandes de fréquences.

Le dernier chapitre se focalise sur la partie pratique, il est consacré à la simulation et l'adaptation d'une antenne rectangulaire imprimée à la fréquence de 2.6GHz alimenté par une ligne micro-ruban en utilisant logiciel CST Micro-wave studio, une reconfiguration en fréquence (agilité) à savoir 1.8GHz et 800MHz sont effectuées par l'ajout d'une diode PIN sur le patch, ensuite des fentes sont ajoutées sur le plan de masse afin d'augmenter le gain de l'antenne.

Ce mémoire est terminé par une conclusion générale et une bibliographie qui contient les références dont on s'est appuyé pour élargir notre horizon de travail.

*Chapitre 1 : Les
antennes imprimées agiles
en fréquence*

I-1 Introduction

L'idée des antennes imprimées a été proposée pour la première fois en 1953 aux États-Unis par Deschamps et en France par Guttan et Baissimot en 1955. L'utilisation des antennes imprimées a commencé au début des années 1970, Depuis, de nombreux types d'antennes imprimées ont été développés et différentes techniques ont été utilisées pour améliorer leurs performances. Les antennes imprimées sont de petite taille, ce qui les rend faciles à intégrer dans les systèmes de communication sans fil. Ce chapitre donne en première partie des informations générales sur les antennes patch, y compris leur conception, leurs caractéristiques, leur fonctionnement et les techniques utilisées pour les alimenter [1], et en seconde partie les antennes imprimées de types agiles, à savoir ses différentes techniques.

I-2 Définition

Une antenne imprimée est composée d'un plan de masse, d'une couche de substrat diélectrique et de motif conducteur rayonnant qui peut prendre différentes formes telles que carrées, rectangulaires, triangulaires, circulaires, elliptiques ou d'autres formes plus complexes comme montré sur la figure 1.2. Ces antennes sont largement utilisées dans les domaines des micro-ondes et des ondes millimétriques [2] .

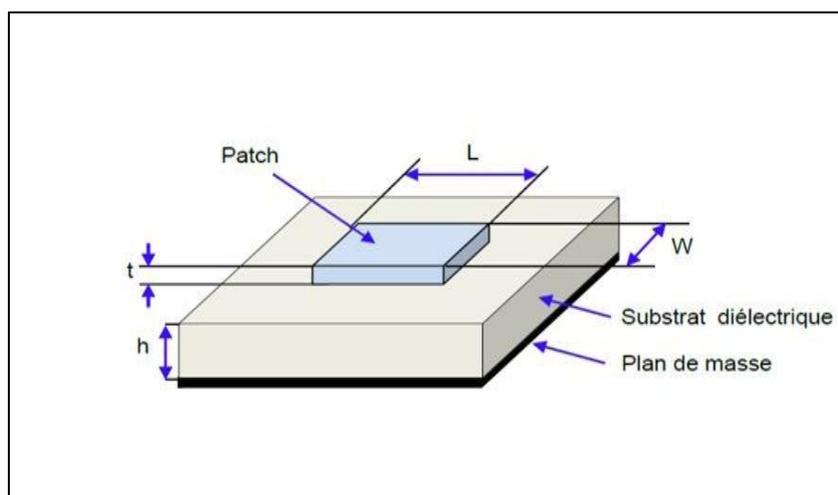


Figure I-1 - Structure d'une antenne imprimée [3].

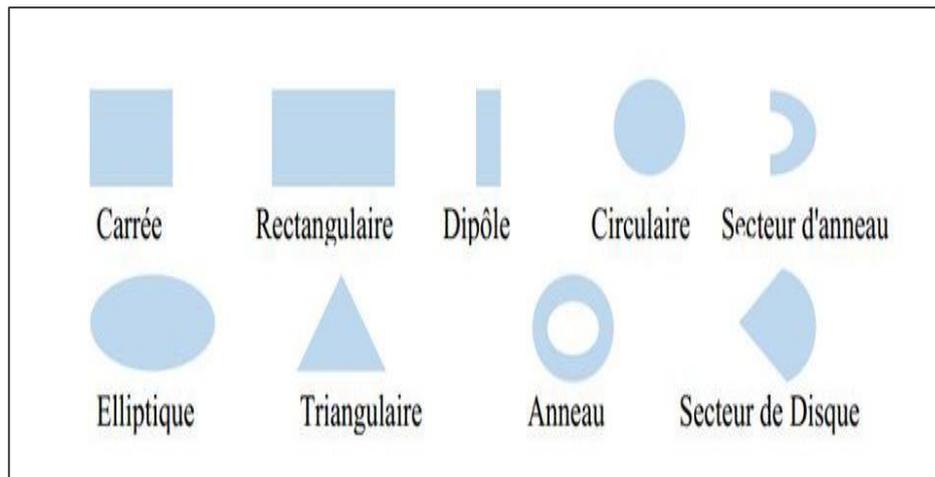


Figure I-2 - Les formes de patches [4].

I-3 Caractéristiques des antennes imprimées

Les propriétés électriques d'une antenne décrivent comment elle s'intègre dans le circuit où elle est branchée. Ceux-ci permettent d'estimer combien d'énergie l'antenne fournit au système qui la stimule, et donc de mesurer sa performance lorsqu'elle transmet de l'énergie vers son environnement de propagation [5]. Parmi ces nombreuses caractéristiques, voici quelques-uns des principaux :

I.3.1 La directivité

Explique comment la force de lumière ou les ondes électromagnétiques se concentrent fort vers un endroit spécifique.

$$D(\theta) = 4\pi \frac{P(\theta)}{\eta P_a} \quad (I.1)$$

I.3.2 Coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion S11 montre comment l'antenne absorbe l'énergie. C'est ce paramètre sur lequel on se concentre lors de l'optimisation [5].

$$S_{11} = \frac{(Z_e - Z_0)}{(Z_e + Z_0)} \quad (I.2)$$

Avec :

Z_e : est l'impédance d'entrée de l'antenne.

Z_0 : est l'impédance caractéristique (généralement égale à 50Ω).

I.3.3 Impédance d'entrée de l'antenne

Pour comprendre l'antenne selon la théorie des circuits linéaires, considérons qu'elle peut être comparée à un élément d'impédance complexe appelé "dipôle d'impédance". Ce dipôle a deux parties : une partie réelle (réel) et une partie imaginaire. La partie réelle correspond à la puissance perdue comme radiation et autres pertes internes (par exemple effets Joule et ondes de surface). La partie imaginaire indique la puissance réactive autour de l'antenne et le décalage entre les signaux entrants et sortants. L'impédance d'entrée de l'antenne est observée depuis la ligne d'alimentation proche de l'antenne elle-même [5] . Elle est calculée grâce à l'expression suivante :

$$Z_e = \frac{V_e}{I_e} = R + jX \quad (I.3)$$

Z_e = impédance d'entrée aux bornes a et b

R = résistance de l'antenne aux bornes a et b

X = réactance de l'antenne aux bornes a et b.

I.3.4 Rendement de l'antenne

Le taux de performance de l'antenne mesure combien de l'énergie fournie atteint finalement le milieu extérieur via la radiation, c'est-à-dire le rapport entre la puissance radiée (P_r) et la puissance fournie à l'antenne (P_a) [5] . Ce rapport illustre les pertes intérieures à l'antenne :

$$\eta = \frac{P_r}{P_a} \quad (I.4)$$

Avec :

P_r : Puissance totale rayonné.

P_a : Puissance d'alimentation de l'antenne.

I.3.5 Le gain

Il est défini par :

$$G(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_0(\theta, \varphi)} = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{Pa} \quad (I.5)$$

La relation entre le gain et la directivité d'une antenne est donnée par l'équation suivante :

$$G(\theta, \varphi) = \eta D(\theta, \varphi) \quad (I.6)$$

I.3.6 Polarisation de l'antenne

La polarisation d'une antenne est déterminée par l'orientation de l'onde qu'elle émet. Cette orientation est la même que celle du champ électrique de l'onde. Si le champ électrique est perpendiculaire au sol, on parle de polarisation verticale, et s'il est parallèle au sol, on parle de polarisation horizontale. La trajectoire temporelle du champ électrique forme une figure, généralement une ellipse, qui définit la polarisation. Si la trajectoire est une ligne, l'antenne a une polarisation linéaire, et si elle forme un cercle, l'antenne a une polarisation circulaire [5].

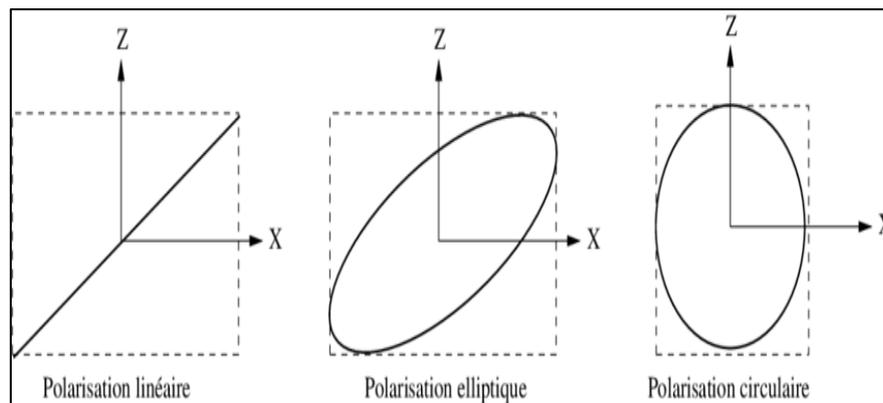


Figure I-3 - Les différentes sortes de polarisation [6].

I.3.7 Taux d'onde stationnaire (VSWR)

Voltage Standing Wave Ratio ou le taux d'onde stationnaire, également appelé rapport d'ondes stationnaires (ROS), représente une fonction du coefficient de réflexion, qui décrit la puissance réfléchie par l'antenne [5]. Le VSWR est défini par la formule suivante :

$$VSWR = \frac{1+|S_{11}|}{1-|S_{11}|} \quad (I.7)$$

I.3.8 Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement décrit les variations de la puissance rayonnée par l'antenne par les différentes directions de l'espace. La direction pour laquelle la puissance rayonnée est maximale est appelée l'axe de rayonnement de l'antenne [5].

La fonction caractéristique de rayonnement de l'antenne $Pr(\theta, \varphi)$ est donnée par :

$$Pr(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P(\theta_0, \varphi_0)} \quad (I.8)$$

$P(\theta, \varphi)$: Puissance rayonnée dans une direction quelconque

$P(\theta_0, \varphi_0)$: Puissance rayonnée max

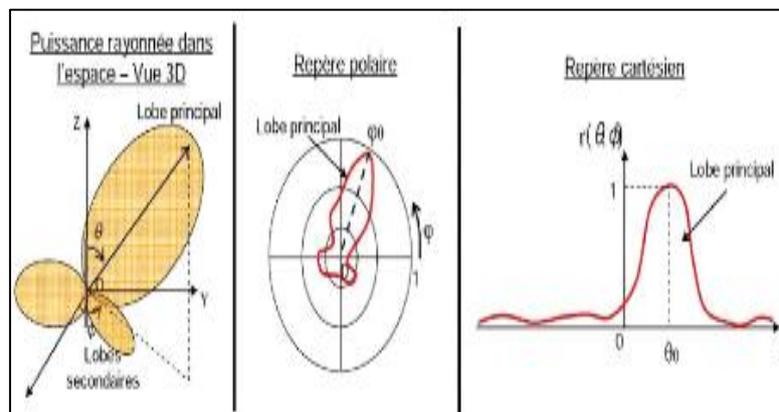


Figure I-4 - Représentation du diagramme de rayonnement [7].

I.3.9 Angle d'ouverture

Le gain maximal d'une antenne donnée dans un plan bien déterminé, alors son ouverture dans ce plan est l'angle qui se trouve entre deux directions de ce plan ayant la moitié du gain maximal (gain a -3 dB) [8].

I-4 Les techniques d'alimentation des antennes

L'Étude des antennes imprimées implique de prendre en compte l'excitation, qui est cruciale pour contrôler la façon dont l'énergie est transmise aux éléments radiateurs de l'antenne.

De cette manière, il est possible de modifier leur radiation et améliorer leurs performances. La méthode d'alimentation de l'antenne dépend de la manière dont elle est intégrée dans le système [9].

Les méthodes d'alimentation des antennes peuvent être classées en deux catégories :

- 1) Les alimentations par contact (par sonde coaxiale ou ligne micro ruban).
- 2) Les alimentations par proximité (couplage électromagnétique ou couplage à ouverture).

I.4.1 Alimentation directe par une ligne micro ruban

Une technique couramment employée pour alimenter certaines antennes imprimées consiste à connecter une fine bande de cuivre directement au bord d'un patch mince (comme celui utilisé dans les micro-rubans). Cette bande de cuivre est plus étroite que le patch lui-même. Les avantages de cet approche incluent la possibilité de graver la bande de cuivre sur la même face de l'antenne, ce qui facilite sa fabrication et permet d'adapter facilement l'antenne à la résonance souhaitée. Cependant, cette configuration peut entraîner un rayonnement parasite [9].

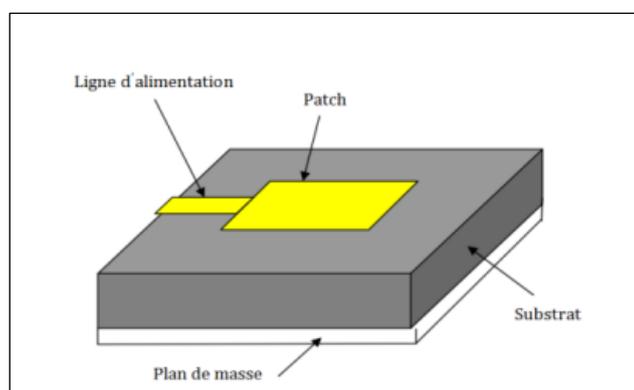


Figure I-5 - Alimentation par ligne micro ruban [10].

I.4.2 Alimentation coaxiale

Alimenter les antennes micro-rubans avec une connexion coaxiale ou une sonde est une méthode populaire. Dans ce cas, le fil intérieur du connecteur coaxial pénètre le matériau isolant et est soudé au patch, tandis que le fil extérieur est relié au plan de masse. L'avantage majeur de

cette méthode réside dans la flexibilité de positionner l'alimentation n'importe où dans le patch, ce qui simplifie la fabrication.

Malheureusement, cette technique présente quelques inconvénients concernant le diagramme de rayonnement. Ainsi, la connexion crée un pic de courant localisé près de l'élément radiant, ce qui peut provoquer une asymétrie dans le diagramme de rayonnement. Par ailleurs, des pertes apparaissent lorsque le plan de masse, le matériau isolant et l'élément plaqué sont percés [9].

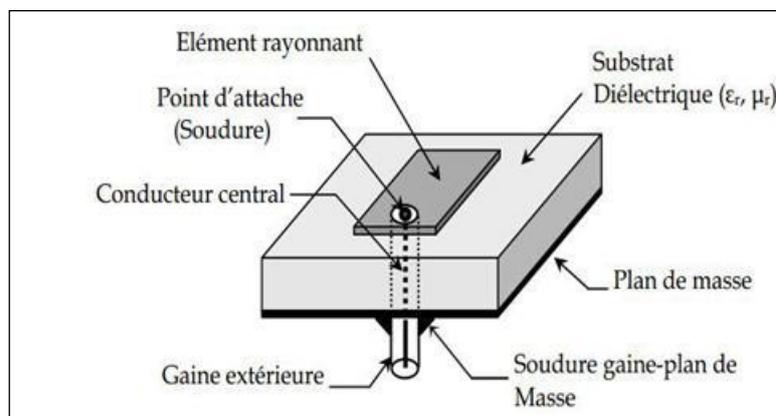


Figure I-6 - Antenne patch alimentée par câble coaxial [11].

I.4.3 Alimentation couplée par ouverture

Ce type d'alimentation est difficile à concevoir à cause des couches multiples, qui augmentent l'épaisseur d'antenne. Cependant elle offre l'élargissement de bande passante [9].

La connexion entre le patch et la ligne d'alimentation est établie par une ouverture ou une fente dans le plan de masse. Les substrats inférieurs sont généralement fabriqués à partir de

matériaux à permittivité élevée, tandis que les substrats supérieurs sont fabriqués à partir de matériaux à faible constante diélectrique pour optimiser le rayonnement du patch.

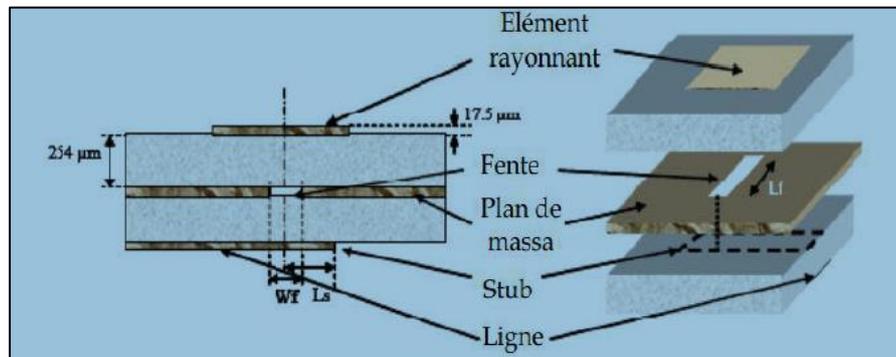


Figure I-7 - Antenne patch alimentée par ouverture [12].

I.4.4 Alimentation couplée par proximité

Cette méthode d'alimentation utilise deux substrats diélectriques, avec la ligne d'alimentation entre les deux substrats et le patch de rayonnement sur le substrat supérieur.

Le principal avantage de cette technique est qu'elle élimine le faux rayonnement d'alimentation et permet d'obtenir une bande passante plus large en augmentant l'épaisseur globale de l'antenne.

Cependant, cette méthode présente également des inconvénients, notamment la difficulté de fabrication due aux deux couches diélectriques nécessitant un alignement précis, ainsi que la difficulté d'intégrer des dispositifs actifs [9].

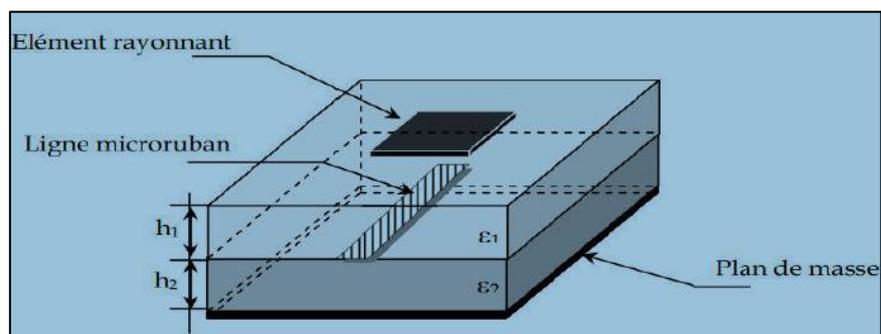


Figure I-8 - Antenne patch alimentée par proximité [12].

I-5 Les techniques d'adaptations

Tout système convertissant l'énergie sur une ligne de transmission requiert une adaptation car la ligne change l'impédance de chargement en une autre valeur d'impédance juste devant la source. Donc, ce que la source voit dépend de l'impédance de chargement, de la longueur électrique de la ligne et de son impédance caractéristique [13].

I.5.1 L'adaptation par quart d'onde

Lors de la construction de circuits hyperfréquences, on cherche souvent à s'adapter à une impédance différente (généralement l'impédance caractéristique) de celle obtenue à la fin du circuit. Cela s'appelle l'adaptation.

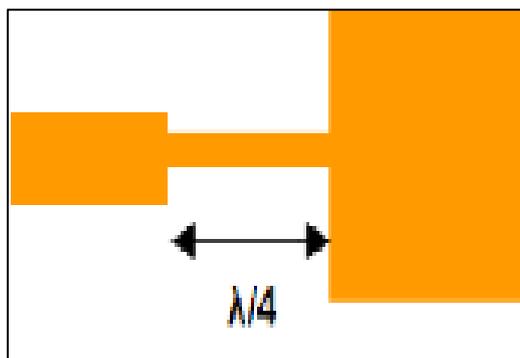


Figure I-9 - Adaptation par quart d'onde [13].

I.5.2 Adaptation avec encoches

Pour ajuster l'antenne, on modifie la forme du patch en y ajoutant des encoches. Les dimensions et la forme des encoches sont ajustées pour obtenir les caractéristiques de rayonnement souhaitées. [13]

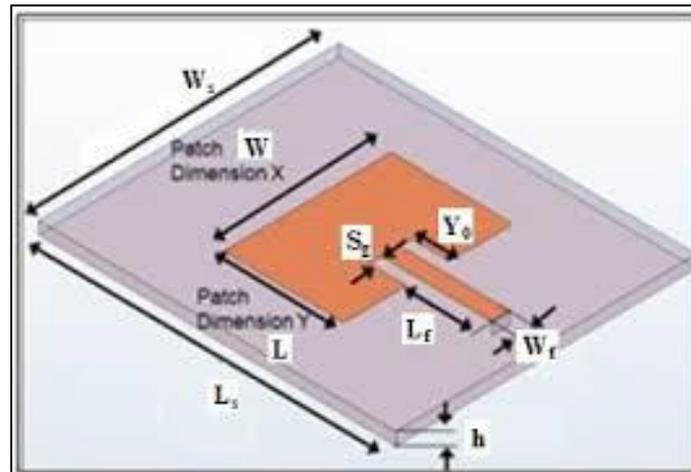


Figure I-10 – Adaptation avec encoches [14].

I-6 Avantages, limitations et domaines d'applications des antennes imprimées

Les antennes imprimées offrent de nombreux avantages et sont utilisées sur une large plage de fréquences, allant de 100 MHz à 100 GHz [15], elles sont utilisées dans divers domaines, comme la télémétrie, la communication sur les missiles, le radar, l'aviation, les liaisons entre les navires ou les satellites, les armes intelligentes et les systèmes GPS, en raison de leurs nombreux avantages par rapport à quelques inconvénients [16].

Certains avantages sont les suivants :

- ❖ Faible poids.
- ❖ Encombrement réduit.
- ❖ Faible coût de fabrication, production en masse possible.
- ❖ Antennes multi bandes, multi polarisation possibles.
- ❖ Compatibilité avec les circuits hybrides (microwave monolithic integrated circuit).
- ❖ Les réseaux d'alimentation et d'adaptation sont fabriqués simultanément avec l'antenne.

Cependant, ces antennes présentent également des inconvénients et des limitations, tels que :

- ❖ Bande passante étroite.
- ❖ Un gain moyen.
- ❖ Un rayonnement limité à un demi-plan d'espace.

- ❖ Supportent uniquement des faibles puissances.
- ❖ Pertes de rayonnement par onde de surfaces.

I-7 Les Antennes Agiles

I.7.1 Définition

Une antenne agile ou reconfigurable est capable de changer sa façon de fonctionner après avoir été fabriquée. Cela signifie qu'elle peut ajuster certaines de ses caractéristiques, comme la fréquence à laquelle elle opère, la direction dans laquelle elle envoie ou reçoit des signaux, ou même la manière dont elle est polarisée. Ces ajustements se font en fonction de ce que l'antenne détecte dans son environnement et des besoins spécifiques de l'application à laquelle elle est destinée [17].

I.7.2 Avantage des antennes agiles

Le principal avantage d'une telle antenne est qu'elle permet de transformer une antenne classique à fonctionnement fixe en une antenne plus flexible. En utilisant des techniques de commutation électrique, mécanique, optique ou autres, on peut améliorer les performances des appareils sans fil sans rendre les systèmes plus complexes ou coûteux.

I.7.3 Techniques d'agilités

Le développement de la microélectronique a permis de créer des antennes reconfigurables de manière plus efficace et moins coûteuse. Certaines méthodes utilisent des composants actifs spécifiques une fois intégrés dans l'antenne, peuvent modifier sa longueur électrique, créer des courts-circuits ou des fentes activables, et activer ou désactiver des éléments supplémentaires, parmi ces techniques:

a) Diode Varicap

Une diode varicap, également appelée varactor ou diode à capacité variable, agit comme un condensateur dont la capacité varie en fonction de la tension appliquée. En modifiant la tension, on peut changer la capacité de la diode varicap. Bien qu'elles soient faciles à intégrer et offrent une grande flexibilité, ces diodes peuvent entraîner des pertes importantes et nécessitent parfois des tensions élevées. Elles sont souvent utilisées pour rendre les antennes agiles en fréquence [17].

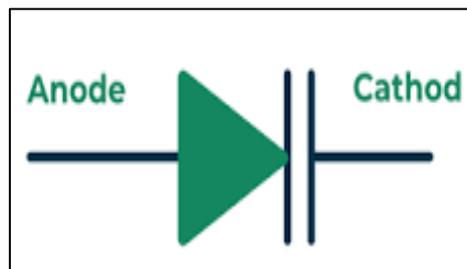


Figure I-11 – diode varicap [18].

b) Diode PIN

La diode PIN fonctionne comme une résistance variable ou un interrupteur rapide pour les signaux hauts fréquence. Elle offre une faible impédance en mode passant et une grande impédance en mode bloqué. Les diodes PIN sont faciles à intégrer, peu coûteuses et fiables, mais elles peuvent consommer beaucoup de puissance en mode passant. Elles sont souvent utilisées pour créer des antennes agiles en contrôlant les états des diodes [17].

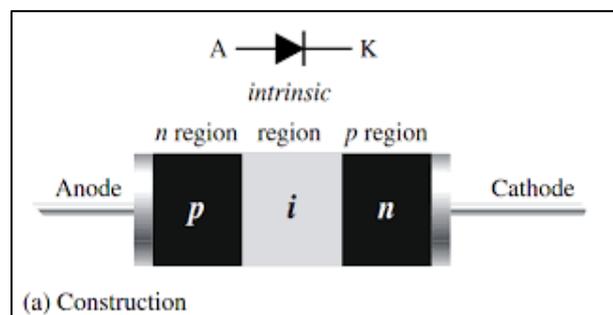


Figure I-12 – Diode PIN [19].

c) MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)

Les MEMS de type "switches RF" utilisent un mouvement mécanique pour créer des courts-circuits ou des circuits ouverts sur une ligne de transmission. Ils offrent une faible consommation d'énergie, un temps de réponse rapide et une fabrication simple. Les MEMS sont utilisés pour activer et désactiver des éléments résonants dans les antennes [17].

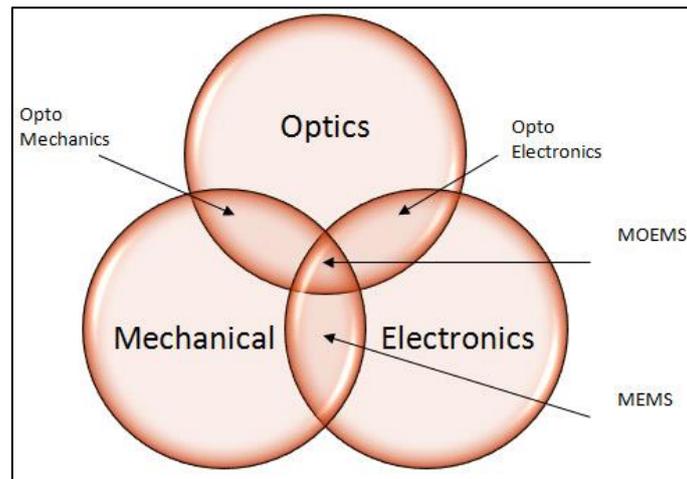
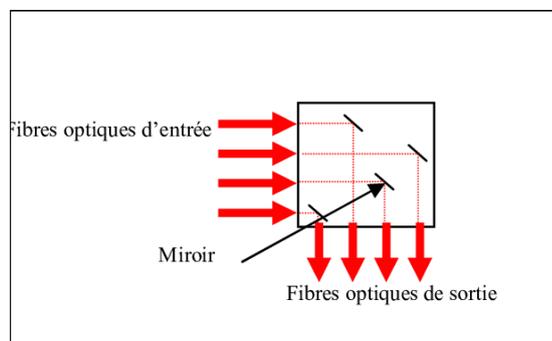


Figure I-13 – Le système Micro-Electro Mechanical [20].

d) Commutateurs Optiques

Les commutateurs optiques utilisent des photoconducteurs pour contrôler les antennes sans avoir besoin de circuits de polarisation complexes. Ils sont rapides et peuvent modifier les fréquences de résonance de l'antenne en fonction de l'activation du laser [17].



*Figure I-14 –Principe d'un commutateur optique 4*4 : 4 fibres optiques en entrée et 4 fibres optiques en sortie [21].*

e) Matériaux Agiles

Les matériaux agiles, comme les matériaux ferroélectriques, ferromagnétiques et les cristaux liquides, peuvent modifier leurs propriétés électromagnétiques pour rendre les antennes plus flexibles. Ils sont peu encombrants et de plus en plus faciles à intégrer, mais leur utilisation nécessite une commande externe, des tensions élevées et des dispositifs d'alimentation complexes [17].

I.7.4 Classification des antennes agiles

Nous identifions trois principales catégories de ces antennes :

1. Antennes agiles en fréquence.
2. Antennes agiles en diagramme de rayonnement.
3. Antennes agiles en polarisation.

Il est également possible de combiner deux ou plus de ces fonctionnalités pour créer des antennes encore plus flexibles et adaptatives [17].

a) Antennes agile en Fréquence :

L'agilité en fréquence est une caractéristique très recherchée qui suscite un intérêt croissant tant dans le milieu académique que dans l'industrie. Cette demande croissante est due à la multiplication des normes utilisées dans les systèmes de télécommunication, ainsi qu'à leurs exigences en termes de qualité et de capacité d'accueil des utilisateurs. Le défi majeur réside dans la nécessité de faire coexister différentes normes sur une même antenne, telles que le GSM 850, GSM 900, GSM1800, GSM 1900, GPS, UMTS, ISM, LTE, Radio FM, BlueTooth, WiFi, WLAN, WiMAX, etc [17].

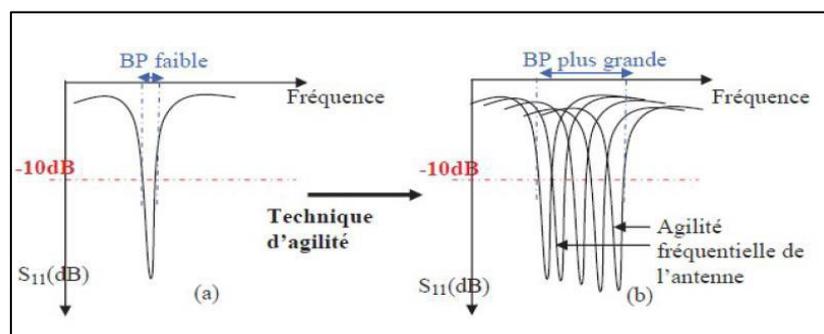


Figure I-15 –Antennes agile en Fréquence [22].

b) Antennes Agiles en Diagramme de Rayonnement :

Les antennes agiles en diagramme de rayonnement offrent une nouvelle approche pour créer des diagrammes de rayonnement de manière plus simple que les réseaux à déphaseurs traditionnels. En général, la diversité du diagramme de rayonnement permet de modifier la forme et la direction des diagrammes pour privilégier certaines directions. Cette capacité aide à optimiser les liaisons de communication, améliorer les débits de transmission, réduire les interférences avec d'autres utilisateurs, éviter les pertes de signal dans les environnements complexes, et augmenter l'efficacité globale du système [17].

c) Antennes Agiles en Polarisation :

L'intégration d'antennes flexibles en polarisation dans les systèmes de communication sans fil et par satellite gagne en popularité et se développe rapidement. Ces antennes doivent pouvoir changer leur polarisation tout en conservant les mêmes caractéristiques en termes de fréquence de résonance et de rayonnement. L'objectif est de modifier uniquement l'orientation du champ électrique pour améliorer la réception du signal en évitant les pertes liées aux trajets multiples [17].

I-8 Conclusion

Ce chapitre vise à présenter de manière concise l'essentiel de la théorie des antennes imprimées. Nous avons décrit ces antennes leur principe de fonctionnement, les techniques les plus importantes utilisées pour les alimenter, et enfin, nous abordé les techniques d'agilités de ces derniers ainsi leurs classifications.

Chapitre 2 :
Généralités sur la
technologie LTE

II-1 Introduction

La technologie LTE (Long-Term Evolution) est une norme de communication sans fil de quatrième génération (4G) développée pour fournir des vitesses de données élevées et une meilleure performance réseau par rapport aux générations précédentes, il a été développé par le 3rd Generation partnership project (3GPP).

II-2 Évolution des réseaux mobiles

La téléphonie mobile a progressé à travers différentes générations, passant du 1G au 4G : Le réseau 1G, lancé en France en 1986 sous le nom de Radiocom 2000, utilisait des téléphones analogiques principalement installés dans les voitures [23].

Le réseau 2G, apparu en 1990, a marqué le passage de l'analogique au numérique, permettant les appels, les SMS et parfois les MMS, avec des vitesses de données allant jusqu'à 9,6 Kbits/s. Des améliorations ont été apportées avec le GPRS (2,5G) et l'EDGE (2,75G). La 3G, fonctionnant sur les fréquences 900 MHz et 2100 MHz, offrait des débits allant jusqu'à 1,9 Mbits/s. Des évolutions comme la 3G+ (HSPA), le (HSPA+) et le H+ Dual Carrier (DC-HSPA+) ont augmenté les débits jusqu'à 10 Mbits/s, permettant de regarder des vidéos instantanément.

La 4G, également appelée LTE (Long Term Evolution), offre des vitesses de téléchargement élevées, permettant le transfert de fichiers lourds et la diffusion de vidéos en haute définition en streaming.

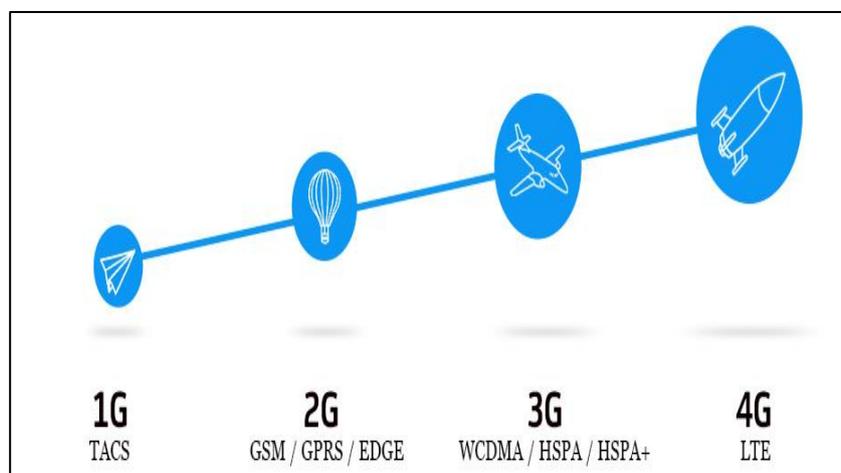


Figure II-1 - Évolution des réseaux mobiles [24].

II-3 La technologie LTE (4G)

Les services de communication mobiles suivent la même évolution que les services fixes, avec une transition rapide vers un accès à très haut débit. Les réseaux 4G répondent aux demandes croissantes des utilisateurs mobiles en termes de qualité de service et de capacité de trafic [25].

Ces fréquences sont destinées à des réseaux mobiles à très haut débit pour offrir aux consommateurs une capacité et une qualité de service supérieures à celles de l'internet mobile actuel. La technologie LTE (Long Term Evolution) offre des débits de plusieurs dizaines de Mbits/s, bien supérieurs aux performances des technologies 3G et 3G⁺ actuellement déployées, ainsi que des temps de latence plus courts favorisant une meilleure interactivité. Avec la 4G, toutes les informations, y compris la voix et les données, sont transmises par IP, le même protocole utilisé sur Internet.

Cela facilite le développement d'applications multimédias et permet des vitesses de téléchargement plus rapides et des temps de latence plus courts. Selon les normes de l'Union internationale des télécommunications (UIT), le vrai 4G devrait offrir des vitesses de téléchargement de 100 Mbits/s pour un utilisateur en mouvement et de 1 Gbit/s en mode stationnaire.



Figure II-2 - La technologie LTE (4G) [26].

II-4 Objectifs de la 4G

La 4ème génération de réseaux mobiles vise à améliorer l'efficacité spectrale et à augmenter la capacité de traiter le grand nombre de terminaux dans une même zone. Elle cherche également à offrir des débits élevés en situation de mobilité et à garantir une mobilité complète pour l'utilisateur en assurant l'interopérabilité entre les différentes technologies existantes. Son

objectif est de rendre le passage entre les réseaux transparents pour l'utilisateur, afin d'éviter toute interruption des services pendant le changement de cellules, et de passer progressivement vers le tout-IP [27], les principales ambitions des réseaux de 4e génération consistent en :

- Maintenir la continuité des sessions en cours.
- Réduire les retards et le trafic de signalisation.
- Améliorer la qualité de service.
- Optimiser l'utilisation des ressources.
- Réduire le délai de relève, le délai de bout-en-bout, la gigue et la perte de paquets.
- Minimiser le coût de signalisation.

II-5 Caractéristiques de la 4G/LTE

II.5.1 Les débits

Les objectifs de débit maximal définis pour le LTE sont les suivants :

- 100Mb/s en voie descendante pour une largeur de bande allouée de 20Mhz
- 50Mbit/s en voie montante pour une largeur de bande allouée de 20Mhz Le débit de la cellule doit être atteignable au moins par 95% des utilisateurs. [28]

II.5.2 La latence

C'est la capacité à réagir rapidement à des demandes d'utilisateurs oued service. On a deux plans :

- Latence du plan de contrôle : Le but est d'augmenter le temps réponse (latence) du système de contrôle plus efficacement que dans UMTS (Universal Mobile Télécommunications System), tout en maintenant une durée de passage inférieure à 100 millisecondes.
- Latence du plan usager : En termes simples, la latence du réseau LTE fait référence au temps qu'il faut pour qu'un paquet de données IP soit transmis à travers le réseau d'accès.

Dans le cas du réseau LTE, l'objectif est de maintenir une latence du plan utilisateur inférieure à 5 millisecondes.

II.5.3 L'agilité en fréquence

L'agilité en fréquence est une caractéristique clé de la technologie LTE qui permet au réseau d'utiliser efficacement diverses bandes de fréquences pour optimiser les performances et la capacité, tout en réduisant les interférences. Elle doit pouvoir opérer sur des porteuses de différentes largeurs afin de s'adapter à des allocations spectrales variées. Les largeurs de bande initialement requises ont par la suite été modifiées pour devenir les suivantes : 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz et 20 MHz dans les sens montant et descendant.

II.5.4 Codage et sécurité

L'OFDMA (Accès multiple par répartition en fréquence orthogonal) est une technologie de codage radio qui permet le partage simultané de la bande de fréquence entre plusieurs utilisateurs distants. Contrairement à l'OFDM, dont il est dérivé et qui est utilisé dans l'ADSL et le Wifi, l'OFDMA est spécifiquement optimisé pour l'accès multiple, ce qui signifie qu'il permet à plusieurs utilisateurs distants de partager efficacement la ressource spectrale.

II.5.5 Multiplexage

Il existe deux modes de multiplexage de fréquences :

- a) FFD (Fréquence Division Duplexing) : L'émission et la réception se font à des fréquences différentes.
- b) TDD : L'émission et la réception se transigent à une même fréquence, mais à des instants différents.

II-6 Les bandes de fréquences en LTE

Depuis l'arrivée de la 4G LTE, le choix d'un téléphone est devenu plus important. Pour avoir une bonne connexion et des vitesses rapides, il est essentiel de choisir un téléphone qui fonctionne bien avec l'opérateur que vous utilisez [29]. En France, les opérateurs ont des licences pour différentes bandes de fréquence telles que :

- **La bande 1 (2100MHz):** Utilisée en Asie et en Europe.
- **La bande 2 (1900MHz):** Utilisée en Amérique du Nord.
- **La bande 3 (1800MHz):** L'une des bandes les plus utilisées dans le monde entier.
- **La bande 5: (850 MHz):** Utilisée en Amérique, Asie et Australie.
- **La bande 7 (2600MHz):** Commune en Europe et en Asie.
- **La bande 20 (800MHz):** Utilisée en Europe.
- **La bande 28 (700MHz) :** Utilisée en Afrique.

II-7 Conclusion

La technologie LTE, ou Long Term Evolution, occupe une place centrale dans le paysage des télécommunications actuel. En constante évolution depuis son introduction, le LTE a su s'imposer comme une norme mondiale de communication, offrant des débits de téléchargement élevés et une connectivité fiable.

Dans le prochain chapitre, nous allons concevoir une antenne imprimée sous le logiciel CST MWS capable de fonctionner sur différentes bandes de fréquences, et cela pour augmenter les capacités du réseau LTE.

Chapitre 3 :
Simulation et
Résultats

III-1 Introduction

Dans ce chapitre, nous avons pour objectif de concevoir et simuler une antenne imprimée pour la technologie LTE 4G, en utilisant le logiciel CST Microwave.

Nous nous sommes concentrés sur la conception d'une antenne fonctionnant dans les différentes bandes de fréquences du LTE. Nous avons présenté les résultats des simulations de notre antenne proposée, en termes de coefficient de réflexion, le Diagramme de rayonnement en Gain et Directivité, et le taux d'onde stationnaire (VSWR).

III-2 Choix de l'outil de simulation

Le logiciel CST Microwave Studio est un outil informatique créé par la compagnie CST (Computer Simulation Technology) pour simuler des composants de haute fréquence en 3D en utilisant une combinaison de la méthode PBA (Perfect Boundary Approximation) et de la technique FIT (Finite Integration Technique) pour approximer les conditions aux limites.

III-3 Le cahier de charge

Dans ce Travail, nous avons choisi une antenne patch rectangulaire. Afin de formaliser notre conception, nous avons travaillé sur le cahier de charge suivant :

Composant	Type	Permittivité (ϵ_r)	Hauteur (mm)
Substrat	FR-04	4.3	1.6
Plan de masse	Copper		0.035
Patch	Copper		0.035

Tableau III-1 : Le cahier de charge.

III-4 Calcul des dimensions de l'antenne

Le tableau suivant représente les équations utilisées pour le calcul de notre antenne rectangulaire à une fréquence de 2.6 GHz.

	Paramètre de l'antenne	Equations
Patch	La largeur	$Wp = \frac{c}{2fr} \sqrt{\frac{2}{\epsilon r + 1}}$
	Constante diélectrique (ϵ_{eff})	$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon r + 1}{2} + \frac{\epsilon r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{-\frac{1}{2}}$
	La longueur	$Lp = \frac{c}{2fr\sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L$
	L'extension de la longueur (ΔL)	$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.8 \right)}$
Substrat et plan de masse	La longueur	$Lgr = Lp + L + (6 \times h)$
	La largeur	$Wgr = Wp + (6 \times h)$
La longueur de la ligne	Simple	$L = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2fr\sqrt{\epsilon_{eff}}}$

Tableau III-2 : Paramètres de l'antenne imprimée Rectangulaire.

Tel que :

C : la vitesse de la lumière = $3 * 10^8$ m/s

ϵ_{eff} : Permittivité effective du substrat

h : l'épaisseur du substrat

fr : Fréquence de résonance.

Les valeurs des paramètres de l'antenne patch initiale sont mentionnées dans le tableau qui est calculées à partir des équations du tableau.

Paramètres	Antenne Patch Initiale
Wp	35.42
Lp	26.62
Wgr/Ws	45.02
Lgr/Ls	52.98
Lf	15.96
Wf	3.11

Tableau III-3 : Résultats des calculs simulé de l'antenne patch initiale.

III-5 Résultats de simulation

La figure III-1 montre la structure de notre antenne patch initiale.

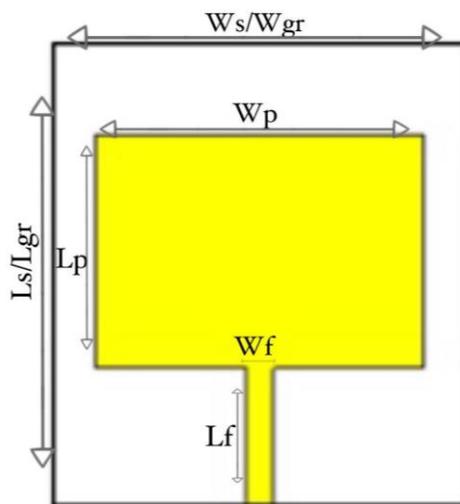


Figure III -1- la représentation de l'Antenne Patch Initiale.

a) Coefficient de réflexion S [1,1]

Le coefficient de réflexion obtenu avec le logiciel CST de l'Antennes Patch initiale.

Nous remarquons que le coefficient de réflexion n'est pas adapté à la fréquence désirée, pour cela nous allons procéder par une technique d'adaptation qui est l'ajout des encoches et des fentes sur le patch.

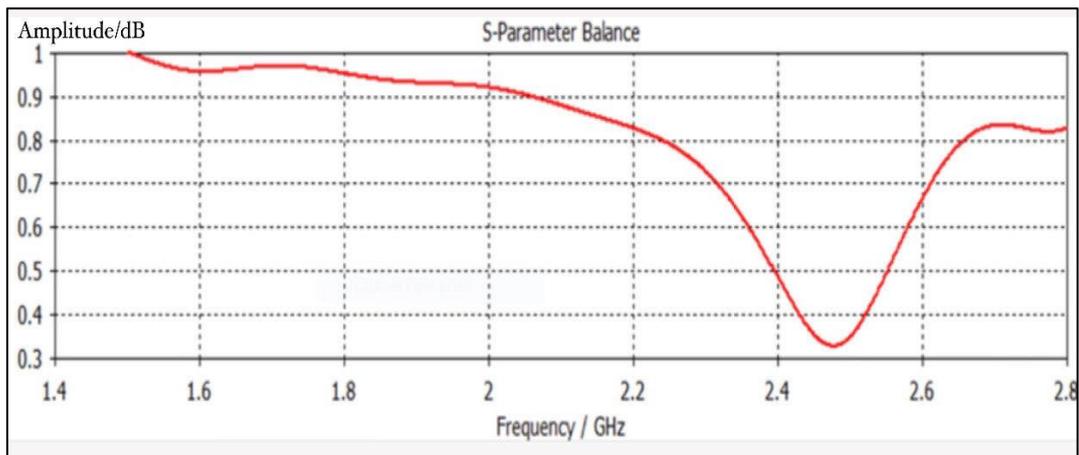


Figure III- 2 - Le coefficient de réflexion de l'Antennes Patch initiale.

III-6 Structure de l'antenne imprimée pour le LTE 2600

La structure de notre antenne est montrée sur la **figure III-3**, Afin d'adapter notre antenne patch rectangulaire proposée, nous avons choisi la technique d'insertion des encoches sur l'élément rayonnant de l'antenne, et l'ajout des fentes sur celui-ci.

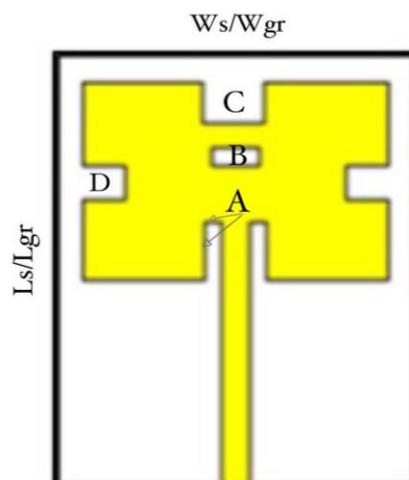


Figure III -3- La représentation de l'Antenne Patch proposée.

III-6-1 Dimensions des Fentes et Encoches sur le patch

/	L (mm)	W (mm)
Encoches (A)	7.22	1.9
Fente Au milieu (B)	2	8
Fente En haut (C)	6	8
Fentes A cotés (D)	4	6

Tableau III-4 : Dimensions des Fentes et Encoches sur le patch proposé.

III-6-2 Résultats de simulation

1. Le Coefficient de réflexion S [1,1]

La **figure III-4** montre que l'antenne patch résonne à la fréquence 2.6GHz avec un coefficient de réflexion $s_{11} = -30.098$ dB. L'antenne patch proposée est adaptée à la norme 4G LTE.

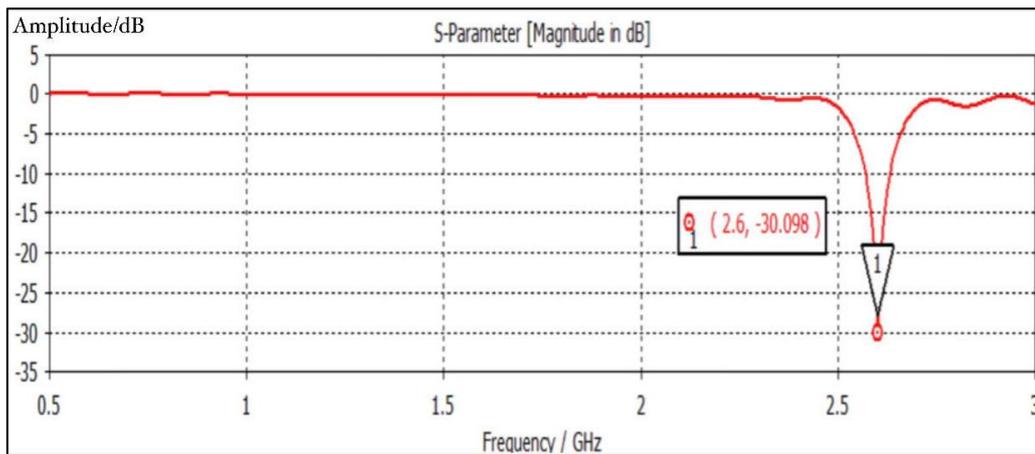


Figure III-4 - Le coefficient de réflexion de l'Antenne proposée.

2. Le Taux d'onde stationnaire (VSWR)

Le VSWR est à la fréquence de 2.6 GHz, qui est **inférieur à 2**, donc nous avons une bonne adaptation de la ligne avec l'antenne patch.

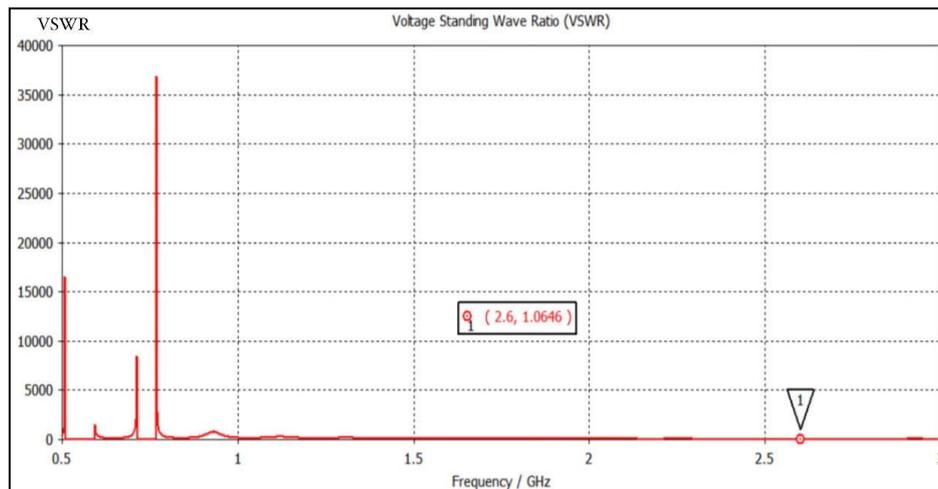


Figure III-5- Le VSWR de l'Antenne Finale.

3. Le gain

Dans les **Figure III-6** et **III-7**, on trace le diagramme de rayonnement du gain en 3D et en coordonnées polaires à la fréquence 2.6 GHz. Nous remarquons que le gain est à une valeur de **1.36 dB** et le diagramme est dirigé suivant **9°**.

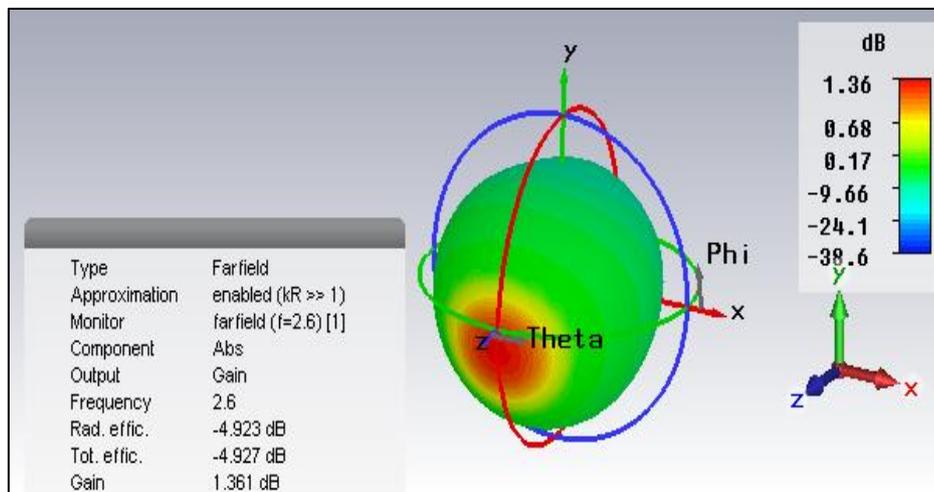


Figure III-6- la représentation 3D du gain de l'Antenne imprimée.

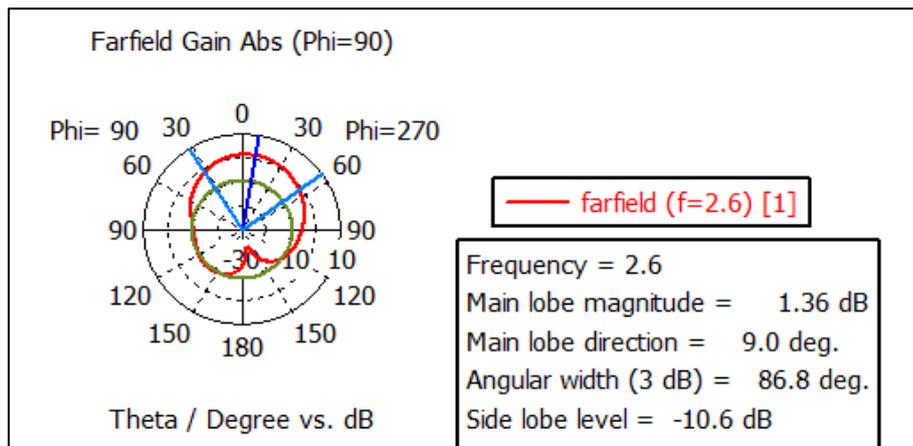


Figure III-7- la représentation polaire du gain de l'Antenne imprimée.

4. La directivité

La **figure III-8-** montre bien la directivité de l'Antenne imprimée en 3D pour la fréquence 2.6GHz à une valeur de **6.28 dB**.

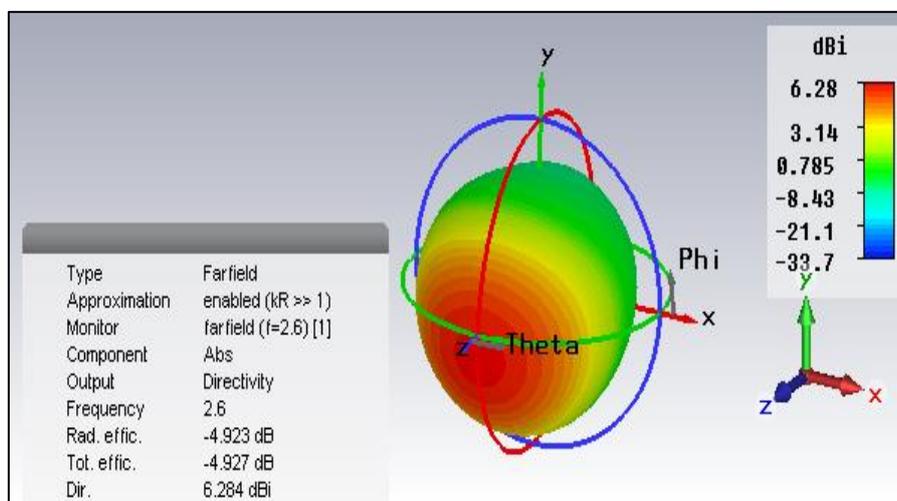


Figure III-8- la représentation 3D de la directivité de l'Antenne imprimée.

III-6-3 Amélioration du gain de l'antenne proposée

Nous avons mis l'accent sur la conception d'une antenne imprimée à patch unique qui résonne à la fréquence de 2.6 GHz pour une application de la quatrième génération. Les attentes de la 4G nécessitent beaucoup plus de gain. Pour répondre à ceci, nous devons augmenter le gain

total de l'antenne. Pour se faire nous passons la mise en réseau de deux antennes, en utilisant l'antenne proposé.

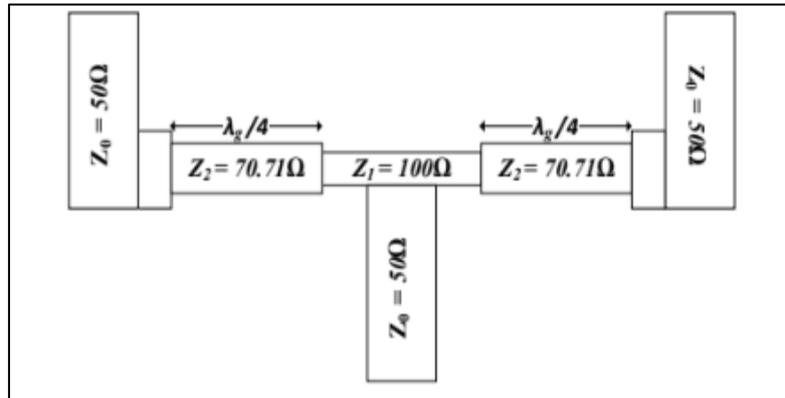


Figure III-9- Configuration de la ligne d'alimentation pour le réseau d'antennes. [30]

Le calcul est fait par les équations suivantes :

$$W_f = \frac{2h}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r + 1}{2\epsilon_r} \left[\ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right] \right\}$$

$$\text{Where } B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}}$$

III-7 Structure du réseau d'antenne de 2 éléments

Dans le cadre de ce travail, un réseau d'antenne patch rectangulaire de 2 éléments avec substrat FR4 a été conçu et simulée à une fréquence de 2.6 GHz sous le CST Microwave studio.

Le FR4 utilisé pour concevoir le réseau d'antennes ayant une constante de diélectrique (ϵ_r) égale à 4,3 et d'une épaisseur $h = 1.6$ mm, comme montré dans la figure III-10, Les éléments de patch micro ruban sont disposés avec un espacement de $\lambda/2$ pour concevoir un réseau d'antennes de 2 éléments.

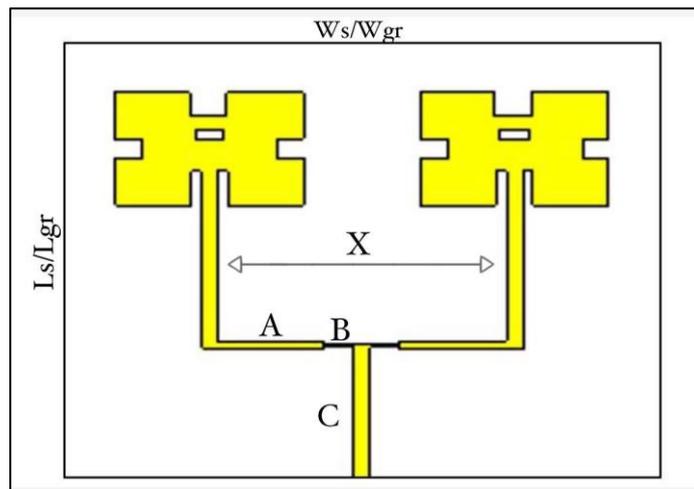


Figure III-10- Structure du réseau d'antenne de 2 éléments.

Le **tableau III-5** montre les valeurs des principaux paramètres suivis dans la conception de notre réseau antennaire proposé.

Paramètres	Ls/Lgr (Longueur du substrat et du plan de masse)	Ws/Wgr (Largueur du substrat et du plan de masse)	L'espace X entre les 2 éléments (2 patch)
Valeur (mm)	65 mm	57.5 mm	54.39 mm

Tableau III-5 : paramètres du réseau d'antennes patch.

Lignes	W	L
A	20	1.65
B	14.39	0.73
C	29.24	3.11

Tableau III-6: dimensions de la ligne d'alimentation pour le réseau d'antenne.

1. Le Coefficient de réflexion S11

On peut visualiser que le réseau d'antenne proposé résonne autour de la fréquence 2.6Ghz avec un **S11=-44.512 dB**. On remarque une bonne adaptation.

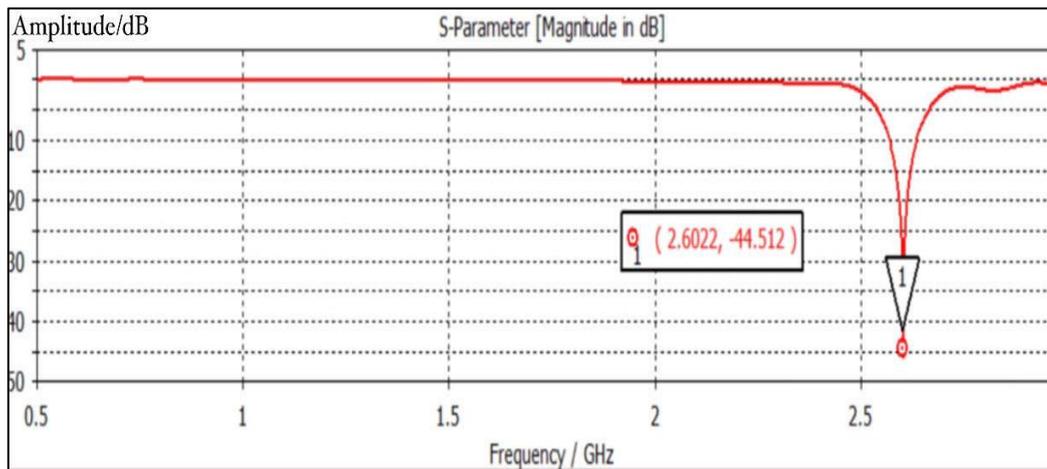


Figure III- 11- Coefficient de réflexion S11 de réseau d'antenne.

2. Le gain

Les figures III-12- et III-13- montrent le diagramme de rayonnement du réseau d'antennes patch. Nous remarquons bien que le gain est augmenté à une valeur de **3.22 dB** et le diagramme est dirigé suivant **33°**.

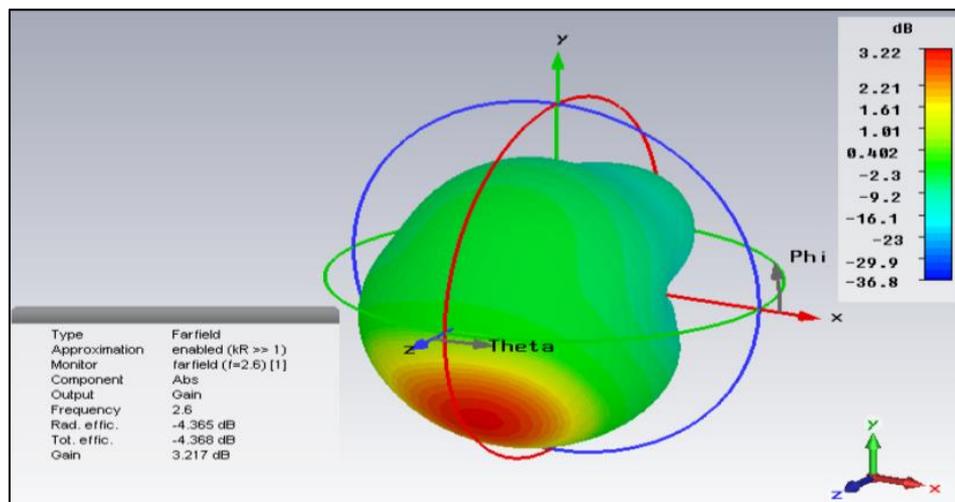


Figure III-12- Diagramme de rayonnement du réseau d'antenne en 3D.

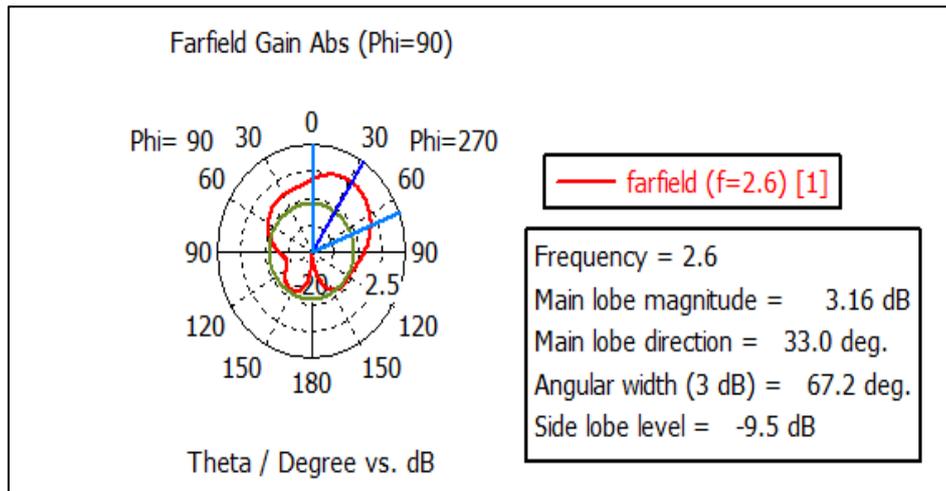


Figure III-13- Diagramme de rayonnement polaire de réseau d'antenne.

3. La Directivité

La figure III-14- montre bien la directivité du réseau d'antenne en 3D pour la fréquence 2.6GHz à une valeur de **7.58 dB**.

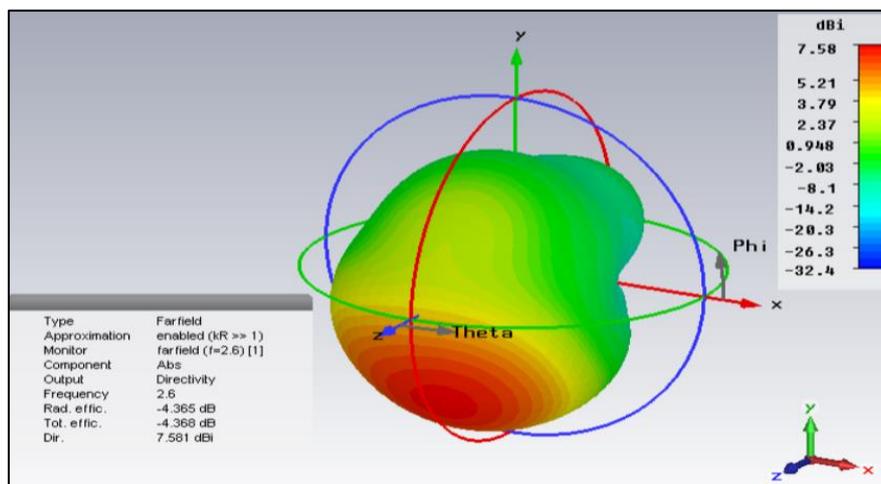


Figure III-14- Directivité du réseau d'antenne en 3D.

III-8 Conception d'une antenne patch rectangulaire pour le LTE2600, et le LTE 700-900

Nous allons concevoir une antenne imprimée capable de travailler sur 2 bandes de fréquences sans changer à chaque fois les dimensions, pour cela nous avons insérer une diode PIN sur la nouvelle structure proposée comme montré sur la figure III-15.

III-8-1 Antenne proposée à double bande

Nous avons ajouté un stub de forme de T sur la face supérieure du patch, afin de basculer la résonance vers les fréquences inférieures, et après nous avons connecté ces deux éléments par une diode PIN de type BAR50-2V.

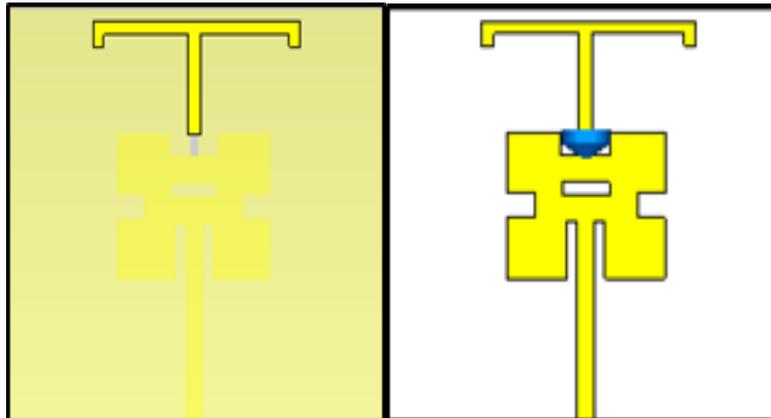


Figure III-15-Structure de l'antenne à double bandes avec l'insertion de la diode pin et stub sur le patch.

III-8-2 Résultats de simulation de l'ajout du stub

a. Le Coefficient de réflexion S11

On peut remarquer que l'antenne avec l'ajout du stub a un $S_{11} = -25.948$ dB.

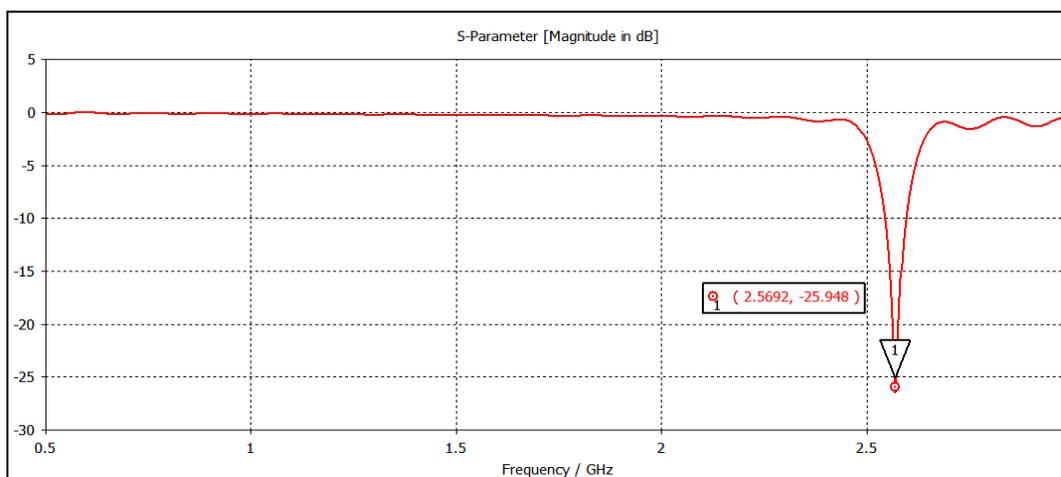


Figure III- 16 -Coefficient de réflexion S11 d'antenne avec l'ajout du stub.

b. Le Gain

Les figures III-17- et III-18- montrent le diagramme de rayonnement en Gain en 3D et en coordonnées polaires. Nous remarquons que le gain a une valeur de **1.11dB** et le diagramme est dirigé suivant **12°**.

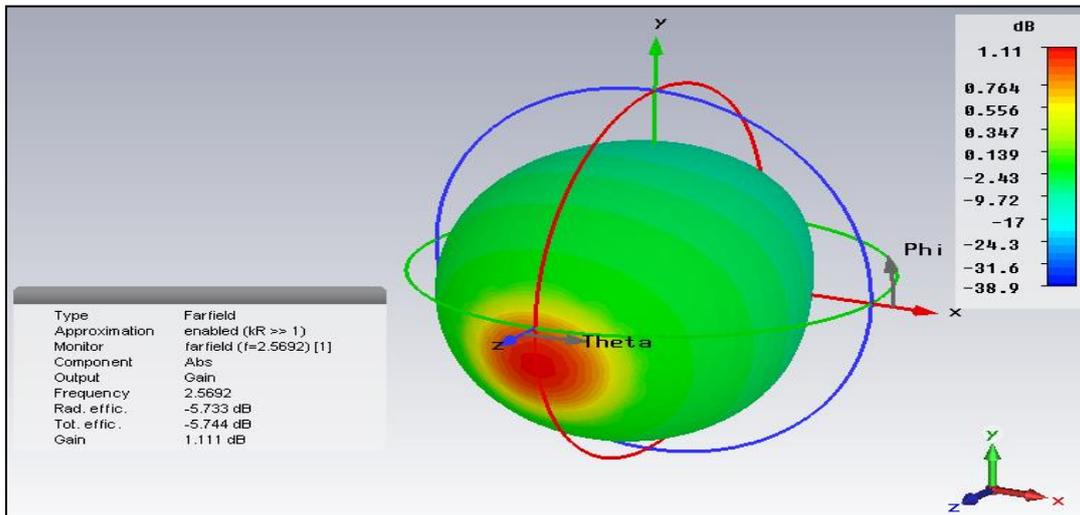


Figure III-17- Diagramme de rayonnement d'antenne avec l'ajout du stub en 3D.

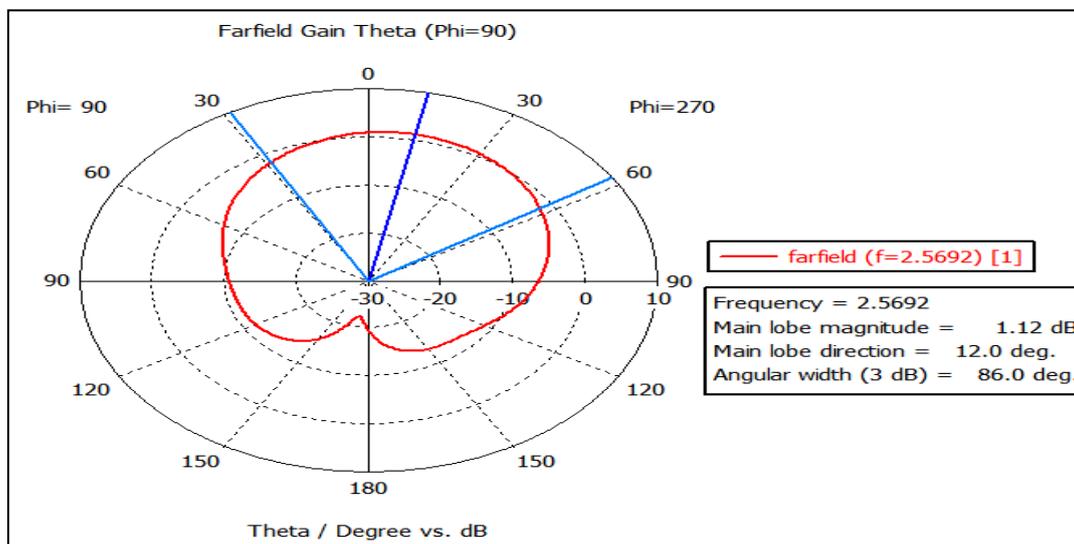


Figure III-18- Diagramme de rayonnement polaire d'antenne avec l'ajout du stub.

III-8-3 Circuit équivalent pour les modes (on/off) de la diode pin

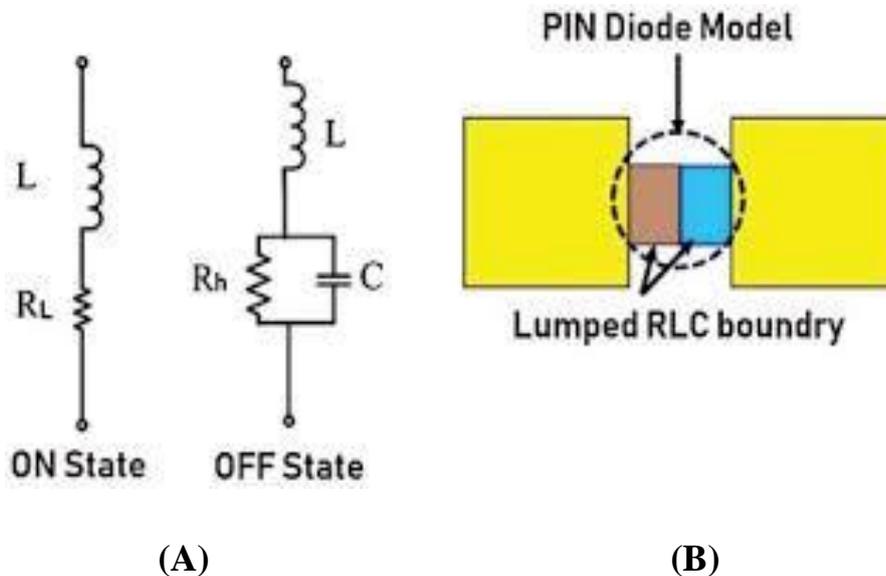


Figure III-19- La configuration des diodes pin RF : (A) Modèles de circuits équivalents pour les états ON et OFF du commutateur. (B) CST model. [31]

➤ Les valeurs de la diode pin

Valeurs d'éléments	Etat on	Etat off
R	3 Ω	5 kΩ
L	0.45 nH	0.45 nH
C	/	0.15pf

Tableau III-7 : Les valeurs de la diode pin.

III-8-4 Résultats de simulation

➤ Pour la diode OFF

1. Le Coefficient de réflexion S11

On peut remarquer que l'antenne à double bandes à l'état OFF résonne autour de la fréquence **2.53GHZ** avec un **S11 de -28.913dB** et **S11 = -4.2654dB** autour de la fréquence **0.84 GHZ**, comme montrée sur la **figure III.17**

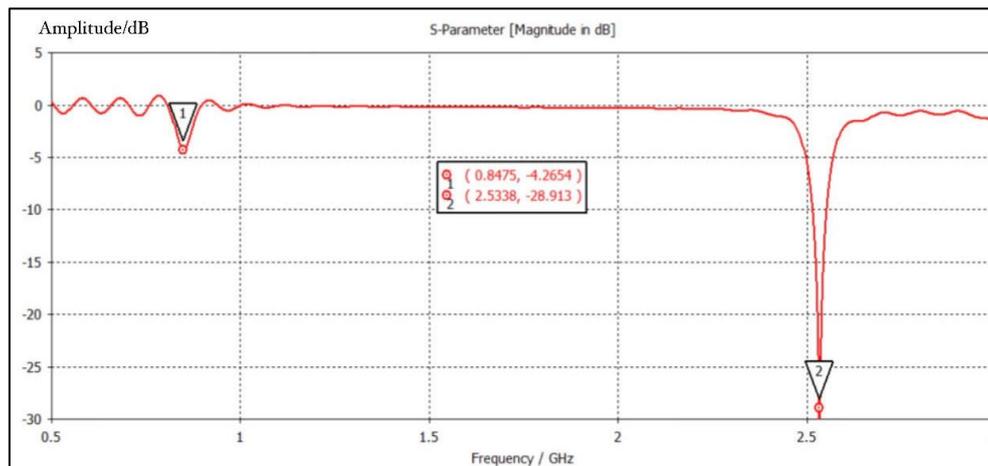


Figure III- 20 -Coefficient de réflexion S11 d'antenne à double bandes (diode OFF).

2. Le Gain pour la fréquence 2.53 GHz

Les figures III-18- et III-19- montrent le diagramme de rayonnement d'antenne patch à double bandes proposé en 3D et en coordonnées polaires pour la fréquence 2.53 GHz à l'état OFF. Nous remarquons que le gain est à une valeur de **1.47 dB** et le diagramme est dirigé suivant **14°**.

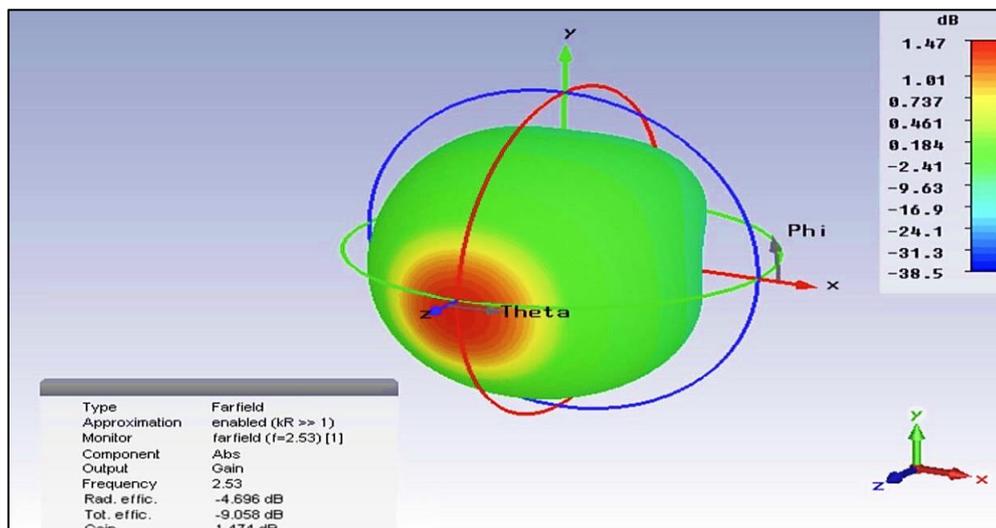


Figure III-21- Diagramme de rayonnement d'antenne à double bandes (diode OFF) en 3D pour la fréquence 2.53 GHz.

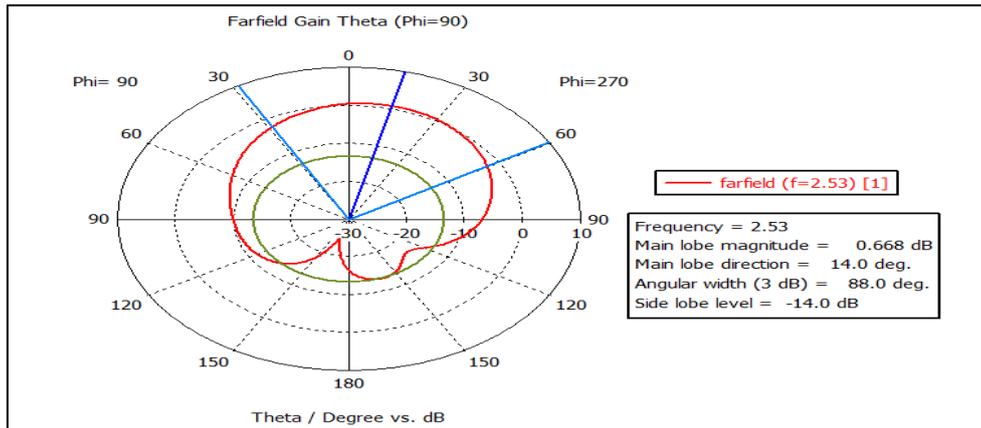


Figure III-22- Diagramme de rayonnement polaire d'antenne à double bandes (diode OFF) pour la fréquence 2.53 GHz.

3. La Directivité pour la fréquence 2.53 GHz

La **figure III-20-** montre bien la directivité d'antenne patch à double bandes à l'état OFF proposé en 3D pour la fréquence 2.53 GHz à une valeur de **6.63 dBi**.

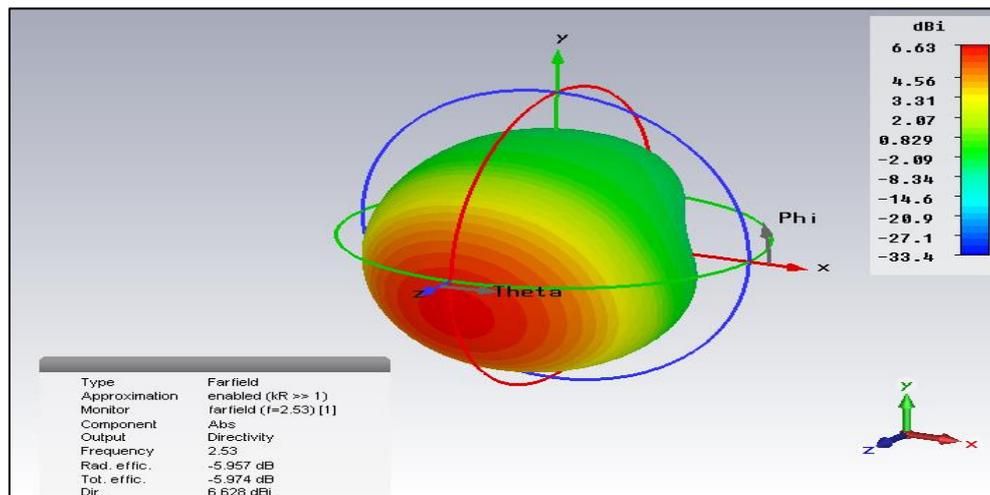


Figure III-23- Directivité d'antenne à double bandes (diode OFF) en 3D pour la fréquence 2.53 GHz.

➤ Pour la diode ON

1. Le Coefficient de réflexion S11

Lorsque la diode est à l'état ON, nous obtenons deux résonances de fréquences, une à **2.53 GHz** avec un **S11=-26,13 dB**, et l'autre à **0.84 GHz** avec un **S11=-21,56 dB**.

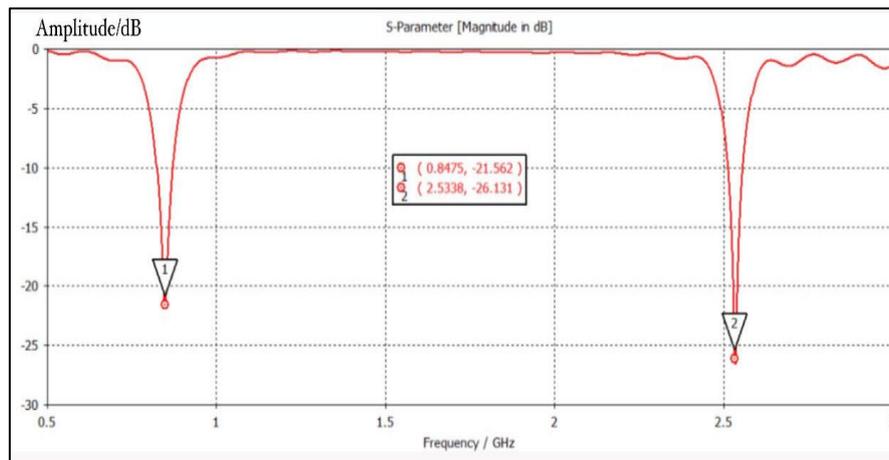


Figure III- 24 -Coefficient de réflexion S11 d'antenne à double bandes (diode ON).

2. Le Gain pour la fréquence 2.53 GHz

Les figures III-22- et III-23- montrent le diagramme de rayonnement en Gain en 3D et en coordonnées polaires pour la fréquence 2.53 GHz à l'état ON. Nous remarquons que le gain a une valeur de **1.78 dB** et le diagramme est dirigé suivant **14°**.

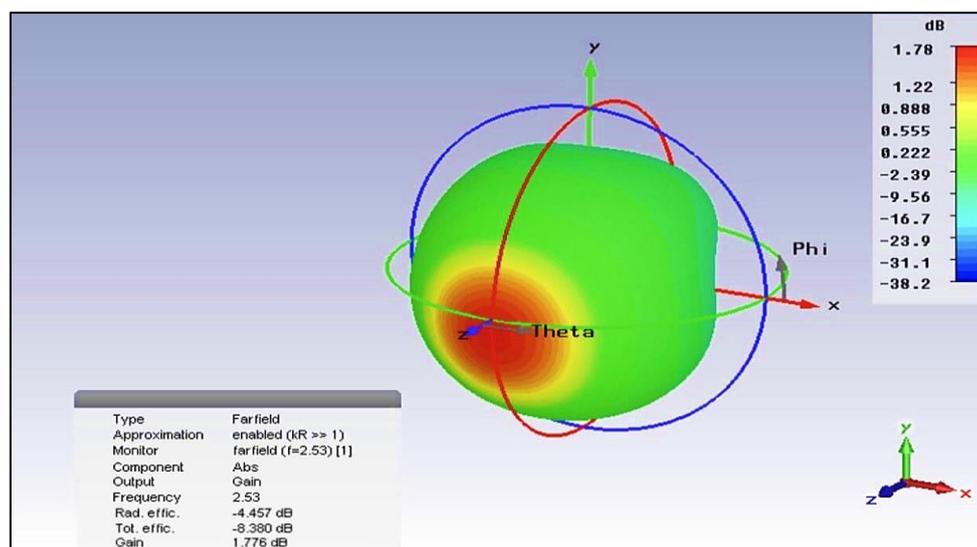


Figure III-25 -Diagramme de rayonnement d'antenne à double bandes (diode ON) en 3D pour la fréquence 2.53 GHz.

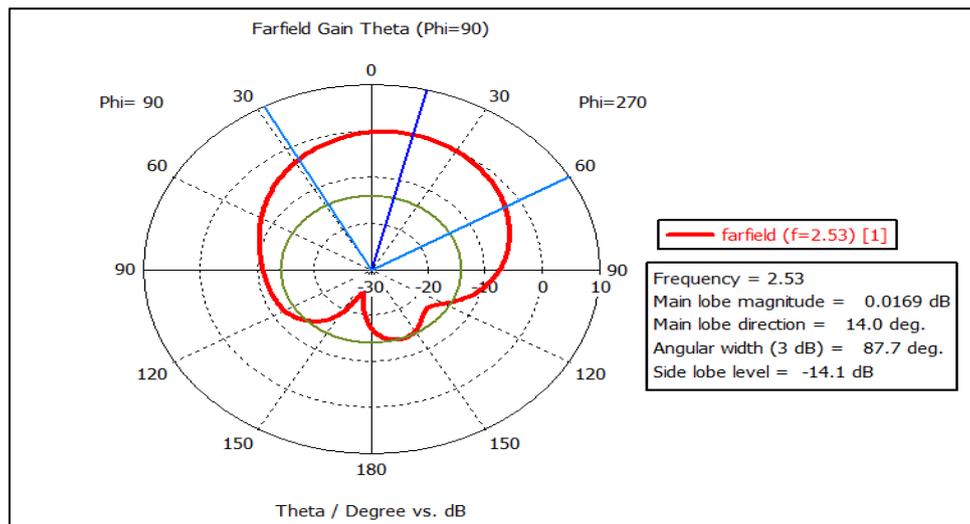


Figure III-26 -Diagramme de rayonnement polaire d'antenne à double bandes (diode ON) pour la fréquence 2.53GHz.

3. La Directivité pour la fréquence 2.53 GHz

La figure III-24- montre bien la directivité pour la fréquence 2.53 GHz qui est de 6.64 dBi.

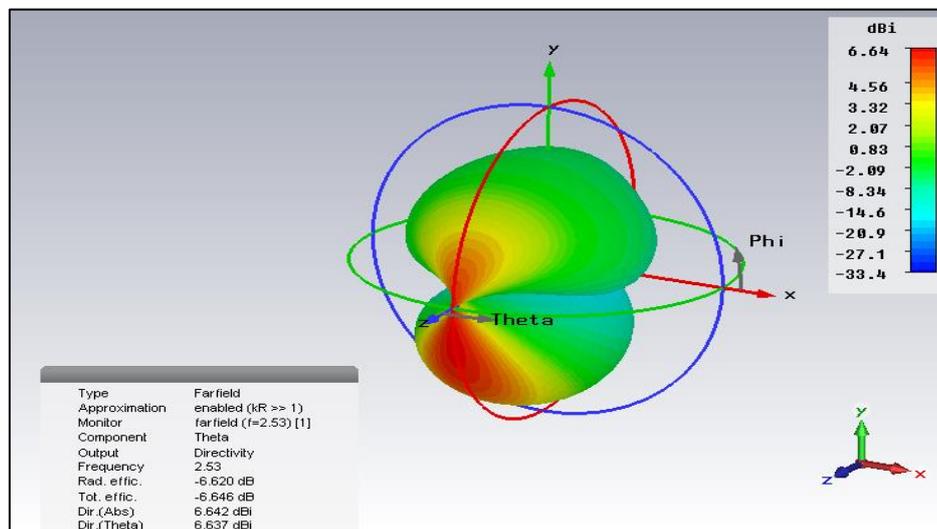


Figure III-27- Directivité d'antenne à double bandes (diode ON) en 3D pour la fréquence 2.53 GHz.

4. Le Gain à la fréquence 0.84 GHz

La figures III-25- montre que le gain de cette antenne proposée à l'état ON est négatif, avec une valeur de -22,4 dB.

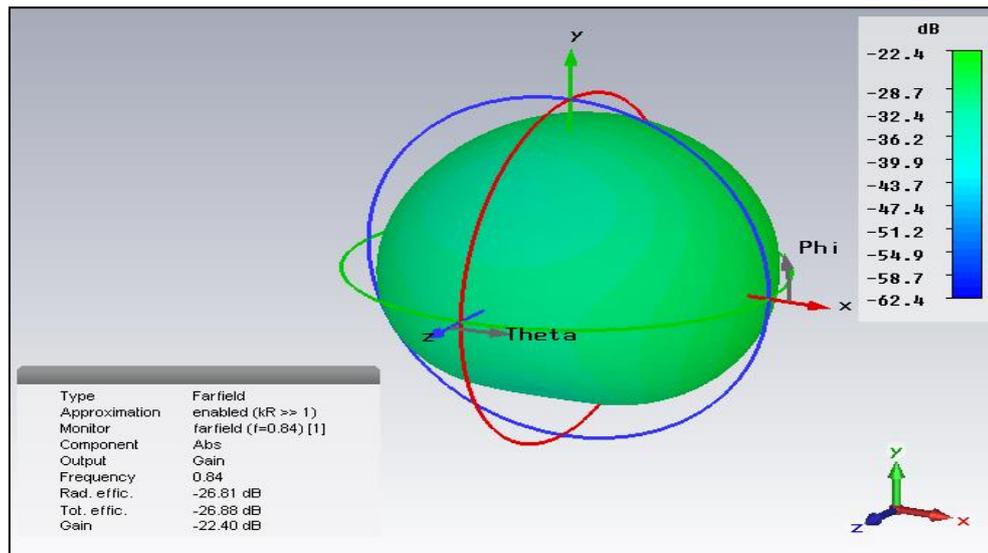


Figure III-28- Diagramme de rayonnement du gain (diode ON) en 3D pour la fréquence 0.84 GHz.

Donc nous allons chercher à augmenter le gain de cette dernière en insérant des fentes sur le plan de masse, cette méthode est utilisée en littérature dont le but d'augmenter le gain de l'antenne.

III-8-5 Augmentation du gain en ajoutant des fentes sur le plan de masse

Nous allons insérer des fentes sur le plan de masse dont le but d'augmenter le gain de l'antenne.

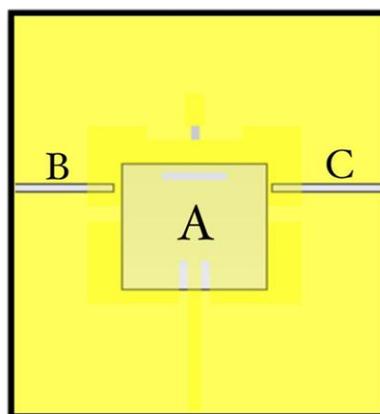


Figure III-29- Structure du plan de masse de l'antenne avec l'insertion des fentes.

/	L (mm)	W (mm)
Plan de masse /Substrat	108	90
Fente (A)	32	34
Fente (B/C)	2	26

Tableau III-8 : Dimensions des fentes sur le plan de masse.

III-8-6 Résultats avec fentes sur PM

➤ Pour diode OFF

1. Le Coefficient de réflexion S11

On peut remarquer que l'antenne résonne sur 3 bandes de fréquences à l'état OFF, la 1ère est autour de la fréquence **2.6 GHz** avec un **S11=-17.83dB**, la 2ème est autour de **1.8GHz** avec un **S11=-13,72dB**, et la dernière autour de la fréquence **0.9 GHz** avec un **S11= -13,25dB**.

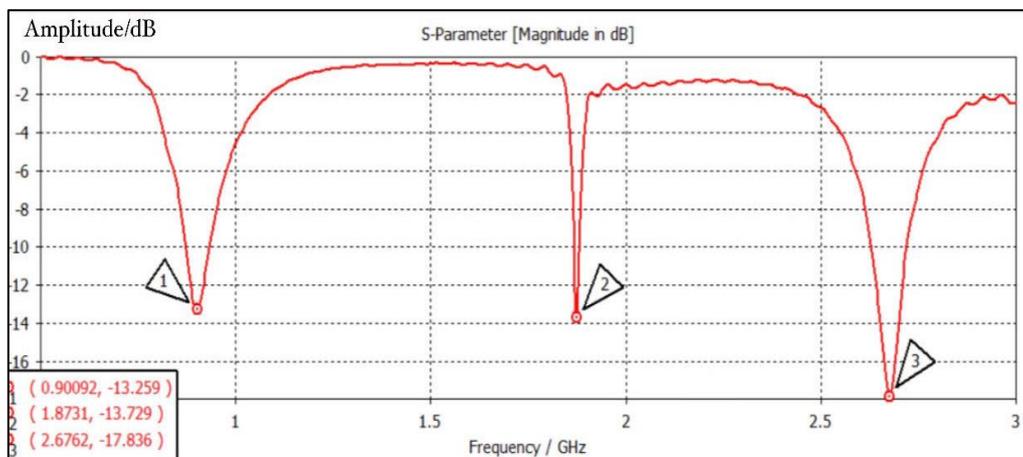


Figure III- 30- Coefficient de réflexion S11 de l'antenne proposée (diode OFF) avec fentes sur PM.

2. Le Gain à 2.6 GHz avec fentes sur PM

La figure III-28- montre diagramme de rayonnement en gain en 3D et en coordonnées polaires pour la fréquence 2.6 GHz à l'état OFF. Nous remarquons que le gain est à une valeur de **4.45 dB** et le diagramme est dirigé suivant **1°**.

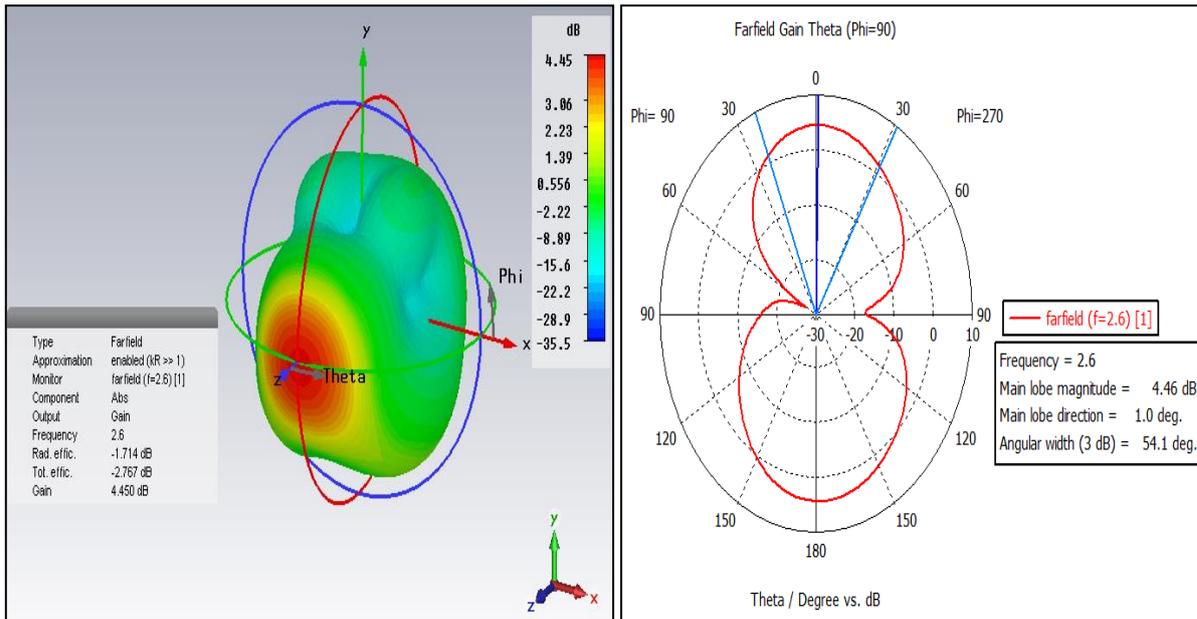


Figure III-31- Le gain (diode OFF) avec fentes sur PM en 3D et en coordonnées polaires pour la fréquence 2.6 GHz.

3. La Directivité pour la fréquence 2.6 GHz avec fentes sur PM

La figure III-29- montre bien la directivité d'antenne patch à l'état OFF en 3D pour la fréquence 2.6 GHz qui est de **6.16 dBi**.

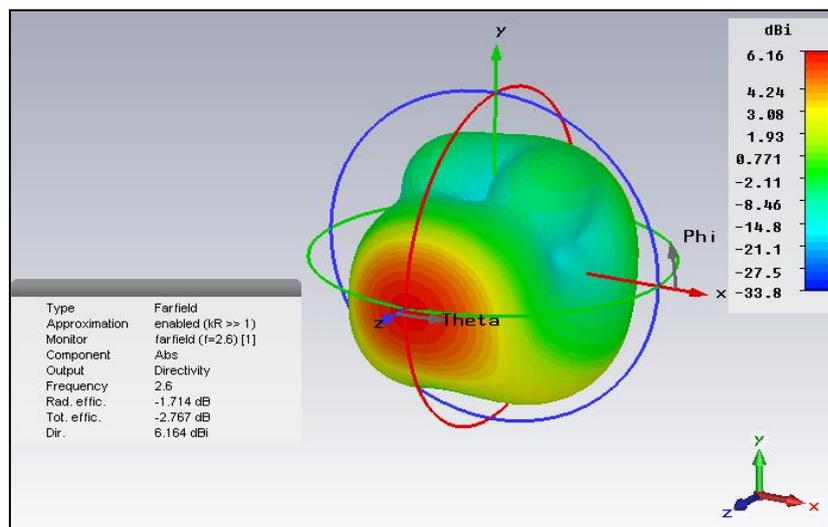


Figure III-32- Directivité e l'antenne (diode OFF) avec fentes sur PM en 3D pour la fréquence 2.6 GHz.

4. Le Gain à la fréquence 1.8 GHz avec fentes sur PM

La figure III-30- montre diagramme de rayonnement d'antenne patch en gain en 3D et en coordonnées polaires pour la fréquence 1.8 GHz à l'état OFF. Nous remarquons que le gain a une valeur de **1.34 dB** et le diagramme est dirigé suivant **22°**.

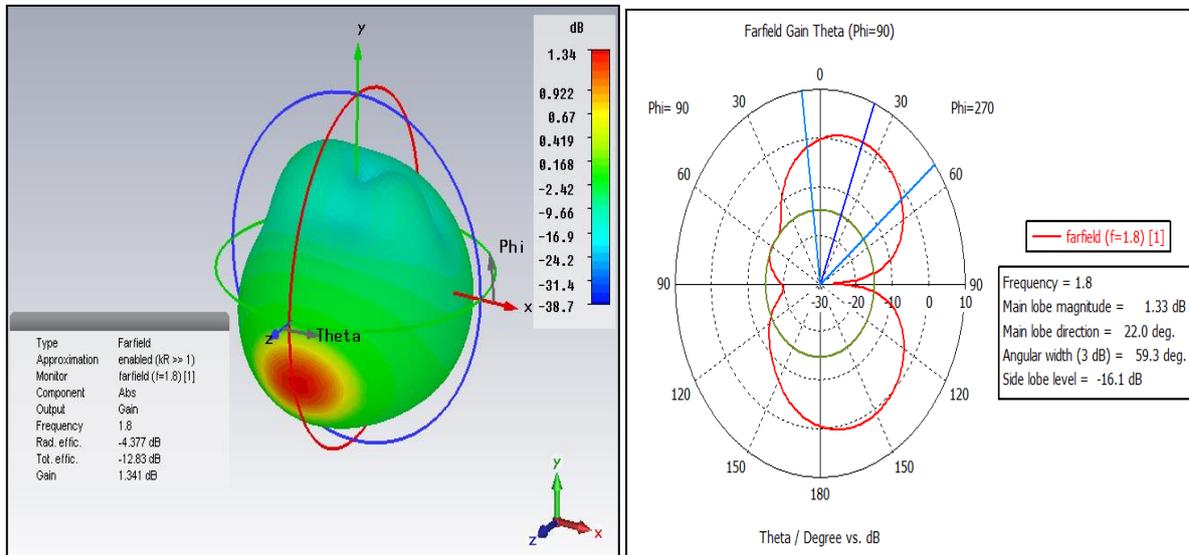


Figure III-33- Le Gain (diode OFF) avec fentes sur PM en 3D et en coordonnées polaires pour la fréquence 1.8 GHz.

5. La Directivité à la fréquence 1.8 GHz avec fentes sur PM

La figure III-31- montre bien la directivité d'antenne patch à l'état OFF proposé en 3D pour la fréquence 1.8 GHz à une valeur de **5.72dBi**.

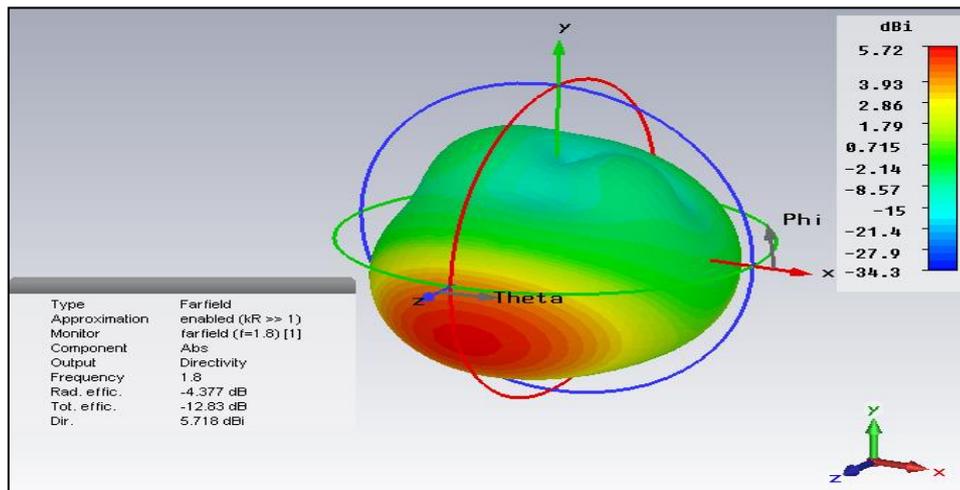


Figure III-34- Directivité de l'antenne (diode OFF) avec fentes sur PM en 3D pour la fréquence 1.8 GHz.

6. Le Gain à la fréquence 0.8 GHz avec fentes sur PM

La **figure III-32-** montre diagramme de rayonnement d'antenne patch en gain en 3D et en coordonnées polaires pour la fréquence 0.8 GHz à l'état OFF. Nous remarquons que le gain a une valeur de **2.63dB** et le diagramme est dirigé suivant **1°**.

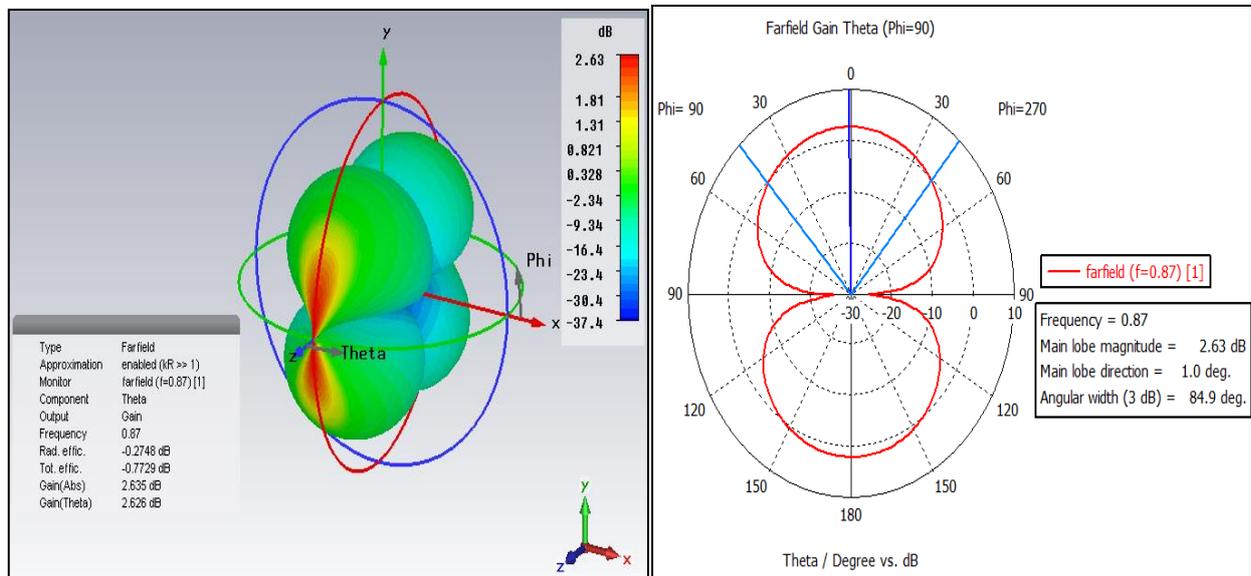


Figure III-35- Le Gain d'antenne (diode OFF) avec fentes sur PM en 3D et en coordonnées polaires pour la fréquence 0.8 GHz.

7. La Directivité pour la fréquence 0.8 GHz avec fentes sur PM

La **figure III-33-** montre bien la directivité d'antenne patch à l'état OFF proposé en 3D pour la fréquence 0.8 GHz qui a une valeur de **2.91dB**.

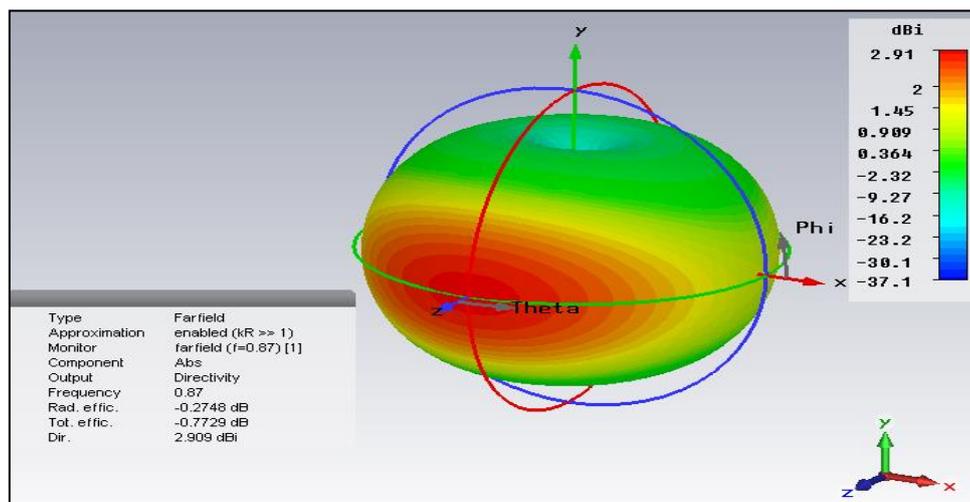


Figure III-36- Directivité d'antenne (diode OFF) avec fentes sur PM en 3D pour la fréquence 0.8 GHz.

➤ **Pour diode ON**

1. Le Coefficient de réflexion S11

On peut remarquer que lorsque la diode est à l'état ON, l'antenne résonne autour de la fréquence **2.6 GHz** avec un **S11= -21.99dB** et la fréquence **0.9 GHz** avec un **S11= -13.918 dB**.

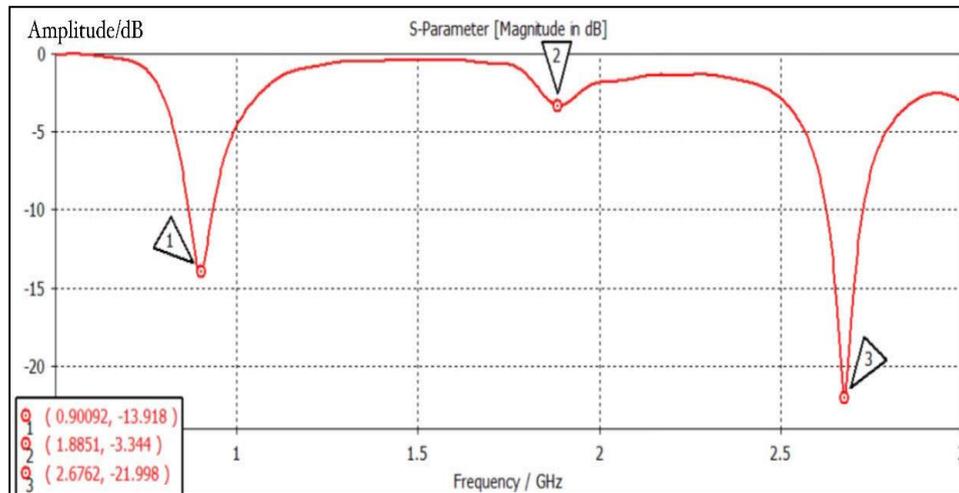


Figure III- 37 - Coefficient de réflexion S11 d'antenne (diode ON) avec fentes sur PM.

2. Le Gain à 2.6 GHz avec fentes sur PM

Le gain obtenu de cette antenne est de **4.03dB** qui est meilleur par rapport à la structure précédente et le diagramme est dirigé suivant **2°**.

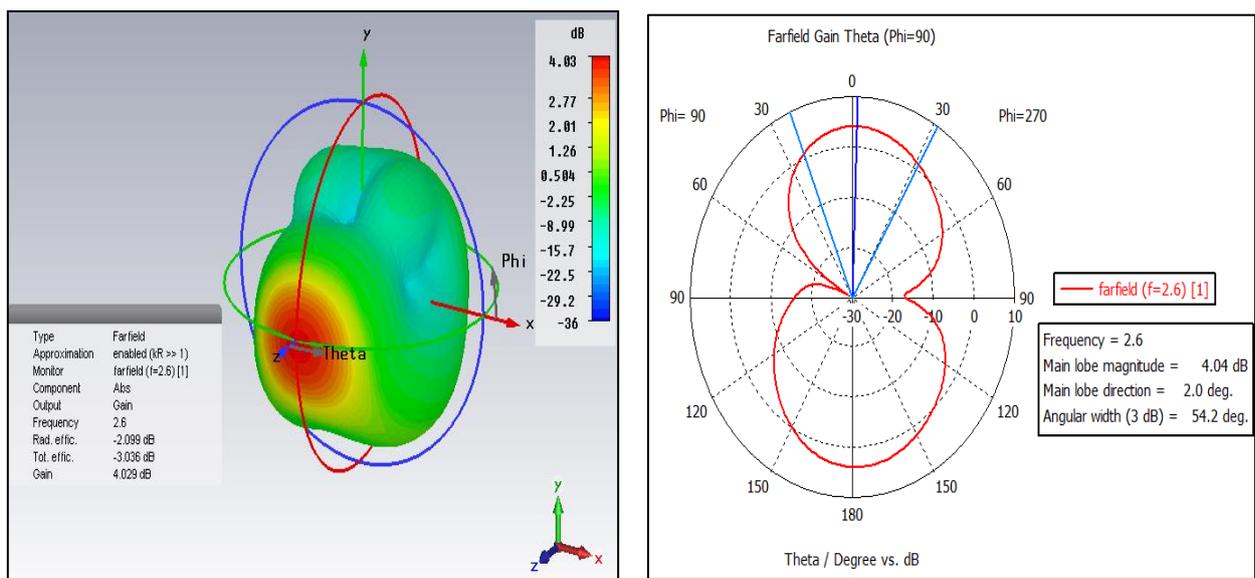


Figure III-38- Diagramme de rayonnement du gain (diode ON) avec fentes sur PM en 3D et en coordonnées polaires pour la fréquence 2.6 GHz.

3. La Directivité à 2.6 GHz avec fentes sur PM

La **figure III-36-** montre bien la directivité d'antenne patch à l'état ON proposé en 3D pour la fréquence 2.6 GHz qui vaut **6.13 dB**.

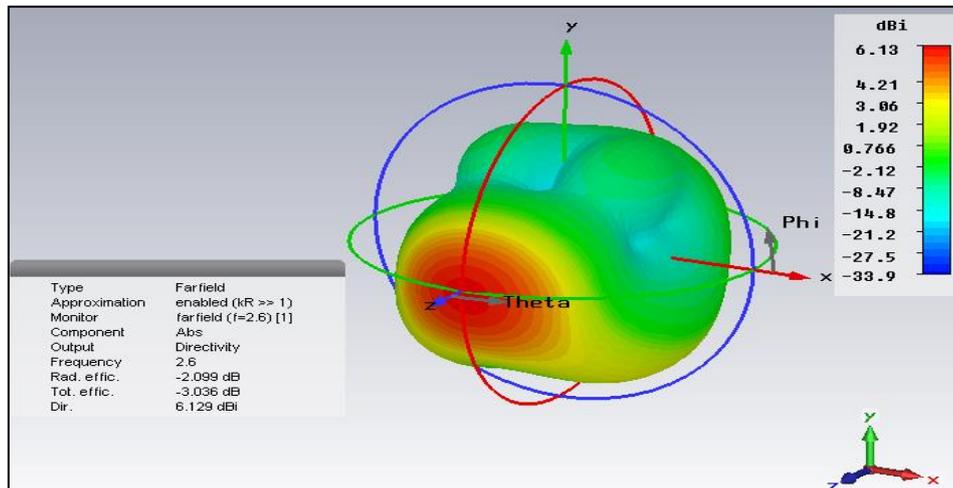


Figure III-39- Directivité de l'antenne à l'état ON avec fentes sur PM en 3D pour la fréquence 2.6 GHz.

4. Le Gain à la fréquence 0.8 GHz avec fentes sur PM

La **figure III-37-** montre diagramme de rayonnement d'antenne patch proposé en 3D et en coordonnées polaires pour la fréquence 0.8 GHz à l'état ON. Nous remarquons que le gain a une valeur de **2.29 dB** et le diagramme est dirigé suivant **1°**.

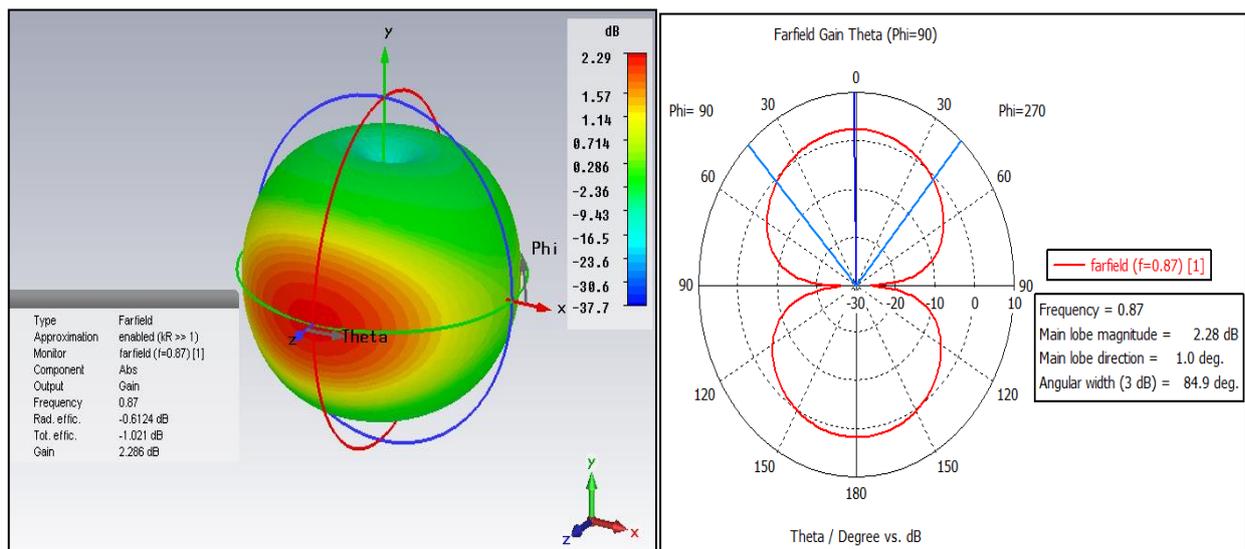


Figure III-40-Le Gain de l'antenne (diode ON) avec fentes sur PM en 3D et en coordonnées polaires pour la fréquence 0.8 GHz.

5. Le Gain à la fréquence 0.9 GHz avec fentes sur PM

La **figure III-38-** montre diagramme de rayonnement d'antenne patch proposé en 3D et en coordonnées polaires pour la fréquence 0.9 GHz à l'état ON. Nous remarquons que le gain a une valeur de **2.44 dB** et le diagramme est dirigé suivant **1°**.

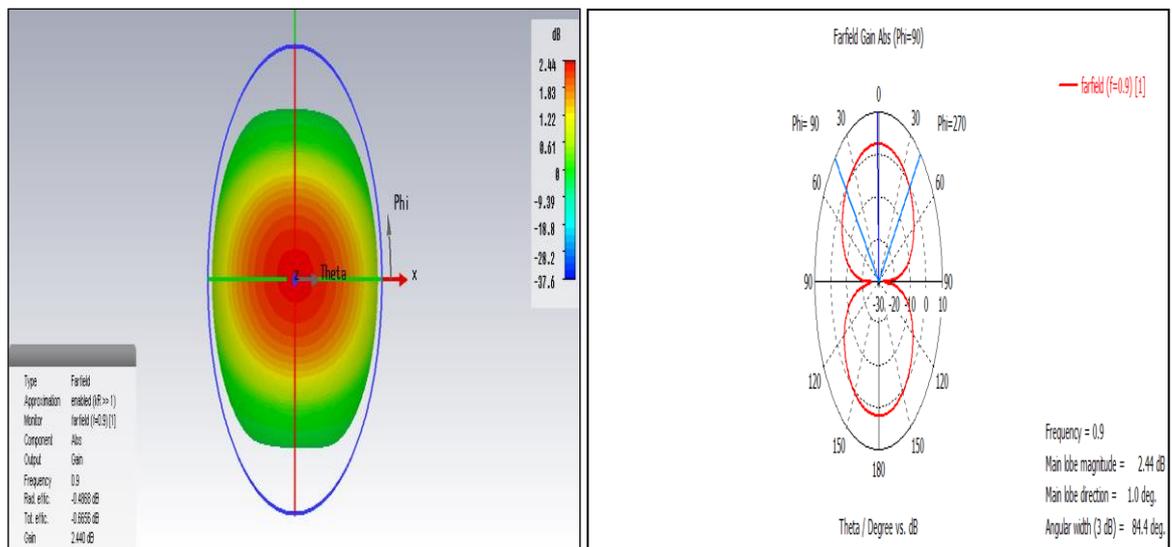


Figure III-41- Le Gain de l'antenne (diode ON) avec fentes sur PM en 3D et en coordonnées polaires pour la fréquence 0.9 GHz.

6. La Directivité pour la fréquence 0.8 GHz avec fentes sur PM

La **figure III-39-** montre bien la directivité d'antenne patch à l'état ON proposé en 3D pour la fréquence 0.8 GHz qui est de **2.9 dBi**.

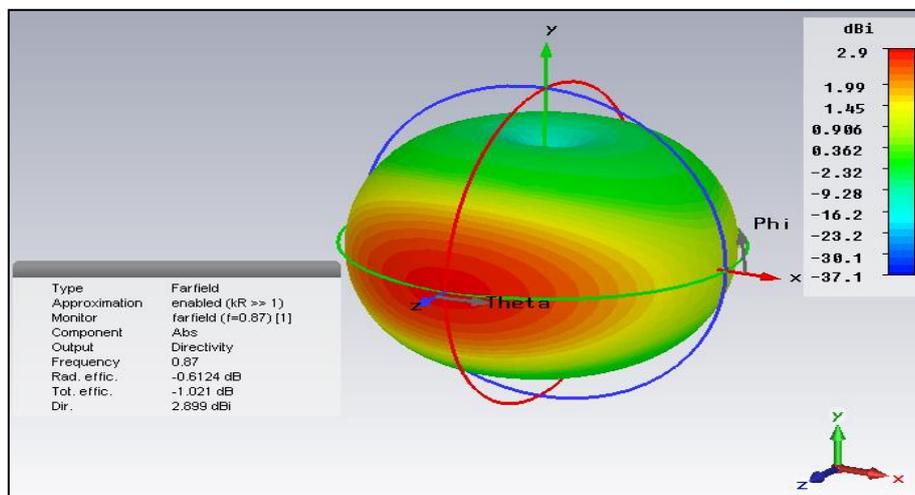


Figure III-42- Directivité de l'antenne (diode ON) avec fentes sur PM en 3D pour la fréquence 0.8 GHz.

Conclusion

Ce chapitre présente en première partie, une conception d'une antenne imprimée fonctionnant à la fréquence de **2.6 GHz** destinée pour la 4G LTE, en utilisant le logiciel CST Microwave Studio, le gain de celle-ci a été amélioré par l'utilisation d'un réseau d'antennes de deux éléments.

La deuxième partie, et elle est le principal but de notre travail, est destinée à la conception d'une antenne imprimée opérante à plusieurs bandes de fréquences de la technologie LTE, à savoir la bande **LTE2600**, la bande **LTE 1800**, et la bande **LTE 700-900**, la structure finale est obtenue en ajoutant un stub sur l'élément rayonnant, une diode PIN pour obtenir les différentes agilités (reconfigurations) des fréquences, ainsi que des fentes sur le plan de masse pour améliorer le gain de notre antenne.

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail était de concevoir et simuler une antenne patch spécifique pour la 4G opérante à plusieurs fréquences.

Dans le premier chapitre, nous avons décrit les antennes imprimées, en commençant par de brèves définitions et caractéristiques de ces derniers, puis en abordant les techniques d'alimentations et les applications des antennes imprimées. Nous avons conclu ce chapitre en présentant les antennes agiles, les techniques d'agilités de ces derniers ainsi que leurs classifications.

Dans le deuxième chapitre, nous avons introduit brièvement la technologie LTE (Long Term Evolution) de la quatrième génération (4G), en définissant son principe de fonctionnement, ses principales caractéristiques, ainsi que des bandes de fréquences utilisées par celle-ci.

Dans le dernier chapitre, nous avons simulé une antenne patch rectangulaire pour le LTE 2600, Le LTE 1800 et le LTE 700-900 en utilisant une diode PIN sur le patch ainsi des fentes sur le plan de masse afin d'augmenter les performances de notre antenne, à savoir le gain qui était négatif pour les fréquences inférieurs.

Nos résultats de simulation ont démontré que les performances de notre antenne répondent aux exigences en termes de coefficient de réflexion, adaptation, gain et diagramme de rayonnement, reste en perspective la comparaison avec des résultats de mesures.

Dans les futurs travaux en envisageant :

- la réalisation des antennes 4G agiles pour LTE nécessitent une approche holistique qui combine innovation technologique, adaptation aux besoins du marché et respect des normes de performance et de sécurité.

- Ajuster dynamiquement leur faisceau pour optimiser la couverture et la capacité, en particulier dans les zones urbaines et les zones rurales étendues.

-les futurs développements technologiques des antennes 5G, est crucial pour assurer un retour sur investissement à long terme.

Références

- [1] Aissaoui, C., & Benghalia, « Contribution à l'analyse des antennes microbandes avec excitation par la méthode du domaine spectral-Application à un réseau d'antennes microbandes». Thèse de Doctorat, 2017.
- [2] Gaha, « Analyse et conception des antennes fractales : applications aux Télécommunications Large Bande». Thèse de Doctorat, L'institut national polytechnique de Toulouse, 2007.
- [3] DEGHEFEL, W., & MERZOUGUI, « Etude et conception d'une antenne patch ultra large bande ULB à bande rejetée». Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf-M'SILA, 2017.
- [4] Ait Tamlihat Malak , <<Antennes patches >>. master matière et rayonnement module : antenne et microondes.
- [5] z. hamouda, « antennes microondes souples ultra large bande à base de matériaux composites » thèse de doctorat, université de blida, 2016
- [6]CHOUICHA MOHAMED, HAISSOUNE LAHCEN. Etude de l'influence des différents matériaux sur les performances d'une antenne multicouche fort gain. 2019.
- [7] Joska MWANIA KAMATIKI,<< Influence de la PIRE sur la transmission par satellite géostationnaire>>.mémoire d'Ingénieur technicien en Radio transmission ISTA Goma,2014.
- [8] DEGHEFEL, W., & MERZOUGUI, « Etude et conception d'une antenne patch ultra large bande ULB à bande rejetée». Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf-M'SILA, 2017.
- [9] Soltane, « Etude et caractérisation d'antennes imprimées pour système ultra-large bande». Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider-Biskra, 2015.
- [10] H. ERRIFI. A. BAGDAD. AL. SAHEL. AL. BADRI, ANALYSE ET CONCEPTION D'ANTENNE RESEAU A DEUX PATCH RECTANGULAIRES ALIMENTEE EN SERIE ,Laboratoire EEA & TI, Université Hassan II, Faculté des Sciences et Techniques,
- [11] Fouad Benamrane, « Conception d'une antenne patch microstrip », Université Sidi Mohamed Ben Abdallah (Fès) MAROC - Master télécoms hyperfréquence 2011.
- [12]BERROUA Nora,GHERIS Akila, Etude paramétrique et simulation de l'antenne patch sous CST.Mémoire de fin d'étude MASTER ACADEMIQUE, UNIVERSITE MOULOUDE MAMMERI DE TIZI-OUZOU,juillet 2017.

- [13] Fouad Benamrane, « Conception d'une antenne patch microstrip », Université Sidi Mohamed Ben Abdellah (Fès) MAROC - Master télécoms hyperfréquence 2011.
- [14] A Bagdad, Etude Comparative de L'Influence Des Deux Methodes D'Adaptation D'impedance Sur La Performance de L'Antenne Patch Rectangulaire A La Fréquence 10 GHZ, Université Hassan II-Mohammedia, Faculté des Sciences et Techniques.
- [15] CHORFI Hamid, « conception d'un nouveau système d'antenne réseau conforme en onde millimétrique », Thèse de doctorat, Université du Québec, 2012)
- [16] M. CHAABANE Abdelhalim, CONCEPTION D'UNE ANTENNE BIP LARGE BANDE A FORT GAIN ,these de doctorat, Université Ferhat Abbas - Sétif 1- ,2017
- [17] Imen Ben Trad, Antennes agiles pour les télécommunications multi standards, Sciences de l'ingénieur [physics], INSA de Rennes; Université de Tunis El-Manar, Faculté des Sciences de Tunis (Tunisie), 2014.
- [18] KIM, Dong-Wook, LEE, Jae-Jin, KWON, Young-Se, et al. Characteristics of an area-variable varactor diode. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 1996, vol. 44, no 11, p.2053-2057.
- [19] <https://instrumentationtools.com/pin-diode-working-principle/>
- [20] TUANTRANONT, Adisorn et BRIGHT, Victor M. Introduction to Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) with emphasis on optical applications. NECTEC Technical Journal, 2000, vol. 1, no 6, p. 227-236.
- [21] https://www.researchgate.net/figure/Principe-dun-commutateur-optique-44-4-fibres-optiques-en-entree-et-4-fibres-optiques_fig1_30512609
- [22] Sabrina HOUSSANY, <<1 JDD 2011 Methodology to evaluate microprocessor sensitivity toward cosmic radiation >>, March 2011
- [23] KHIR, MAACHE EL et OUALID, LOUCIF. Mémoire de Master.
- [24] TASSADIT, Saad et THIZIRI, Taleb. Dimensionnement et planification d'un réseau 4G/LTE. 2017. Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri.
- [25] HOUTON, « Etude de performance des réseaux 4G », Présenté pour l'obtention du diplôme de licence professionnel, UATM CASA, 2015
- [26] <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.argus.sava.networkmode&hl=ln>
- [27] H. BOUCHENTOUF et R. BOUDGHENE STAMBOULI, Etude des performances des réseaux 4G (LTE). Mémoire de master, Département de génie électrique et électronique, Option : réseaux mobiles et services (RMS), Faculté de technologie, université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 2013

[28] H. BOUCHENTOUF et R. BOUDGHENE STAMBOULI, Etude des performances des réseaux 4G (LTE). Mémoire de master, Département de génie électrique et électronique, Option : réseaux mobiles et services (RMS), Faculté de technologie, université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 2013

[29] Frandroid. (2024, May 22). Fréquences 4G et 5G : comment assortir au mieux téléphone et opérateur

[30] mohamed lamine seddiki1, mourad nedil1, soufiane tebache, compact multiband handset antenna design for covering 5g frequency bands, engineering school, Irtcs university of quebec, uqat quebec, j9p 1y3, canada 2 ecole nationale polytechnique (enp), algeria

[31] Mohammed H. Alsharif, Frequency Reconfigurable Antenna for Multi Standard Wireless and Mobile Communication Systems, A'Sharqiyah University, Ibra 400, Oman, April 2021.

Annexe

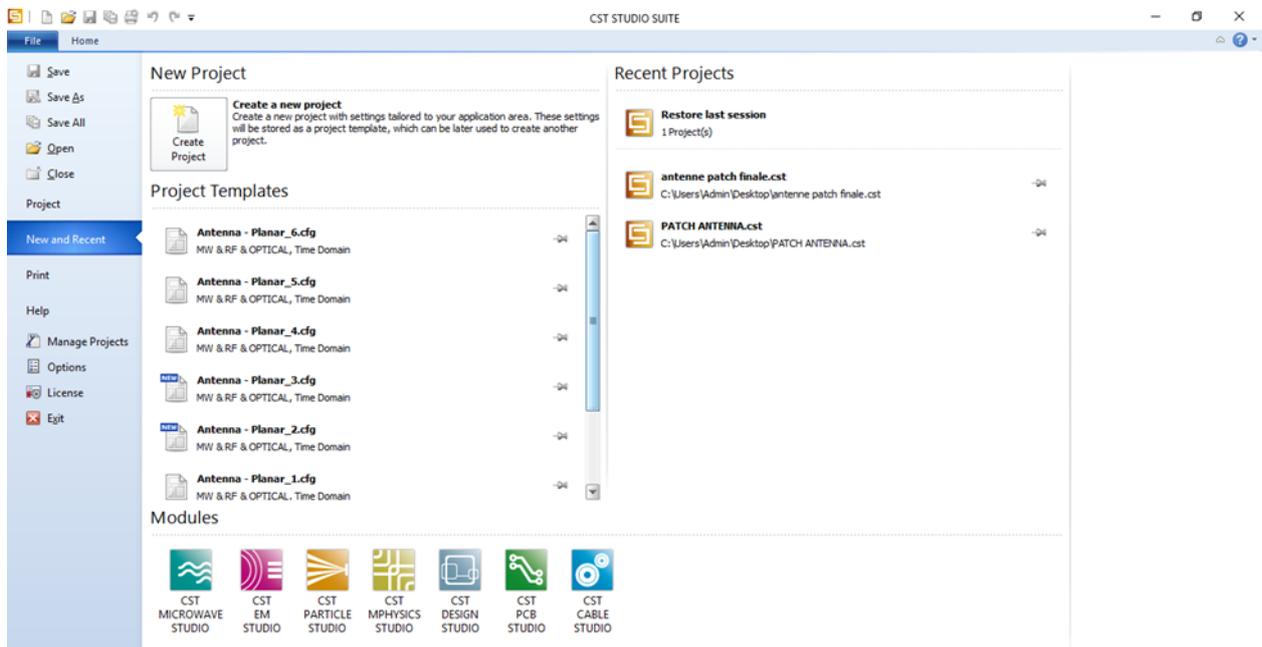
Présentation générale du logiciel :

Pour travailler avec des projets existants ou commencer de nouveaux dans le logiciel CST Microwave Studio, voici quelques étapes simplifiées :

1) Ouvrir un projet :

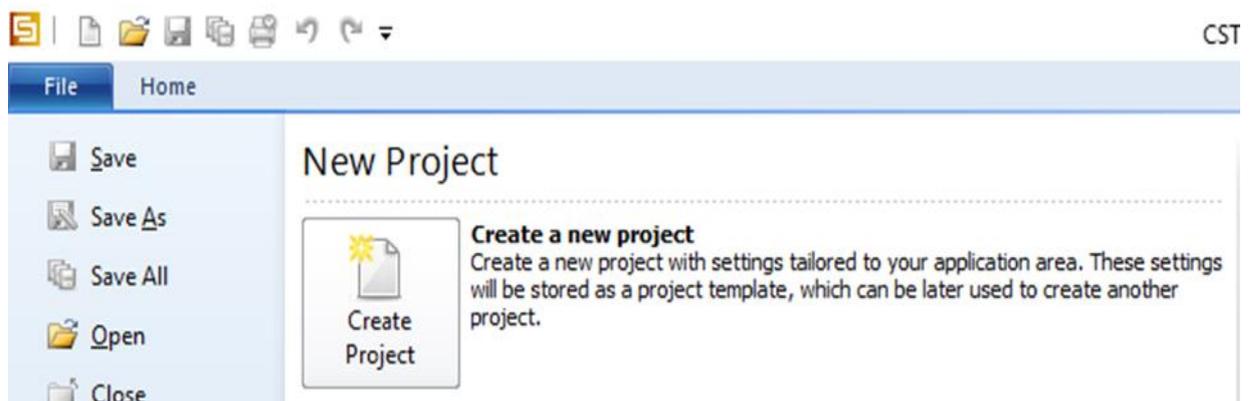
Sélectionnez l'option "OUVREZ" dans l'interface principale.

Naviguez jusqu'au répertoire où votre fichier de projet a été sauvegardé.

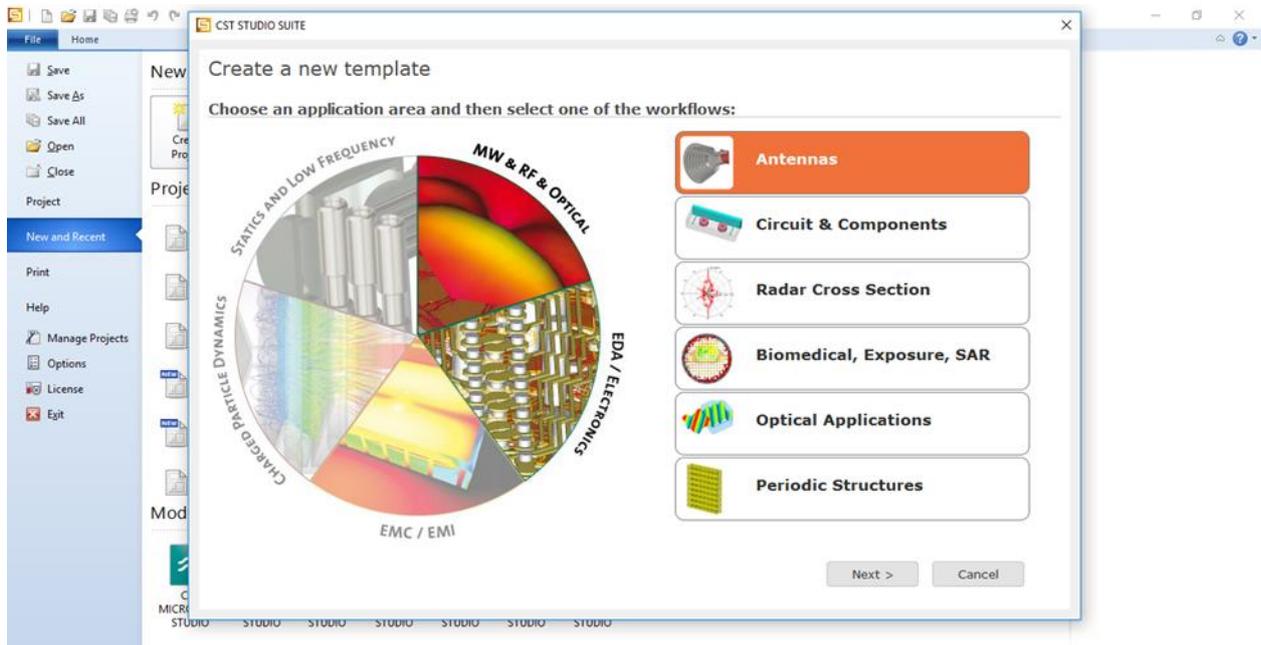


2) Créer un nouveau projet :

Appuyez sur le bouton "CRÉER UN PROJET".

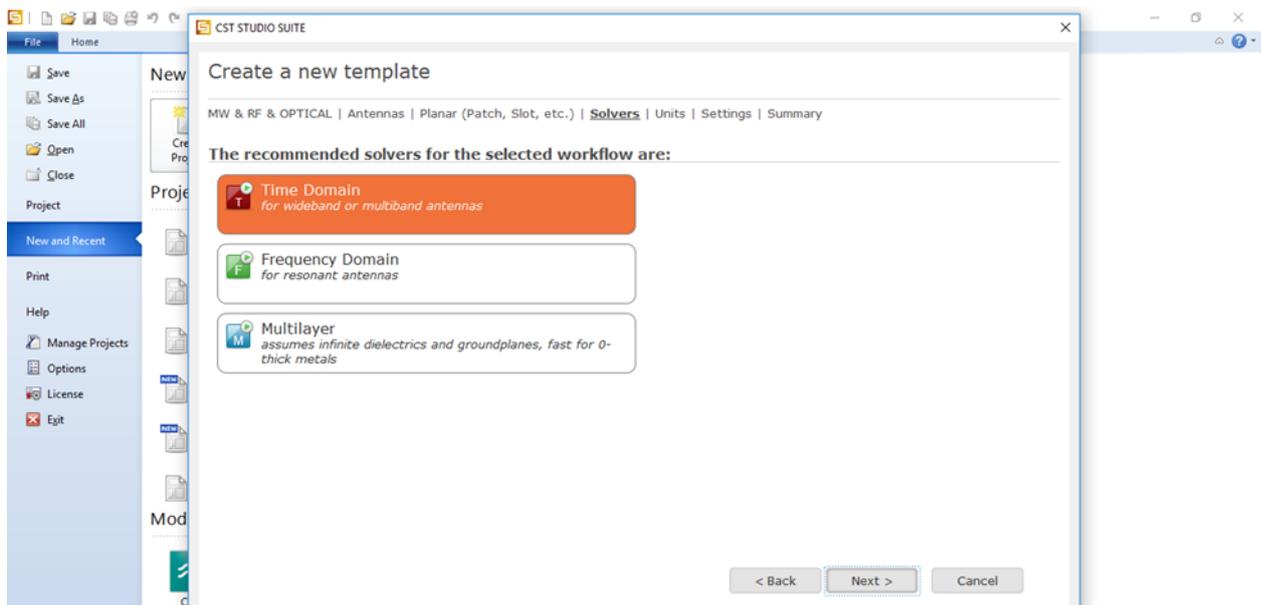


Dans la boîte de dialogue qui s'affiche, sélectionnez le type de simulation que vous souhaitez réaliser ("MW & RF & OPTICAL") > ("Antennes").

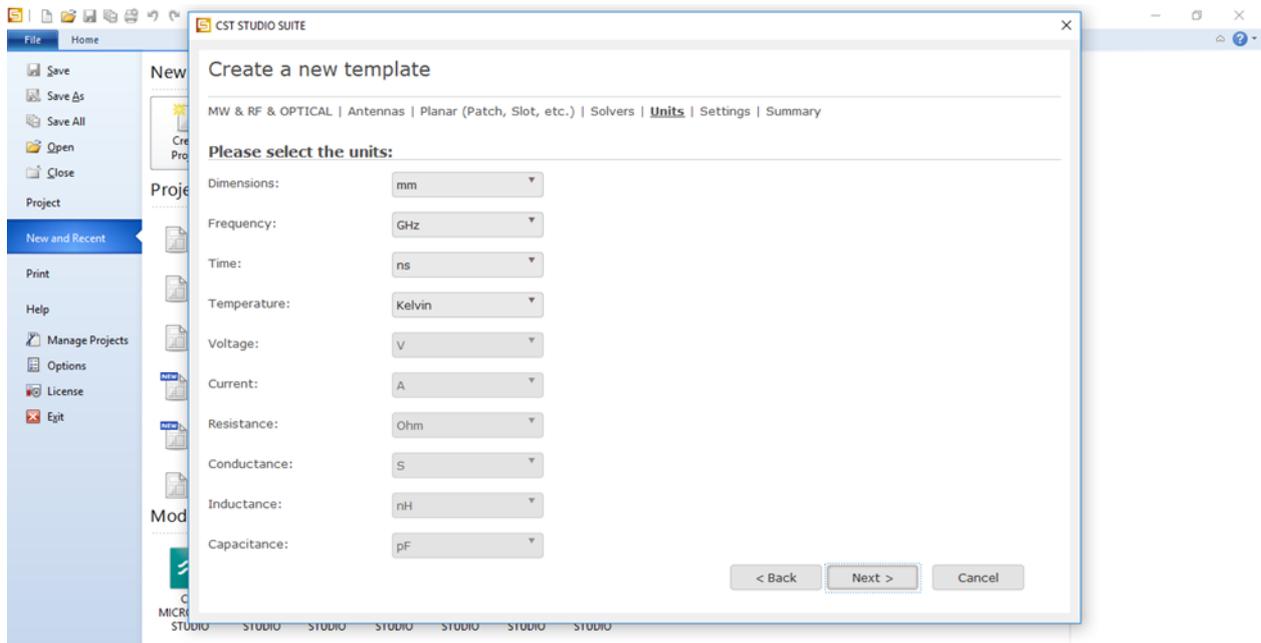


Ensuite, passez à la page suivante ("Suivant") pour sélectionner le type d'antenne que vous désirez utiliser.

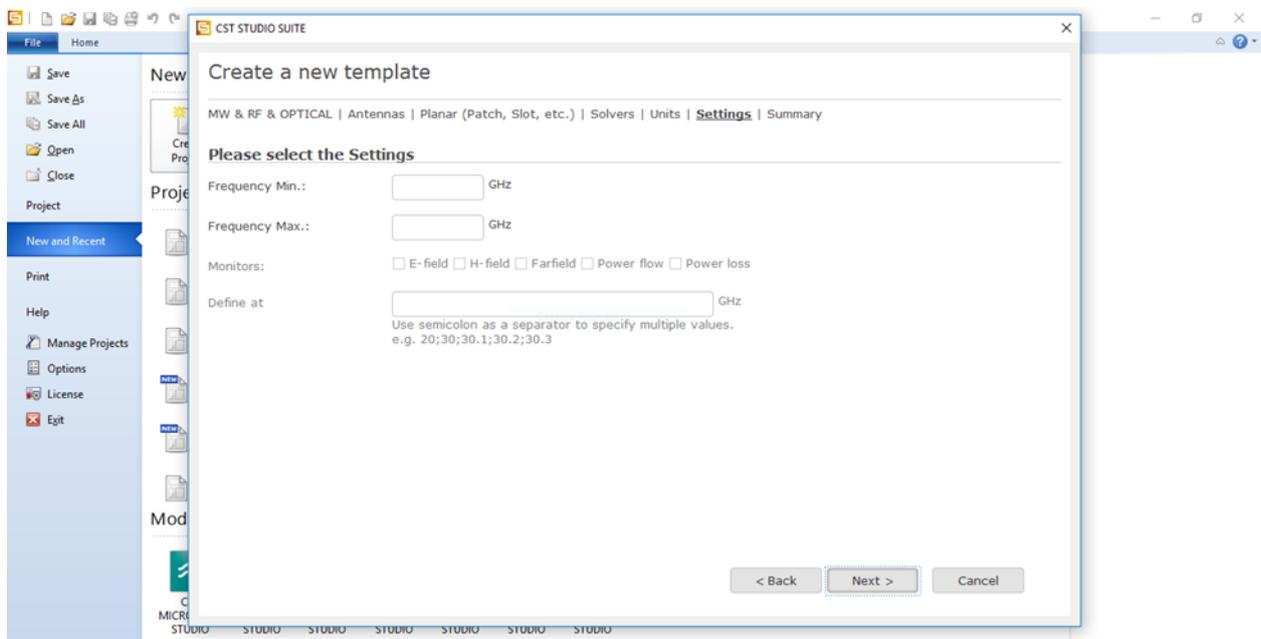
Passez à la page suivante ("Suivant") pour sélectionner le type de simulation ("TEMPS DOMANIEL").



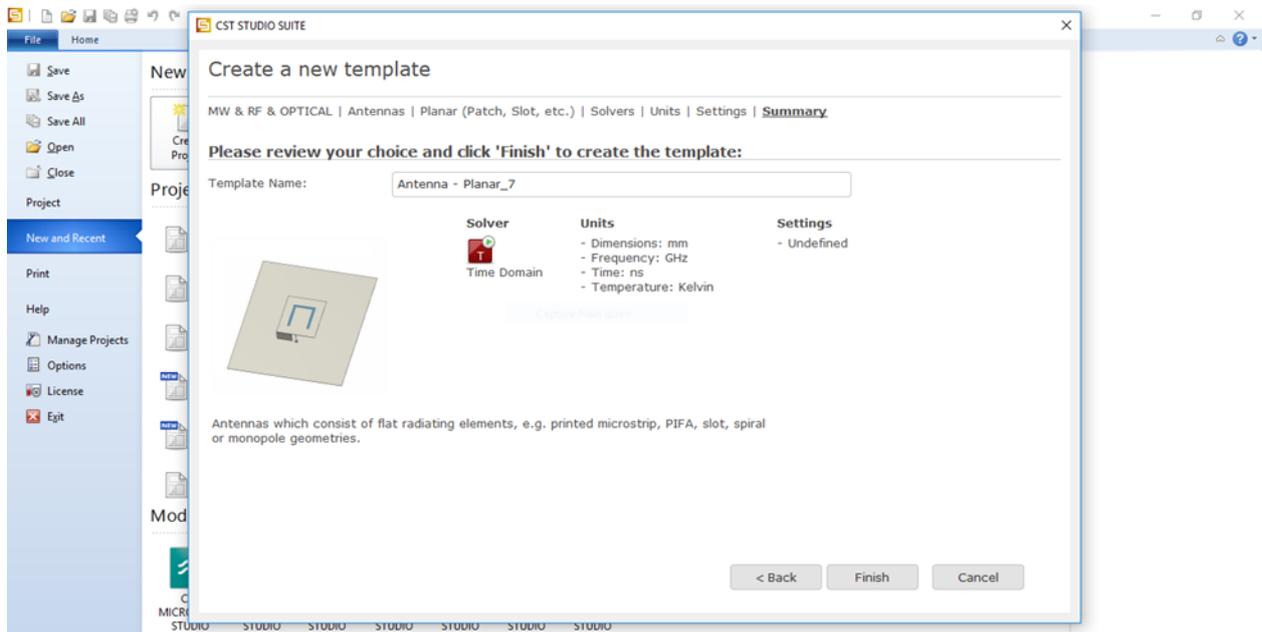
Déclarer les unités de divers paramètres pour la simulation de votre antenne.



Effectuez les bandes de fréquences d'étude.



Finalement, cliquez sur "FINIR" dans la fenêtre finale pour terminer la création du projet.



3) Description générale des outils CST :

Une fois le logiciel lancé, vous accédez à son interface utilisateur, où vous pourrez gérer vos projets et configurer vos simulations.

