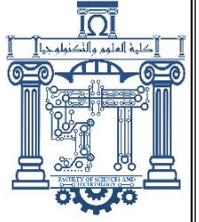




الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
Republique Algerienne Democratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة العربي التبسي - تبسة

Université Larbi Tébessi- Tébessa –

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de génie électrique

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de Master Académique**

Spécialité : Réseaux et Télécommunications

Par : CHERGUI Safa
DJABRI Roumaissa

Sujet

CONCEPTION D'UNE ANTENNE PATCH RECTANGULAIRE A DOUBLE BANDE AVEC LA STRUCTURE A DEFAUT DANS LE PLAN DE MASSE (DGS)

Présenté et soutenu publiquement, le 23 /06 / 2021 , devant le jury composé de :

M. BentaharTarek
M. Ferroudji Karim
M. Saidi Riad

MCB
MCB
MCA

Président
Rapporteur
Examineur 1

Promotion : 2020/2021

Dédicace

Je dédie ce travail Aux plus belles femmes de l'univers, à mon paradis qui était la source de mon énergie, à ma mère magnifique, que dieu ait son âme.

Je le dédie à mon modèle et à la personne la plus chère à mon cœur, mon père, qui a toujours été à mes côtés.

Je le dédie à Mon frère et mon cher, abdal mouiz et à mon frère gâté, mon petit nadjemeddine et à mes jolies sœurs et mes chères Maroua, Oumaima, Chaïma, basma et ma petite fille, Alaa que dieu les protège.

Je le dédie à ma tante distinguée et la femme que j'aime beaucoup, ma tante djamila, qui m'a soutenu à chaque étape, et à sa précieuse petite famille.

Je le dédie à mes petites filles Line et Iness.

À mon frère et mon oncle spécial, Rodhouane, et à toute ma famille.

Je dédie ce travail à mon amie, sœur et chère voisine Debbabilhem.

à ma chère, la femme que j'aime beaucoup tante Faïza.

à mes chères amies, Bouthaina, Rania, Nardjes, Mariem, Chaïmaa, amina, Nour, Dhouha, Maroua et toutes mes amies.

à ma bien-aimée et joyeuse binôme Roumaïssa qui je lui souhaite du succès toujours

Je le dédie à mes chers professeurs, Hnine Hananaï, Mariam Selatniaï et Labied Salïma et à tous les personnes que j'aime.

Safaa.

Je dédie ce travail :

- *A mon père l'homme qui a voulu de me voir un jour réussie - que dieu ait son âme -*
- *A ma mère l'étoile de ma vie, qui m'a soutenu et encouragé durant ces années d'étude qu'elle trouve ici le témoignage ma profonde reconnaissance*
- *A ma adorable sœur Ouafa, et mes magnifiques frères Fahd, Mohammed et Chouaib, ma jolie belle-sœur, et mon beau-frère, mes neveux et mes nièces Maram, M.Rabeh, Tasnim, Taki, Anas, Madjed et Nadjem, et mes grands-parents et ce qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail, ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours*
- *Mes chère amies et sœur NourElHouda et Dhoha, mes bonheurs, ma binôme la jolie Safa dieu te protège*
- *A ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité*
- *A tous mes amies qui m'ont toujours encouragé*
- *A tous ce que j'aime*

Roumaïssa.

Remerciement

Après avoir remercié Dieu Tout-Puissant, qui nous a donné courage et patience. Nous tenons à remercier chaleureusement tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Nous tenons à remercier Dr. Ferroudji Karim, pour sa présence, notamment ses conseils avisés, qui ont contribué à notre réflexion, et nous ont accordé sa confiance.

Nous adressons également nos sincères remerciements aux membres du jury, le Président Dr. Bentahar Tarek, et l'examineur Dr. Saïdi Riad, pour avoir accepté l'évaluation et la revue de notre travail.

Nous tenons à remercier Pr. Maamir Mahmoud pour l'intérêt qu'il a porté à nos questions et à nos conseils pendant le travail.

Enfin, nous tenons à remercier tous nos professeurs et collègues pour leur aide et leurs encouragements.

Merci

Liste des tableaux

Tableau 3. 1. Démentions de l'antenne de 5GHz	46
Tableau 3. 2. Paramètres de l'antenne patch de 5 GHz	47
Tableau 3. 3. Résultats de simulation de l'antenne de 5GHz	50
Tableau 3. 4. Paramètres de lantenne patch de 2.7GHz	51
Tableau 3. 5. Résultats de simulation de l'antenne de 2.7GHz	54
Tableau 3. 6. Variables optimisées du RAFC	61
Tableau 3. 7. Paramètres de l'antenne patch de 2.7GHz , 4.7GHz	63
Tableau 3. 8. Résultats de simulation de l'antenne double bande proposée.	68
Tableau 3. 9. Etude comparative entre les antennes	69
Tableau 3. 10. Comparaison avec autres antennes patch à double bande dans la littérature.....	70

Liste des figures

Figure 1. 1 .Diagramme de rayonnement d'une antenne directive.	7
Figure 1. 2 .Différentes polarisations des ondes EM.	9
Figure 1. 3 .Diagramme de rayonnement bidimensionnel en coordonnées cartésiennes.	9
Figure 1. 4 . La bande passante.....	10
Figure 1. 5 . Antenne cornet.	12
Figure 1. 6 . Antenne imprimée	14
Figure 1. 7 . Structure de base d'une antenne patch.....	15
Figure 1. 8 . Rayonnement d'une antenne patch rectangulaire.....	16
Figure 1. 9. Alimentation par ligne Micro-ruban.....	17
Figure 1. 10. Alimentation par câble coaxial.....	17
Figure 1. 11. Alimentation par proximité.....	18
Figure 1. 12. Alimentation au travers d'une ouverture au plan de masse.	18
Figure 1. 13. Formes de DGS simple.	20
Figure 1. 14. DGS sous formes de lettres.	21
Figure 1. 15. Formes plus complexes des DGS [19].....	22
Figure 1. 16. DGS de forme résonateur à anneau fendu carré.....	23
Figure 2. 1. Fenêtre principale de HFSS.	26
Figure 2. 2. Barre d'outils	26
Figure 2. 3. Arbre de conception de structure du projet.	27
Figure 2. 4. groupe de matériels	27
Figure 2. 5. exemple de modèle du dessin actif	27
Figure 2. 6. Propriétés d'un attribut	28
Figure 2. 7. Erreurs ou avertissements sur Message Manager.....	28
Figure 2. 8. Progression de solution.....	28

Figure 2. 9. Sauvegarde de projet	29
Figure 2. 10. Insertion une conception de HFSS avec raccourcis.....	30
Figure 2. 11. Insertion une conception de HFSS	30
Figure 2. 12. Boite de dialogue de type solution	31
Figure 2. 13. Étapes pour choisir ou changer l'unité de dimensions.....	32
Figure 2. 14. Boite d dialogue Set model Units	32
Figure 2. 15. Commande d'aspiration de HFSS sur menu Draw.....	33
Figure 2. 16. Raccourcis commande de menu Draw.....	33
Figure 2. 17. Paramètres d'un box insérer sur 3D Manager	33
Figure 2. 18. Insertion variable.....	34
Figure 2. 19. Création de substrat	35
Figure 2. 20. Dimensions et position de substrat	35
Figure 2. 21. Patch	35
Figure 2. 22. Paramètres de port	36
Figure 2. 23. Le port dans le plan	36
Figure 2. 24. Création de plan de masse.....	37
Figure 2. 25. Ajouter solution setup.....	37
Figure 2. 26. Condition d'analyse setup.....	38
Figure 2. 27. Edit frequency Sweep	38
Figure 2. 28. Validation de projet	39
Figure 2. 29. Analyse de projet.....	39
Figure 2. 30. Toutes les opérations pour créer les résultats et les diagrammes	40
Figure 2. 31. Création de substrat	40
Figure 2. 32. Création de masse (ground)	41
Figure 2. 33 Création patch.	42
Figure 2. 34. Création de port.....	42
Figure 2. 35. Affichage de S11	43
Figure 2. 36. Affichage de VSWR, diagrammes 2D et 3D	43
Figure 3. 1. Antenne patch rectangulaire alimentée par ligne microbande avec adaptation par encoche.	46
Figure 3. 2. Antenne patch rectangulaire fonctionne à une fréquence de 5 GHz	48
Figure 3. 3. Coefficient de réflexion S(1,1) et bande passante de l'antenne patch de 5 GHz	48
Figure 3. 4. Rapport d'onde stationnaire (VSWR) de l'antenne patch de 5GHz	49
Figure 3. 5. Diagramme de rayonnement 2D de l'antenne patch de 5GHz	49
Figure 3. 6. Diagramme de rayonnement 3D en directivité de l'antenne patch de 5 GHz	50
Figure 3. 7. Antenne patch rectangulaire fonctionne à une fréquence de 2.7 GHz	51
Figure 3. 8. Coefficient de réflexion S(1,1) et bande passante de l'antenne patch de 2.7GHz	52
Figure 3. 9. VSWR de l'antenne pour Frq=2.7GHz	52
Figure 3. 10. Diagramme de rayonnement en 2D pour Frq=2.7GHz	53
Figure 3. 11. Diagramme de rayonnement en 3D pour Frq=2.7GHz	53
Figure 3. 12. Structure de résonateur à anneau fendu carré.....	55
Figure 3. 13. Plan de masse de l'antenne proposé avec RAFC	56
Figure 3. 14. Vue tridimensionnelle de l'antenne proposé avec RAFC.....	56
Figure 3. 15. Résultats de varriation du parametre XR1	57

Figure 3. 16. Effet de parametre XO	58
Figure 3. 17. Effet de parametre XO2	58
Figure 3. 18. Effet du parametre Xp	59
Figure 3. 19. Effet de parametre Yp	59
Figure 3. 20. Effet de parametre W	60
Figure 3. 21. Effet du parametre S	61
Figure 3. 22. Vue 3D de l'antenne double bande proposée.....	62
Figure 3. 23. Vue de face de l'antenne double bande proposée.....	62
Figure 3. 24. Vue de dos de l'antenne double bande proposée.....	63
Figure 3. 25. Paramètre S(1,1) de l'antenne double bande Fr1=2.7GHz ,Fr2=4.7GHz	64
Figure 3. 26 . Bande passante de l'antenne double bande.....	64
Figure 3. 27. Paramètre VSWR de l'antenne pour Fr1=2.7GHz, Fr2=4.7GHz	65
Figure 3. 28. Diagramme de rayonnement en 2D pour Fr1=2.7 GHz	66
Figure 3. 29. Diagramme de rayonnement en 2D pour Fr2=4.7 GHz	66
Figure 3. 30. Diagramme de rayonnement en 3D pour Fr1=2.7 GHz	67
Figure 3. 31. Diagramme de rayonnement en 3D pour Fr2=4.7 GHz	67
Figure 3. 32. Diagramme d'efficacité de l'antenne proposé.....	68
Figure 3. 33. Comparaison S(1,1) entre antenne de 2.7GHz et antenne double bande	69
Figure 3. 34. Schéma l'antenne à réaliser.....	71
Figure 3. 35. Papier calque et plaque photosensible avec adhésif opaque	73
Figure 3. 36. Insoleuse	73
Figure 3. 37. Temps d'insolation	74
Figure 3. 38. Révélateur (perchlorure de fer)	74
Figure 3. 39. Révélation de l'antenne par perchlorure de fer	75
Figure 3. 40. Rinçage de l'antenne dans l'eau.....	75
Figure 3. 41. Impression de l'antenne sur du papier glacé.....	76
Figure 3. 42. Transfert du toner sur le cuivre avec le fer à repasser	77
Figure 3. 43. Ramollir le papier avec l'eau	78
Figure 3. 44. Bain de perchlorure de fer.....	78
Figure 3. 45. Ajustement et lissage des bords	79
Figure 3. 46. Soudage du connecteur SMA.....	79
Figure 3. 47. Face supérieur de l'antenne.....	79
Figure 3. 48. Face inferieur de l'antenne.....	79
Figure 3. 49. Dispositif Antenna Trainer	80

Liste des symboles et abréviations

RF : Radio Fréquence

APM : Antenne patch micro ruban

GPS : Global Positioning System

GSM : Global System for Mobile

DGS : Defected Ground Structure

RAFC: Résonateur à anneau fendu carrée.

VSWR : Voltage Standing Wave Ratio

HFSS : High Frequency Structure Simulation

Pa : la puissance d'alimentation

ω : Pulsation de l'onde électromagnétique

Γ : Coefficient de réflexion

EM : Electromagnétique.

RL : Return Loss

Z_{in} : impédance d'entrée

Z₀ : impédance caractéristique

U(θ, φ) : Intensité de rayonnement d'une antenne dans la direction (θ, φ)

U_{iso} : Intensité de rayonnement d'une antenne isotrope.

V_{max} : volume maximale

V_{min} : volume minimale

D : La directivité d'une antenne

Pray : Puissance rayonnée de l'antenne.

MAXD: La directivité maximale

G(θ, φ) : Le gain d'une antenne dans la direction (θ, φ)

ζ_r : La permittivité diélectrique relative

TEM : Transmission Electron Microscopy

Δl : Extension de longueur de patch

ϵ_{eff} : La permittivité effective

L_{eff} : longueur effective du patch

S_{11} : Coefficient de réflexion

C : la vitesse de propagation dans le vide

MEMS: Micro Electro Mechanical Systems

f_r : fréquence de résonance

UV: Ultra-Violet

SMA: Sub-Miniature Version A

WLAN: Wireless Local Area Network

Résumé :

Une antenne est l'élément le plus important de toute communication sans fil. Les progrès rapides des communications sans fil nécessitent le développement d'antennes légères, à profil bas, miniaturisées et à alimentation unique. De plus, il est hautement souhaitable d'intégrer plusieurs bandes de fréquences dans un seul équipement.

Par conséquent, les antennes multibandes, pouvant être utilisées simultanément dans différentes normes, ont été au centre de nombreux projets de recherche.

Dans ce mémoire nous proposons d'utiliser la technique des défauts dans le plan de masse (DGS : Defected Ground Structure) et en particulier, la technologie DGS sous la forme d'un résonateur à anneau fendu carré (RAFC) afin de concevoir une antenne rectangulaire avec une double bande de fréquence, de sorte qu'après avoir étudié l'effet des différences de niveau de plan de masse, on obtiendra une antenne miniature d'environ 67% qui fonctionne dans la fréquence de 2,7 GHz et de 4,7 GHz et comparer ses caractéristiques avec d'autres antennes pour prouver ainsi, son efficacité et sa qualité.

Mots clé : Antenne, Patch, double bande, HFSS, DGS, Rayonnement.

Summary:

An antenna is the most important element of any wireless communication system. Rapid advances in wireless communications require the development of lightweight, low profile, miniaturized, singlefeed antennas. In addition, it is highly desirable to integrate multiple frequency bands into a single equipment. Therefore, multiband antennas, which can be used simultaneously in different standards, have been the focus of many research projects.

In this work we propose to use the technique of Defected Ground Structure (DGS) and in particular, the DGS technology in the form of a square split-ring resonator in order to design a rectangular antenna with a dual frequency band, so that after studying the effect of differences in ground level, we will get a miniature antenna of about 67% that works in the frequency of 2.7 GHz and 4.7 GHz and compare its characteristics with other antennas to prove its efficiency and quality.

Keywords: Antenna, Patch, dual band, HFSS, DGS, Radiation.

ملخص :

الهوائي هو أهم جزء في أي اتصال لاسلكي. تتطلب التطورات السريعة في الاتصالات اللاسلكية تطوير هوائيات أقل وزن وحجمًا وأحادية التغذية. بالإضافة إلى ذلك، من المستحسن للغاية دمج نطاقات تردد متعددة في جهاز واحد. لذلك، كانت الهوائيات متعددة النطاقات، والتي يمكن استخدامها في نفس الوقت بمعايير مختلفة، محور تركيز العديد من المشاريع البحثية.

نقترح في هذه الأطروحة استخدام تقنية العيوب في المستوى الأرضي للهوائي (DGS : بنية أرضية معيبة) وبشكل خاص تقنية DGS بشكل مرنان حلقة الانقسام المربعة من أجل تصميم هوائي ذي رفعة مستطيلة بنطاق تردد مزدوج

إنتحصل بعد دراسة تأثير الاختلافات في مستوى الأرضي ,على هوائي مصغر الحجم بنسبة تقارب 67 % يعمل في نطاق تردد 2.7 GHZ و 4.7 GHZ ومقارنة خصائصه مع هوائيات أخرى لنتبث بذلك فعاليته وجودته.

الكلمات المفتاحية: هوائي ، رقعة ، نطاق مزدوج ، HFSS ، DGS، إشعاع .

Table des matières

Dédicace	2
Remerciement	4
Liste des tableaux	5
Liste des figures	5
Liste des symboles et abréviations	8
Résumé :	10
Table des matières	12
Introduction générale	1
CHAPITRE 1 : LES ANTENNES	4
1 Introduction :	5
2 Caractéristiques d'une antenne :	5
2.1 Coefficient de réflexion :	5
2.2 Rapport d'onde stationnaire (VSWR) :	6
2.3 Diagramme de rayonnement	6
2.4 Directivité :	7
2.5 Gain	8
2.6 Polarisation	8
2.6.1 Polarisation linéaire :	8
2.6.2 Polarisation Circulaire et elliptique :	8
2.7 Angle d'ouverture	9
2.8 Ouverture rayonnante et Rendement	10
2.9 Bande passante :	10
3 Types d'antennes	11
3.1 Antennes cornets	11
3.2 Antennes filaires	12
3.3 Antennes à fente :	13
4 Antenne imprimée ou patch :	13
4.1 Structure d'antenne imprimée :	14
4.2 Principe de fonctionnement :	15
5 Types d'alimentation :	16
5.1 Alimentation par ligne micro-ruban :	16
5.2 Alimentation par sonde coaxial	17

5.3	Alimentation par couplage électromagnétique.....	17
5.4	Alimentation à travers d'une ouverture au plan de masse.....	18
6	Techniques de miniaturisation :	19
7	Modification de plan de masse (Defected Ground structure) :	20
7.1	Description de la technique :	20
7.2	Formes variées de la structure DGS	20
7.3	Miniaturisation par la technique DGS	22
8	Conclusion :	23
CHAPITRE 2 : PRESENTATION DE LOGICIEL HFSS.....		24
1	Introduction :	25
2	Présentation du simulateur HFSS :	25
3	Fenêtre principale de HFSS :	26
3.1	Barre d'outils :	26
3.2	Project Manager :	26
3.3	3D Modeler Window :	27
3.4	PropertyWindow :	27
3.5	Message Manager :	28
3.6	Progress Window :	28
4	Comment commencer à HFSS.....	28
4.1	Comment ouvrir un nouveau projet HFSS :	28
4.2	Comment sauvegarder un projet :	29
4.3	Insérer une conception de HFSS	29
4.4	Choix de type de solution.....	30
4.5	L'Arrangement des Unités du Modèle de Mesure.....	31
4.6	Dessiner un modèle :	32
4.7	Paramètre de modèle.....	33
4.8	Insertion variables :	34
4.9	Création du substrat	34
4.10	Création de patch :	35
4.11	Création de Port.....	36
4.12	Création de Masse	36
4.13	Add solution Setup	37
4.14	Edit frequency Sweep	38
4.15	Analyse de projet.....	39
4.16	Résultats.....	40
4.17	Insertion de modèle pour cette étude :	40
5	Conclusion.....	43

CHAPITRE 3 : CONCEPTION ET REALISATION D'UNE ANTENNE PATCH DOUBLE BANDE.....	44
1 Introduction :.....	45
2 Etude et conception d'une antenne patch de fréquence de résonance 5GHz.....	45
2.1 Résultats de Simulation :.....	48
3 Etude et conception d'une antenne patch de fréquence de résonance 2.7 GHz.....	50
3.1 Résultats de simulation :.....	52
4 Conception de l'antenne proposée à double bande avec une structure DGS de forme résonateur à anneau fendu carré.....	54
4.1 Résonateur à anneau fendu carré (RAFC):.....	55
4.2 Antenne double bande proposée avec RAFC:.....	55
4.3 Étude paramétrique.....	57
4.4 Variables optimisées.....	61
4.5 Conception de l'antenne double bande proposée :.....	62
4.6 Résultats de Simulation :.....	63
5 Etude comparative entre les antennes :.....	69
5.1 Comparaison entre les antennes conventionnelles de 2.7GHz et 4.7GHz et l'antenne double bande :.....	69
5.2 Comparaison entre les antennes double bande récemment développées :.....	70
6 Réalisation de l'antenne double bande proposée:.....	71
6.1 Photolithographie :.....	71
6.2 Technique de transfert de toner :.....	76
7 Conclusion :.....	80
Conclusion générale.....	82
Références Bibliographiques.....	85

Introduction générale

L'explosion des technologies de l'information et des communications sans fil a créé de nombreuses opportunités pour améliorer les performances des systèmes de transmission et de traitement de signaux existants. Cela a fourni une forte motivation pour développer de nouveaux dispositifs et systèmes. L'antenne est un élément indispensable de tout système de communication sans fil. Une antenne est un appareil utilisé pour émettre ou recevoir des ondes radio. La nouvelle génération de systèmes sans fil exige des antennes efficaces et fiables, ces antennes comprennent des réflecteurs paraboliques, des antennes patch, des antennes à fente et des antennes dipôles repliées.

Chaque type d'antenne a ses propres avantages et inconvénients, mais sans une conception appropriée, le signal généré par le système de radiofréquence (RF) ne sera pas transmis efficacement et une mauvaise détection du signal se produira au niveau du récepteur.

La taille et le poids de divers systèmes électroniques sans fil ont rapidement diminué grâce au développement de la technologie des circuits intégrés modernes. Dans de nombreux systèmes de communication sans fil, il est nécessaire de disposer d'antennes à profil bas.

Les antennes patch microruban (APM) sont des exemples d'antennes à profil bas. Les AMP présentent de nombreuses caractéristiques attrayantes telles que profil bas, légèreté, facilité de fabrication, conformabilité aux surfaces courbes, faible coût de production et compatibilité avec la technologie des circuits intégrés. Ces caractéristiques attrayantes ont récemment augmenté la popularité et les applications des AMP et ont stimulé davantage d'efforts de recherche pour comprendre et améliorer leurs performances.

Une des utilisations les plus répandues d'une antenne est sa nature bi-bande où la même antenne peut être utilisée pour rayonner dans deux bandes de fréquences différentes. Le fonctionnement à double fréquence des antennes est devenu une nécessité pour de nombreuses applications dans les systèmes de communication sans fil récents, tels que les services GPS, GSM fonctionnant sur deux bandes de fréquences différentes. Ce mémoire tente de concevoir et d'analyser une antenne bi-bande.

Plusieurs techniques ont été utilisées pour créer un comportement bi-bande dans les antenne patch. L'une de ces techniques est la structure à défaut dans le plan de masse (DGS : Defected Ground Structure), où le métal du plan de masse d'une antenne microruban est

intentionnellement modifié pour améliorer les performances. Le nom de cette technique signifie simplement qu'un "défaut" a été placé dans le plan de masse de l'antenne. Lorsqu'on envisage la conception d'antennes patch pour des applications double bande, les structures de masse défectueuses présentent une nouvelle technique pour modifier les caractéristiques de ces antennes.

Dans ce travail, nous proposons une antenne patch conventionnelle qui rayonne à une seule fréquence de 5GHz, ensuite nous appliquons la technique DGS de forme résonateur à anneau fendu carré (RAFC) incorporé dans le plan de masse de l'antenne de 5GHz. L'objectif est de créer une autre fréquence de résonance ce qui permet de gagner davantage en dimension de l'antenne proposée donc une miniaturisation de cette dernière.

Une étude paramétrique est effectuée dont les paramètres géométriques du RAFC sont modifiés un par un, afin de constater leurs influences sur les caractéristiques de l'antenne. L'objectif est de créer un comportement double bande avec le minimum de $S_{11}(\text{dB})$ est le maximum de gain dans une antenne conventionnelle de 5GHz. Cette étude paramétrique est très importante car elle permet de mieux appréhender l'influence des différents paramètres du RAFC sur les performances de l'antenne proposée.

De plus, une étude expérimentale a été effectuée dont nous avons réalisé l'antenne double bande proposée avec plusieurs techniques de réalisation.

La conception et l'analyse de l'antenne proposée sont effectuées en utilisant le logiciel de simulation HFSS (high-frequency structure simulator).

Ce mémoire contient trois chapitres organisés comme suit :

Le premier chapitre est un bref aperçu du concept d'antenne et de ses caractéristiques et en particulier pour les antennes patch microstrip et ses composants structurels, ses applications, les techniques d'alimentation, et les différentes méthodes miniaturisation en particulier la technique DGS.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation du logiciel HFSS (High Frequency Structure Simulator) où nous avons présenté de façon générale les étapes et le rôle de chaque fonction pour réaliser les simulations de projet.

Chapitre trois contient les simulations et discussion de l'antenne double bande proposée avec DGS (Defected Ground structures) et la comparaison entre l'antenne proposée sans DGS et

après utilisation de la technique DGS et aussi la comparaison entre ce travail avec et d'autres travaux récemment publiés dans la littérature.

De plus, ce chapitre comprend une étude expérimentale dont nous avons utilisé deux techniques de fabrication manuel de l'antenne double bande proposée ; à savoir, la technique de photolithographie et la méthode de transfert de toner.

Enfin, nous finalisons notre mémoire par une conclusion générale dont nous résumons le travail proposé et en présentant quelques perspectives.

CHAPITRE1 : LES ANTENNES

1 Introduction :

Dès l'origine, l'antenne est l'élément qui assure la propagation dans l'air, il est utilisé pour diffuser les ondes électromagnétiques par rayonnement. Il joue deux rôles réciproques:

Le rôle d'émission ou l'antenne transforme la puissance électromagnétique guidée, issue d'un générateur en une puissance rayonnée. Dans ce sens, c'est un transducteur [1]

De façon inverse, la puissance rayonnée peut être captée par une antenne de réception. Dans ce sens, l'antenne apparaît comme un capteur et un transformateur de puissance rayonnée en puissance électromagnétique guidée.

Ainsi, dans une chaîne de communications sans fil, l'antenne est toujours le premier élément dans une chaîne de réception ou le dernier élément d'une chaîne d'émission.

L'objectif de ce chapitre est de définir et de décrire de manière générale, les différentes quantités habituellement utilisées pour caractériser les antennes, les types d'antenne. Un intérêt particulier est porté sur les antennes imprimées, leur propriété, types et caractéristiques.

2 Caractéristiques d'une antenne :

Les caractéristiques d'une antenne sont déterminées par rapport à une source de référence, une source ponctuelle qui rayonne sa puissance d'alimentation d'une façon identique dans toutes les directions constituant la source de référence idéale [2].

La puissance rayonnée par unité d'angle solide dans une direction définie par les deux angles (θ, φ) s'écrit :

$$P_o(\theta, \varphi) = \frac{Pa}{4\pi} \quad (1.1)$$

Où Pa est la puissance d'alimentation.

2.1 Coefficient de réflexion :

Le coefficient de réflexion est le rapport entre l'onde réfléchi en entrée de l'antenne et l'onde incidente. Il dépend de l'impédance d'entrée $Z_{in}(\omega)$ de l'antenne et de l'impédance caractéristique de la ligne de transmission Z_0 tel que:

$$\Gamma = \frac{Z_{in}(\omega) - Z_0}{Z_{in}(\omega) + Z_0} \quad (1.2)$$

Ainsi les pertes de retour (par réflexion) dites aussi Return Loss (en anglais S11) s'en déduisent:

$$RL = -20 \log |\Gamma| \quad (1.3)$$

C'est un des paramètres qu'on utilise lors de l'optimisation d'antenne double bande proposée dans ce mémoire.

2.2 Rapport d'onde stationnaire (VSWR) :

Le rapport d'onde stationnaire (ROS) est le paramètre le plus important pris en compte lors de l'installation et du réglage des antennes d'émission. L'adaptation de l'antenne est caractérisée par le Rapport d'Ondes Stationnaires (en anglais: Voltage Standing Wave Ratio VSWR). Lorsqu'une antenne connecte l'émetteur à la ligne d'alimentation, leur impédance doit correspondre exactement pour que le transfert d'énergie maximal ait lieu. 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'un régime d'ondes stationnaires dans la ligne d'alimentation de l'antenne. L'amplitude de cette onde stationnaire n'est pas constante le long de la ligne. Le ROS est le rapport entre l'amplitude maximale (V_{max}) et l'amplitude minimale (V_{min}) de cette onde stationnaire, il s'écrit sous la forme suivante :

$$ROS = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (1.4)$$

Pour une bonne adaptation de l'antenne la valeur de VSWR doit se situer dans une plage de 1 à 2.

2.3 Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement fournit des informations sur la distribution spatiale de l'énergie rayonnée ou reçue par l'antenne considérée. Par conséquent, selon le diagramme de rayonnement, plusieurs paramètres de rayonnement d'antenne peuvent être définis, y compris l'ouverture, le niveau de puissance et la direction des lobes latéraux.

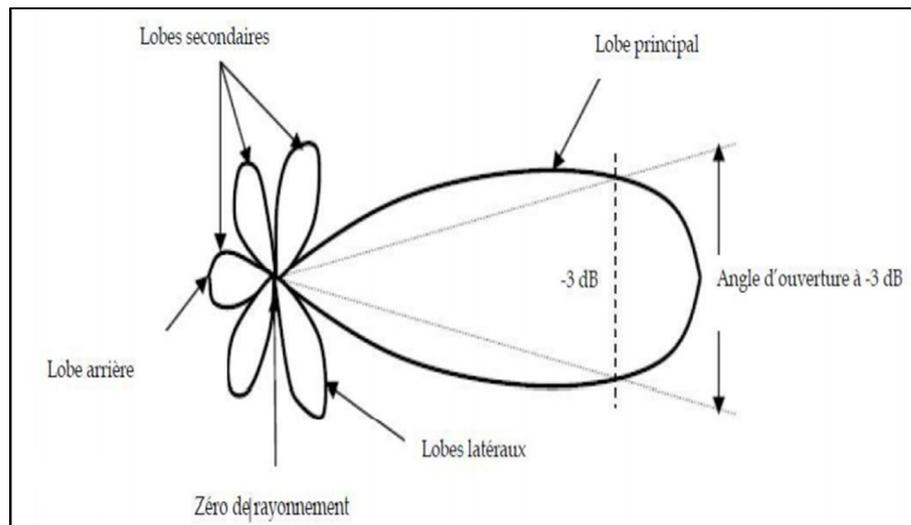


Figure 1. 1 .Diagramme de rayonnement d'une antenne directive.

- **D'un lobe principal :** C'est le lobe de rayonnement qui contient l'énergie maximale et la direction maximale du rayonnement.
- **Des lobes secondaires :** Tous les autres lobes sont appelés lobes secondaires. Ils représentent les directions nocives du rayonnement de l'antenne. Le niveau du lobe latéral est généralement exprimé comme le rapport de la densité de puissance du lobe au lobe principal. Ce rapport est appelé le niveau du lobe latéral, exprimé en dB.
- **D'un lobe arrière (rayonnement arrière):** C'est le lobe secondaire présent dans la direction opposée (à 180°) du lobe principal, le rapport avant/arrière est le rapport en dB de la puissance rayonnée dans la direction du maximum de rayonnement par rapport celle rayonnée dans la direction opposée. Dans la plupart des systèmes antennaires, les lobes secondaires sont indésirables. Une bonne conception d'antenne doit permettre de minimiser les niveaux de lobes secondaires [3].

2.4 Directivité :

La directivité d'une antenne caractérise la manière dont cette antenne concentre son rayonnement dans certaines directions de l'espace. La directivité d'une antenne dans une direction $D(\theta, \varphi)$ est définie comme suit :

$$D_o(\theta, \varphi) = \frac{U(\theta, \varphi)}{U_{iso}} \quad (1.5)$$

Avec :

$U(\theta, \varphi)$: Intensité de rayonnement de l'antenne considérée.

U_{iso} : Intensité de rayonnement d'une antenne isotrope, elle est donnée par :

$$U_{iso} = \frac{P_{ray}}{4\pi} \quad (1.6)$$

P_{ray} : Puissance rayonnée de l'antenne.

La directivité maximale que l'on appelle souvent et simplement directivité est donnée par :

$$D_0 = \text{MAX}D(\theta, \varphi) \quad (1.7)$$

La directivité, grandeur sans dimension, est généralement exprimée par sa valeur en décibels

$$D(\theta, \varphi) |_{db} = 10 \log D_0 \quad (1.8)$$

Une antenne isotrope rayonne uniformément la même densité de puissance quel que soit la direction.

2.5 Gain

Le gain $G(\theta, \varphi)$ d'une antenne dans une direction (θ, φ) est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée $P(\theta, \varphi)$ sur la puissance que rayonnerait une antenne (P_a) [3].

Dans le cas d'une antenne isotrope sans pertes, la relation est donnée par :

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi * P \frac{(\theta, \varphi)}{P_a} \quad (1.9)$$

2.6 Polarisation

La polarisation d'une onde TEM est le type de trajectoire que décrit l'extrémité du champ E en cours du temps dans le plan transverse. Il existe trois types de polarisation :

2.6.1 Polarisation linéaire :

Si le vecteur E ne change pas de direction avec la distance pendant la propagation, alors on dit que nous avons une polarisation linéaire. L'angle formé par la direction du vecteur E et le sol peut avoir n'importe quelle valeur, y compris certaines valeurs spécifiques: 0° = polarisation horizontale, 90° = polarisation verticale. Pour d'autres, nous avons une polarisation « inclinée ». L'onde polarisée obliquement peut être divisée en deux ondes, l'une est la polarisation H et l'autre est la polarisation V.

2.6.2 Polarisation Circulaire et elliptique :

Si lors de la propagation, le vecteur E change de direction de manière synchrone avec la longueur d'onde, on peut dire que l'on a une polarisation "elliptique" (la figure décrit la

direction du vecteur E dans la longueur d'onde). Si le petit axe de l'ellipse est nul, cela signifie une polarisation linéaire. Si les deux axes sont égaux, nous avons une polarisation circulaire. La polarisation elliptique peut être « droite » ou « gauche », selon que le vecteur est tourné à droite ou à gauche lors de la propagation (en observant les fluctuations). Tous ces éléments sont résumés dans la figure 1.2.

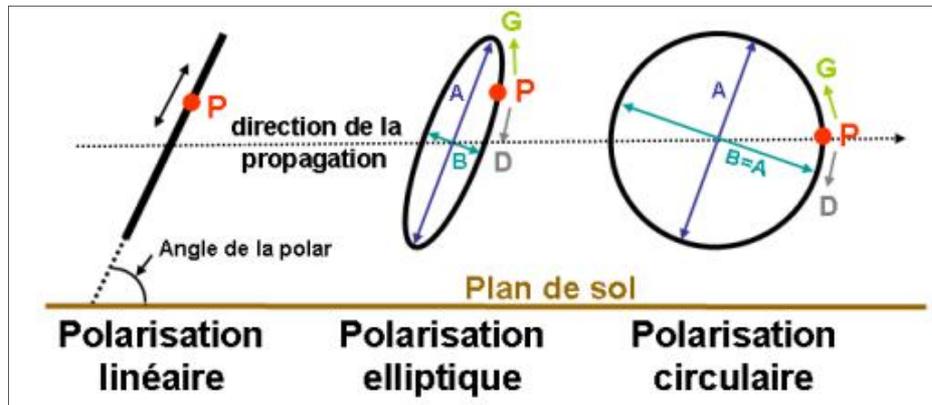


Figure 1. 2 .Différentes polarisations des ondes EM.

2.7 Angle d'ouverture

L'angle d'ouverture est l'angle que font entre elles les deux directions du lobe principal selon lesquelles la puissance rayonnée est égale à la moitié de la puissance rayonnée dans la direction de rayonnement maximal. La figure 1.3 présente un exemple de présentation diagramme de rayonnement en coordonnées cartésiennes.

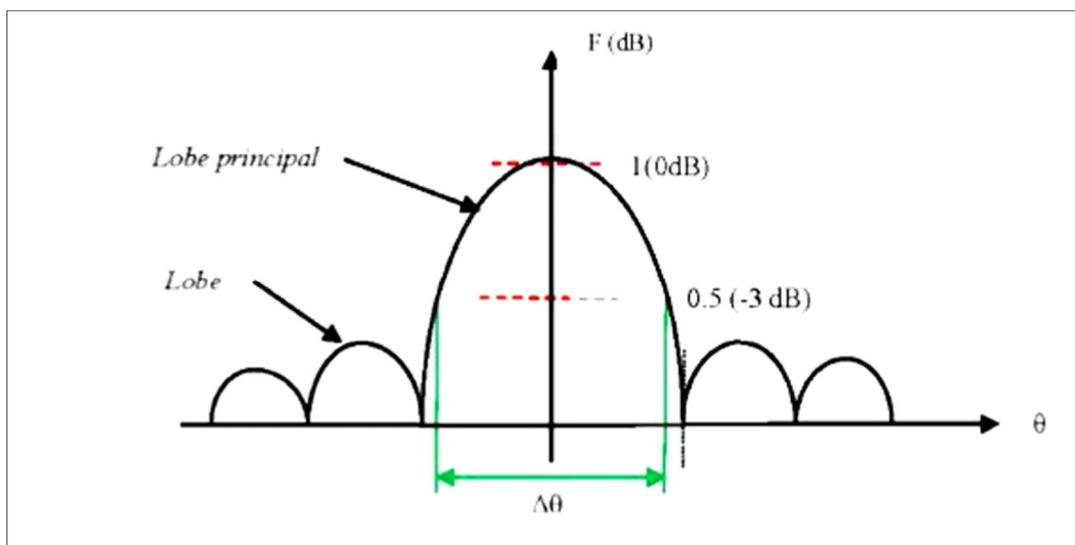


Figure 1. 3 .Diagramme de rayonnement bidimensionnel en coordonnées cartésiennes.

L'angle $\Delta\theta$ présenté sur ce diagramme est l'angle d'ouverture, lorsque l'antenne présente un lobe principal assez fin, la plus grande partie de la puissance rayonnée est à l'intérieur des deux directions à (-3dB). Donc l'angle d'ouverture nous donne une idée assez précise sur la finesse du lobe et la qualité du rayonnement [2].

2.8 Ouverture rayonnante et Rendement

L'ouverture rayonnante d'une antenne est la surface géométrique rayonnante de cette antenne. C'est aussi la surface qui capte l'énergie des ondes électromagnétiques transmises. La puissance rayonnée par l'antenne est généralement différente de la puissance d'alimentation de l'antenne. On définit alors le rendement d'une antenne comme étant le rapport entre la puissance totale P qu'elle rayonne et la puissance d'alimentation de cette antenne [2]

$$\eta = \frac{P}{Pa} \quad (1.10)$$

2.9 Bande passante :

La bande passante d'une antenne correspond à la bande de fréquence où le transfert d'énergie de l'alimentation vers l'antenne (ou de l'antenne vers le récepteur) est maximal. La bande passante peut être définie en fonction du coefficient de réflexion (il n'y a pas de critères précis pour la limite). Un critère typique est d'avoir un coefficient de réflexion inférieure à -10 dB (ou encore un $ROS \leq 2$) sur la bande passante comme nous pouvons le voir sur **la Figure 1.4**.

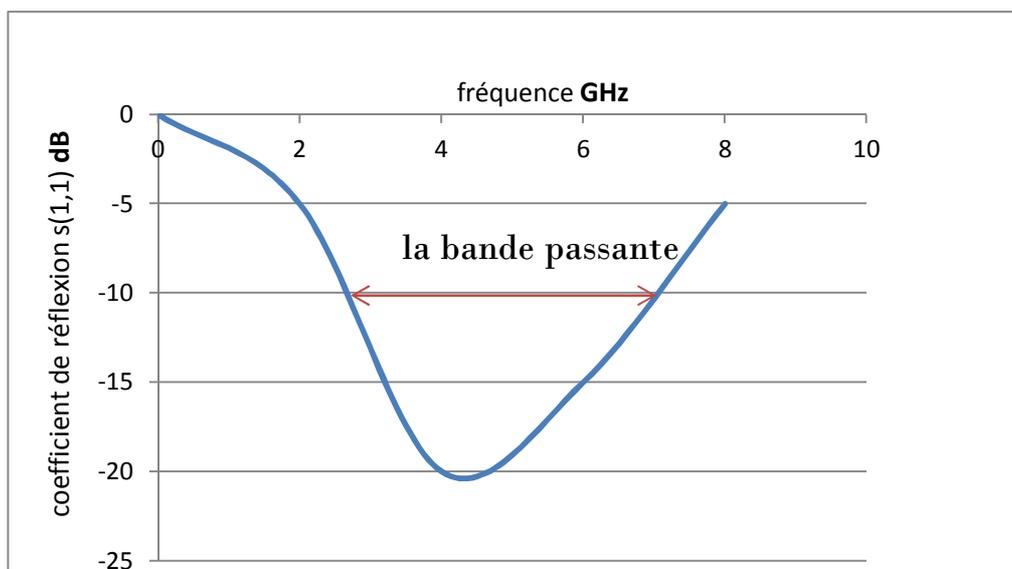


Figure 1.4 . La bande passante

3 Types d'antennes

Il existe plusieurs types d'antennes selon la géométrie, le gain, la forme du faisceau et la bande passante. On peut les classer comme suite:

- **Les formes ou géométries :**

- Antennes filaires : dipôle, boucle, spirale.
- Antennes à ouverture : cornet, fente.
- Antennes imprimées : patch, dipôle imprimé, spirale.

- **Le gain :**

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

- **La forme de faisceau :**

- Omnidirectionnelle : dipôle.
- Faisceau étroit : planaire.
- Faisceau large : antenne réseau.

- **La largeur de bande :**

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

3.1 Antennes cornets

Une antenne cornet est une antenne de forme cylindrique, conique ou pyramidale employée pour des liaisons directes ou comme antenne source pour éclairer un réflecteur parabolique. Si on veut rayonner dans l'espace libre une onde électromagnétique guidée par un guide d'onde de forme rectangulaire, il faut juste laisser l'extrémité de ce dernier ouverte pour que l'onde se propage [4].

Le problème qui se pose est qu'une fraction de l'énergie transmise est rayonnée, tandis que la majeure partie est réfléchi à l'ouverture du guide. La cause de ce phénomène est la rupture d'impédance d'onde du guide et de l'espace libre qui conduit à la réflexion de la quasi-totalité

de l'énergie incidente. Pour pallier à ce problème, il faut prévoir une zone transitoire entre le guide et l'espace tout en augmentant les dimensions du premier [4].

Les antennes cornets sont encore largement utilisées dans le domaine des micro-ondes, en particulier dans les bases de mesures, les sources primaires des réflecteurs paraboliques et dans des applications qui nécessitent une large bande passante. Les avantages des antennes cornets sont la pureté de polarisation qui permet son utilisation pour caractériser la polarisation d'autres antennes, sa large bande passante et son gain important. Malheureusement, ces antennes ont des inconvénients résumés par son encombrement dû au manque d'espace surtout dans les appareils de communication (téléphone cellulaire) et son poids [4].

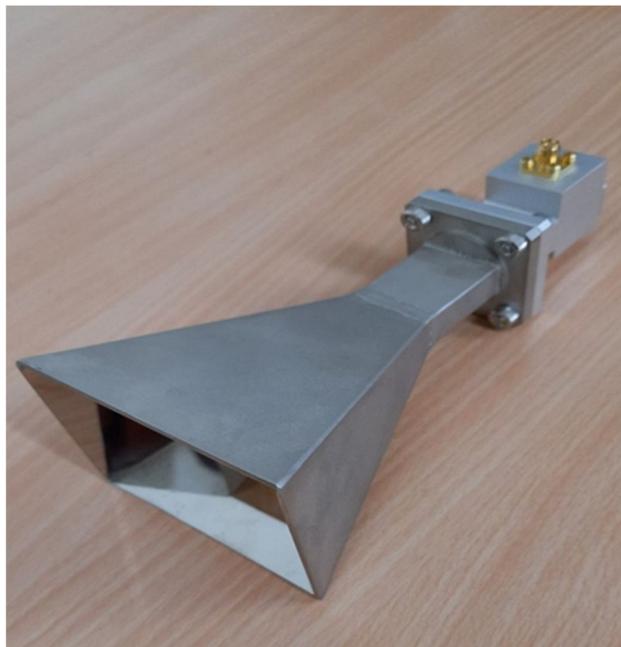


Figure 1. 5 . Antenne cornet.

3.2 Antennes filaires

Une antenne monopole est constituée d'un brin conducteur en forme de fil ou de tige, souvent placé au-dessus et perpendiculairement d'une surface conductrice, constituant le plan de masse. Le signal d'excitation (en mode d'émission) ou la tension de sortie (en mode de réception), se situent entre l'extrémité inférieure du monopole et le plan de masse. La fréquence de résonance est inversement proportionnelle à la longueur du conducteur. En plaçant à sa base une charge, par exemple une capacité variable, il sera possible de faire varier la longueur électrique du monopole et ainsi de modifier sa fréquence de fonctionnement [5].

Une antenne dipôle est constituée de deux conducteurs métalliques, en forme de fil ou de tige, reliés aux deux bornes de l'émetteur. Ces deux brins conducteurs peuvent être en ligne, parallèles (partiellement), à angle droit ou quelconque, égaux ou inégaux, libres ou réunis (par exemple une boucle). L'alimentation est le plus souvent placée au centre de la structure ce qui conduit à un système symétrique. Pour ce type d'antennes, la reconfiguration peut être réalisée grâce à des changements de la longueur des éléments conducteurs via l'utilisation d'éléments locaux tels que des diodes PIN, des varactors, ou des MEMS, etc [5].

Pour les antennes dérivées de l'antenne dipôle, telles que les antennes Yagi-Uda, les antennes log-périodiques, etc. La reconfiguration peut être obtenue par l'ajustement des éléments discrets les composant [6]. Une antenne hélice est une antenne constituée d'un fil enroulé (type solénoïde) dont une extrémité est masquée par un écran métallique, le plan de masse. La ligne d'alimentation est connectée entre le bas de l'hélice et le plan de masse. La fréquence opérante de l'antenne hélice est fonction des dimensions et de l'espacement entre les spires. Cela permet d'offrir des possibilités de reconfiguration en fréquence. En outre, la longueur de la bobine détermine la directivité de l'antenne et son gain permettant alors d'obtenir une combinaison de reconfiguration en fréquence et en diagramme de rayonnement [7].

Une antenne spirale est constituée d'un ou plusieurs bras en forme de spirale. Il existe plusieurs variantes comme la spirale carrée, la spirale logarithmique, etc. Les caractéristiques de l'antenne dépendront de l'espacement entre les spires, de la largeur des bras, du rayon intérieur et du rayon extérieur [8]. Un placement judicieux de composants actifs permet de modifier la géométrie initiale et d'obtenir des possibilités de reconfiguration.

3.3 Antennes à fente :

Une antenne à fente est composée d'une surface métallique, généralement une plaque plane, avec un trou ou une fente. L'alimentation est placée au milieu de la fente qui rayonne de façon semblable à une antenne dipôle. La forme et la taille de la fente déterminent les caractéristiques de rayonnement. Comme pour un dipôle, la reconfiguration d'une antenne à fente peut donc être réalisée en modifiant la longueur des encoches à l'aide de diodes PIN, varactors, MEMS [9].

4 Antenne imprimée ou patch :

Le concept d'antennes imprimées est apparu dans les années 50, mais ce n'est que dans les années 70 que les premières réalisations apparaissent, essentiellement réservées à des

applications militaires, et les années 90 ne sont pas vraiment passées au stade industriel. Deux avantages principaux conduiront à un développement très important de telles antennes: leur coût de mise en œuvre est faible, et elles ont des capacités d'intégration. Ils sont maintenant intégrés dans de nombreux appareils électroniques et sont le type d'antenne préféré aux fréquences micro-ondes dans les systèmes de communication intégrés modernes.



Figure 1. 6 . Antenne imprimée

4.1 Structure d'antenne imprimée :

Généralement, une antenne imprimée est constituée d'un plan de masse, d'une ou plusieurs couches de substrats avec permittivités identiques ou différentes (ζr) [10].

La surface contient des éléments rayonnants de toutes formes géométriques (rectangulaires, circulaires, fendues ou plus fines). Il existe plusieurs mécanismes d'excitation qui peuvent amener le diagramme de rayonnement à avoir une polarisation linéaire ou circulaire [10].

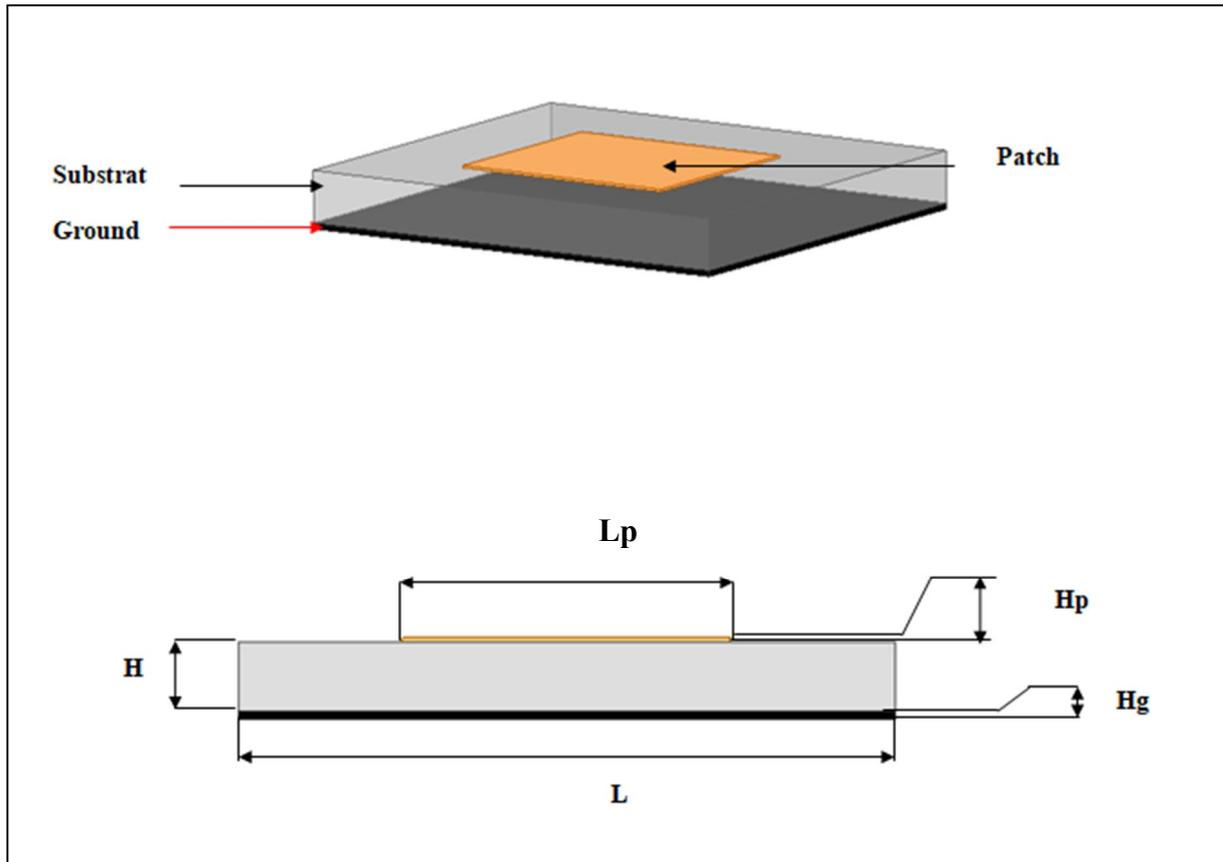


Figure 1. 7 . Structure de base d'une antenne patch

Où:

H : hauteur du **substrat**

L : largeur du **substrat** et de la masse (**Ground**)

Hg : hauteur de la masse

Hp : hauteur du **patch**

Lp : largeur de **patch**

4.2 Principe de fonctionnement :

Dans sa configuration d'origine, une sonde de courant connectée entre le patch rayonnant et le plan de masse est utilisée pour contrôler le comportement de l'antenne, ce qui se traduira par l'apparition et la répartition de la charge établie entre le plan de masse et le sol au-dessus et au-dessous de l'élément Substrat.

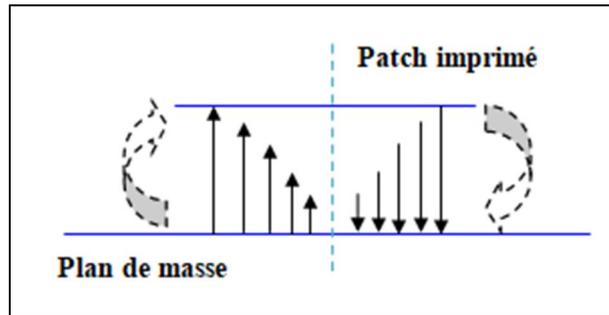


Figure 1. 8. Rayonnement d'une antenne patch rectangulaire.

Le champ magnétique existant entre le bord du patch et le plan de masse va déborder et aider à générer le champ électromagnétique rayonné: le champ magnétique maximum généré par le bord séparé par L et le champ magnétique de phase opposée aura tendance à s'ajouter de manière constructive et optimale, et générer un rayonnement inscrit sur le plan YZ. Par conséquent, ces deux arêtes sont appelées arêtes radiales.

5 Types d'alimentation :

Les antennes patch peuvent être excitées par plusieurs techniques, ces techniques peuvent être divisées en deux catégories : avec Contact et sans contact. Dans le premier type, l'antenne est alimentée en utilisant un élément de contact telles que les lignes micro-ruban et les câbles coaxiaux. Dans le second type (non Contact), l'alimentation est fournie par la fente ou le couplage de proximité. Dans cette dernière catégorie le transfert de la puissance entre la ligne microruban et l'élément rayonnant de l'antenne est garanti le couplage de champ électromagnétique

5.1 Alimentation par ligne micro-ruban :

Dans cette méthode d'alimentation, la ligne micro-ruban (généralement d'impédance de 50Ω) est connectez directement à l'élément rayonnant, la ligne micro-ruban ce trouve dans le même plan que le patch.

Plus la longueur du ruban conducteur est longue plus le patch est petit. L'avantage de cette alimentation est qu'elle est gravé sur le même substrat ce qui fournit une structure plane. C'est la technique la moins coûteuse et plus la simple à mettre en œuvre [12].

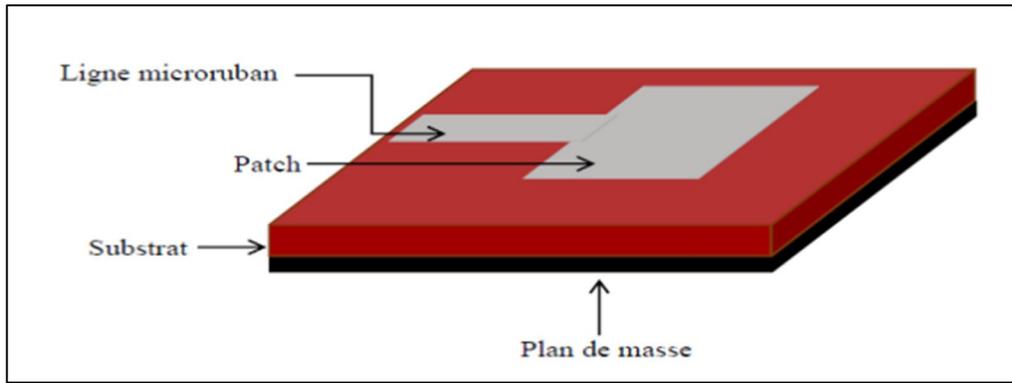


Figure 1. 9. Alimentation par ligne Micro-ruban

5.2 Alimentation par sonde coaxial

L'alimentation par câble coaxial est très utilisée dans les antennes micro-ondes à cause de sa simplicité de mettre en œuvre et sa facilité d'adaptation d'impédance. Le câble coaxial se compose de deux conducteurs (externe et interne). Le conducteur externe est relié au plan de masse tandis que le conducteur intérieur est relié au patch rayonnant. Mais ce type d'alimentation présente une bande passante étroite et une grande difficulté de la modéliser, surtout pour des substrats épais [13].

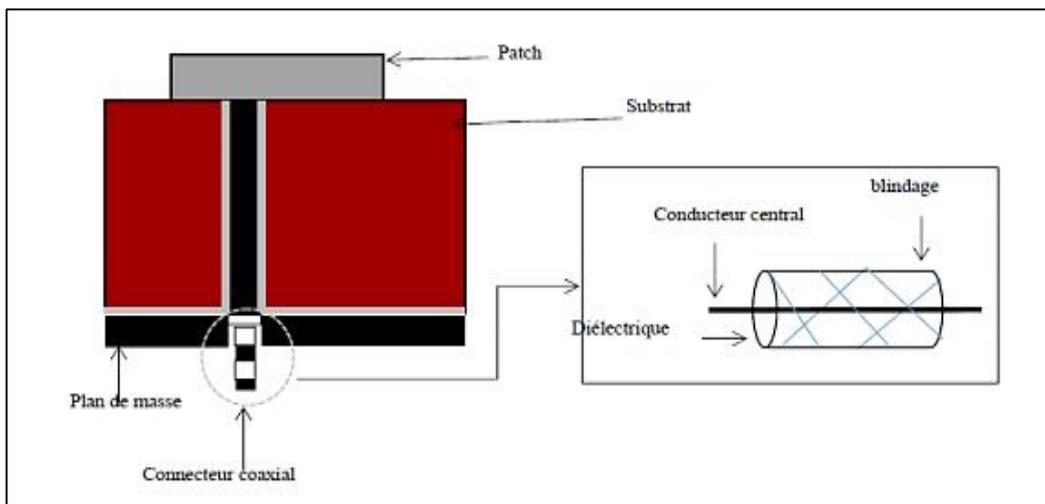


Figure 1. 10. Alimentation par câble coaxial

5.3 Alimentation par couplage électromagnétique

L'antenne est constituée de deux substrats diélectriques entre lesquels est située la ligne d'alimentation. L'élément rayonnant est imprimé sur le substrat supérieur. L'excitation se fait par couplage électromagnétique. Cette technique permet d'améliorer la bande passante mais elle est difficile à réaliser [11].

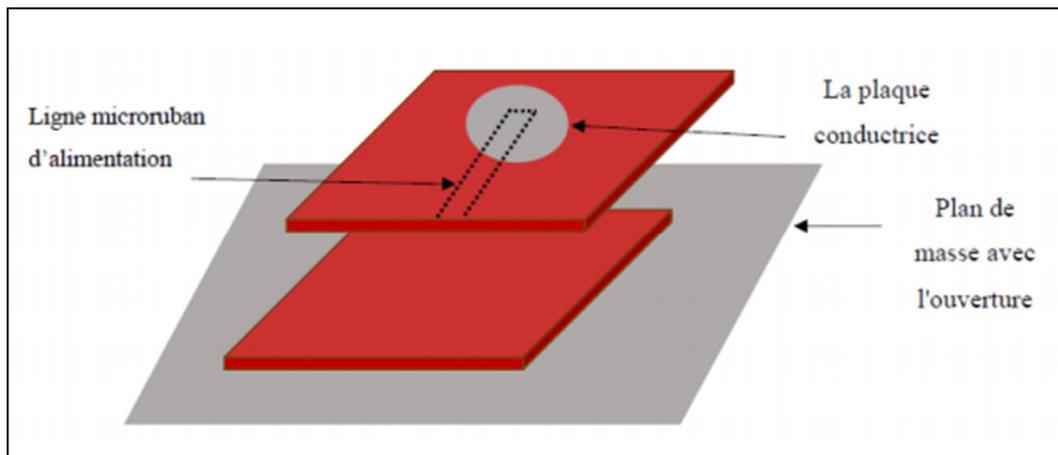


Figure 1. 11. Alimentation par proximité.

5.4 Alimentation à travers d'une ouverture au plan de masse

L'alimentation par ouverture est la plus difficile à mettre en œuvre, en plus elle présente une bande passante étroite. Cependant elle présente des rayonnements parasites faibles. La géométrie est constituée de deux substrats, de permittivités différentes, séparés par un plan de masse sur lequel l'ouverture est faite. Une ligne de transmission est disposée sur le substrat inférieur (permittivité élevée) alors que le patch est disposé sur le substrat supérieur (permittivité faible). Ce patch est alimenté par la ligne micro-ruban à travers l'ouverture du plan de masse. Pour aboutir l'adaptation d'impédance, on doit contrôler la taille de la fente et/ou la taille de la ligne de transmission [13].

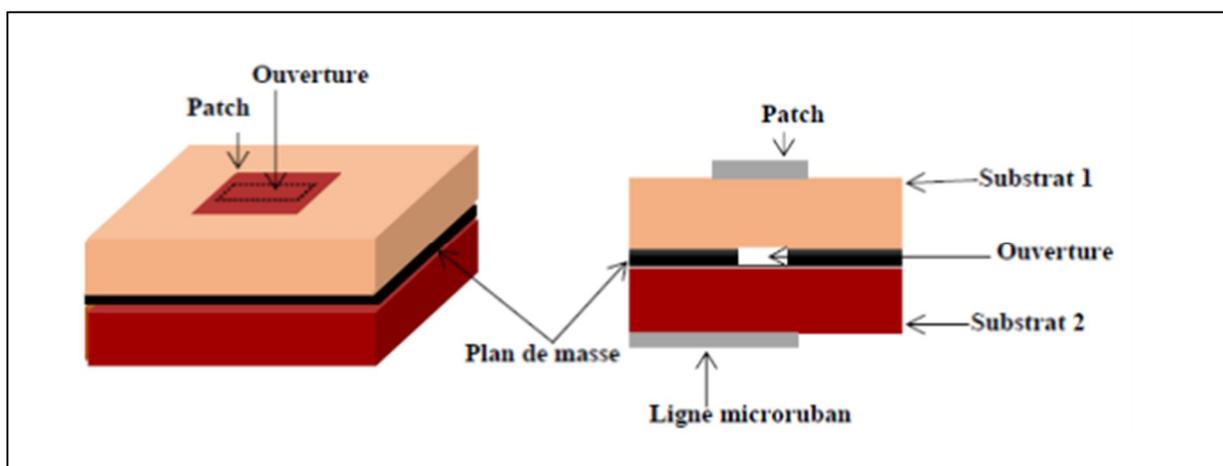


Figure 1. 12. Alimentation au travers d'une ouverture au plan de masse.

6 Techniques de miniaturisation :

La miniaturisation d'une antenne patch consiste à réduire la taille globale de l'antenne tout en conservant ses performances telles que le diagramme de rayonnement, coefficient de réflexion et gain. De nombreuses techniques ont été utilisées pour la miniaturisation des antennes, nous citons [14]:

- ✓ **Modification de la géométrie :**
 - Le repliement de l'élément rayonnant.
 - La réduction de la taille d'antenne patch jusqu'à 50%.
- ✓ **Modification de la forme de l'élément rayonnant :**
 - En forme triangulaire.
 - En forme de nœud-papillon.
 - Méandres verticaux ou repliement de la structure
 - Méandres latéraux ou verticaux très étroits.
- ✓ **Utilisation d'un substrat à haute constante diélectrique.**
- ✓ **Ajout des courts circuits verticaux entre l'élément rayonnant et le plan de masse en deux façons**
 - Court-circuit plain.
 - Court-circuit languette
- ✓ **Ajout de résonateurs parasites :**
 - Juxtaposés.
 - Juxtaposés avec un ajout de court-circuit.
 - Superposés.
 - Superposés avec un ajout de court-circuit.
- ✓ **Insertion de fentes dans l'élément rayonnant pour :**
 - Fente demi-onde (non-débouchant).
 - Fente quart d'onde (débouchant).
 - L'allongement des longueurs électriques.

- La création de nouveaux résonateurs.
- ✓ **Insertion d'une charge capacitive insérée :**
 - En bout d'élément.
 - Dans l'élément.
- ✓ **Utilisation des charges capacitif et ou inductif réalisé par des composantes localisées.**
- ✓ **Modification du plan de masse (DGS)**

7 Modification de plan de masse (Defected Ground structure) :

7.1 Description de la technique :

La structure à défaut dans le plan de masse (pour DGS: Defected Ground Structure en anglais) est un défaut de configuration périodique ou apériodique gravé dans le plan de masse [15]. Le principe de la méthode DGS consiste à employer des fentes pour modifier la distribution de courant sur le plan de masse, en raison de la dimension du DGS et de sa position relative, entraînant l'altération des caractéristiques de transmission.

La DGS présente des caractéristiques différentes de leurs géométries gravées au plan de masse. Elle a été largement utilisée dans divers types d'antennes patches par exemple pour la conception des antennes : ultra large bande [16] ou double bande [17].

7.2 Formes variées de la structure DGS

Plusieurs formes des éléments DGS ont été proposée dans la littérature. Ces formes varient d'une simple fente rectangulaire à des configurations plus compliquées [18]. En plus de la forme rectangulaire, on peut trouver dans la littérature un DGS de forme : circulaire, spirale, anneau, en L , en U, en V , hexago, croix et même combinaison de ces formes n. Certaines de ces formes sont illustrées aux figures : 1.13, 1.14 et 1.15 ;

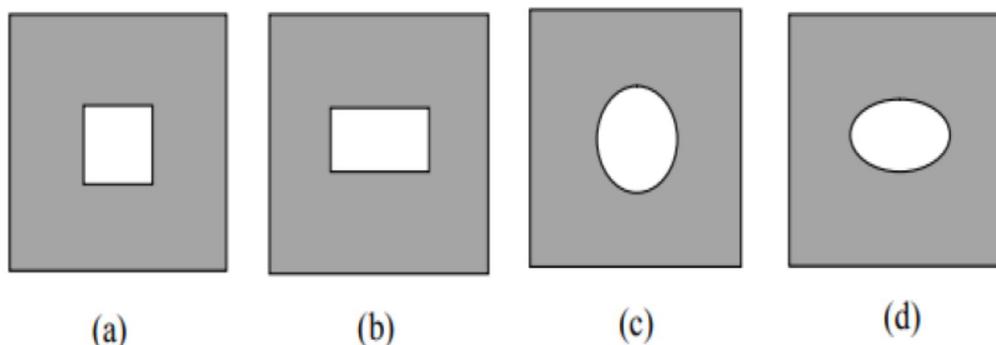


Figure 1. 13. Formes de DGS simple.

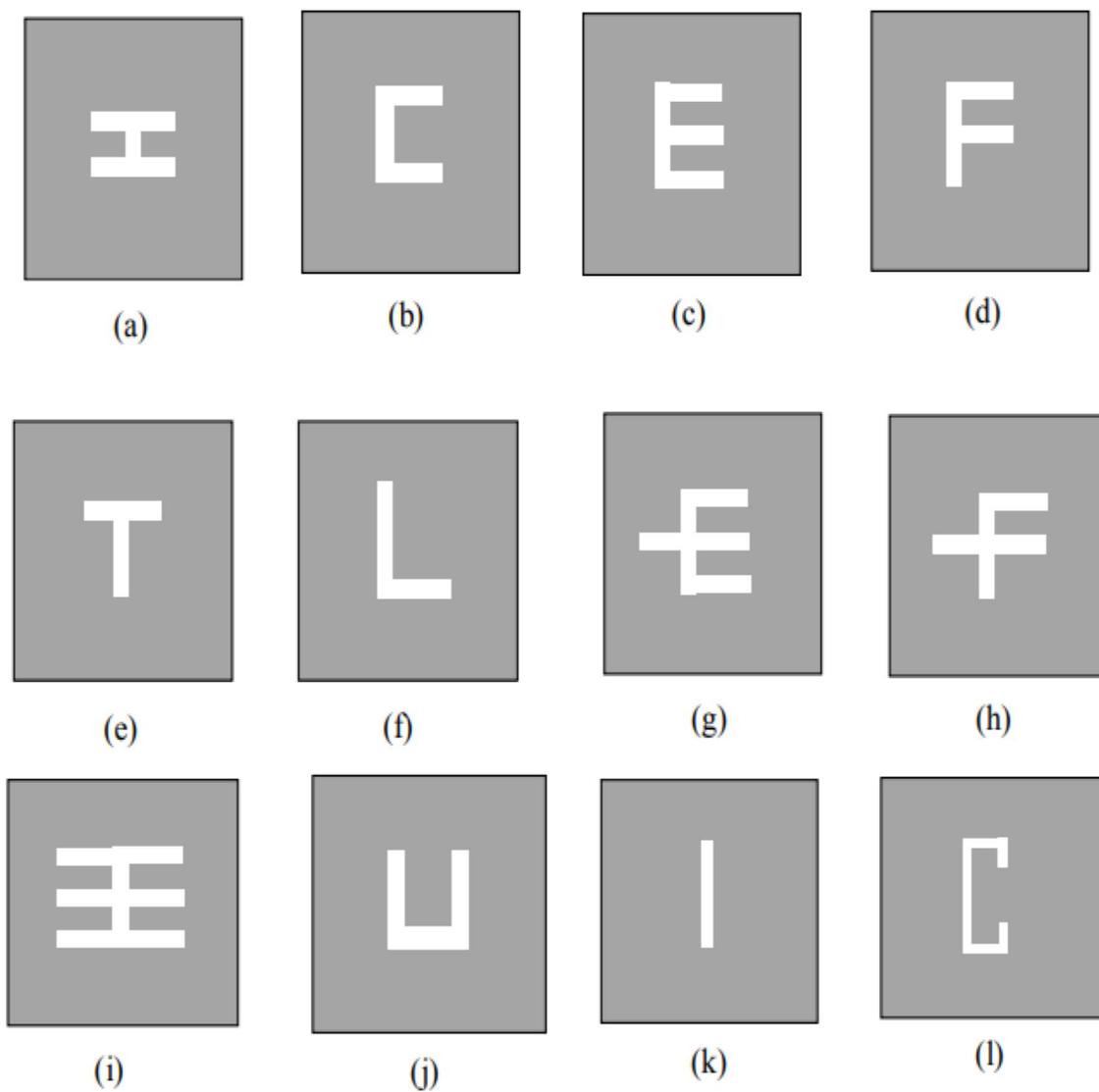


Figure 1. 14. DGS sous formes de lettres.

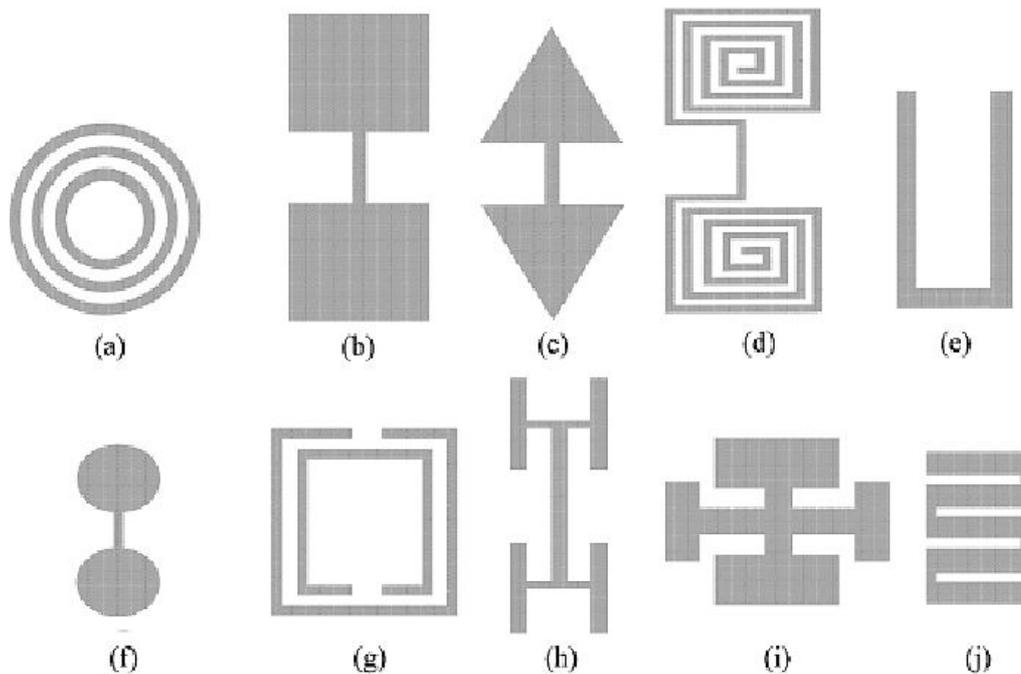


Figure 1. 15. Formes plus complexes des DGS [19]

Ces structures réduisent le champ de rayonnement à polarisation croisée (XP) sans affecter l'impédance d'entrée en mode dominant et les diagrammes de rayonnement Co-polarisés de l'antenne conventionnelle [19].

7.3 Miniaturisation par la technique DGS

Les progrès et la croissance rapides de la technologie sans fil exigent des équipements de communication miniaturisés. De ce fait, les études se sont orientées vers la miniaturisation des antennes patchs en utilisant les structures DGS.

Un problème courant lié à l'antenne patch miniaturisée est un gain et une efficacité médiocres. Par conséquent, nous avons utilisé dans ce mémoire un DGS de forme résonateur à anneau fendu carré (voir Figure 1.16). Ce dernier est gravé dans le plan de masse d'une antenne conventionnelle de 5GHz.

Le But est : (i) la miniaturisation de la taille de l'antenne patch, (ii) générer un comportement bi-bande avec un gain suffisant pour toutes les bandes.

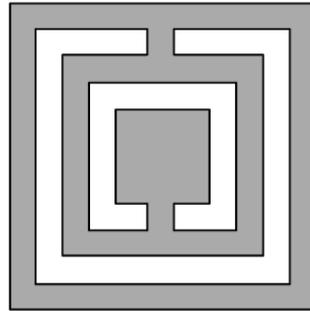


Figure 1. 16. DGS de forme résonateur à anneau fendu carré

8 Conclusion :

Les antennes imprimées ou les antennes patch sont largement utilisées dans les systèmes de réseau sans fil. Dans ce chapitre nous avons donné une description, les mécanismes de fonctionnement, les techniques d'alimentation ainsi que quelques types de miniaturisation d'antenne patch.

De plus, nous avons présenté les différentes formes et types de la technique DGS, en particulier celle de forme résonateur à anneau fendu carré qui sera utilisé dans le chapitre 3 pour la conception d'une antenne multi bande. Le chapitre suivant présente les détails de la conception d'une antenne en utilisant le logiciel HFSS.

CHAPITRE 2 : PRESENTATION DE LOGICIEL

HFSS

1 Introduction :

Le présent chapitre développe les différents aspects de mise en œuvre d'un projet HFSS depuis le dessin de la structure à étudier jusqu'à l'exécution. Les menus et les projets présentés dans ce mémoire sont réalisés dans la version 19.2 de HFSS (High Frequency Structure Simulation).

C'est un logiciel puissant qui peut étudier et simuler des structures complexe en troisdimensions, il est notamment utilisé pour calculer le paramètre S, les fréquences de résonances et aussi la visualisation du diagramme de rayonnement en 3D. En effet c'est un logiciel dédié à la simulation haut fréquence.

2 Présentation du simulateur HFSS :

H.F.S.S « High Frequency Structure Simulator » est un simulateur électromagnétique de haute performance pour les modèles en 3D. Il intègre des simulations, des visualisations et une interface automatisée facile à utiliser pour résoudre rapidement et de façon efficace les problèmes électromagnétiques en 3D. Son code de calcul est basé sur la méthode des éléments finis (méthode fréquentielle), des graphiques performants pour donner à l'utilisateur des résultats et une perspicacité aux problèmes électromagnétiques en 3D.

H.F.S.S peut être utilisée pour calculer des paramètres, les fréquences de résonance et les champs. C'est un outil permettant le calcul du comportement électromagnétique d'une structure.

3 Fenêtre principale de HFSS :

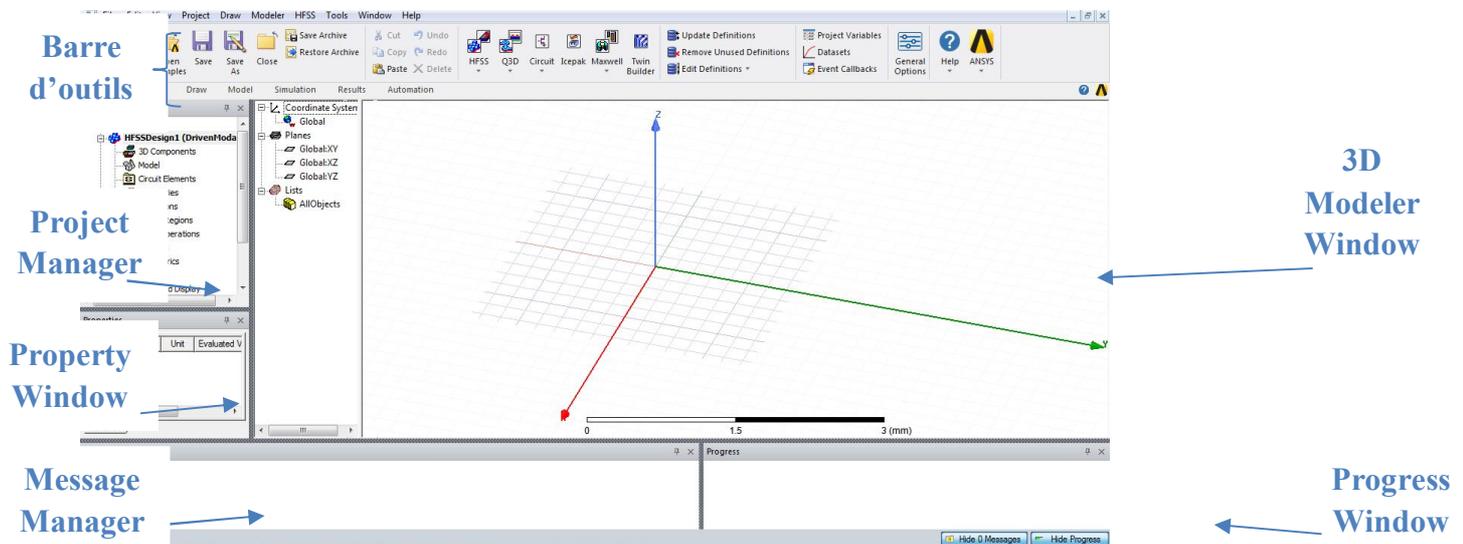


Figure 2. 1.Fenêtre principale de HFSS.

La fenêtre Ansoft HFSS à plusieurs panneaux optionnels:

3.1 Barre d'outils :

C'est une fenêtre contient des boutons qui sont des raccourcis de commande fréquemment utilisés.



Figure 2. 2. Barre d'outils

3.2 Project Manager :

Un gestionnaire de projet qui contient un arbre de conception qui répertorie la structure du projet.

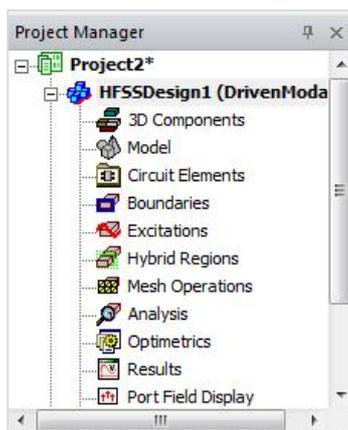


Figure 2. 3. Arbre de conception de structure du projet.

3.3 3D Modeler Window :

Une fenêtre qui contient le modèle du dessin actif, et contient aussi une sous fenêtre ressemble matériaux du modèle.

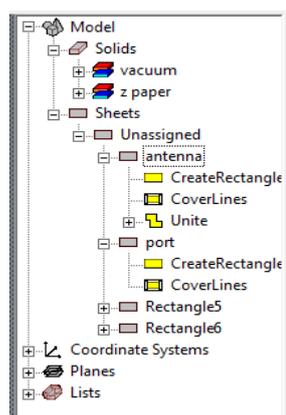


Figure 2. 4. groupe de materiels

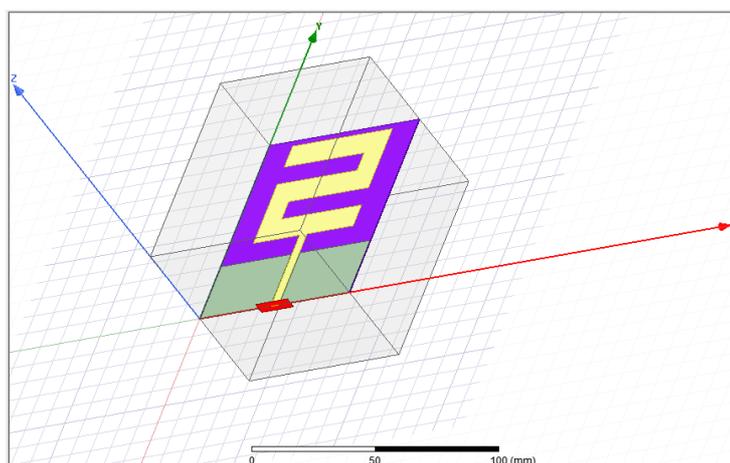


Figure 2. 5.exemple de modèle du dessin actif

3.4 PropertyWindow :

Une fenêtre des Propriétés qui affiche et vous permet de changer les paramètres du modèle ou attributs.

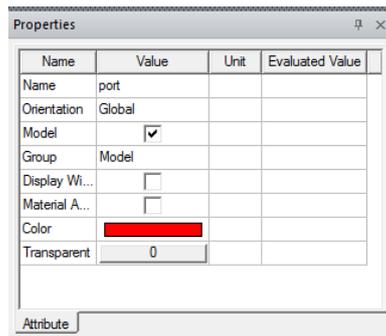


Figure 2. 6. Propriétés d'un attribut

3.5 Message Manager :

Un gestionnaire de messages qui vous permet d'afficher toutes les erreurs ou avertissements qui peuvent avoir lieu avant de commencer une simulation.

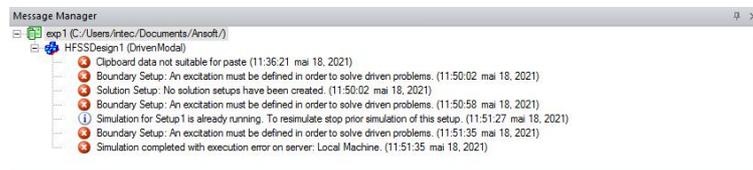


Figure 2. 7. Erreurs ou avertissements sur Message Manager

3.6 Progress Window :

Une fenêtre de progression qui affiche la progression de solution.

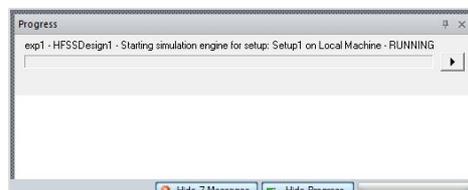


Figure 2. 8. Progression de solution

4 Comment commencer à HFSS

4.1 Comment ouvrir un nouveau projet HFSS :

Cliquez sur le menu **File** puis cliquez **New**, le projet sera ajouté sur **Project Manager**, le projet sera appelé **project x**

On peut utiliser le raccourcis **New** de la **Barre d'outils**.

4.2 Comment sauvegarder un projet :

Sur le menu **File**, cliquer **Save As**, ou cliquer sur le raccourcis **Save As** de la Barre d'outils. La machine le sauvegarde dans le dossier **Ansoft** par défaut. Pour le changer, localiser le chemin dans laquelle vous voulez sauvegarder le projet

Comme **C:\Users\intec\Documents\Ansoft\chapitre2**

Puis en cliquant sur le nom du dossier puis tapant le nom voulu, Cliquer sur Enregistrer.

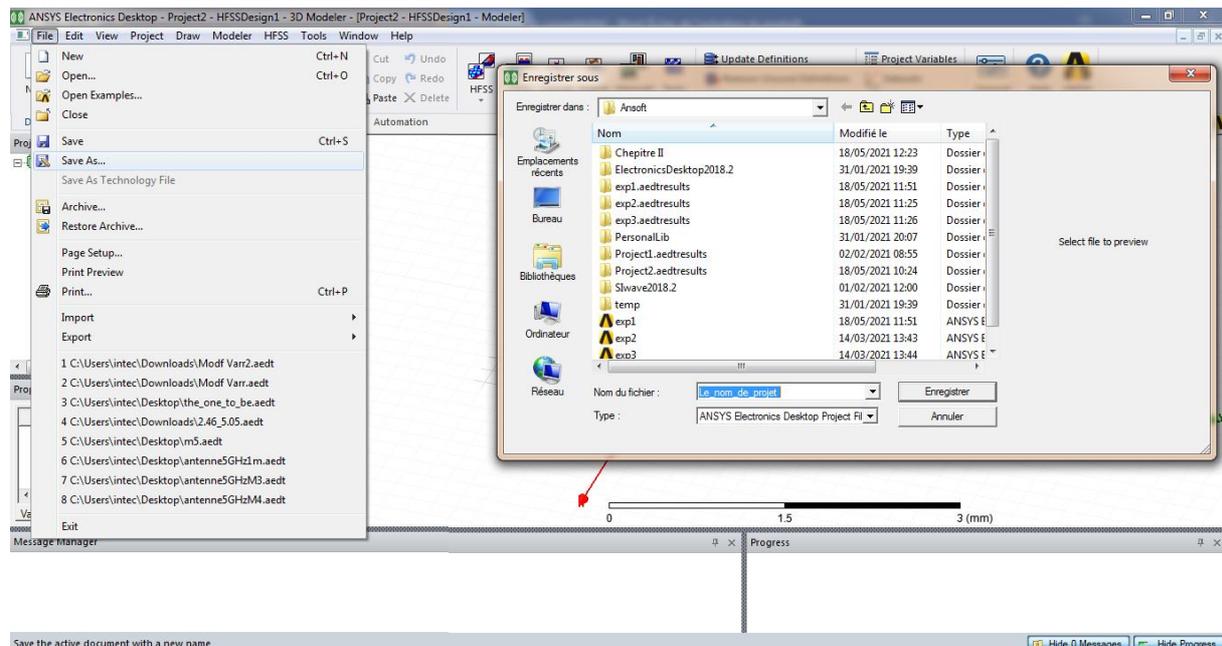


Figure 2. 9. Sauvegarde de projet

4.3 Insérer une conception de HFSS

Sur Project menu cliquer Insert HFSS Design, une nouvelle conception est énumérée dans l'arbre de projet, est appelé Model par défaut.

Ou sur le raccourcis dans la barre d'outils **HFSS**, choisir **HFSS**

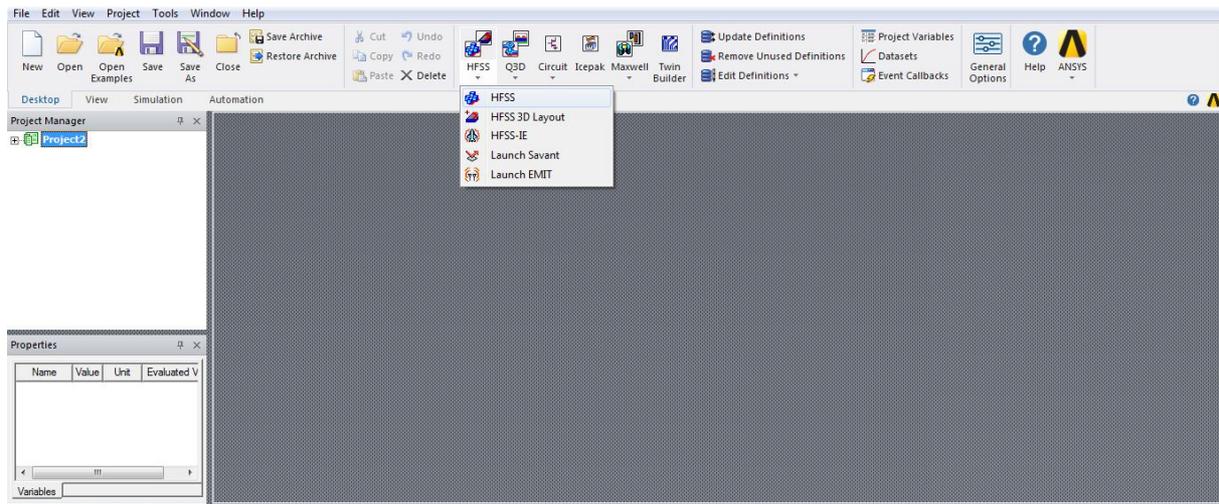


Figure 2. 10. Insertion une conception de HFSS avec raccourcis

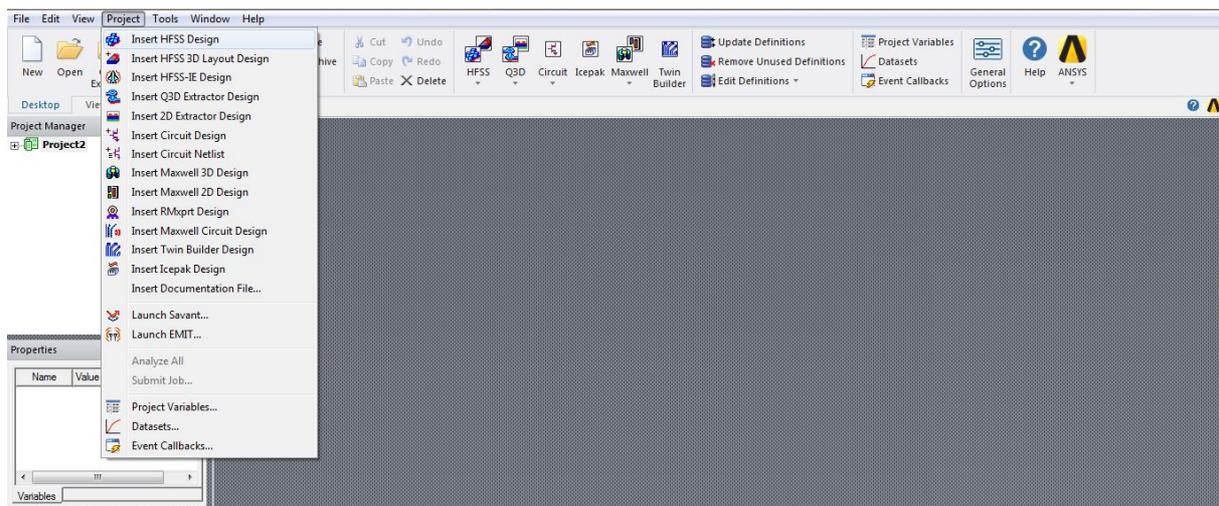


Figure 2. 11. Insertion une conception de HFSS

4.4 Choix de type de solution

Pour créer un modèle, il est nécessaire d'insérer un nouveau projet, puis nous sélectionnons le type de solution à partir du menu **HFSS**, en cliquant sur le bouton "**Solution Type**", la boîte de dialogue de Type de Solution apparaît, on choisit Driven Modal

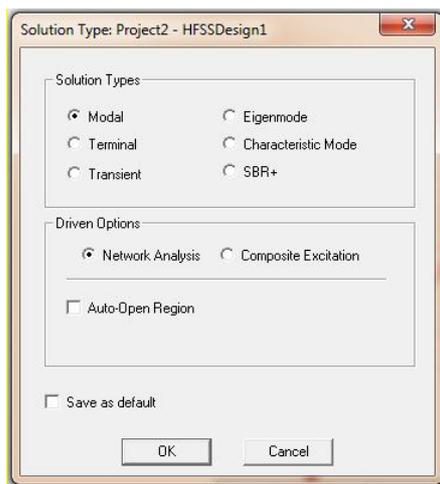


Figure 2. 12. Boite de dialogue de type solution

Dans notre travail, nous utilisons le type "**Driven Modal**" qui nous permet de calculer les paramètres S de mode des structures passives haute fréquence tel que les microrubans, les guides d'ondes et les lignes de transmission excitées par une source.

4.5 L'Arrangement des Unités du Modèle de Mesure

Nous pouvons choisir ou changer les dimensions du modèle à une unité pertinente (mm). Sur le menu "**Modeler**", puis cliquer sur "**Units**", La boîte de dialogue "**Set Model Units**", Dans cette boîte de dialogue, cliquons **mm** à partir de la liste déroulante

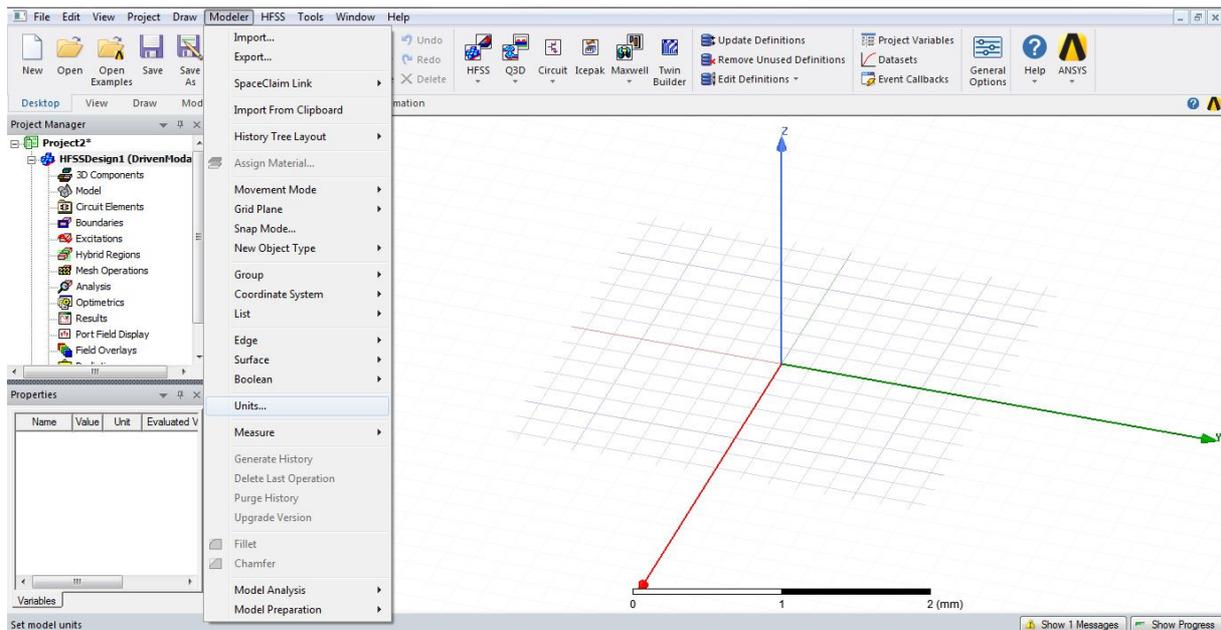


Figure 2. 13. Étapes pour choisir ou changer l'unité de dimensions.

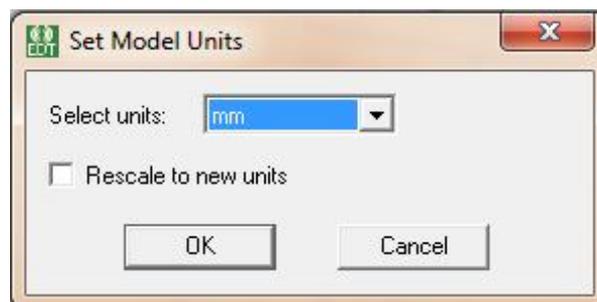


Figure 2. 14. Boîte d dialogue Set model Units.

4.6 Dessiner un modèle :

Pour créer une structure, il faut de dessiner le model utilisant les commandes de l'aspiration de HFSS

Les objets seront placés dans **3D Modeler Window**

On trouve les commandes et les formes à employer sur le menu **Draw**, ou sur la barre d'outils comme des boutons raccourcis, dans la dernière on a toute les opérations qu'on besoin pour dessiner le model.

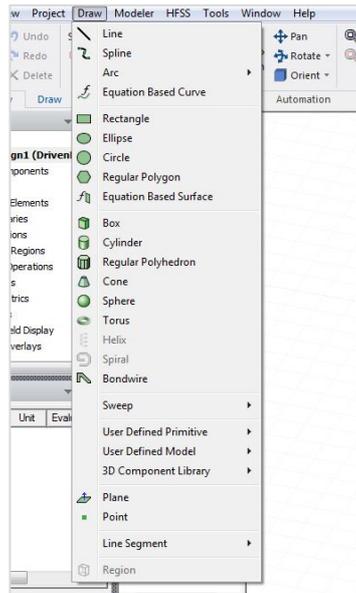


Figure 2. 15. Commande d'aspiration de HFSS sur menu Draw.

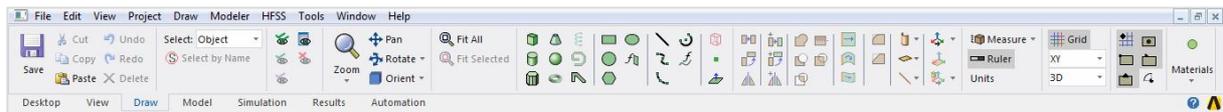


Figure 2. 16. Raccourcis commande de menu Draw.

4.7 Paramètre de modèle

Chaque forme ou attribut les paramètres changeables selon les besoins comme les dimensions, positions, propriétés des matériaux, l'insertion de ces paramètres faites en parallèles avec la création sur le 3D Modeler

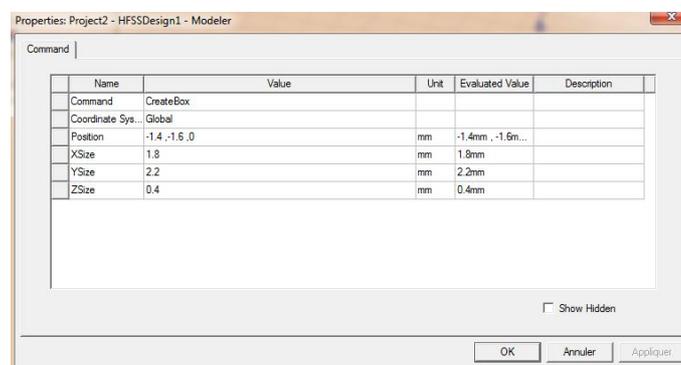


Figure 2. 17. Paramètres d'un box insérer sur 3D Manager

4.8 Insertion variables :

Cette opération nous aide à obtenir plusieurs résultats simultanément sur un seul modèle un ou plusieurs de ces paramètres se varient dans un intervalle précisé

Pour mettre un des paramètre variable on doit l'insérer dans PropertyWindow,boite de dialogue apparait demande le nom, type d'unité,unité,valeur de variable, puis cliquant OK

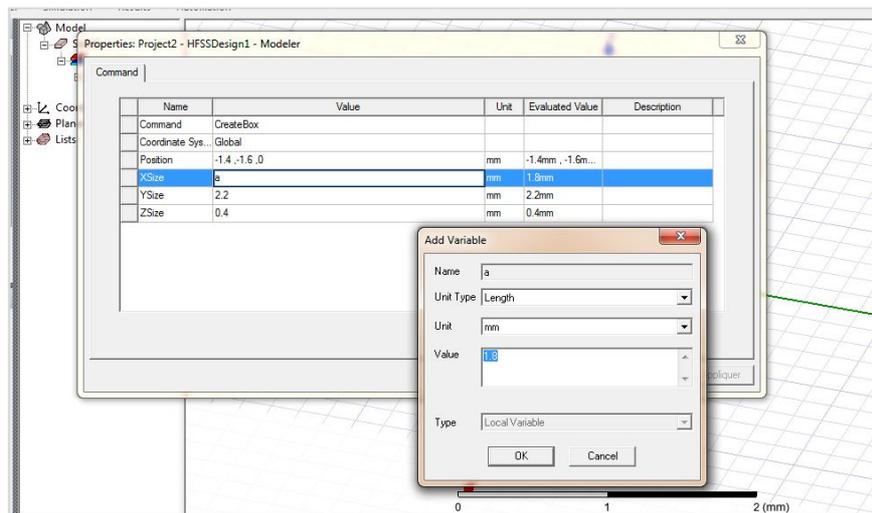


Figure 2. 18. Insertion variable

4.9 Création du substrat

Afin de dessiner substrat, cliquer sur Draw >Box de la barre d'outils, puis dessiner le Box, insérer les dimensions et la positions, matériel, nom et couleur

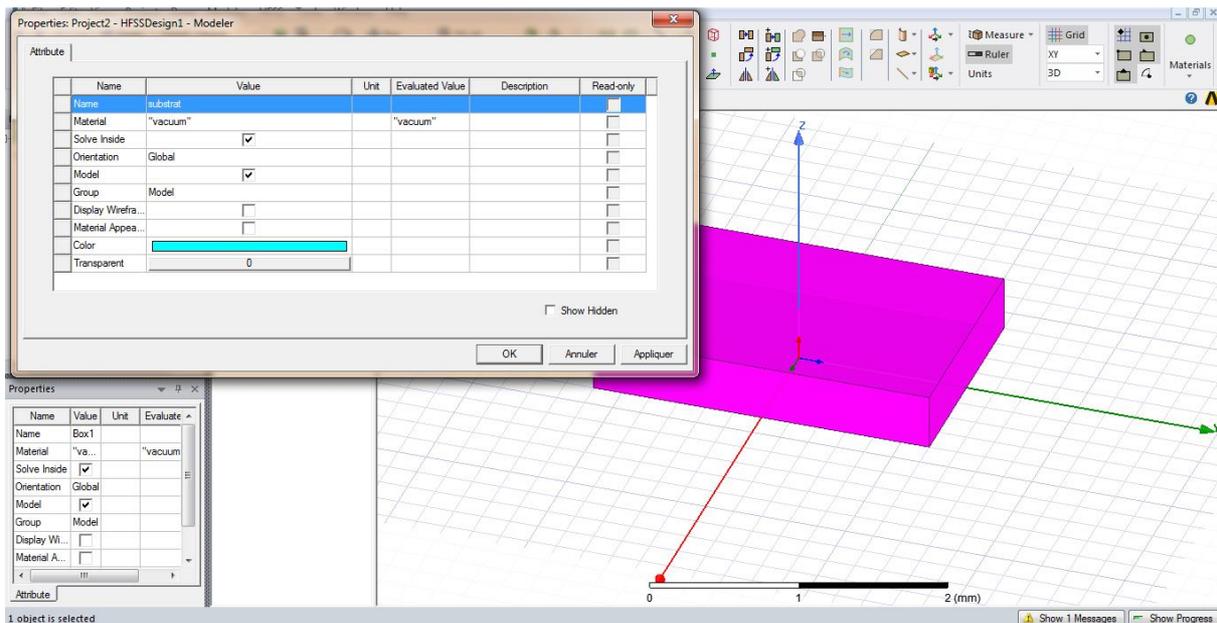
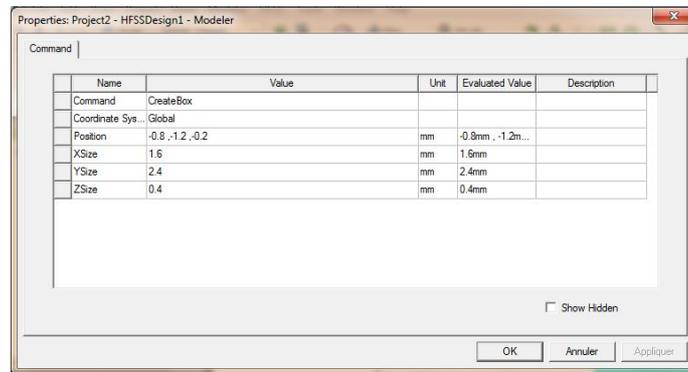


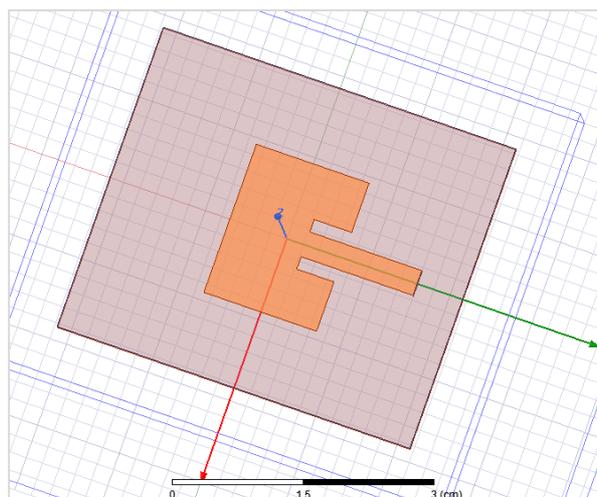
Figure 2. 19. Création de substrat**Figure 2. 20.** Dimensions et position de substrat

4.10 Création de patch :

Pour dessiner un patch cliquer **rectangle** de menu **Draw**, placer la forme et régler les dimensions et la position

A fin de dessiner un model comme la figure il faut placer plusieurs formes pour terminer le model et ont besoin d'utiliser les opérations Unit, Intersect et Subtract objets

Il est nécessaire d'unir une ligne pour alimentation avec le patch comme montré dans la figure suivante :

**Figure 2. 21.** Patch

4.11 Création de Port

Le port doit être au début de ligne d'alimentation. Pour le dessiner il faut premièrement changer le plan de dessin **YZ** et dessiner le rectangle convenable avec dimension et position précisés

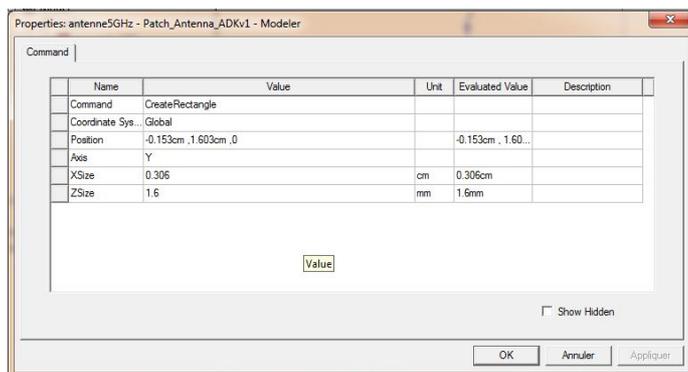


Figure 2. 22. Paramètres de port

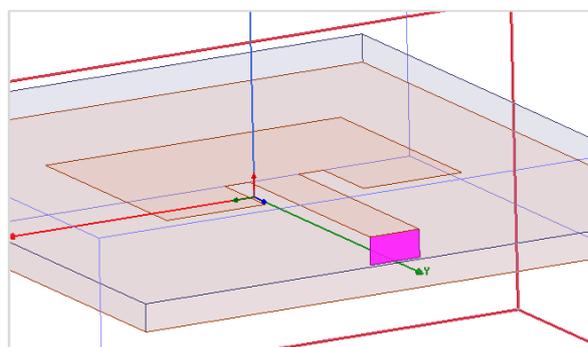


Figure 2. 23. Le port dans le plan

4.12 Création de Masse

Pour le plan de masse, dessiner le rectangle avec les mêmes étapes précédentes, largeur et longueur de la masse sont les mêmes du substrat.

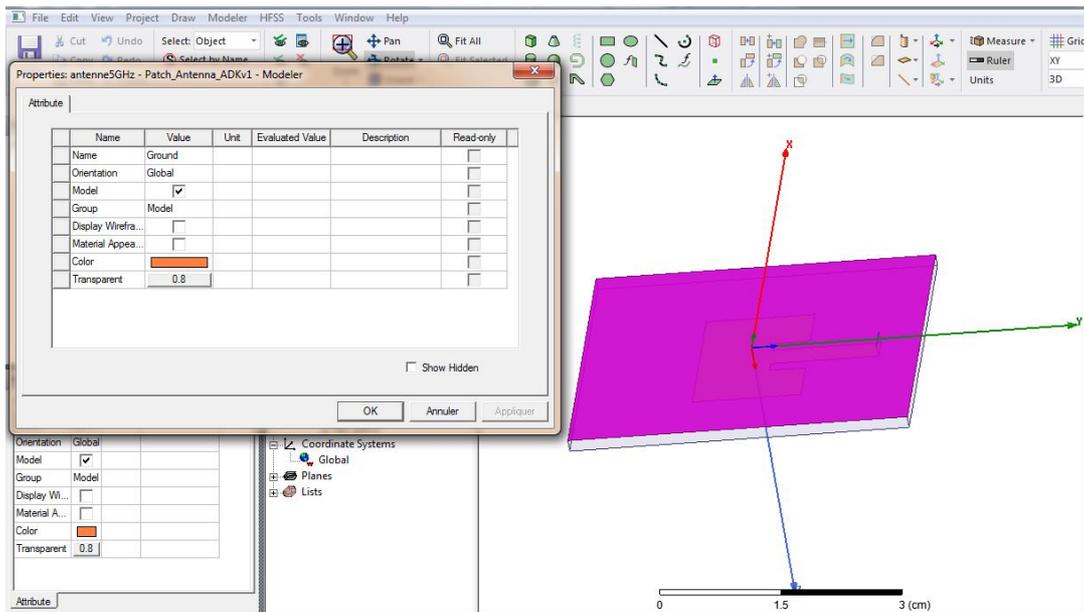


Figure 2. 24. Création de plan de masse

4.13 Add solution Setup

Afin d'obtenir les résultats, il faut donner une fréquence d'utilisation, maximum number of pass, maximum delta S

Allant à le menu **HFSS >analysis setup >add solution setup**

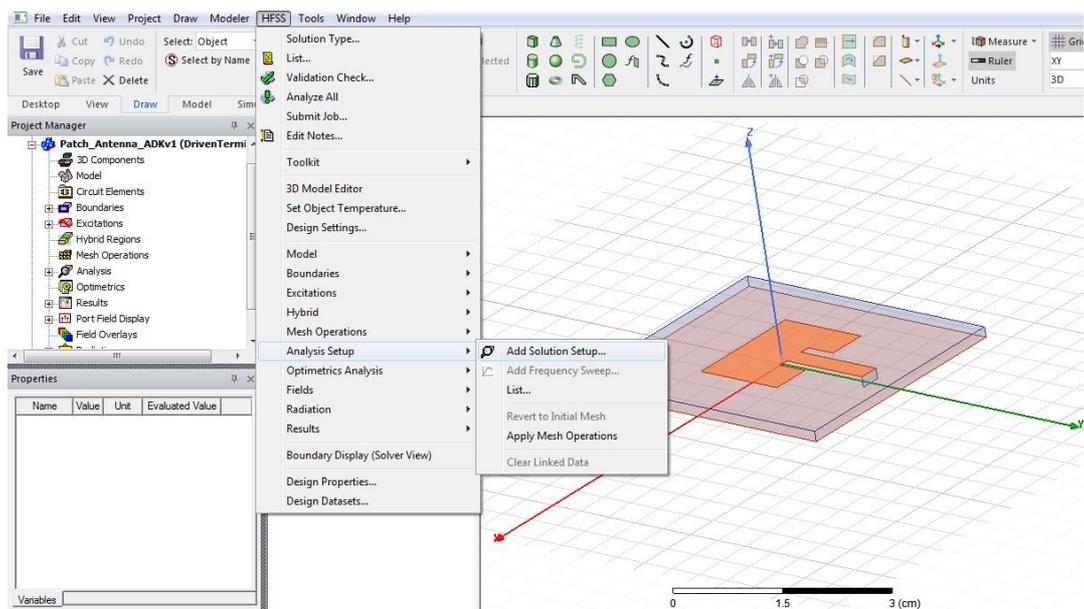


Figure 2. 25. Ajouter solution setup

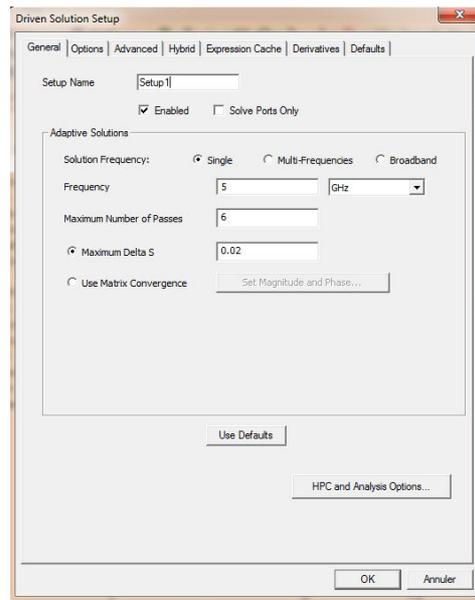


Figure 2. 26. Condition d'analyse setup

Nouveau setup est créé et nommé par défaut **Setup1** avec la fréquence 5 Ghz comme illustrée dans la figure2.26.

4.14 Edit frequencySweep

L'étape qui suit l'addition setup, automatiquement Sweep1 est créé, on doit ouvrir la boîte de dialogue cliquant sur **analysis>setup1>sweep1** de la fenêtre **Project manager**

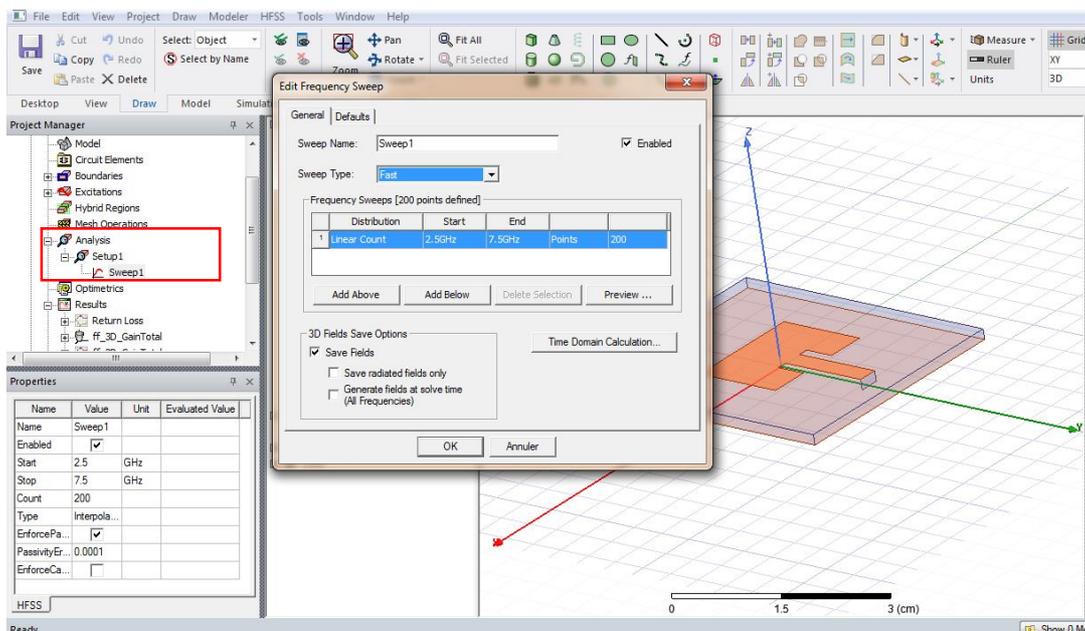


Figure 2. 27. Edit frequencySweep

Ajouter le champ fréquence qu'on a besoin pour les résultats, fréquence de départ et d'arrêt, nombre de point utilisés, à chaque fois le nombre de point s'élever les résultats sont plus exacts.

4.15 Analyse de projet

Au cour d'analyser le travail il faut le sauvegarder et le valider par le bouton **Valider** de menu **Simulation** de la barre d'outils, pour tester les erreurs

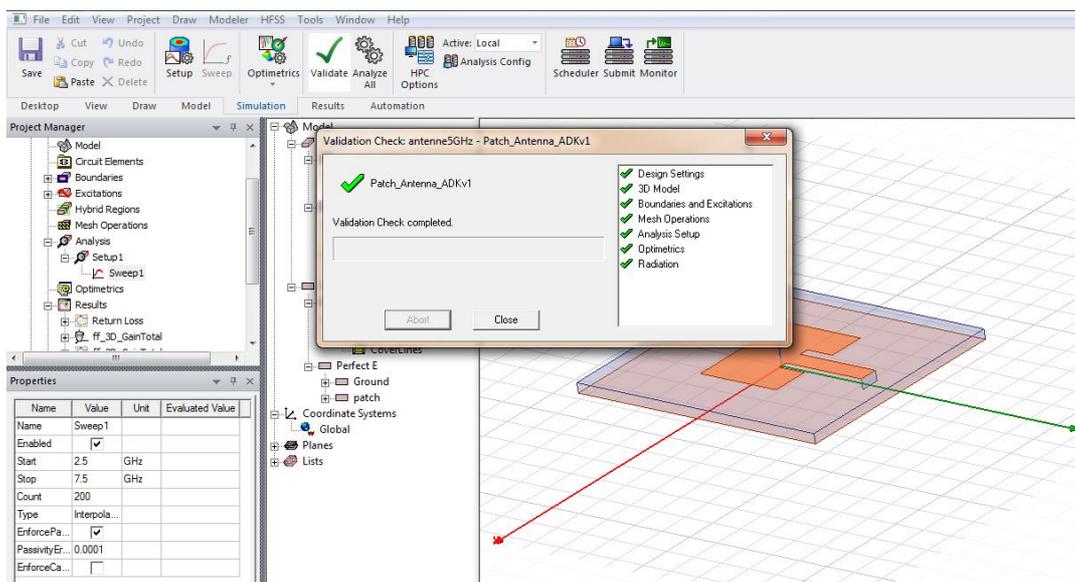


Figure 2. 28. Validation de projet

Le projet ne contient pas des erreurs, maintenant analyser



Figure 2. 29. Analyse de projet

4.16 Résultats

Le rôle principal de HFSS est de tracer les diagrammes qu'on veut

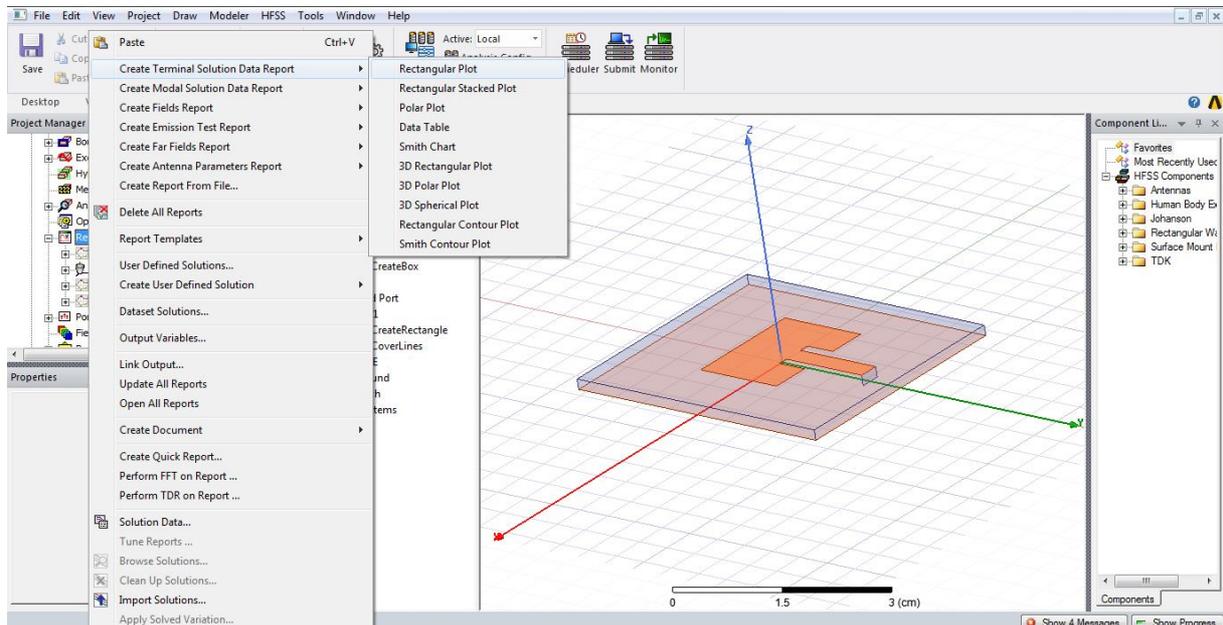


Figure 2. 30. Toutes les opérations pour créer les résultats et les diagrammes

4.17 Insertion de modèle pour cette étude :

- **Création de substrat :**

Insérer Box avec paramètres de dimension et position tel que la figure 2.31

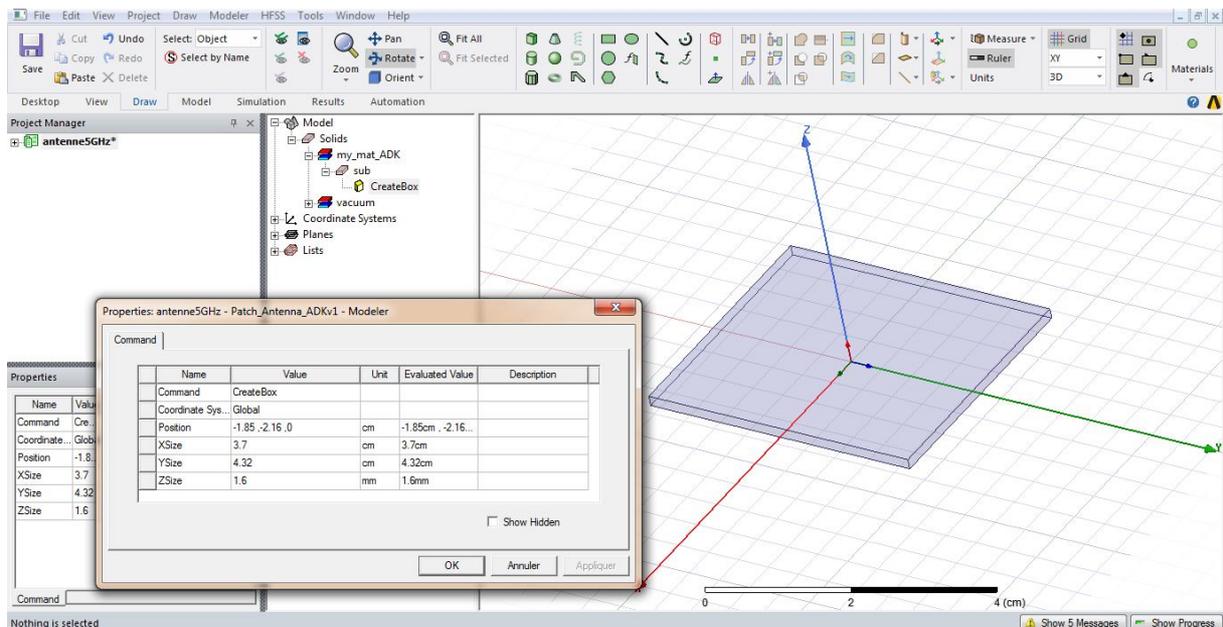


Figure 2. 31. Création de substrat

- **Création de masse (ground) :**

Insérer rectangle avec des mesures comme est exprimé dans la figure 2.32

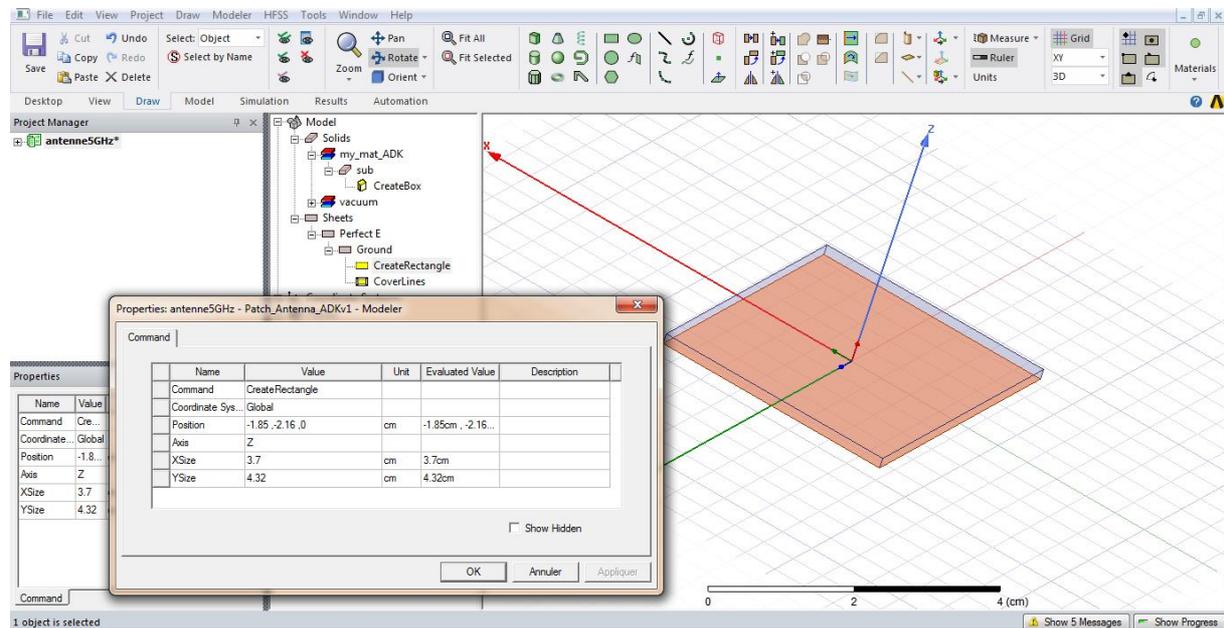


Figure 2.32. Création de masse (ground)

- **Création patch**

Insérer des rectangles appliquant les propriétés affichés dans la figure et puis appliquer les opérations Unit objects, Intersectobjects sur ces rectangles jusqu'à l'obtention dumodèle de patch figure 2.33

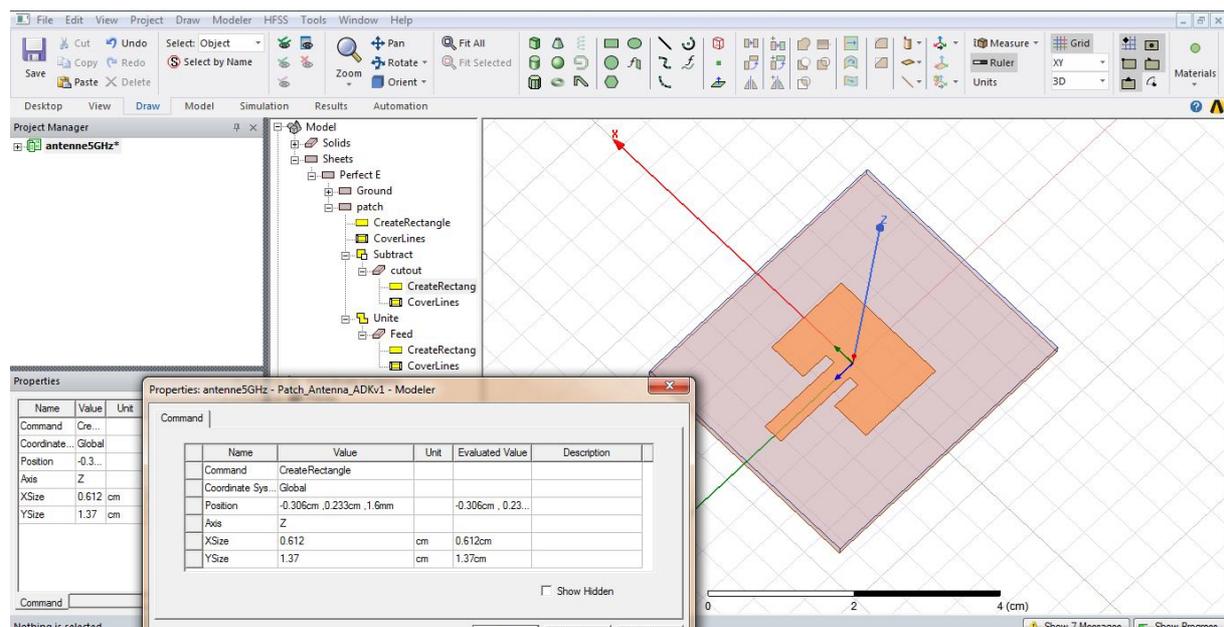


Figure 2. 33 Création patch.

- **Création de port**

Insérer un rectangle sur l'axe XZ placé juste à la fin de ligne d'alimentation de patch, figure 2.34

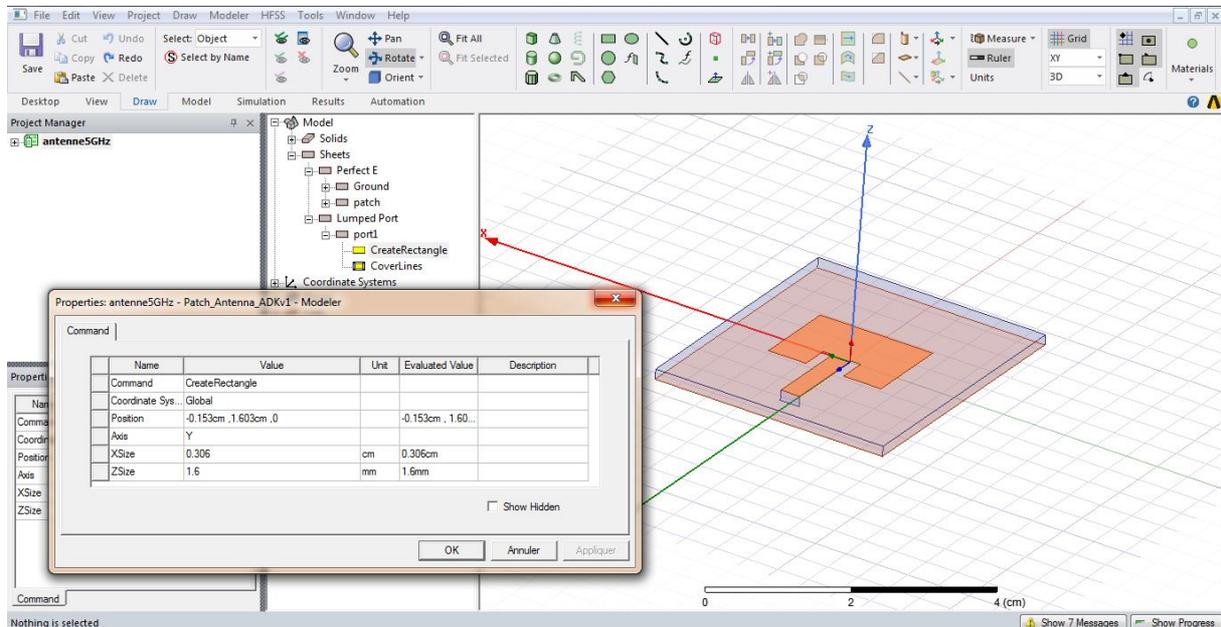


Figure 2. 34. Création de port

- **Résultats**

Après la validation et la simulation de projet, afficher :

- Le coefficient de réflexion S11 en fonction de fréquence.

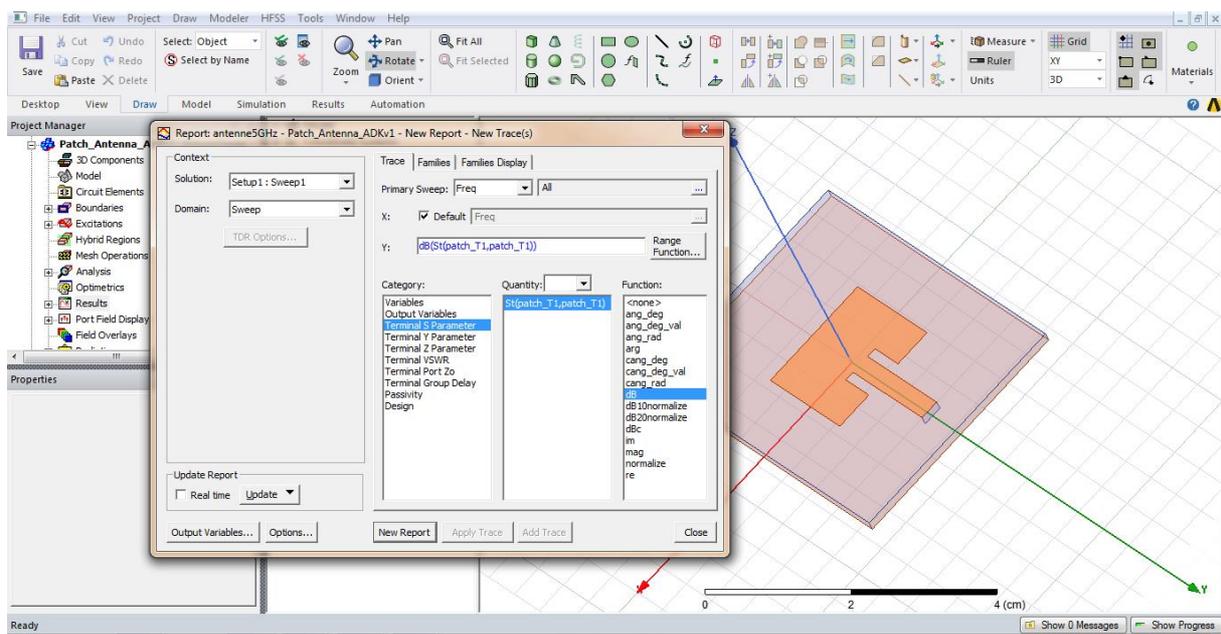
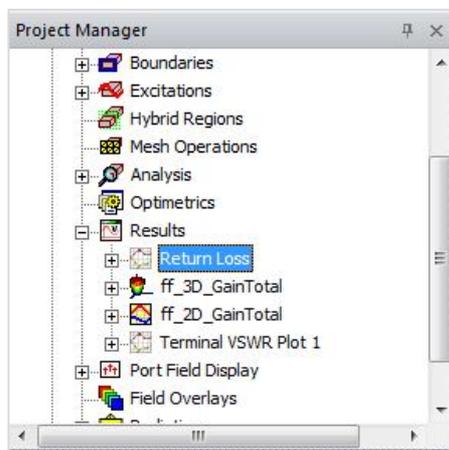


Figure 2. 35. Affichage de S11

- VSWR (le rapport d'onde stationnaire) en fonction de fréquence.
- Diagramme de rayonnement en 2D pour ($\phi=0^\circ$) et ($\phi=90^\circ$).
- Diagramme de rayonnement en 2D.

**Figure 2. 36.** Affichage de VSWR, diagrammes 2D et 3D

5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons expliqué les étapes de création d'un projet sur HFSS. Afin d'analyser et d'afficher les résultats, les illustrations sont faites sur une antenne rectangulaire patch. Les résultats des simulation sont présenté au chapitre suivant.

**CHAPITRE3 : CONCEPTION ET REALISATION
D'UNE ANTENNE PATCHDOUBLE BANDE**

1 Introduction :

Les progrès et la croissance rapides de la technologie sans fil exigent des équipements de communication miniaturisés. Les antennes microruban ont attiré de nombreux chercheurs au cours des dernières décennies en raison de leurs diverses caractéristiques telles que leur petite taille, leur poids léger, leur faible coût et leur conformabilité. Ces antennes peuvent fonctionner à des fréquences élevées et sur plusieurs bandes avec un gain élevé et des bandes passantes plus larges si elles sont convenablement conçues. Ce travail présente une amélioration des performances d'une antenne microruban rectangulaire en utilisant une structure à défaut dans le plan de masse (DGS). Le but est de créer deux bande de fréquences dans une antenne conventionnelle de 5GHz.

Le résultat des simulations présente une antenne patch d'une taille miniaturisée par une structure DGS sous forme de résonateurs à anneau fendue carrée (en anglais **square split ring resonator**), alimentée par une ligne micro-ruban et destinée à fonctionner dans deux bandes de fréquence.

Les performances de l'antenne double bandes proposée sont évaluées en utilisant plusieurs paramètres d'antenne, tels que le coefficient de réflexion, la bande passante, le rapport d'ondes stationnaires de tension (VSWR), le gain maximal, les diagrammes de rayonnement et l'efficacité de rayonnement à l'aide du logiciel HFSS.

Ce chapitre est divisé en quatre parties :

- Conception d'une antenne patch avec une fréquence de résonance 5 GHz
- Conception d'une antenne patch avec une fréquence de résonance 2.7GHz
- Conception d'une antenne patch avec deux fréquences de résonances 2.7GHz et 4.7GHz en incorporant une structure à défaut dans le plan de masse (DGS) l'antenne déjà réaliser de 5 GHz.
- Etude comparative

2 Etude et conception d'une antenne patch de fréquence de résonance 5GHz

La **Figure 3.1** ci-dessous illustre la structure de l'antenne patch a étudié. Il s'agit d'un patch rectangulaire imprimé sur un substrat diélectrique dont la face inférieure (plan de masse) est complètement métallisée.

Tableau 3. 1. Démentions de l'antenne de 5GHz

	Paramètres de l'antenne	Dimensions (mm)
L	longueur du patch	13.76
W	largeur du patch	18.25
Y0	position d'alimentation	4.57
Sf	Largueur de l'encoche	6.12
Lf	Longueur ligne d'alimentation	19.27
Wf	largeur de la ligne d'alimentation	3.06

Les calculs des dimensions du patch et du plan de masse sont effectués à l'aide d'équations standard disponibles dans la littérature.

L'antenne est destinée à fonctionner à une fréquence de 5 GHz **Figure 3.2.**

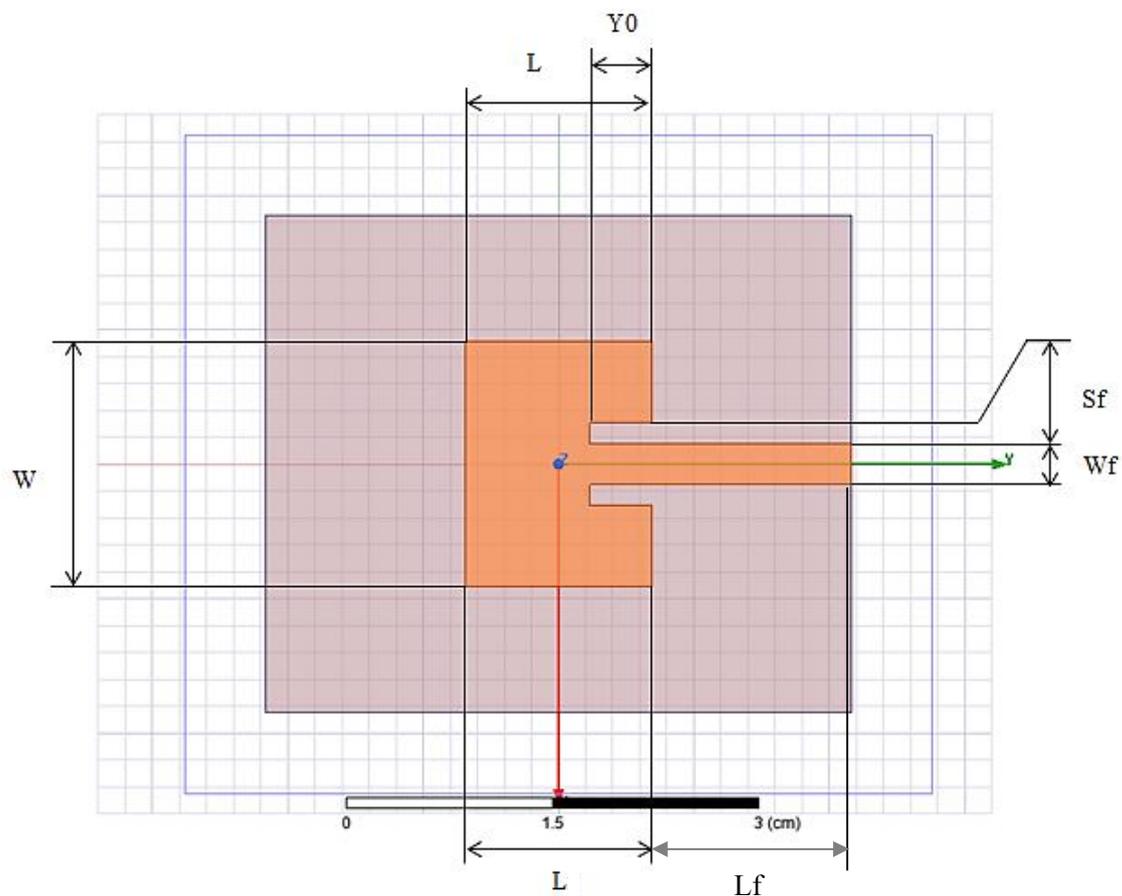


Figure 3. 1. Antenne patch rectangulaire alimentée par ligne microbande avec adaptation par encoche.

Les formules suivantes permettent de calculer les dimensions du patch:

Détermination de la longueur de patch **L** :

$$L = \frac{c}{2fr\sqrt{\varepsilon_{eff}}} - 2\Delta l \quad (3.1)$$

Où Δl et ε_{eff} sont respectivement l'extension de longueur et la permittivité effective. Elles sont données par :

$$\varepsilon_{eff} = \frac{1}{2}(\varepsilon_r + 1) + \frac{1}{2}(\varepsilon_r - 1) \left[\left(1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{-\frac{1}{2}} \right] \quad (3.2)$$

$$\Delta l = 0.421h \frac{(\varepsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.264 \right)}{(\varepsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.813 \right)} \quad (3.3)$$

La longueur du patch devient :

$$L = L_{eff} - 2\Delta l \quad (3.4)$$

Détermination de la largeur de patch **W** :

$$W = \frac{c}{2fr} \sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r + 1}} \quad (3.5)$$

C étant la vitesse de propagation dans le vide.

La technique d'alimentation Microstrip est utilisée pour alimenter l'antenne. La largeur et la longueur de l'antenne conçue sont de 3.7 cm et 4.32cm. respectivement. FR4 epoxy de constante diélectrique 4,4 a été choisi comme matériau de substrat et la hauteur du substrat est de 1.6 mm. Le tableau 3.2 montre les paramètres de la structure d'antenne de 5GHz conçue.

Tableau 3. 2. Paramètres de l'antenne patch de **5 GHz**

Fréquence de résonance 5 GHz							
Dimension de patch		Substrat				Dimension de Masse	
Largueur (cm)	Longueur (cm)	Volume (cm ³)	type	Permittivité	Perméabilité	Largueur (cm)	Longueur (cm)
1.852	1.376	3.7×4.32 ×0.16	FR4 epoxy	4.4	1	3.7	4.32

En utilisant le logiciel **HFSS**, on a réalisé la géométrie de l'antenne pour **Frq=5GHz**. Les étapes de la conception sont présentées dans le **Chapitre II**.

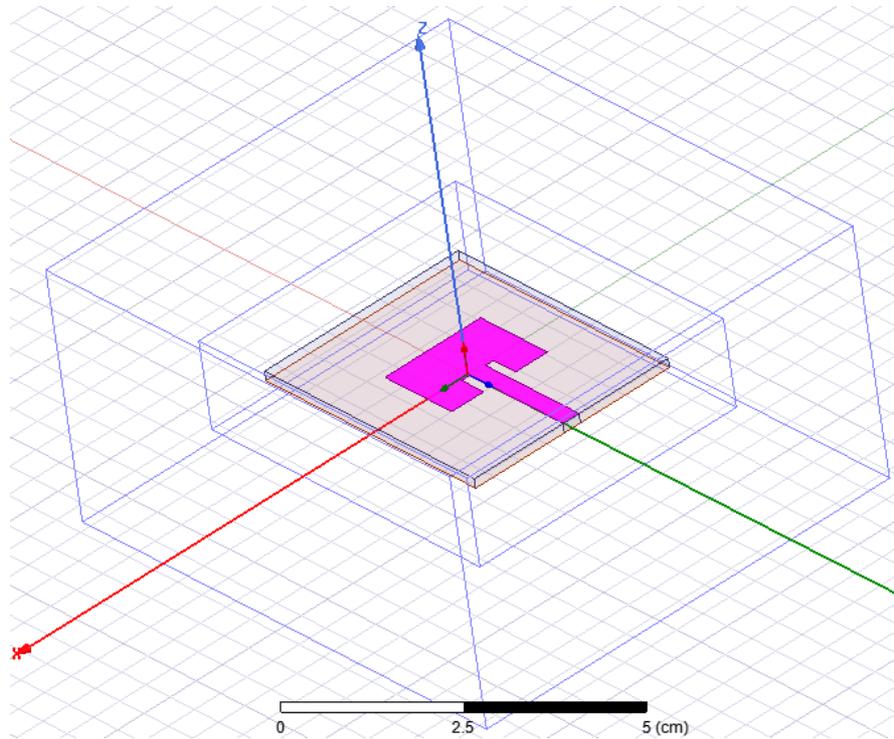


Figure 3. 2. Antenne patch rectangulaire fonctionne à une fréquence de **5 GHz**

2.1 Résultats de Simulation :

Cette section présente les résultats de simulation de l'antenne patch micro-ruban de **5GHz**. La structure système a été conçue et simulé par la version **19.2deHFSS** (Les étapes de conception et de simulation sont présentées dans le **chapitreII**).

- **Coefficient de réflexion S(1,1) en fonction de fréquence :**

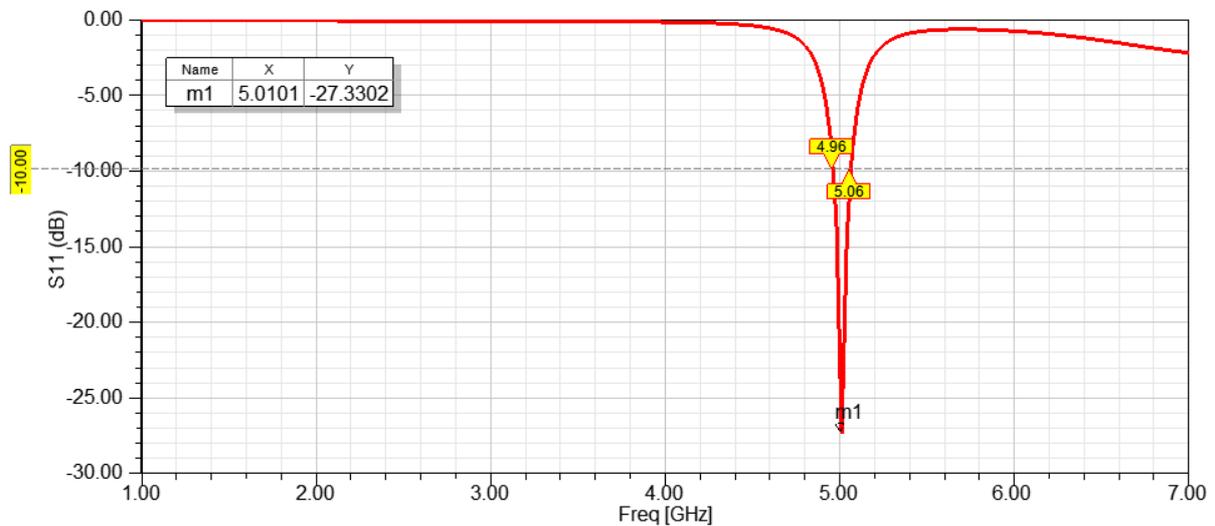


Figure 3. 3. Coefficient de réflexion S(1,1) et bande passante de l'antenne patch de **5 GHz**

La figure 3.3 montre deux paramètres de base, le coefficient de réflexion S11 de l'antenne patch de 5 GHz qu'est égale à -27.3302 en fonction de la fréquence, simulé par le logiciel HFSS et la bande passante qu'est égale à 100MHz.

- **Rapport d'onde stationnaire VSWR en fonction de fréquence**

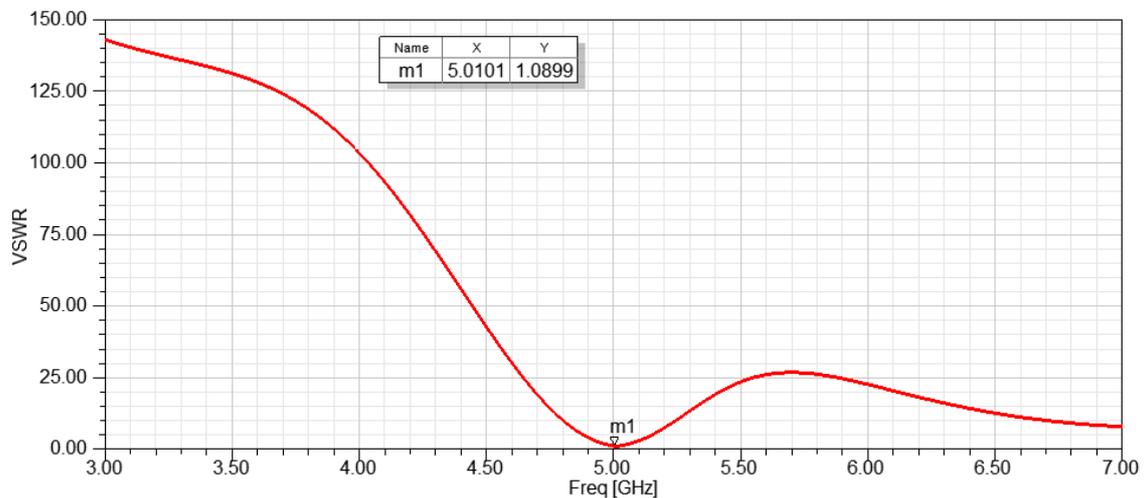


Figure 3. 4. Rapport d'onde stationnaire (VSWR) de l'antenne patch de 5GHz

Le rapport d'onde stationnaire VSWR a de valeur de 1.09, ce qui montre que l'antenne est bien adaptée ($S_{11} \leq -10\text{dB}$, $VSWR \leq 2$).

- **Diagramme de rayonnement en 2D pour ($\phi=0^\circ$) et ($\phi=90^\circ$)**

La figure ci-dessous illustre le diagramme de rayonnement en 2D dans le plan E (xz : $\phi = 0$ degré et $\theta =$ toutes les valeurs) et dans le plan H (yz : $\phi = 90$ degrés et $\theta =$ toutes les valeurs) pour la fréquence de 5GHz. Le diagramme de rayonnement montre que l'antenne conçue présente une caractéristique presque omnidirectionnelle dans les deux plans E et H.

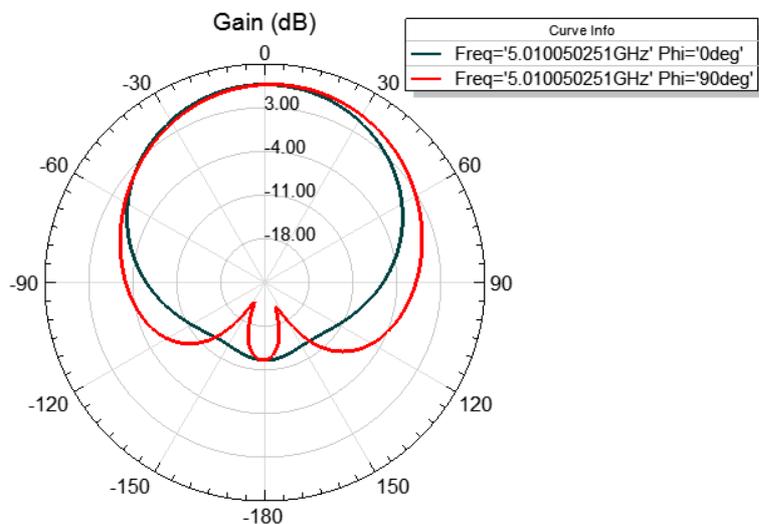


Figure 3. 5. Diagramme de rayonnement 2D de l'antenne patch de 5GHz

- **Diagramme de rayonnement en 3D**

Le diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne de 5GHz est illustré dans la figure 3.6. A partir des figures 3.6 3.5 on constate que le rayonnement de l'antenne est presque omnidirectionnel et présente un gain maximal de $G=6.8$ dB

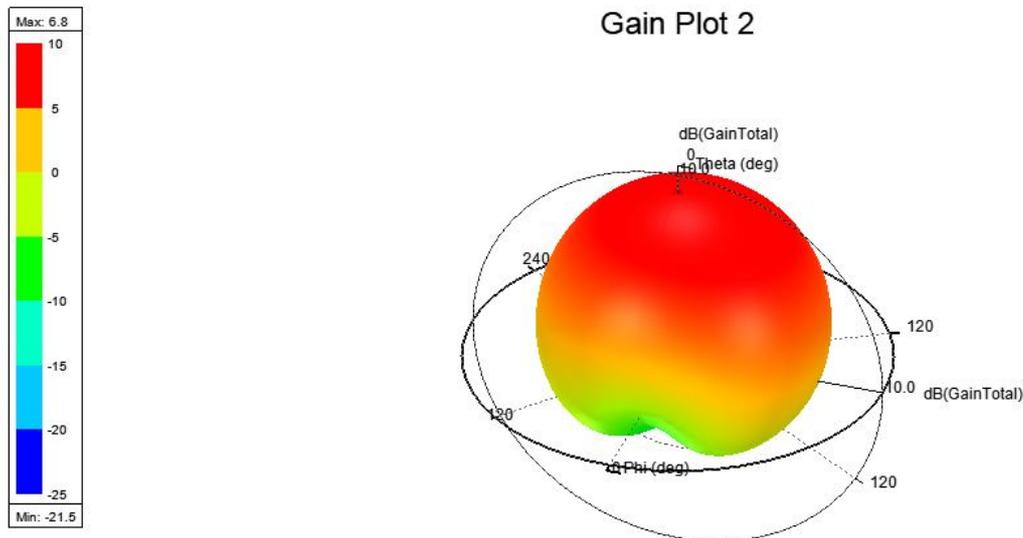


Figure 3. 6. Diagramme de rayonnement 3D en directivité de l'antenne patch de 5 GHz

Le tableau suivant résume les résultats de simulation :

Tableau 3. 3. Résultats de simulation de l'antenne de 5GHz

Antenne patch rectangulaire fonctionne à une fréquence de 5 GHz	
La bande passante (GHz)	0.1
Le coefficient de réflexion(S11)	-27.3302
Le rapport d'onde stationnaire VSWR	1.09
Le gain (dB)	6.8

3 Etude et conception d'une antenne patch de fréquence de résonance 2.7 GHz

De meme que pour l'antenne de 5GHz, o a utilisé les formules mathématique de 3.1 à 3.5 pour la conception d'une autre antenne avec une fréquence de résonance de 2.7GHz.

Les paramètres géométriques de l'antenne de 2.7GHz sont illustrés dans le tableau suivant:

Tableau 3. 4.Paramètres de lantenne patch de **2.7GHz**

Fréquence de résonance 2.7GHz							
Dimension de patch		Substrat				Dimension de Masse	
Largueur (cm)	Langueur (cm)	Volume (cm ³)	type	Permittivité	Perméabilité	Largueur (cm)	Langueur (cm)
3.38	2.61	6×8.07 ×0.16	FR4 epoxy	4.4	1	6	8.07

En utilisant le logiciel **HFSS**, on a réalisé l'antenne pour **Frq=2.7GHz**

Les étapes de la conception sont présentées dans le **chapitre II**

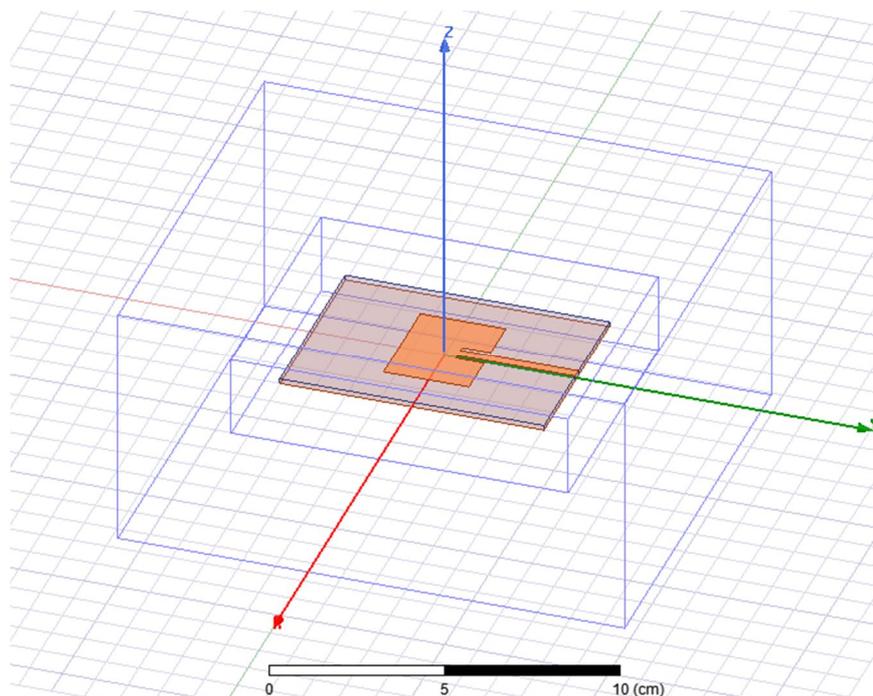


Figure 3. 7.Antenne patch rectangulaire fonctionne à une fréquence de **2.7 GHz**

3.1 Résultats de simulation :

Cette section présente les résultats de simulation de l'antenne patch micro-ruban de **2.7GHz**.

- **Coefficient de réflexion S(1,1) en fonction de fréquence**

La figure 3.8 présente les paramètres **S(1,1)** en dB en fonction de fréquence. Cette antenne rayonne dans la fréquence de **2.7GHz** avec une valeur de **S11** de **-16.71 dB** et une bande passante **40MHz**.

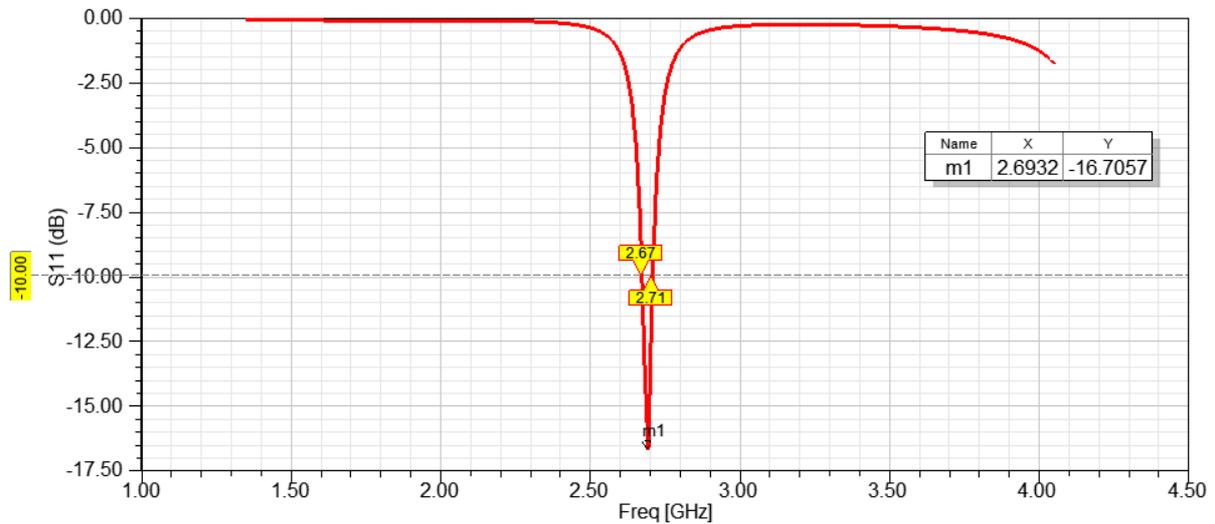


Figure 3. 8. Coefficient de réflexion S(1,1) et bande passante de l'antenne patch de **2.7GHz**

- **Rapport d'onde stationnaire VSWR en fonction de fréquence**

Cette antenne présente un rapport d'onde stationnaire de 1.3423, ce qui montre que l'antenne est bien adaptée ($S_{11} \leq -10\text{dB}$, $VSWR \leq 2$).

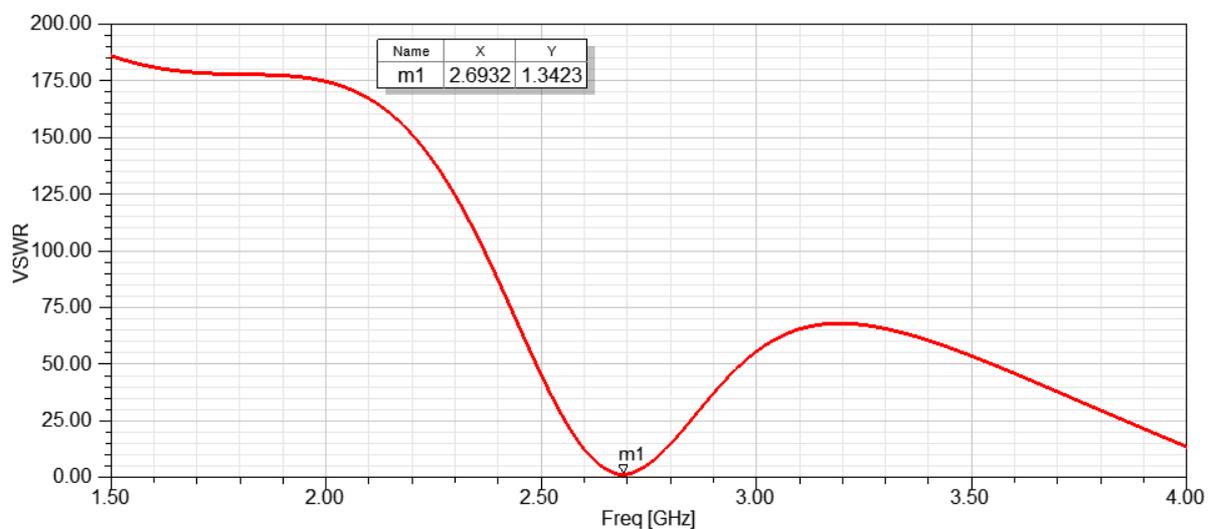


Figure 3. 9. VSWR de l'antenne pour **Frq=2.7GHz**

- **Diagramme de rayonnement en 2D pour ($\phi=0^\circ$) et ($\phi=90^\circ$)**

Le diagramme de rayonnement en **2D** dans le plan E ($\phi = 0^\circ$) et dans le plan H ($\phi = 90^\circ$) de l'antenne **2.7GHz** est présenté dans la figure 3.14. Cette antenne présente un rayonnement presque omnidirectionnel dans les deux plans E et H.

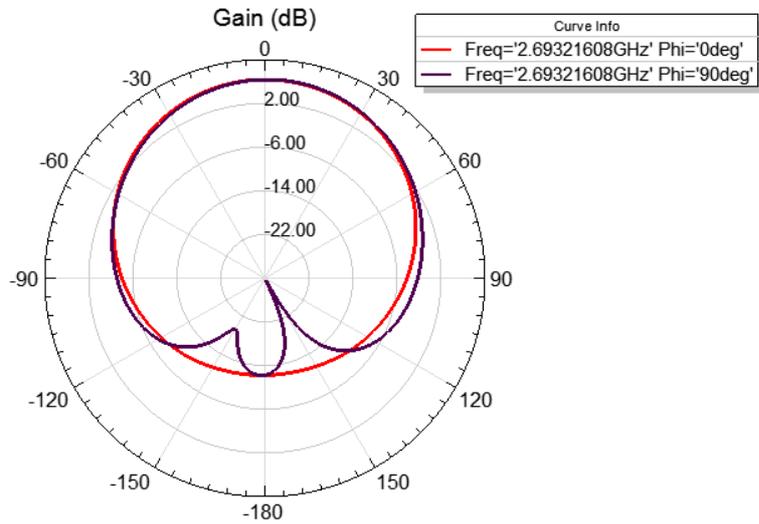


Figure 3. 10. Diagramme de rayonnement en **2D** pour **Frq=2.7GHz**

- **Diagramme de rayonnement en 3D pour Frq=2.7GHz**

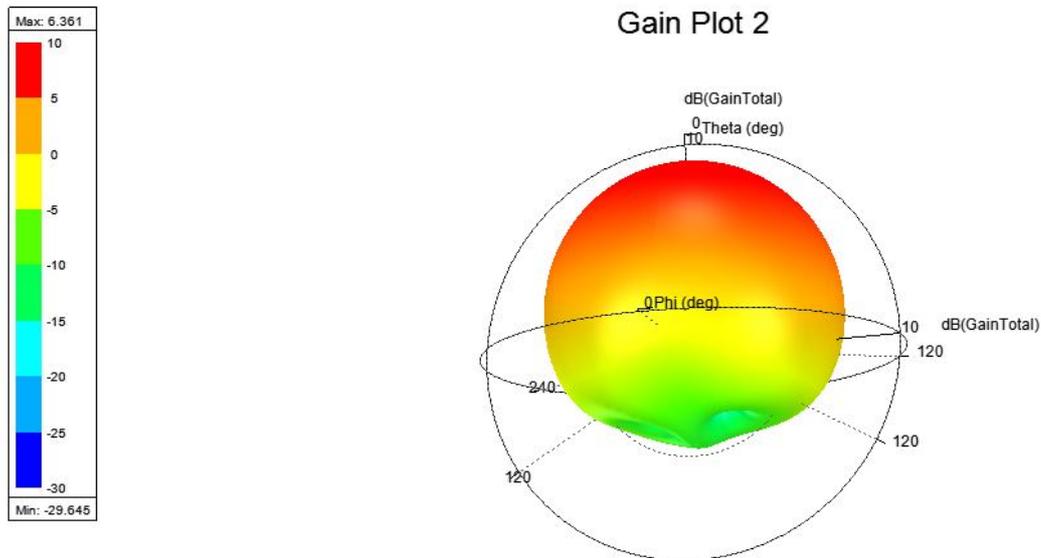


Figure 3. 11. Diagramme de rayonnement en **3D** pour **Frq=2.7GHz**

Le diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne de 5GHz est présenté dans la figure **3.11**. A partir des **figures 3.11et3.10**on remarque que le rayonnement de l'antenne est presque omnidirectionnel avec un gain maximal de $G=6.361$ dB

Le tableau suivant résume les résultats de simulation de l'antenne de **2.7 GHz** :

Tableau 3. 5. Résultats de simulation de l'antenne de 2.7GHz

Antenne patch rectangulaire fonctionne à une fréquence de 2.7 GHz	
La bande passante (MHz)	40
Le coefficient de réflexion(S11)	-16.7040
Le rapport d'onde stationnaire VSWR	1.3423
Le gain (dB)	6.361

Les paramètres présentés dans les **tableaux 3.2, 3.3, 3.4et 3.5** montrent que plus l'antenne est petite, plus la fréquence de résonance est élevée et vice versa, nous pouvons voir aussi que les coefficients de réflexion simulés (S11) sont inférieurs à -10 dB pour les deux antennes.

4 Conception de l'antenne proposée à double bande avec une structure DGS de forme résonateur à anneau fendu carré

Une variété d'applications dans les dispositifs de communication nécessitent des fréquences de fonctionnement distinctes, cela a conduit à de nombreuses recherches sur la miniaturisation de la taille des antennes tout en maintenant des performances adéquates. Il est bien connu que l'efficacité fournie lorsqu'une antenne rayonne dans plusieurs fréquences est supérieure à l'efficacité de l'utilisation d'une antenne pour chaque bande de fréquences. Selon les exigences de conception, la géométrie des antennes microruban peut être ajustée pour résonner à plusieurs fréquences.

Dans les sections précédentes deux antennes sont réalisées. La première antenne rayonne à une fréquence de 5GHz et la deuxième à une fréquence de 2.7GHz. Et comme les dimensions de l'antenne à 5GHz (3.7×4.32 cm²) sont inférieurs à celle de l'antenne à 2.7GHz (6×8.07 cm²), nous utiliserons l'antenne de 5GHz, qui a une petite taille, pour la réalisation de

notre antenne patch double bande qui rayonne dans deux fréquences de résonances 2.7GHz et 4.7 GHz.

La conception consiste à incorporer un défaut dans le plan de masse de forme résonateur à anneau fendu carré dans l'antenne conventionnelle déjà réalisée de 5 GHz afin de créer deux bandes de fréquences de 2.7GHz et 4.7 GHz. Il est à noter que les paramètres (dimensions et permittivité ϵ) de l'antenne conventionnelle de 5 GHz ne sont pas affectés, le seul changement est l'insertion d'un résonateur à anneau fendu carré dans le plan de masse.

4.1 Résonateur à anneau fendu carré (RAFC):

La figure 3.12 montre la géométrie d'un résonateur à anneau fendu carré avec deux anneaux. Ce RAFC est composé de deux boucles de largeur $XR1$ et $XR2$ et d'épaisseur S . Deux ouvertures de largeur $XO1$ et $XO2$ sont ajoutées à la bague extérieure et à la bague intérieure respectivement. L'écart entre l'anneau intérieur et extérieur est symbolisé par W . Il est à noter que la largeur $XR2 = XR1 - (S + W)$.

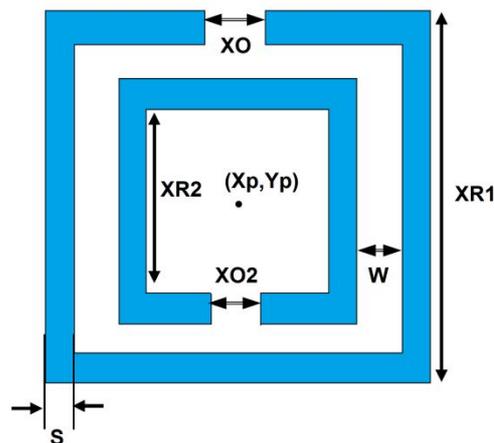


Figure 3. 12. Structure de résonateur à anneau fendu carré

Il est noté que la cellule RAFC est introduite dans les antennes patchs pour réduire sa taille et améliorer ces caractéristiques (création de deux bandes de fréquence dans notre cas).

4.2 Antenne double bande proposée avec RAFC:

Les figures 3.13 et 3.14 montrent le plan de masse de l'antenne proposée ainsi qu'une vue tridimensionnelle du même antenne après l'insertion du RAFC.

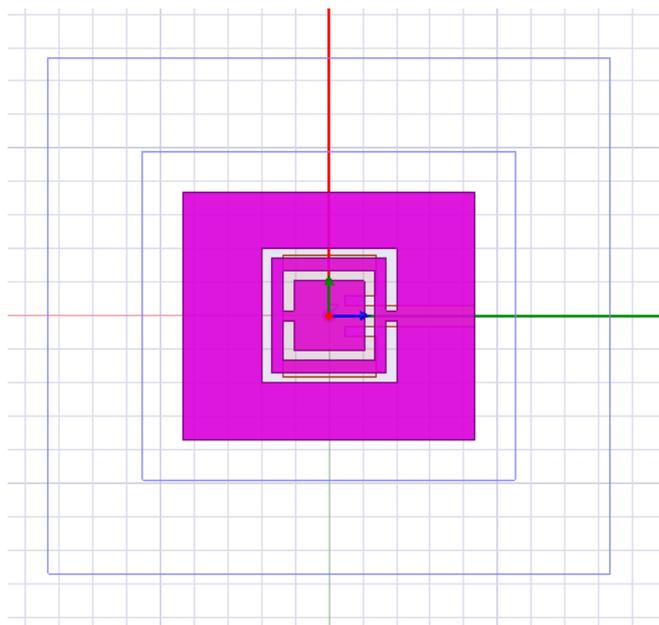


Figure 3. 13. Plan de masse de l'antenne proposé avec RAFC

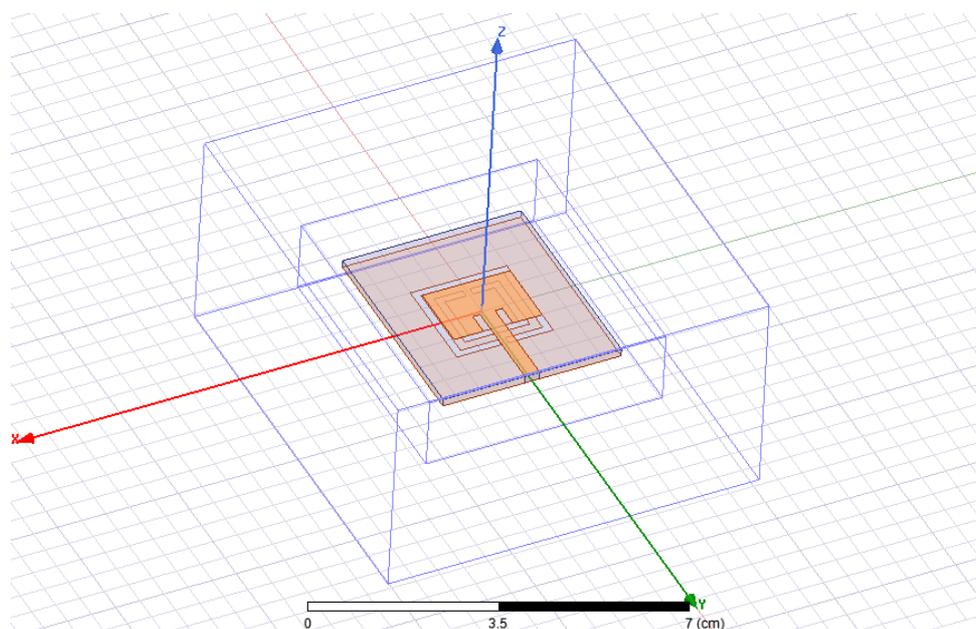


Figure 3. 14. Vue tridimensionnelle de l'antenne proposé avec RAFC

4.3 Étude paramétrique

Afin d'optimiser la géométrie du résonateur à anneau fendu carré incorporé dans le plan de masse de l'antenne de 5GHz, une étude paramétrique est effectuée. L'objectif est de créer un comportement double bande avec le minimum de S_{11} (dB) est le maximum de gain dans une antenne conventionnelle de 5GHz.

Cette étude paramétrique est très importante car elle permet de mieux appréhender l'influence des différents paramètres du RAFC sur les performances de l'antenne proposée. Pour cela les paramètres géométriques du RAFC sont modifiés un par un, afin de constater leurs influences sur les caractéristiques de l'antenne, notamment en termes de coefficient de réflexion, gain et VSWR. Le processus de l'étude paramétrique consiste à fixer tous les paramètres et faire changer un seul paramètre, pour étudier l'influence de ce dernier sur les caractéristiques de l'antenne.

➤ Effet de la largeur de l'anneau extérieur XR1 :

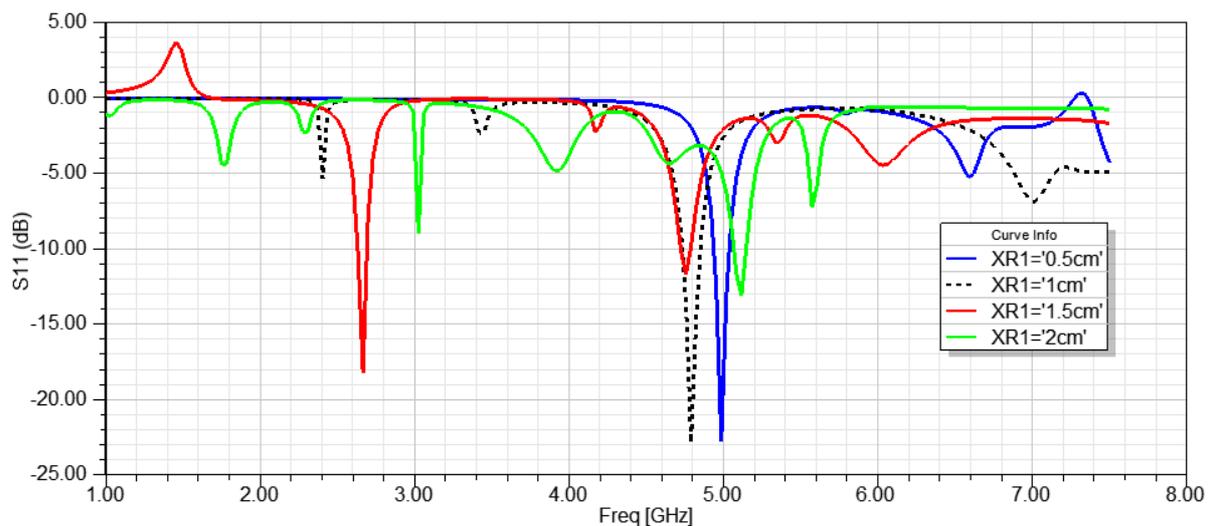


Figure 3. 15. Résultats de variation du paramètre XR1

L'effet de la variation de la largeur de la boucle extérieure (XR1) est illustré dans la figure 3.15, dont les valeurs de XR1 sont changées dans un intervalle de 0.5 cm à 2 cm. On remarque que la variation de la largeur de l'anneau extérieur affecte fortement le coefficient de réflexion pour la fréquence inférieure. Un comportement double bande ($S_{11} \leq -10$ dB) n'est obtenu qu'en utilisant une largeur de 1.5 cm.

Comme la largeur de la boucle intérieure (XR2) est une fonction de XR1, S, et W, le changement d'un paramètre de ces derniers affecte directement XR2 :

$$XR2 = XR1 - (S+W) \quad (3.6)$$

C'est pour cette raison qu'on a étudié seulement l'effet de la largeur de l'anneau extérieur XR1.

➤ **Effet des ouvertures XO et XO2 dans les anneaux extérieur et extérieur :**

L'influence de la modification des largeurs des ouvertures XO et XO2 dans les anneaux extérieur et extérieur est présentée dans les figures 3.16 et 3.17 respectivement.

Les valeurs de XO sont changées dans un intervalle de 0.15 cm à 1.65 cm, alors que les valeurs de XO2 sont changées dans un intervalle de 0.15 cm à 0.9 cm.

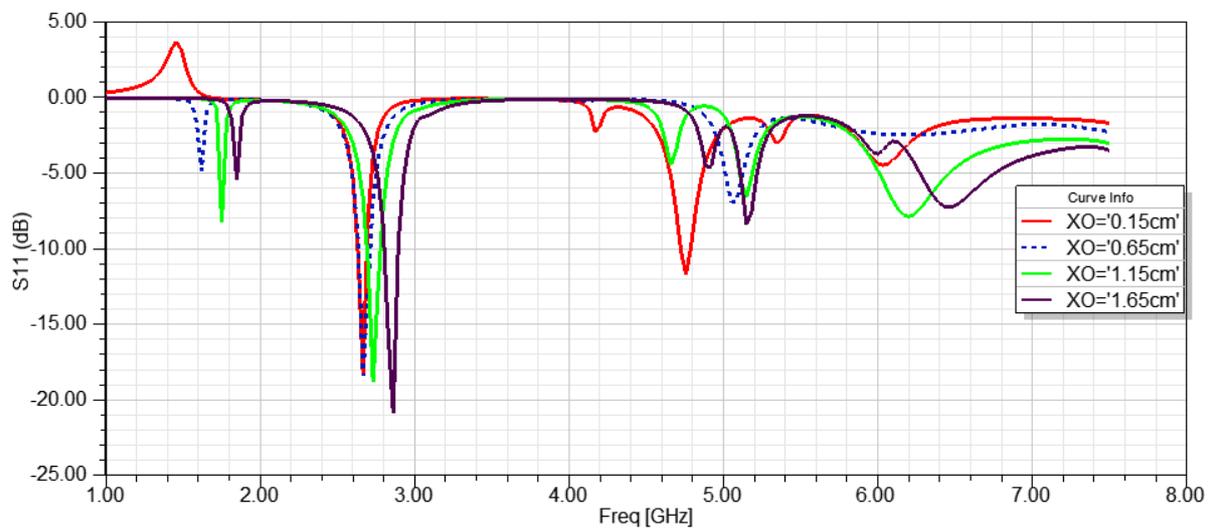


Figure 3. 16. Effet de parametre XO

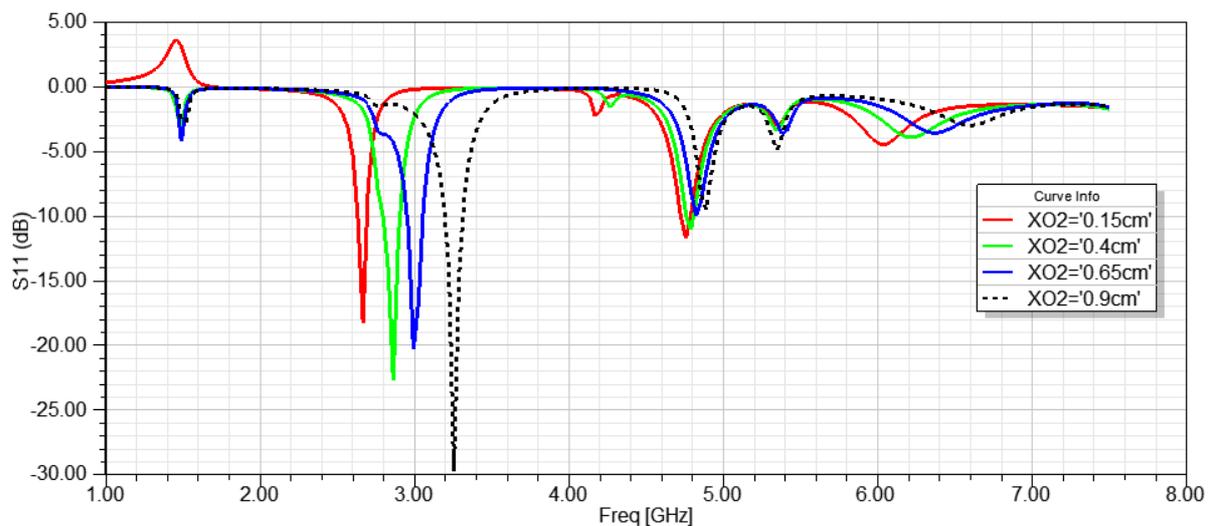


Figure 3. 17. Effet de parametre XO2

On remarque que la variation des largeurs des ouvertures des deux anneaux affecte fortement le valeur du coefficient de réflexion pour les fréquences supérieures. Un minimum de S11 est obtenue pour les petites largeurs des ouvertures. Contrairement aux fréquence inférieurs. De plus la largeur croissante des ouvertures des anneaux intérieur et extérieur donne l'impact du décalage des fréquences de résonances vers des fréquences plus hautes.

Les meilleurs résultats ($S_{11} \leq -10\text{dB}$) qui donnent un comportement double bande sont obtenus en utilisant $XO=XO2=0.15\text{cm}$

➤ **Effet de la position (X_p, Y_p) du RAFC dans le plan XY:**

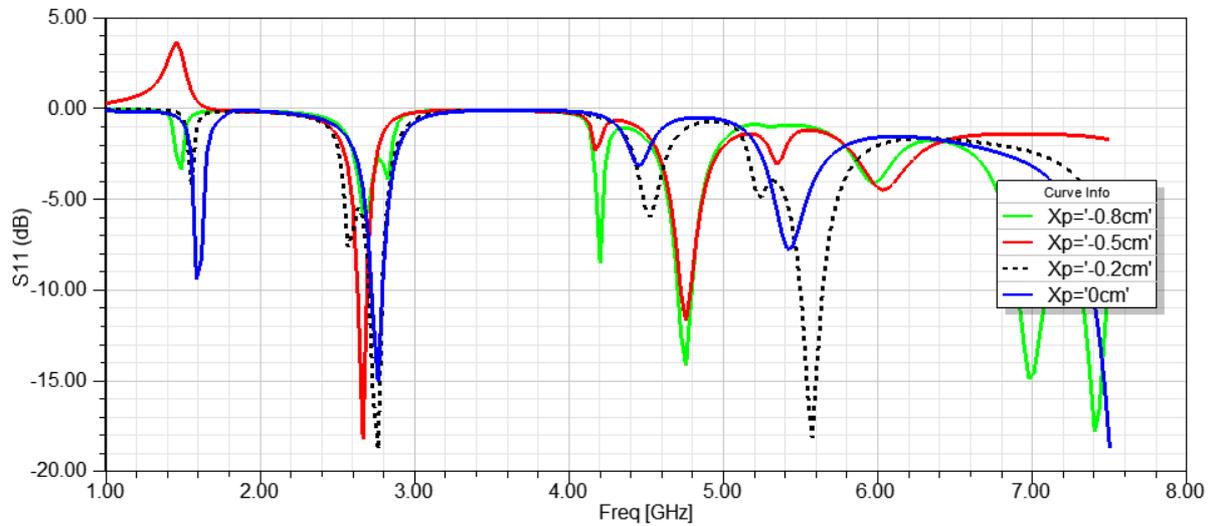


Figure 3.18. Effet du parametre X_p

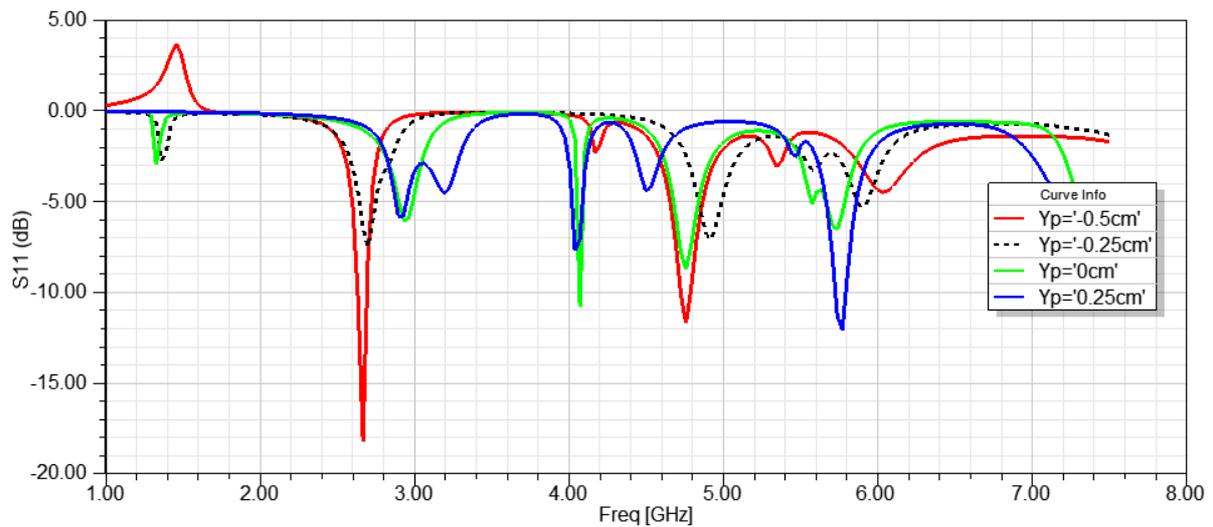


Figure 3.19. Effet de parametre Y_p

La position X_p et la position Y_p , correspondent à la position du RAFC par rapport au centre de masse (voir **Figure 3.13**), sont modifiées pour déterminer la position optimale de la cellule afin de garantir un meilleur comportement double bande.

X_p est variée entre **-0.8cm** et **0cm**, Y_p est variée entre **-0.5cm** et **0.25 cm**.

Les meilleurs résultats ($S_{11} \leq -10\text{dB}$) qui donnent un comportement double bande sont achevés en utilisant $X_p=Y_p=-0.5\text{cm}$.

➤ **Effet de l'écart entre l'anneau intérieur et extérieur W**

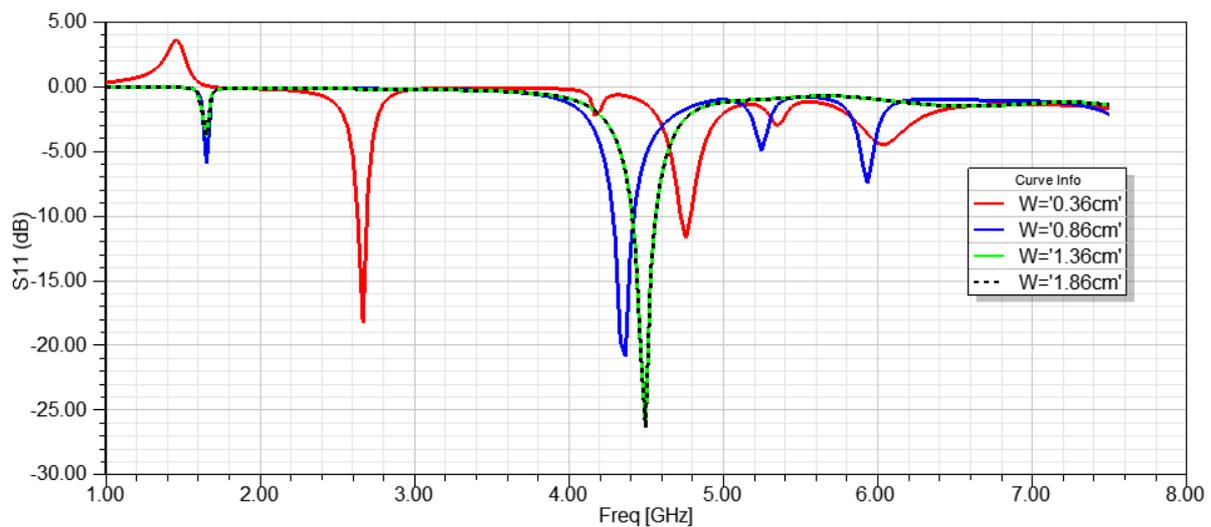


Figure 3. 20. Effet de parametre W

L'écart entre l'anneau intérieur et extérieur (W) est varié dans un intervalle de **0.36 à 1.86 cm**. On remarque que plus l'écart entre l'anneau intérieur et extérieur est grand plus la valeur du coefficient de réflexion est grande pour la fréquence inférieure. Une deuxième fréquence de 2.7GHz (avec $S_{11} < -10\text{dB}$) n'est obtenue qu'en utilisant une petite valeur de W de 0.36cm.

➤ **Effet de l'épaisseur des anneaux S :**

On remarque que le coefficient de réflexion pour les fréquences supérieures diminue avec l'augmentation de l'épaisseur des anneaux S . contrairement aux fréquences inférieures. Un compromis entre l'épaisseur des anneaux S et le coefficient de réflexion pour les deux fréquences inférieures et supérieures est obtenu en choisissant une valeur de S égale à 0.2cm. La valeur de S est modifiée entre 0.2 et 1.25 cm

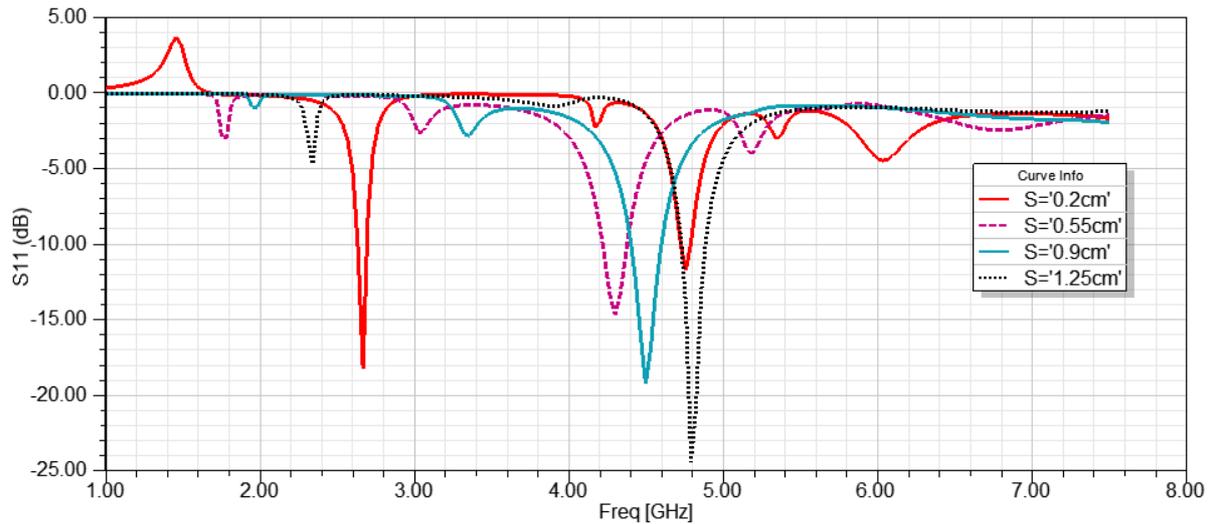


Figure 3. 21. Effet du parametreS

Il est à noter qu'une étude paramétrique intensive de tous les paramètres est menée, mais nous avons présenté que les résultats de la structure optimale par souci de brièveté.

4.4 Variables optimisées

Une étude paramétrique est menée pour l'optimisation de la conception du RAFC. Les paramètres géométriques du résonateur à anneau fendu carré sont modifiées dans des limites tolérables comme le montrent les figures 3.15, 3.16, 3.17, 3.18, 3.19, 3.20 et 3.21. Les résultats répondant aux spécifications requises pour que l'antenne présente le meilleur comportement double bande en termes de coefficient de réflexion sont obtenus en utilisant les paramètres suivants :

Tableau 3. 6. Variables optimisées du RAFC

	Paramètres de l'antenne	Dimensions (cm)
XR1	Largeur de l'anneau extérieur	1.5
XR2	Largeur de l'anneau intérieur	0.94
S	d'épaisseur	0.2
W	L'écart entre l'anneau intérieur et extérieur	0.36
(Xp, Yp)	Position du RAFC par rapport au centre de la masse	(-0.5, -0.5)
XO	Largeur de l'ouverture dans l'anneau extérieur	0.15
XO2	Largeur de l'ouverture dans l'anneau intérieur	0.15

4.5 Conception de l'antenne double bande proposée :

Les figure 3.22, 3.23et 3.24 montrent la géométrie de l'antenne double bande proposée après l'insertion du RAFC optimisée. Il est à noter que cette structure est conçue sur le logiciel HFSS.

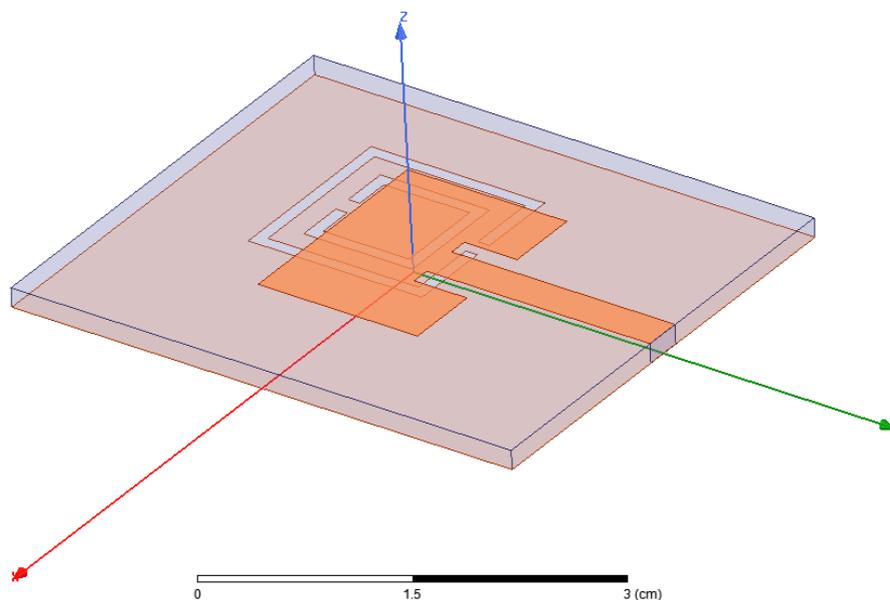


Figure 3. 22. Vue 3D de l'antenne double bande proposée

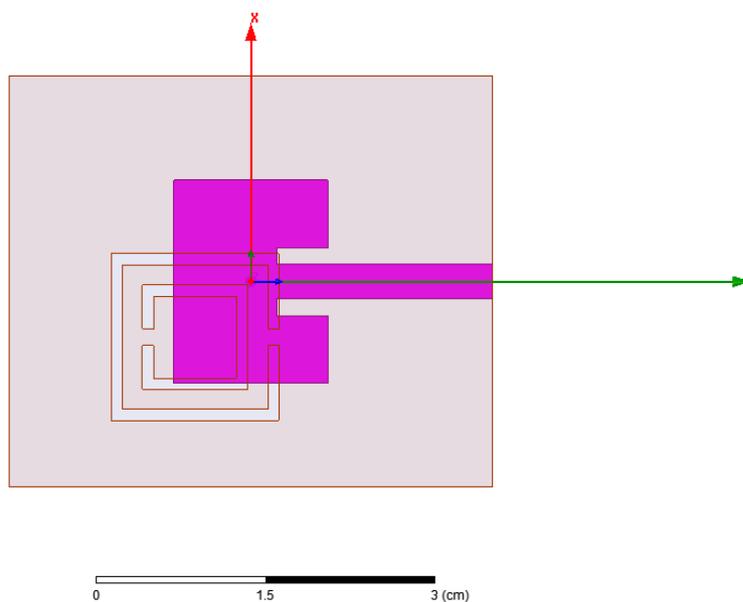


Figure 3. 23. Vue de face de l'antenne double bande proposée

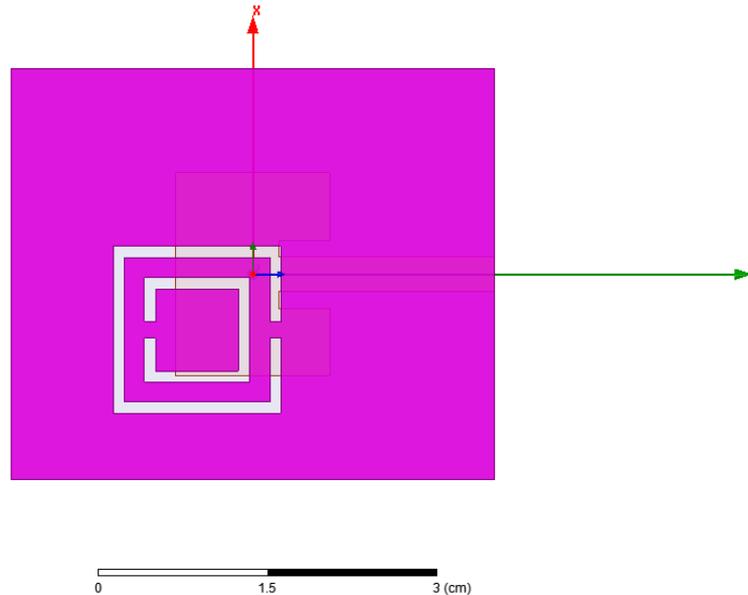


Figure 3. 24. Vue de dos de l'antenne double bande proposée

L'antenne optimisée présente deux fréquences de résonance $F_{r1}=2.7\text{GHz}$ et $F_{r2}=4.7\text{GHz}$, ces paramètres géométriques sont illustrés dans le tableau suivant :

Tableau 3. 7. Paramètres de l'antenne patch de 2.7GHz , 4.7GHz

Fréquence de résonance 2.7GHz ; 4.7 GHz							
Dimension de patch		Substrat				Dimension de masse	
Largueur (mm)	Langueur (mm)	Volume (mm ³)	Type	Permittivité	Perméabilité	Largueur (cm)	Langueur (cm)
1.852	1.376	3.74 ×4.32 ×0.16	FR4 epoxy	4.4	1	3.74	4.32

4.6 Résultats de Simulation :

Cette section présente les résultats des performances de l'antenne double bande proposée (2.7GHz et 4.7GHz .) qui sont évaluées en utilisant plusieurs paramètres d'antenne, tels que le coefficient de réflexion, la bande passante, le rapport d'ondes stationnaires de tension (VSWR), le gain maximal, les diagrammes de rayonnement et l'efficacité de rayonnement. L'antenne a été conçue et simulée par la version 19.2 de HFSS (Les étapes de conception et de simulation sont présentées dans le chapitre II).

- Coefficient de réflexion $S(1,1)$ en fonction de fréquence

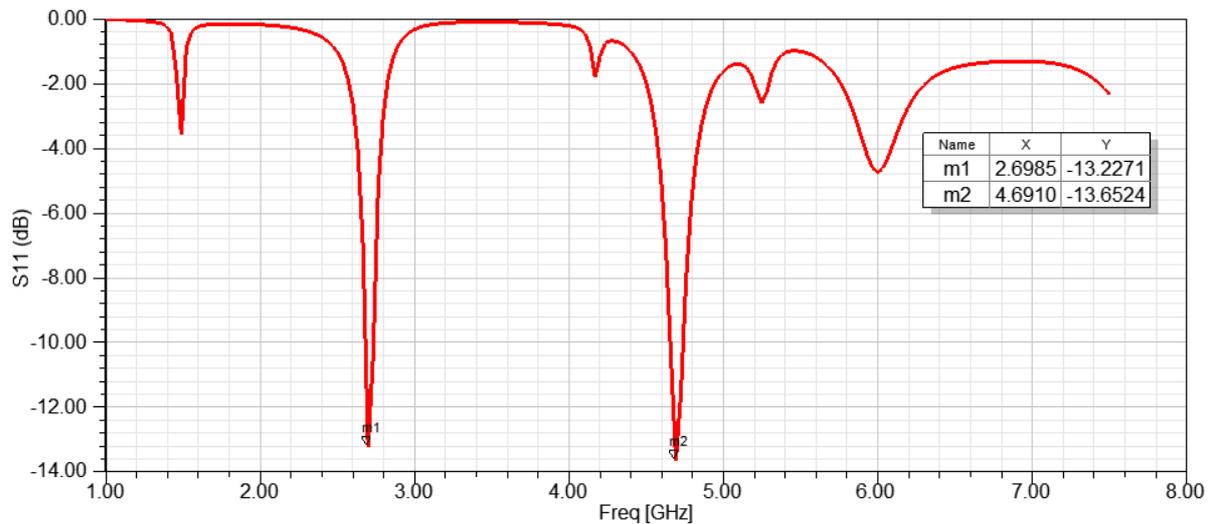


Figure 3. 25. Paramètre $S(1,1)$ de l'antenne double bande $Fr1=2.7GHz$, $Fr2=4.7GHz$

Figure 3.25 présente le coefficient de réflexion $S(1,1)$ en dB en fonction de fréquence. L'antenne proposée a été simulée dans la gamme de fréquences de 1 GHz à 8 GHz. La première fréquence de résonance est 2.7 GHz, tandis que la seconde fréquence de résonance est 4.7 GHz avec des valeurs de coefficient de réflexion de **-13.23 dB** et **-13.65 dB** respectivement. On observe qu'à la deuxième fréquence de résonance, une meilleure valeur de coefficient de réflexion a été obtenue.

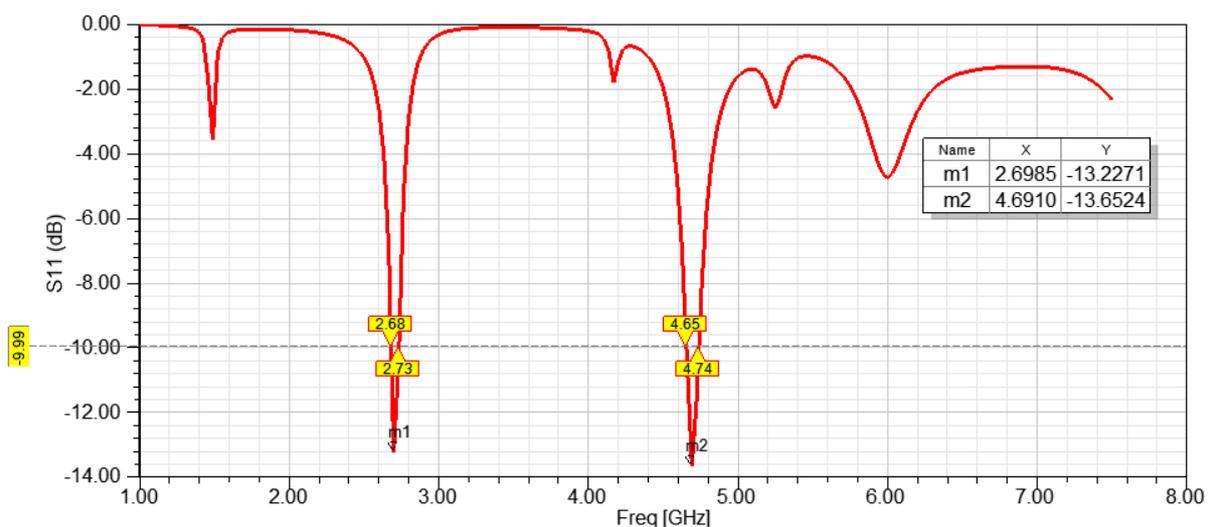


Figure 3. 26. Bande passante de l'antenne double bande

La bande passante de l'antenne double bande proposée est illustrée dans la figure 3.26. Pour la fréquence de résonance de **2.7GHz** l'antenne présente une bande passante de **50 MHz**.

Pour la deuxième fréquence de résonance de **4.7GHz** l'antenne présente une bande passante de **90MHz**.

- **Rapport d'onde stationnaire VSWR en fonction de fréquence**

Le rapport d'onde stationnaire (**VSWR**) de l'antenne proposée est illustré à la Figure **3.27**. À partir du tracé du **VSWR** en fonction de fréquence, on observe que le **VSWR** est de 1,20 à la fréquence 2,7 GHz alors que pour la fréquence de 4.7GHz, le **VSWR** est de **1.5242**.

Les résultats obtenus démontrent que l'antenne satisfait l'exigence de $VSWR < 2$ et résonne dans la limite acceptable de **VSWR** qui est comprise entre 1 et 2 pour les deux fréquences de résonances. Cela indique qu'une bonne adaptation d'impédance entre la ligne d'alimentation de l'antenne et le patch rayonnant est obtenue.

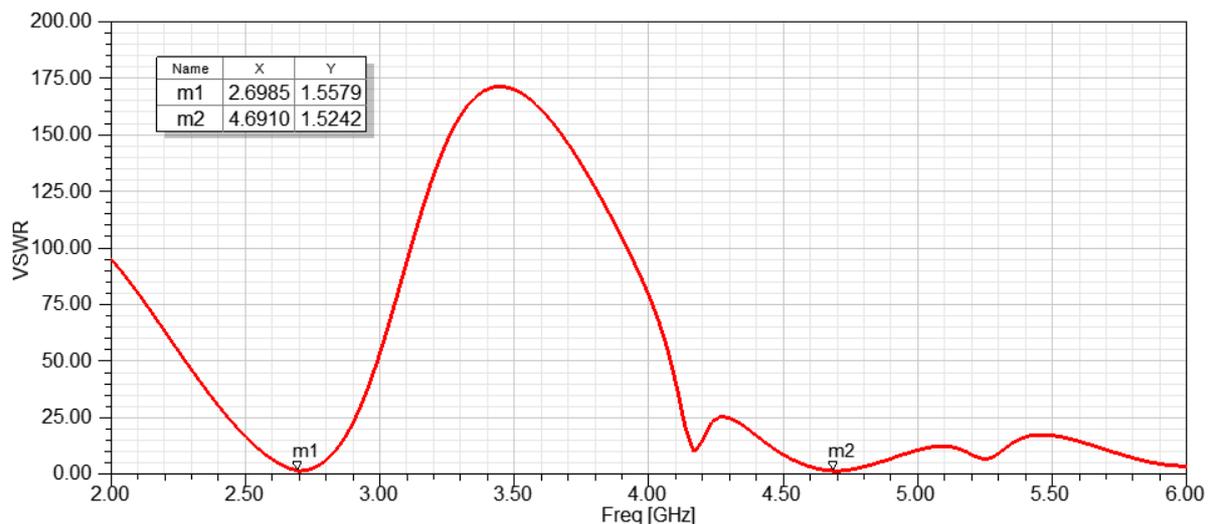


Figure 3. 27. Paramètre VSWR de l'antenne pour $Fr1=2.7GHz$, $Fr2=4.7GHz$

- **Diagramme de rayonnement en 2D pour ($\phi=0^\circ$) et ($\phi=90^\circ$)**

Figure 3.28 et **3.29** illustrent les diagrammes de rayonnement en **2D** pour un déphasage ($\phi=0^\circ$, $\phi=90^\circ$) à la fréquence de **2.7GHz** et **4.7GHz**, respectivement. Ces figures présentent la variation de la densité de puissance avec la position angulaire aux fréquences 2,4 GHz et 4,7 GHz dans les plans E et H.

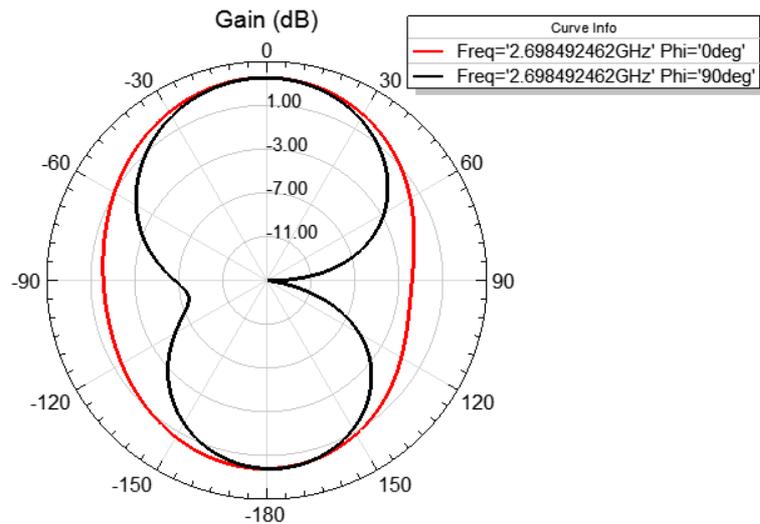


Figure 3. 28. Diagramme de rayonnement en **2D** pour **Fr1=2.7 GHz**

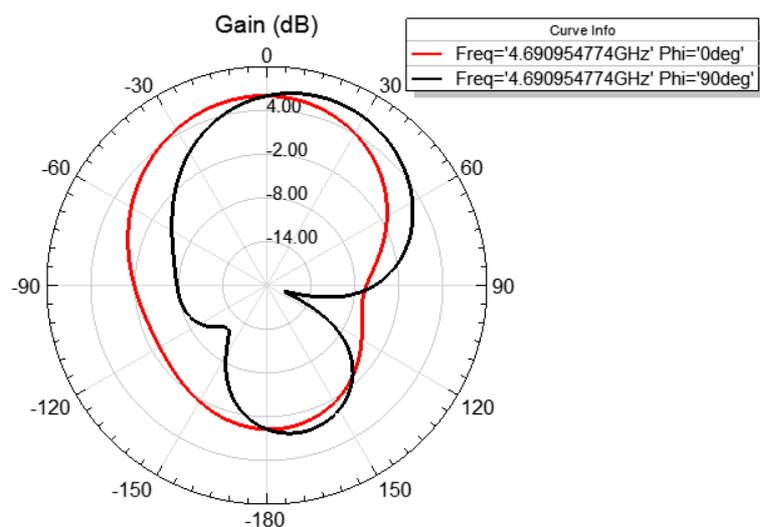


Figure 3. 29. Diagramme de rayonnement en **2D** pour **Fr2=4.7 GHz**

- **Diagramme de rayonnement en 3D**

Les figures 3.30 et 3.31 montrent le diagramme de rayonnement de gain en champ lointain simulé en 3D de l'antenne double bande. Cette figure montre les diagrammes de directivité de l'antenne conçue à deux bandes de fréquences. Cette antenne présente un gain maximal de **3.5 dB** pour la fréquence de résonance de 2.7GHz. Pour la fréquence de 4.7GHz le gain directif simulé est de **6.69 dB**.

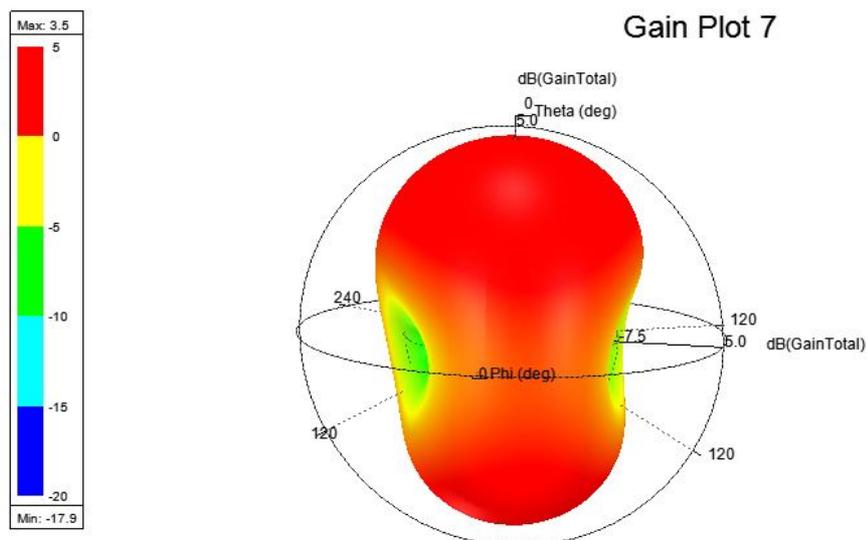


Figure 3. 30. Diagramme de rayonnement en 3D pour $Fr1=2.7$ GHz

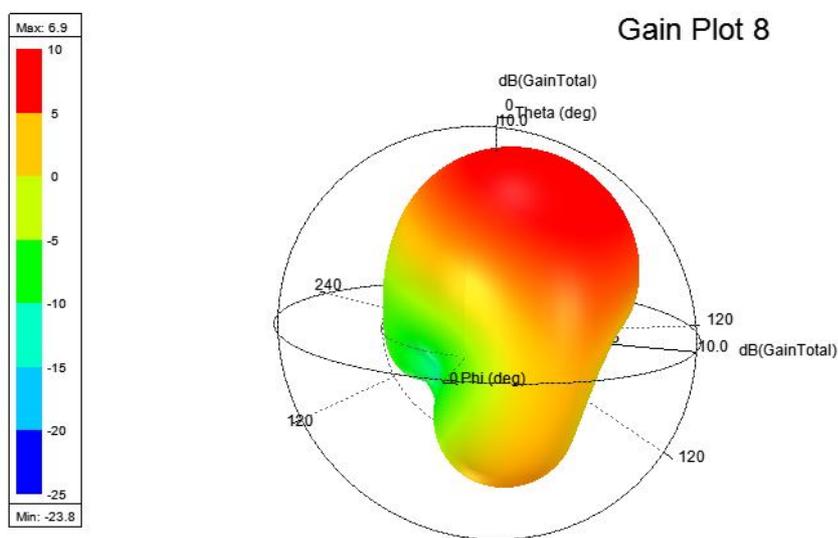


Figure 3. 31. Diagramme de rayonnement en 3D pour $Fr2=4.7$ GHz

A partir des figures 3.28, 3.29, 3.30 et 3.31 on constate que le rayonnement de l'antenne double bande proposé est presque omnidirectionnel dans le plan E ($\phi=0^\circ$) et bidirectionnel dans le plan H ($\phi=90^\circ$).

- **Efficacité de rayonnement:**

La figure 3.32 montre l'efficacité de rayonnement (%) en fonction de la fréquence (GHz) de l'antenne proposée. Cette mesure indique le rapport de la puissance rayonnée par l'antenne à la puissance délivrée. Une très bonne efficacité de rayonnement de **93.13%** et **96,50%** pour les bandes de fréquences 2.7 GHz et 4,7 GHz est obtenue, respectivement.

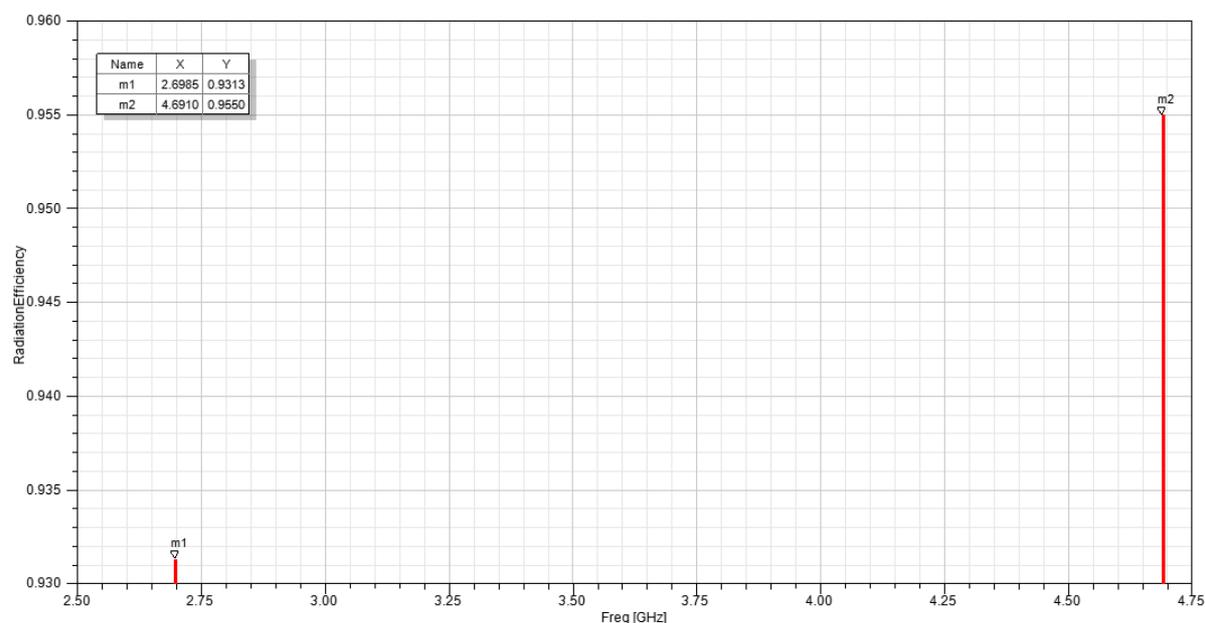


Figure 3. 32. Diagramme d'efficacité de l'antenne proposé

Le tableau 3.8 résume tous les résultats des paramètres des deux fréquences de résonance de l'antenne proposée :

Tableau 3. 8.Résultats de simulation de l'antenne double bande proposée.

Antenne patch rectangulaire double bande		
Fréquences (GHz)	2.7	4.7
Bande passante (MHz)	50	9
Coefficient de réflexion S11 (dB)	-13.23	-13.65
Rapport d'onde stationnaire VSWR	1.5579	1.5244
Gain (dB)	3.5	6.9
Efficacité de rayonnement (%)	93.13	96,50

5 Etude comparative entre les antennes :

5.1 Comparaison entre les antennes conventionnelles de 2.7GHz et 4.7GHz et l'antenne double bande :

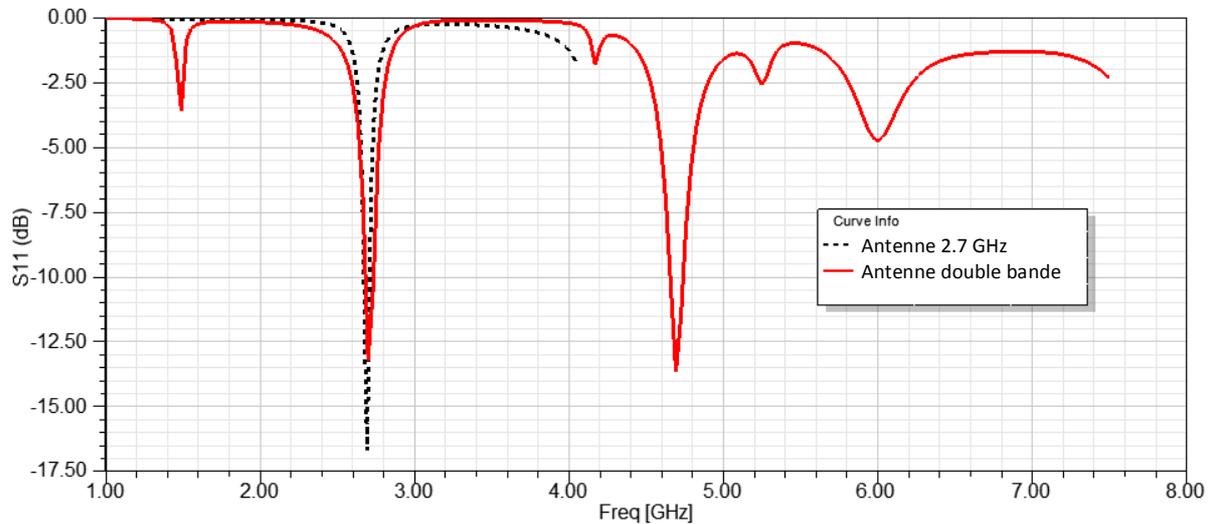


Figure 3. 33. Comparaison S(1,1) entre antenne de 2.7GHz et antenne double bande

La figure 3.33 illustre une comparaison entre une antenne qui rayonne dans la fréquence 2.7 GHz avec un S(1,1) de -16.71 dB et l'antenne Bi bande proposé qui rayonne dans la fréquence 2.7 GHz avec un S(1,1) de -13.23 dB et dans la fréquence 4.7 GHz avec un S(1,1) de -13.65dB. Le tableau 3.9 montre plus de détails concernant la comparaison entre les résultats obtenus.

Tableau 3. 9. Etude comparative entre les antennes

Caractéristique	Antenne 2.7GHz	Antenne 5GHz	Antenne double bande 2.7GHz, 4.7GHz	
Dimension (cm ²)	6×8.07	3.7×4.32	3.74×4.32	
S(1,1) (dB)	-16.71	-27.33	-13.23	-13.65
VSWR	1.3423	1.09	1.5579	1.5242
Gain (dB)	6.361	6.8	3.5	6.9
Bande passante (MHz)	40	100	50	90

L'antenne proposée a permis d'économiser environ **67%** de la superficie totale de l'antenne seule pour la fréquence de 2,7 GHz et une amélioration de la bande passante de l'antenne de 10 MHz.

5.2 Comparaison entre les antennes double bande récemment développées :

Tableau 3.10 présente une étude comparative entre l'antenne proposée et d'autres conceptions d'antennes patch à double bande récemment développées. La comparaison est effectuée en termes de taille d'antenne, de bande passante, de coefficient de réflexion et de gain. L'antenne proposée présente un meilleur gain avec une bande passante acceptable. De plus, l'antenne double bande proposée est plus petite donc occupe une surface minimale par rapport aux autres références.

Tableau 3. 10. Comparaison avec autres antennes patch à double bande dans la littérature

Antenne	Fréquences (GHz)	Dimension (mm ²)	S(1,1) (dB)	Gain (dB)	Bande passante (MHz)	Efficacité de rayonnement
WALI et.al[20]	2.63 4.65	45×50	-21.7 -33.22	2.4 -2.2	860 1400	—
KUMAR et.al [21]	2.4 2.6	55.6×67.2	-27.08 -27.24	3.5 4.5	533 200	—
LIU et.al[22]	4.6 5.2	66.4×66.4	-11.11 -15.68	2.23 4.40	20 80	48%
KUMAR et.al [23]	2.4 4.66	37.23×47.2	-30.44 -14.66	3 -1.24	70 60	—
Antenne proposé	2.7 4.7	37×43.2	-13.23 -13.65	3.5 6.9	50 90	93.13% 96,50%

6 Réalisation de l'antenne double bande proposée:

Dans ce mémoire nous avons réalisé notre antenne double bande en utilisant deux techniques différentes; à savoir, la méthode de photolithographie et la technique de transfert de toner. Le support de l'antenne patch réalisée dans ce projet est une plaque de circuit imprimé de type FR4 époxy de permittivité 4.4 et d'épaisseur 1.6 mm

6.1 Photolithographie :

Cette technique consiste à exposer une résine photosensible à un rayonnement ultraviolet (UV) via un masque ne laissant passer que des rayons à des endroits précis afin d'obtenir des configurations bien spécifiques. Cette insolation modifie les caractéristiques de la résine, cette dernière devient soluble (résine négative) ou résistive (résine positive) vis-à-vis à des solvants de révélation. Le traitement consiste à supprimer le cuivre de partout sauf aux endroits représentant la surface d'antenne (élément rayonnant et plan de masse), en partant d'une plaque entièrement recouverte de cuivre à l'origine.

Dans ce qui suit nous décrivons en détail les démarches que nous avons suivies pour la réalisation de notre antenne double bande.

1. Tracé avec un logiciel de conception votre antenne (dans notre travail on a utilisé le HFSS)

Tracé la conception d'antenne sur ordinateur avec un logiciel spécialisé (ici on a utilisé le HFSS) puis imprimé le schéma sur le papier calque.

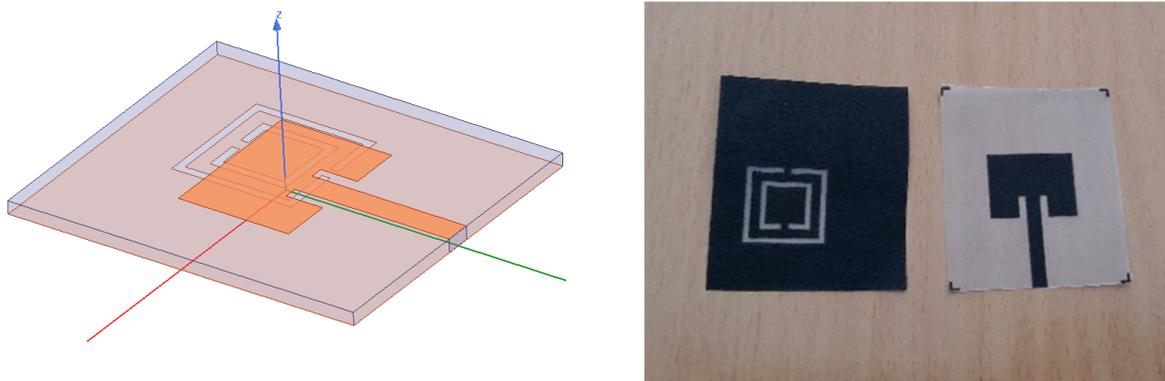


Figure 3. 34. Schéma l'antenne à réaliser

2. Utilisation d'un papier calque

La méthode la plus utilisée aujourd'hui pour réaliser une antenne imprimée consiste à utiliser un papier calque ou un typon représentant la surface que l'on voudra faire apparaître sur l'antenne.

3. Plaque de cuivre photosensible

Pour « transférer » le tracé du papier calque sur la plaque d'antenne, on utilise des plaques de cuivre photosensibles. Les plaques photosensibles sont recouvertes d'une couche photosensible très adhérente, de couleur bleue-violet. La couche est photosensible, ce qui signifie qu'elle est détruite au contact des rayons ultra-violets. Pour protéger le cuivre seulement aux endroits contenant le patch et le plan de masse, on va exposer la plaque photosensible aux rayons ultraviolets, après l'avoir recouverte avec le papier calque: ainsi, la couche protectrice photosensible sera brûlée et éliminée par les rayons ultra-violets à l'extérieur là où le papier calque est transparent.

- L'action de supprimer la couche protectrice photosensible s'appelle l'insolation.
- La machine projetant des rayons ultra-violets sur la couche photosensible s'appelle une insoleuse.

4. Coupe

Découper, à l'aide d'une cisaille, la plaque FR Epoxy selon la conception et les dimensions de l'antenne imprimée.

5. Préparation

Mettre le papier calque dans l'insoleuse en vérifiant bien son sens. Pour que l'insolation puisse s'effectuer, il faut retirer l'adhésif opaque qui protège la couche photosensible des rayons ultra-violets de la lumière ambiante. Une fois l'adhésif retiré, placer la plaque présensibilisée dans l'insoleuse, avec le papier calque côté cuivre.

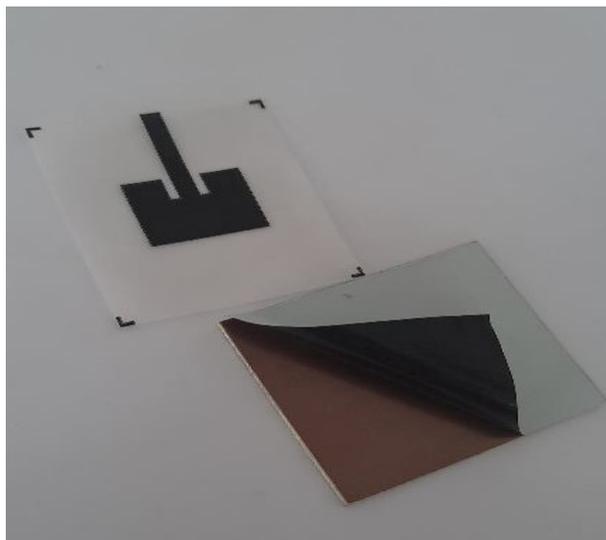


Figure 3. 35. Papier calque et plaque photosensible avec adhésif opaque



Figure 3. 36. Insoleuse

6. Insolation

Pour détruire la couche protectrice photosensible, on expose la plaque recouverte du papier calque aux rayons ultra-violets.

Fermer le capot protecteur de l'insoleuse et régler la minuterie sur 20sec. Les ultra-violets émis par les tubes de l'insoleuse vont détruire la couche photosensible aux endroits non protégés par le tracé du papier calque. Lorsque la minuterie s'arrête, ouvrir le capot protecteur de l'insoleuse et sortir la plaque présensibilisée.



Figure 3. 37. Temps d'insolation

Le temps d'insolation est en général compris entre 10 sec et 40 sec mais dépend de trois facteurs importants : l'opacité de papier calque, la qualité de plaque Epoxy, et la puissance des tubes ultra-violet de l'insoleuse. Pour notre antenne on a commencé avec un temps d'insolation de 40sec, que l'on adaptera après quelques tests en fonction des résultats obtenus.

7. Révélation

Tremper la plaque présensibilisée dans le bain révélateur en suivant bien les consignes de sécurité. Si le révélateur est récent ou très actif, l'opération risque d'être très courte. L'efficacité du révélateur est meilleure quand il est tiède.



Figure 3. 38. Révélateur (perchlorure de fer)

Le cuivre est supprimé par attaque chimique, le produit chimique généralement utilisé pour supprimer le cuivre est le perchlorure de fer. Toute la difficulté réside dans le fait qu'il faut protéger le cuivre là où il doit rester.

Le perchlorure de fer décompose le cuivre qui n'est pas protégé par la couche photosensible : le cuivre sera donc éliminé sur toute la plaque sauf sur les pistes tracées sur le papier calque.

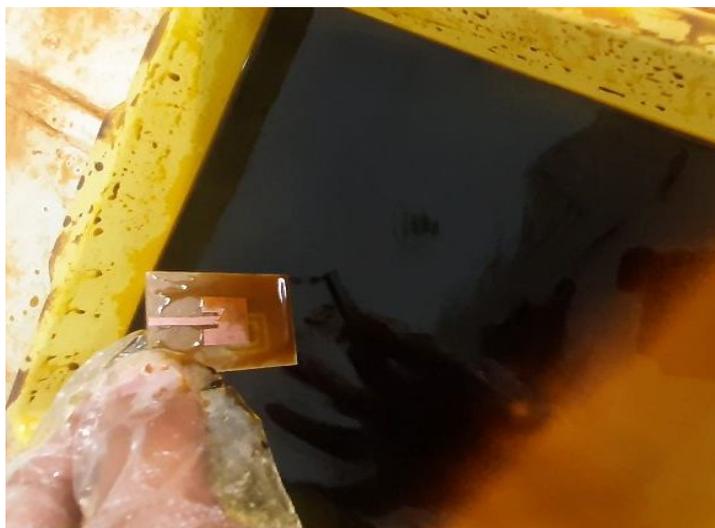


Figure 3. 39. Révélation de l'antenne par perchlorure de fer

Le temps de révélation dépend de l'activité du révélateur (le révélateur est-il neuf ? est-il usé ? est-il beaucoup dilué ?...etc.) mais dépend aussi de l'efficacité de l'insolation (la couche protectrice a-t-elle été totalement brûlée par les rayons ultra-violets ?), mais c'est avant tout l'observation de l'antenne qui vous indiquera l'instant où vous devez sortir la plaque du révélateur.

8. Rinçage

Rincer abondamment la plaque présensibilisée dans l'eau. Le révélateur est encore actif si vous ne l'enlevez pas totalement.

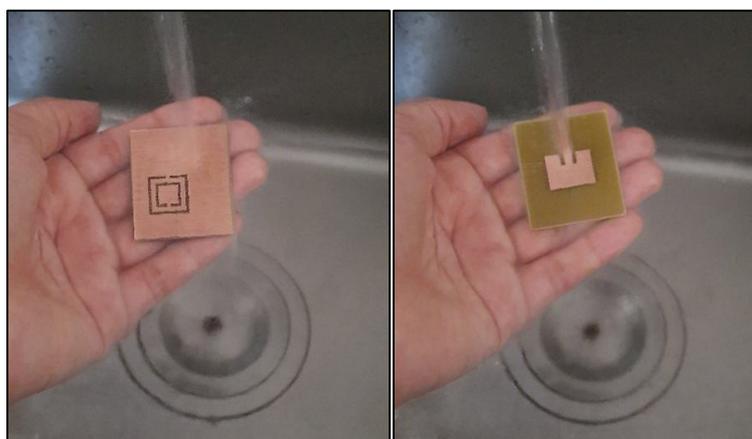


Figure 3. 40. Rinçage de l'antenne dans l'eau

6.2 Technique de transfert de toner :

Le but de la manœuvre est de transférer un typon (dessiné sur ordinateur ou photocopié) sur une plaque de cuivre non présensibilisée. Le tout sans passer par les différentes étapes du tirage sur feuille transparente et du passage par l'insoleuse

1^{ère} étape : Imprimer l'antenne

Il faut obligatoirement imprimer le dessin d'antenne avec une imprimante laser sur du papier glacé. Il est possible d'utiliser du papier photo ou du papier cartonné brillant. Par contre, il est impossible d'obtenir un bon résultat avec du papier ordinaire pour imprimante. Sur du papier ordinaire, le toner fond en profondeur dans la feuille et colle mal sur le cuivre.

L'idée est de faire adhérer le toner du papier imprimé sur notre plaque de cuivre, en le chauffant au moyen d'un fer à repasser.

L'astuce est d'imprimer le typon sur un support qui ne va pas absorber le toner de l'imprimante mais le garder en surface afin que l'on puisse ensuite le transférer.

Les parties noires du dessin doivent être bien sombres. Il faut éviter les grands plans de masse qui se transfèrent moins bien.

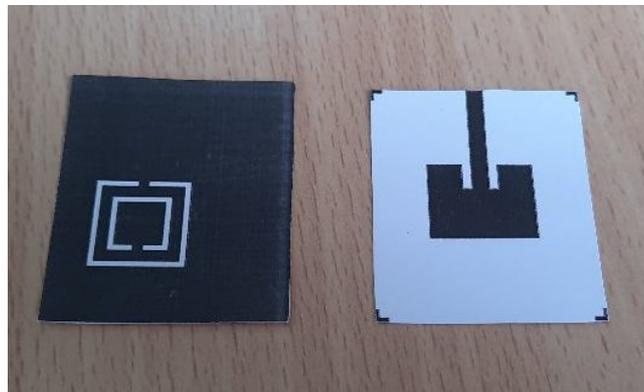


Figure 3. 41. Impression de l'antenne sur du papier glacé

2^{ème} étape : Préparer le l'antenne

Découper une plaque d'antenne imprimée (époxy/cuivre) au dimension du dessin. Frotter le cuivre avec un tampon abrasif ("tampon jex vert") pour rayer légèrement sa surface. Ainsi rayé, le toner colle plus facilement sur le cuivre. Nettoyer le cuivre soigneusement à l'alcool à brûler, ou mieux à l'acétone pour enlever toutes traces de graisses et d'oxydation. Ne plus toucher à la surface cuivrée, sinon le toner ne se collera pas au cuivre là où il a des traces de doigts !

3^{ème} étape : Repasser

Faire chauffer le fer à repasser à la température maximum pendant au moins trois minutes. Poser l'antenne, face cuivrée sur le dessus, sur une surface ne craignant pas la chaleur, mais aussi un peu isolante car il faut que la plaque d'époxy chauffe aussi (Par exemple, placer une plaque métallique en dessous de la plaque époxy). Poser la feuille avec le dessin en dessous. Appuyer délicatement sur la feuille avec le fer à repasser pour commencer à coller le toner sur le cuivre sans déplacer la feuille. Appuyer ensuite fortement pendant 10 à 20 minutes par étapes, sur toute la surface du dessin en soulevant le fer à chaque fois. Faire attention aux bords, car ce sont les éléments qui se transfèrent le moins bien.

La feuille de papier et le toner se collent alors au cuivre légèrement rayé. Une fois le fer passé plusieurs fois sur toute la surface, laisser maintenant complètement refroidir la plaque et le papier.



Figure 3. 42. Transfert du toner sur le cuivre avec le fer à repasser

Laissez la plaque se refroidir naturellement.

4^{ème} étape : Faire disparaître le papier

Remplissez un récipient (ou un évier) d'un peu d'eau froide. Trempez-y la plaque avec le papier pendant quelques minutes.

Au bout de 5 à 10 minutes, pelez la couche supérieure du papier qui se décompose au contact de l'eau. N'hésitez pas à laisser tremper encore.

Le papier se décolle facilement à la main et le toner reste sur le cuivre. Décoller ce qui part facilement et replonger la plaque dans l'eau. Procéder en plusieurs fois jusqu'à avoir une plaque débarrassée entièrement du papier.



Figure 3. 43. Ramollir le papier avec l'eau

En cas de transfert raté, nettoyer la plaque avec de l'acétone et recommencer le transfert.

5^{ème} étape : Tremper la plaque dans le perchlorure de fer

Vous avez maintenant une plaque prête à être plongée dans une solution de perchlorure de fer tiède pour parachever la gravure.

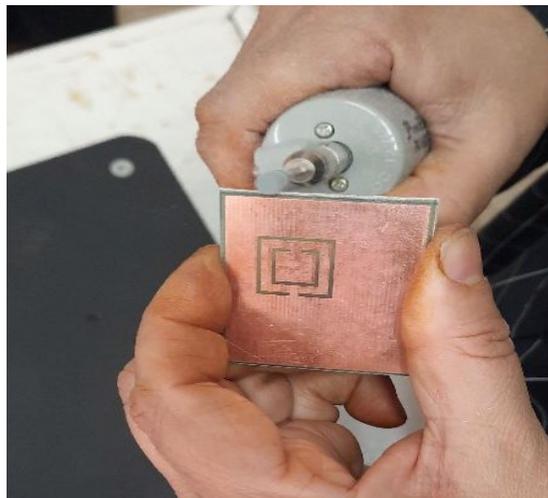
Déposer la plaque dans le bain de perchlorure de fer. Ainsi, le cuivre tombe au fond de récipient et l'on voit facilement quand la plaque est prête.



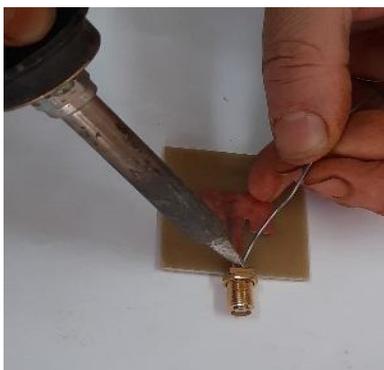
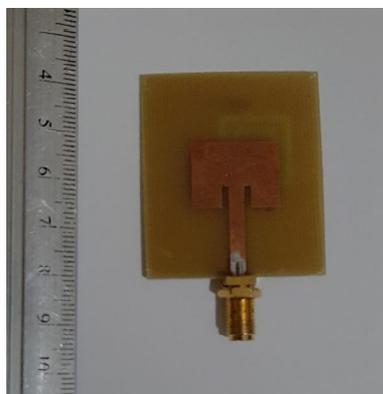
Figure 3. 44. Bain de perchlorure de fer

6^{ème} étape : Enlever le toner et souder les composants

- Rincer l'antenne à l'eau, puis sécher. Ensuite, il est possible d'ajuster et lisser les bords

**Figure 3. 45.** Ajustement et lissage des bords**7^{ème} étape : Souder le port d'alimentation (connecteur SMA)**

La dernière étape est de souder le port d'alimentation

**Figure 3. 46.** Soudage du connecteur SMA**Figure 3. 47.**Face supérieur de l'antenne**Figure 3. 48.** Face inférieur de l'antenne

Les figures 3.47 et 3.48 représentent la face supérieure et inférieure de l'antenne double bande réalisée en utilisant la technique de transfert de toner.

Malheureusement le dispositif Antenna Trainer, disponible au laboratoire d'électronique à l'université de Tébessa, ne peut tracer que le diagramme de rayonnement pour les antennes de fréquences de résonance autour de 500MHz ou autour de 10GHz, ainsi on ne peut pas tracer le diagramme de rayonnement de notre antenne.



Figure 3. 49.Dispositif Antenna Trainer

7 Conclusion :

L'objectif de ce chapitre est la conception une antenne bi-bande pour la communication sans fil. L'antenne proposée est conçue à l'aide d'une structure DGS avec une forme de résonateurs à anneau fendue carrée. Cette structure est gravée dans le plan de masse de l'antenne pour améliorer ces performances.

L'antenne proposé est capable de fonctionner sur deux bandes de fréquences 2.7 GHz et 4.7 GHz avec la même structure. Les bandes de fonctionnement offrent de nombreuses applications potentielles dans les communications sans fil d'aujourd'hui, en particulier pour les normes WiMAX et couvre une partie de la bande Spour les applications d'exploration de la terre et les services de radiolocalisation, de certains satellites de communication [24] et les applications médicales tel que les capteurs de glucose[25].

Une quantité importante de 67% de miniaturisation a été rendue possible grâce à une étude attentive de l'insertion du résonateur à anneau fendue carrée dans le plan de masse d'une antenne conventionnelle de 5GHz.

Pour valider la conception présentée, une étude comparative entre l'antenne proposée et d'autres antennes double bande dans la littérature a été effectuée. L'antenne double bande proposée occupe une surface minimale par rapport aux autres références et offre un gain meilleur avec une bande passante acceptable.

De plus, l'antenne proposée présente une très bonne efficacité de rayonnement de **93.13%** et **96,50%** pour les bandes de fréquences 2.7 GHz et 4,7 GHz, respectivement.

L'antenne double bande optimisée est ensuite réalisée en utilisant deux techniques différentes; à savoir, la méthode de photolithographie et la technique de transfert de toner.

Conclusion générale

La croissance rapide du nombre d'éléments connectés et du nombre d'utilisateurs de systèmes sans fil a ouvert la porte à une course pour créer un des antennes multi bandes pouvant répondre à ces énormes demandes de débit de données. Une antenne fonctionnant sur plusieurs bandes de fréquences avec une meilleure efficacité de rayonnement et une taille réduite est nécessaire pour s'adapter à ces systèmes.

Les antennes microruban planaires sont les meilleurs candidats en raison de leur diagramme de rayonnement omnidirectionnel, de leur structure compacte et simple de leur prix réduit et de leur facilité de construction.

Ainsi, notre travail est principalement axé sur l'amélioration des performances d'une antenne microruban en utilisant une structure DGS. Le but est de créer un comportement b-bande dans une antenne conventionnelle de 5GHz en incorporant un défaut dans plan de masse de forme résonateurs à anneau fendue carrée (RAFC).

L'étude s'est portée sur une variation de la géométrie du RAFC ainsi que sa position par rapport au centre du plan de masse de l'antenne. Pour ce faire, on a utilisé une étude paramétrique qui consiste à fixer tous les paramètres et changer un seul paramètre pour étudier leur influence sur les performances de l'antenne. Cette étude nous a permis d'améliorer les caractéristiques de l'antenne en termes de coefficient de réflexion et gain, sans perdre de performances sur les autres caractéristiques telles que le taux d'onde stationnaire, la bande passante et le diagramme de rayonnement.

Après avoir examiné les différentes conceptions de RAFC sur le plan de masse, l'antenne proposé peut résonner sur plusieurs bandes de fréquence et de produire une réponse multibande avec deux fréquences de résonances de 2.7 GHz et 4.7 GHz..

La première bande est de 2,68 GHz à 2,73 GHz avec une fréquence de fonctionnement de 2,7 GHz et une largeur de bande passante de 50 MHz. Cette bande couvre les normes WiMAX et peut être utilisée dans les services d'aviation, les services maritimes, les satellites d'exploration de la terre et les services de radiolocalisation [24].

La deuxième bande est de 4,65 GHz à 4,74 GHz avec une fréquence de fonctionnement de 4,7 GHz et une largeur de bande d'impédance de 90 MHz. Cette bande couvre une partie de la bande S. La bande S est utilisée pour les radars météorologiques, les radars de navires de

surface et certains satellites de communication (WLAN, Bluetooth, ZigBee, radioastronomie, dispositifs/communications à micro-ondes, téléphones mobiles, GPS, radio amateur) [24] les applications médicales tel que les capteurs de glucose [25].

L'antenne proposée a permis d'économiser une quantité importante environ **67%** de la superficie totale de l'antenne seule pour la fréquence de 2,7 GHz et une amélioration de la bande passante de l'antenne de 10 MHz.

De plus, une étude comparative a été effectuée entre l'antenne proposée et d'autres conceptions d'antennes patch bi-bande dans la littérature. La comparaison est effectuée en termes de dimensions d'antenne, de bande passante, de coefficient de réflexion et de gain. L'antenne bi- bande proposée occupe une surface minimale par rapport aux autres antennes et présente un meilleur gain avec une bande passante acceptable.

Les résultats présentés dans ce mémoire montrent que cette nouvelle conception d'antenne imprimée, qui se compose d'un patch micro-ruban et d'une structure DGS (Defected Ground structure) de forme résonateurs à anneau fendue carrée ont permet de concevoir une antenne double bande avec des bonnes performances.

Le coefficient de réflexion simulé, le gain, le rapport d'ondes stationnaires, l'efficacité de rayonnement et les diagrammes de rayonnement pour chacune des fréquences centrales sont en bon accord. Par conséquent, l'antenne proposée peut être considérée comme un candidat potentiel pour plusieurs systèmes bi-bande dans la communication sans fil.

De nos jours, de nombreux logiciels ont été développés pour la conception et l'analyse d'antennes patch microruban, parmi lesquels HFSS V.19.2 (high-frequency structure simulator) qui a été utilisé pour le travail mentionné dans ce mémoire.

De plus, ce mémoire comprends une étude expérimentale dont nous avons réalisé l'antenne bi-bande proposée en utilisant deux techniques de fabrication manuel; à savoir, la technique de photolithographie et la méthode de transfert de toner.

La réussite de la réalisation de l'antenne en utilisant la technique de photolithographie s'articule sur plusieurs éléments tel que le temps d'insolation, l'opacité de papier calque, la qualité de plaque Epoxy et la puissance des tubes ultra-violet de l'insoleuse ce qui rend cette technique très susceptible aux erreurs. De ce fait, Plusieurs expériences ont échoué. Il est à

noter qu'une meilleure résolution est obtenue en utilisant la technique de transfert de toner par rapport à la technique de photolithographie.

Ce projet nous a permis de prendre en main le logiciel HFSS. En effet, les étapes de conception des antennes ainsi que la création des rapports doivent être bien maîtrisées pour obtenir des résultats valables dans un domaine de fréquence donné. De plus, ce travail nous a permis d'approfondir nos connaissances dans le domaine des antennes ainsi que les techniques de réalisations des antennes patch. La rédaction de ce mémoire nous a permis d'apprendre la terminologie de la recherche et la bonne façon d'utiliser la bibliographie et les références.

Dans le cadre de travaux futurs, et comme l'optimisation manuelle des paramètres de l'antenne prend beaucoup du temps, nous avons l'intention d'utiliser les techniques méta-heuristiques comme les algorithmes génétiques pour l'optimisation des paramètres de l'antenne.

De plus, nous envisageons d'améliorer la technique expérimentale pour avoir plus de précision dans la réalisation des antennes patch.

Références Bibliographiques

- [1] PICON, Odile, CIRIO, Laurent, RIPOLL, Christian, *et al.* *Les antennes: Théorie, conception et applications*. Dunod, 2009.
- [2] ZHOU, Yijun, CHEN, Chi-Chih, et VOLAKIS, John L. Single-fed circularly polarized antenna element with reduced coupling for GPS arrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2008, vol. 56, no 5, p. 1469-1472.
- [3] RAGAD, Hedi. *Etude et conception de nouvelles topologies d'antennes à résonateur diélectrique dans les bandes UHF et SHF*. 2013. Thèse de doctorat. UNIVERSITE DE NANTES; UNIVERSITE DE TUNIS EL MANAR, Tunisie.
- [4] ZAINUD-DEEN, SaberHelmy, EL-AZEM MALHAT, HendAbd, et AWADALLA, Kamal Hassan. A single-feed cylindrical superquadric dielectric resonator antenna for circular polarization. *Progress In Electromagnetics Research*, 2008, vol. 85, p. 409-424.
- [5] PANAGAMUWA, Chinthana J., CHAURAYA, Alford, et VARDAXOGLU, J. C. Frequency and beam reconfigurable antenna using photoconducting switches. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2006, vol. 54, no 2, p. 449-454.
- [6] QIN, Pei-Yuan, WEILY, Andrew R., GUO, Y. Jay, *et al.* Frequency reconfigurable quasi-Yagifoldeddipoleantenna. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2010, vol. 58, no 8, p. 2742-2747.
- [7] MAZLOUMAN, ShahrzadJalali, MAHANFAR, Alireza, MENON, Carlo, *et al.* Reconfigurable axial-mode helixantennasusingshape memory alloys. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2011, vol. 59, no 4, p. 1070-1077.
- [8] WON JUNG, Chang, LEE, Ming-jer, LI, G. P., *et al.* Reconfigurable scan-beam single-arm spiral antennaintegratedwith RF-MEMS switches. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 2006, vol. 54, no 2, p. 455-463.
- [9] LAI, M.-I., WU, T.-Y., HSIEH, J.-C., *et al.* Design of reconfigurable antennasbased on an L-shaped slot and PIN diodes for compact wirelessdevices. *IET Microwaves, Antennas& Propagation*, 2009, vol. 3, no 1, p. 47-54.
- [10] NAKAR, Punit S. Design of a compact microstrip patch antenna for use in wireless/cellular devices. 2004.

-
- [11] ZEMAM, Youssouf et FOUKIA, Aimad Eddine. *Étude et Conception d'Antennes Reconfigurables par Association d'éléments actifs*. 2017. Thèse de doctorat.
- [12] BEHÈOUL, Abla. Contribution à l'étude des antennes microstrip supraconducteur de forme triangulaire. 2010.
- [13] BOUCHRA, MOULFI, IMENE, KELIBEZ, SOUHEYLA, Mme Ferouani, *et al.* Année universitaire 2019/2020.
- [14] DIALLO, Aliou. *Systèmes multi-antennes pour diversité et MIMO*. 2007. Thèse de doctorat. Université Nice Sophia Antipolis.
- [15] ALIBAKHSHI-KENARI, Mohammad. Miniaturized printed monopole antenna with applying the modified conductor-backed plane and three embedded strips based on CPW for multi-band telecommunication devices. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 2016, vol. 8, no 8.
- [16] GOPI, Dattatreya, VADABOYINA, Appala Raju, et DABBAKUTI, JRK Kumar. DGS based monopole circular-shaped patch antenna for UWB applications. *SN Applied Sciences*, 2021, vol. 3, no 2, p. 1-12
- [17] NAKMOUCHE, Mohammed Farouk, ALLAM, A. M. M. A., FAWZY, Diaa E., *et al.* Development of H-Slotted DGS Based Dual Band Antenna Using ANN for 5G Applications. In : *2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. IEEE, 2021. p. 1-5.
- [18] WONG, Hang, SO, Kwok Kan, et GAO, Xia. Bandwidth enhancement of a monopolar patch antenna with V-shaped slot for car-to-car and WLAN communications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, vol. 65, no 3, p. 1130-1136.
- [19] LIU, W.-C. et HU, Z.-K. Broadband CPW-fed folded-slot monopole antenna for 5.8 GHz RFID application. *Electronics Letters*, 2005, vol. 41, no 17, p. 937-939.
- [20] WALI, Rawia, GHNIMI, Said, HAND, A. G., et al. Analysis and design of a new dual band microstrip patch antenna based on slot matching Y-shaped. *The Journal of Engineering Research [TJER]*, 2014, vol. 11, no 2, p. 89-97.
- [21] KUMAR, Sachin, SINGH, AlindPratap, et KHANDELWAL, Mukesh Kumar. Theoretical analysis and design of dual band DGS antenna with small frequency ratio for Wi-Fi and WiMAX applications. *Progress In Electromagnetics Research*, 2017, vol. 62, p. 153-166.
-

- [22] LIU, Huachong, MENG, Linglong, HUO, Xingyue, et al. A Cpw-fed Dual-Band Dual-Pattern Radiation Patch Antenna Based on TM 01 and TM 02 Mode. In : 2020 9th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP). IEEE, 2020. p. 1-2.
- [23] KUMAR, D. Shashiet SUGANTHI, S. Miniaturization of Microstrip Antenna with Enhanced Gain Using Defected Ground Structures. In : 2019 International Conference on Data Science and Communication (IconDSC). IEEE, 2019. p. 1-5.
- [24] KHAN, Tayyaba, RAHMAN, MuhibUr, AKRAM, Adeel, *et al.* A low-cost CPW-fed multiband frequency reconfigurable antenna for wireless applications. *Electronics*, 2019, vol. 8, no 8, p. 900.
- [25] CHRETIENNOT, Thomas. *Biocapteurs hyperfréquences résonants pour l'analyse non-invasive de liquides biologiques*. 2013. Thèse de doctorat. Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier.p. 42.