REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de **T**echnologie

Département de Génie électrique

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Télécommunications

Spécialité : Systèmes Des Télécommunications

Thème

Etude et simulation d'une structure microbande à deux patchs et l'effet de l'ex-centrage sur les caractéristiques de l'antenne

---

Présenté par :

- BEN ZERROUK Marwa
- TALHAOUI Siham

Proposé et Dirigé par :

Dr : BOURAIOU Abdelouahab

Promotion juin 2024

Dédicace

Je dédie ce mémoire à mes chers parents, dont le soutien indéfectible et l'amour inconditionnel ont été ma plus grande source de force et d'inspiration tout au long de ce parcours académique.

À mon frère, dont la présence et le soutien ont été des piliers essentiels dans les moments de doute et de difficulté.

À mes copines, qui ont partagé avec moi les hauts et les bas de cette aventure, je vous suis profondément reconnaissante pour votre amitié sincère et votre soutien inébranlable.

À mon encadrant et à mes enseignants, un immense merci pour votre soutien et vos conseils tout au long de ce parcours

Ce mémoire est le fruit de nos échanges, de nos discussions et de nos encouragements mutuels. Merci d'avoir été à mes côtés tout au long de cette période.

MARWA

Dédicace

Je dédie ce travail à mon père et ma mère, les plus chers et les plus aimés, qui m'ont toujours soutenu et encouragé tout au long de mon parcours scolaire.

Je le dédie à mes frères Youcef et Salim qui sont mon soutien dans la vie.

Je le dédie à mon joyeuse binôme Marwa, je la souhaite toujours du succès dans sa vie.

Je le dédie à mes amies et collègues, à tous ceux qui ont partagé des moments avec moi dans ma vie, et à mes enseignants qui m'ont fourni toutes les connaissances nécessaires pour accomplir ce travail.

Siham

Remerciement

Avant tout, nous tenons à exprimer notre gratitude envers Allah, le Tout-Puissant, pour nous avoir accordé la santé, la patience et la force nécessaires pour mener à bien ce travail. Sans Sa guidance et Ses bénédictions, ce mémoire n'aurait pas été possible.

On tient à remercier tout particulièrement notre encadreur, Dr BOURAIOU Abdelouahab, pour nous avoir suivi et conseillés tout au long de la réalisation de ce mémoire. Nous exprimons également notre gratitude envers les membres du jury, REBIAI MOHAMED et SOUMALI CHAABANE pour avoir accepté de juger notre travail.

Ce mémoire n'aurait jamais pu voir le jour sans le soutien actif des membres de notre famille surtout nos parents qu'ils nous ont toujours encouragé moralement et matériellement et à qui on tient à les remercier.

Enfin, nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance à nos collègues et amis, dont la coopération et les échanges intellectuels ont enrichi cette expérience. Leur soutien moral et leur camaraderie ont été précieux durant cette période.

ملخص

الهوائيات المطبوعة، والمعروفة أيضًا باسم هوائيات الرقعة، هي أجهزة تُستخدم على نطاق واسع في الاتصالات اللاسلكية، وشبكات الهواتف المحمولة، وخاصة في تكنولوجيا الجيل الخامس.

نظرًا لمزاياها العديدة، مثل سهولة التكامل، وخفة الوزن، والتكلفة المنخفضة، اختارها الخبراء لتكون محور الاهتمام والبحث في السنوات القادمة ولنشر شبكات الجيل الخامس.

ومع ذلك، فإن لهذه الهوائيات بعض العيوب، مثل التردد الواحد والنطاق الترددي الضيق. بالإضافة إلى ذلك، فإن النمو السريع في عدد الأجهزة المتصلة في شبكات الجيل الخامس سيسبب العديد من المشاكل، خاصة في الخلايا المجاورة التي ستكون أصغر بسبب محدودية المدى، مما سيتسبب في مشاكل التداخل. كل هذه العيوب تشكل موضوعًا للبحث بهدف تحسينها.

يهدف مشروعنا إلى اقتراح تصميم لهوائي مطبوع برقعتين متراكبتين، حيث سنحاول من خلاله معالجة هذه العيوب، وهي: العمل بترددات متعددة، توسيع النطاق الترددي، وزيادة الكسب. سيساعد هذا التصميم الخبراء على إعادة استخدام الهوائيات في الخلايا المجاورة ويوفر لهم المرونة في اختيار الترددات لتجنب التداخل. بالإضافة إلى ذلك، سيوفر ميزة أخرى فيما يخص خاصية تعدد الإرسال، مما سيزيد من سعة شبكة الجيل الخامس.

الكلمات الرئيسية: الهوائيات المطبوعة، الاتصالات اللاسلكية، تكنولوجيا الجيل الخامس، التداخل.

Abstract

Printed antennas, also known as patch antennas, are devices widely used in wireless communications, mobile phone networks, and particularly in 5G technology. Due to their numerous advantages, such as ease of integration, low weight, and reduced cost, experts have chosen them to be a focus of interest and research for the coming years and for the deployment of 5G networks.

However, these antennas have some drawbacks, such as a single frequency and narrow bandwidth. Additionally, the rapid growth in the number of connected devices in 5G will pose many problems, especially in adjacent cells that will be smaller due to range limitations, causing interference issues. All these drawbacks present a research topic aimed at improving them.

Our project aims to propose a design of a printed antenna with two superimposed patches, through which we will attempt to address these drawbacks, namely: operating at multiple frequencies, expanding bandwidth, and increasing gain. This design will help experts reuse antennas in adjacent cells and provide flexibility in frequency selection to avoid interference. Additionally, it will offer another advantage in multiplexing, which will increase the capacity of the 5G network.

Keywords: Printed antennas, 5G technology, Wireless communications, Interference.

Résumé

Les antennes imprimées, aussi connues sous le nom antennes à patch, sont des dispositifs largement utilisés dans les communications sans fil, les réseaux de la téléphonie mobile et notamment pour la technologie 5G. À cause de leurs multitudes avantages ; tell que la facilité d’intégration le faible poids et le cout réduit ; les experts les ont choisies pour qu’ils soient dans le centre d’intérêt et de recherche pour les années qui viennent et pour le déploiement du réseau 5G.

Quelques inconvénients pour ces antennes comme la fréquence unique, la bande passante étroite, et qui s'ajoute à la croissance très rapide du nombre d'éléments connectés dans la 5G et qui va poser beaucoup de problèmes surtout dans les cellules adjacentes qui vont être plus petites à cause de la portée et qui va causer un problème d'interférence, tous ces inconvénients fonts un sujet de recherche afin de les améliorer.

Notre projet est de proposer une conception d'une antenne imprimée à deux patchs superposés et par laquelle on va essayer d'améliorer ces inconvénients à savoir : le travail avec plusieurs fréquences, élargir la bande passante ainsi qu'augmenter le gain. Cette conception va aider les experts à la réutilisation des antennes dans les cellules adjacentes et les donner une souplesse dans le choix des fréquences pour éviter l'interférence et pour donner un autre avantage dans le multiplexage qui va augmenter la capacité du réseau 5G.

Mots clés : Antennes imprimées, Communications sans fil, Bande passante, Interférence.

Table des matières

Dédicace ..... **I**

Remerciement ..... **III**

ملخص ..... **IV**

Abstract ..... **IV**

Résumé ..... **IV**

Table des matières ..... **V**

Liste de figures ..... **VIII**

Liste des tableaux ..... **XII**

Introduction générale **1**

Chapitre 1 : Généralités sur les antennes microbandes. **1**

1.1. Introduction **2**

1.2. Définition et historique des antennes patch imprimées **2**

1.2.1. Description des antennes patchs : 3

1.2.1.1. L'élément rayonnant : 3

1.2.1.2. Le substrat : 4

1.2.1.3. Le plan de masse : 4

1.2.2. Les avantages et les inconvénients des antennes patch 5

1.2.2.1. Les Avantages : 5

1.2.2.2. Les inconvénients : 5

1.2.3. Applications : 5

1.3. Caractéristiques d'une antenne : 6

1.3.1. Coefficient de réflexion 6

1.3.2. Rapport d'onde stationnaire (VSWR) 6

1.3.3. Diagramme de rayonnement 7

1.3.4. Gain 7

1.3.5. La directivité 8

1.3.6. Polarisation 8

1.3.7. Angle d'ouverture 9

1.3.8. Ouverture rayonnante et Rendement 9

1.3.9. Bande passante 10

1.4. Techniques d'alimentations 10

1.4.1. Alimentation par ligne micro-ruban 10
1.4.2. Alimentation par sonde coaxial 11
1.4.3. Alimentation par couplage électromagnétique 11
1.4.4. Alimentation à travers d'une ouverture au plan de masse 12
1.5. Les techniques d'adaptation des antennes imprimées 13
1.5.1. Adaptation par ligne quart d'onde 13
1.5.2. Adaptation avec encoche 13
1.6. Conclusion 14
Chapitre 2 : Étape de réalisation d'une antenne à deux patchs sur logiciel HFSS 16
2.1. Introduction 17
2.2. Problématique 17
2.3. Description de la conception 17
2.4. Présentation du logiciel HFSS 18
2.4.1. Définition de logiciel HFSS 18
2.4.2. Historique et évolution du logiciel 18
2.4.3. Un projet en HFSS 19
2.4.3.1. Comment commencer HFSS 19
2.4.3.2. Le Project Manager 19
2.4.3.3. La barre d'outils 20
2.4.3.4. Le Message Manager 20
2.4.3.5. La fenêtre de Propretés 20
2.4.3.6. La fenêtre de Progress 21
2.4.3.7. La fenêtre de 3D Modeler 21
2.4.3.8. Comment ouvrir un nouveau projet 21
2.4.3.9. Pour ouvrir un projet HFSS existant 22
2.4.3.10. Définir le type de solution 22
2.5. Création du modèle 23
2.5.1. L'Unité du Modèle de Mesure 23
2.5.2. Création des éléments 24
2.5.2.2. Le premier substrat diélectrique 25
2.5.2.3. Le premier élément rayonnant (patch inférieure) 25
2.5.2.4. La ligne d'alimentation du patch1 27

2.5.2.5. Le deuxième substrat diélectrique 28
2.5.2.6. Le deuxième élément rayonnant (patch supérieure) 28
2.5.2.7. La ligne d'alimentation du patch2 28
2.5.2.8. L'adaptation en utilisant des encoches 28
2.5.2.9. Création du port (waveport) 29
2.5.2.10. Milieu de rayonnement 30
2.6. Structure finale 30
2.7. Installation d'analyse (Analysis setup) 31
2.8. Ajouter le champ de fréquence (Add Frequency Sweep) 31
2.9. La validation et l'analyse 32
2.10. Les résultats 33
2.11. Conclusion 33
Chapitre 3 : Discussion des résultats de la conception d'une antenne à deux patchs rectangulaires sur HFSS 34
3.1. Introduction 35
3.2. Conception d'une Antenne avec deux Patchs Rectangulaire Résonant à 2.4 GHz 35
3.2.1. Caractéristiques et spécifications de conception 35
3.2.2. Analyse des résultats 36
3.3. Conception d'une Antenne avec un seul Patch Rectangulaire Résonant à 3,5 GHz (Application 5G) 37
3.3.1. Caractéristiques et spécifications de conception 37
3.3.2. Analyse des résultats 38
3.4. Conception d'une antenne à deux patchs rectangulaires résonant à 3.5GHz 40
3.4.1. Caractéristiques et spécifications de conception 40
3.4.2. Analyse des résultats 41
3.5. Étude de l'impact de l'ex-centrage sur les performances de l'antenne à deux patchs rectangulaires 44
3.5.1. Effet de l'ex-centrage du patch supérieur 44
3.5.2. Effet de l'ex-centrage du patch inférieur 57
3.6. Conclusion 68
Références Bibliographiques 69

Liste de figures

Figure1- 1 structure générale d'un antenne patch imprimé 3
Figure1- 2 Diverses géométries d'antennes patchs 3
Figure1- 3 diagramme de rayonnement.....7
Figure1- 4 types de polarisation 9
Figure1- 5 L'angle d'ouverture 9
Figure1- 6 La bande passante.....10
Figure1- 7 Alimentation par ligne micro-ruban.....11
Figure1- 8 Alimentation par sonde coaxial 11
Figure1- 9 Alimentation par ligne couplée.....12
Figure1- 10 alimentation avec ouverture.....12
Figure1- 11 adaptations par ligne quart d'onde 13
Figure1- 12 Adaptation par encoche.....14

Figure2- 1 La fenêtre de HFSS.....19
Figure2- 2 La fenêtre de Project manager 19
Figure2- 3 La barre d'outils 20
Figure2- 4 La fenêtre de manager de message 20
Figure2- 5 Fenêtre de propretés.....20
Figure2- 6 Fenêtre de Progress.....21
Figure2- 7 La fenêtre de modèle en 3D.....21
Figure2- 8 L'ouverture d'un nouveau projet 22
Figure2- 9 l'ouverture d'un projet existant.....22
Figure2- 10 type de solution.....23
Figure2- 11 l'unité du modèle.....23
Figure2- 12 dimension et emplacement de plan de masse 24
Figure2- 13 dimension et emplacement de substrat1 25
Figure2- 14 propriété du substrat 25
Figure2- 15 fenêtre de calculateur emtalk.....26
Figure2- 16 Les dimensions et l'emplacements de patch1 27
Figure2- 17 Le port d'alimentation.....29
Figure2- 18 propriété de milieu de rayonnement 30
Figure2- 19 Structure finale de deux patchs rectangulaires sur HFSS.....31
Figure2- 20 Fenêtre d'installation d'analyse 31
Figure2- 21 champ de fréquence 32
Figure2- 22 fenêtre de validation 32
Figure2- 23 La fenêtre d'analyse 32
Figure2- 24 Le type d'affichage de résultat 33

Figure 3- 1 Coefficient de réflexion d'une antenne a deux patchs résonants à 2.4GHz 36

Figure 3- 2 Coefficient de réflexion d'une antenne a deux patchs résonants à 2.4GHz excentré avec 1cm....36
Figure 3- 3 Antenne patch rectangulaire alimentée par ligne microbande....37
Figure 3- 4 géométrie d'antenne patch rectangulaire sur HFSS fonctionne à la fréquence de 3.5 GHz....38
Figure 3- 5 Coefficient de réflexion ***S*11** d'une antenne avec un seul patch résonant à 3.5GHz .38
Figure 3- 6 Le gain en 3D d'antenne patch rectangulaire sur HFSS fonctionne à la fréquence de 3.5 GHz....39
Figure 3- 7 l'efficacité de rayonnement en fonction de la fréquence d'antenne patch rectangulaire fonctionne à la fréquence de 3.5 GHz....40
Figure 3- 8 La puissance rayonnée et la puissance acceptée en fonction de la fréquence d'antenne patch rectangulaire sur HFSS fonctionne à la fréquence de 3.5 GHz....40
Figure 3- 9 la conception d'une antenne a deux patchs résonants à 3.5Ghz sur HFSS....41
Figure 3- 10 Coefficient de réflexion S11 d'une antenne à deux patchs rectangulaires résonant a 3.5GHz....41
Figure 3- 11 le gain en 3D de l'antenne a deux patchs rectangulaires sur HFSS fonctionne à la fréquence de 3.5 GHz....42
Figure 3- 12 l'efficacité de l'antenne a deux patchs en fonction de la fréquence d'une résonant a 3.5GHz....43
Figure 3- 13 La puissance rayonnée et la puissance acceptée d'une antenne a deux patchs résonants a 3.5GHz en fonction de la fréquence....43
Figure 3- 14 Antenne a Patch excentré....44
Figure 3- 15 Coefficient de réflexion ***S*11** d'une antenne à deux patchs après l'ex-centrage de patch sup avec 1 mm....45
Figure 3- 16 le gain en 3D de l'antenne a deux patchs Après l'ex-centrage de 1mm....46
Figure 3- 17 l'efficacité de l'antenne a deux patchs après l'ex-centrage de patch sup avec 1 mm 46
Figure 3- 18 la puissance rayonnée et acceptée de l'antenne a deux patchs après l'ex-centrage de 1mm....47
Figure 3- 19 Coefficient de réflexion ***S*11** d'une antenne à deux patchs après l'ex-centrage de patch sup avec 2 mm....47
Figure 3- 20 le gain en 3D de l'antenne a deux patchs Après l'ex-centrage de2mm....48
Figure 3- 21 l'efficacité de rayonnement de l'antenne a deux patchs en fonction de la fréquence Après l'ex-centrage de2mm....49
Figure 3- 22 La puissance rayonnée et la puissance acceptée en fonction de la fréquence Après l'ex-centrage de2mm....49
Figure 3- 23 Coefficient de réflexion ***S*11** d'une antenne à deux patchs après l'ex-centrage de patch sup avec 3 mm....50
Figure 3- 24 le gain en 3D de l'antenne a deux patchs Après l'ex-centrage de 3mm....51
Figure 3- 25 l'efficacité de rayonnement en fonction de la fréquence Après l'ex-centrage de2mm....51
Figure 3- 26 La puissance rayonnée et la puissance acceptée en fonction de la fréquence Après l'ex-centrage de2mm....52

Figure 3- 27 Coefficient de réflexion $S11$ d'une antenne à deux patchs après l'ex-centrage de patch sup avec -2 mm 52
Figure 3- 28 le gain en 3D de l'antenne a deux patchs Après l'ex-centrage de -2mm 53
Figure 3- 29 l'efficacité de rayonnement en fonction de la fréquence Après l'ex-centrage de -2mm 54
Figure 3- 30 La puissance rayonnée et la puissance acceptée en fonction de la fréquence Après l'ex-centrage de -2mm 54
Figure 3- 31 Coefficient de réflexion $S11$ d'une antenne à deux patchs après l'ex-centrage de patch sup avec 2 mm sur OX, -1mm sur OY 55
Figure 3- 32 le gain en 3D de l'antenne a deux patchs fonctionne à la fréquence Après l'ex-centrage de2 mm sur OX et -1mm sur OY 56
Figure 3- 33 l'efficacité de rayonnement en fonction de la fréquence Après l'ex-centrage de2 mm sur OX et -1mm sur OY 56
Figure 3- 34 La puissance rayonnée et la puissance acceptée en fonction de la fréquence Après l'ex-centrage de2 mm sur OX et -1mm sur OY 57
Figure 3- 35 Coefficient de réflexion $S11$ d'une antenne à deux patchs après l'ex-centrage de patch inf. avec 1 mm 58
Figure 3- 36 Le gain en 3D d'une antenne à deux patchs rectangulaires après l'ex-centrage de patch inf. avec 1 mm 59
Figure 3- 37 l'efficacité de rayonnement en fonction de la fréquence après l'ex-centrage de patch inf. avec 1 mm 59
Figure 3- 38 La puissance rayonnée et la puissance acceptée en fonction de la fréquence après l'ex-centrage de patch inf. avec 1 mm 60
Figure 3- 39 Coefficient de réflexion $S11$ d'une antenne à deux patchs rectangulaires après l'ex-centrage de patch inf. avec 2 mm 60
Figure 3- 40 Le gain en 3D d'une antenne à deux patchs après l'ex-centrage de patch inf. avec 2 mm 61
Figure 3- 41 l'efficacité de rayonnement en fonction de la fréquence après l'ex-centrage de patch inf. avec 2 mm 62
Figure 3- 42 La puissance rayonnée et la puissance acceptée en fonction de la fréquence après l'ex-centrage de patch inf. avec 2 mm 62
Figure 3- 43 Coefficient de réflexion $S11$ d'une antenne à deux patchs après l'ex-centrage de patch inf. avec 2 mm sur OX et 2mm sur OY 63
Figure 3- 44 Le gain en 3D d'une antenne à deux patchs après l'ex-centrage de patch inf. avec 2 mm sur ,OX 2mm OY 64
Figure 3- 45 l'efficacité de rayonnement en fonction de la fréquence après l'ex-centrage de patch inf. avec 2 mm sur OX et 2mm sur OY 64
Figure 3- 46 La puissance rayonnée et la puissance acceptée en fonction de la fréquence après l'ex-centrage de patch inf. avec 2 mm sur OX et 2mm sur OY 65
Figure 3- 47 le S11 d'une antenne à 2 patchs résonant a 3.5GHz après l'ajout de 2 mm sur les dimensions du patch sup 65
Figure 3- 48 Le gain en 3D d'une antenne à deux patchs après l'ajout de 2 mm sur les dimensions du patch sup 66

Figure 3- 49 l'efficacité de rayonnement en fonction de la fréquence après l'ajout de 2 mm sur les dimensions du patch sup 67
Figure 3- 50 La puissance rayonnée et la puissance acceptée en fonction de la fréquence après l'ajout de 2 mm sur les dimensions du patch sup 67

Liste des tableaux

Tableau1- 1 Critères des substrats soft 4
Tableau1- 2 Critère des substrats hard 4

Tableau3- 1 Dimensions de l'antenne à deux patchs résonants en 2,4 GHz 35
Tableau3- 2 Dimensions de l'antenne à un seul patch résonants en 3.5 GHz 37
Tableau3- 3 Analyse de s11 de l'antenne avec un seul patch résonant a 3.5ghz 39
Tableau3- 4 Analyse de s11 de l'antenne avec deux patchs résonants a 3.5ghz 42
Tableau3- 5 Analyse de s11 de l'antenne avec deux patchs après l'ex-centrage de patch sup avec 1 mm 45
Tableau3- 6 Analyse de s11 de l'antenne avec deux patchs après l'ex-centrage de patch sup avec 2 mm 48
Tableau3- 7 Analyse de s11 de l'antenne avec deux patchs après l'ex-centrage de patch sup avec 3 mm 50
Tableau3- 8 Analyse de s11 de l'antenne avec deux patchs après l'ex-centrage de patch sup avec -2 mm 53
Tableau3- 9 Analyse de s11 de l'antenne avec deux patchs après l'ex-centrage de patch sup avec 2 mm sur OX et -1mm sur OY 55
Tableau3- 10 Analyse de s11 de l'antenne avec deux patchs après l'ex-centrage de patch inf. avec 1 mm 58
Tableau3- 11 Analyse de s11 de l'antenne avec deux patchs après l'ex-centrage de patch inf. avec 2 mm 61
Tableau3- 12 Analyse de s11 de l'antenne avec deux patchs après l'ex-centrage de patch inf. avec 2 mm sur ,OX 2mm OY 63
Tableau3- 13 Analyse de s11 de l'antenne avec deux patchs après l'ajout de 2 mm sur les dimensions du patch sup 66

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

Dans le domaine des communications sans fil, la conception d'antennes joue un rôle crucial en garantissant une transmission efficace des signaux électromagnétiques. Les antennes à patch, en particulier les antennes à patch rectangulaire, sont largement utilisées en raison de leur faible coût, de leur facilité de fabrication et de leur compatibilité avec les circuits imprimés. Le présent mémoire est consacré à l'étude et à la conception d'une antenne avec deux patchs rectangulaires résonant à une fréquence de 3,5 GHz, une bande couramment utilisée pour les applications 5G. Nous analyserons également l'effet de l'ex-centrage sur les caractéristiques de l'antenne.

Le premier chapitre de ce mémoire est dédié aux généralités sur les antennes micro-ruban, en abordant leurs principes de fonctionnement, leurs avantages et leurs applications dans diverses technologies modernes. Ce chapitre pose les bases théoriques nécessaires pour comprendre les aspects techniques des antennes à patch.

Dans le deuxième chapitre, nous nous concentrons sur le logiciel HFSS (High-Frequency Structure Simulator), un outil essentiel pour la conception et la simulation des antennes. Nous y détaillons le processus de conception d'antennes sur HFSS, offrant ainsi une méthodologie claire et structurée pour la modélisation et l'optimisation des antennes.

Le troisième chapitre présente notre conception d'une antenne à deux patchs résonants à 3,5 GHz. Pour valider notre approche, nous nous appuyons sur un article expérimental spécifique, servant de référence pour notre travail. Nous explorons également la conception d'un seul patch résonant à 3,5 GHz, une bande fréquemment utilisée pour les communications 5G. Cette comparaison vise à mettre en évidence les avantages et les performances de notre conception à deux patchs par rapport à une conception traditionnelle à un seul patch.

Ensuite, nous procédons à l'examen détaillé de notre conception à deux patchs, en évaluant ses performances et en les comparant à celles de l'antenne à un seul patch. Nous abordons également l'effet de l'ex-centrage des patchs supérieur et inférieur sur les caractéristiques de l'antenne, en étudiant comment ces ajustements influencent les paramètres tels que la bande passante, le gain et l'impédance.

Ce mémoire apporte une contribution significative à la conception des antennes à patch en démontrant l'impact de configurations innovantes et d'ajustements géométriques sur les performances des antennes. Notre approche méthodique et notre utilisation d'outils de simulation avancés comme HFSS offrent des perspectives intéressantes pour l'optimisation des antennes dans les applications sans fil modernes.

Chapitre 1 : Généralités sur les antennes microbandes.

Chapitre 1 : GÉNÉRALITÉS SUR LES ANTENNES MICROBANDES

1.1. Introduction

Ce chapitre se penche sur les antennes patch imprimées, un élément essentiel de nombreux systèmes de communication modernes. En commençant par une définition et un bref historique des antennes patch, nous explorerons ensuite en détail les composants clés de ces antennes, notamment l'élément rayonnant, le substrat et le plan de masse. Nous examinerons également les avantages et les inconvénients associés à l'utilisation des antennes patch, ainsi que leurs diverses applications dans différents domaines.

Par la suite, nous nous attarderons sur les caractéristiques importantes d'une antenne, telles que le coefficient de réflexion, le rapport d'onde stationnaire (VSWR), la directivité, le gain, la polarisation, l'angle d'ouverture et la bande passante. Comprendre ces caractéristiques est crucial pour évaluer les performances et les capacités d'une antenne patch dans un environnement donné.

En outre, nous examinerons les différents types d'alimentation des antennes patch, notamment l'alimentation par ligne micro-ruban, par sonde coaxiale, par couplage électromagnétique et à travers d'une ouverture au plan de masse. Nous discuterons également des techniques d'adaptation des antennes imprimées, telles que l'adaptation par ligne quart d'onde et l'adaptation avec encoche.

Ce chapitre servira de base solide pour une compréhension approfondie des antennes patch imprimées, en fournissant un aperçu complet de leurs composants, de leurs caractéristiques et de leurs applications, ainsi qu'une exploration des techniques d'alimentation et d'adaptation.

1.2. Définition et historique des antennes patch imprimées

Une antenne patch est composée d'une métallisation de forme géométrique appropriée, appliquée sur une face d'un substrat diélectrique, tandis que l'autre face est également métallisée. L'antenne de base comprend généralement une métallisation partielle pour former l'élément rayonnant, tandis que la partie inférieure du substrat est entièrement métallisée. De nos jours, des structures avec des motifs plus complexes sont également disponibles. Cette métallisation détermine toutes les spécificités de l'antenne, y compris ses performances et son mode de fonctionnement.

L'antenne imprimée, imaginée par Georges Deschamps en 1953, vise à canaliser efficacement les rayonnements parasites dans les circuits micro-ondes planaires. Le concept, déposé en brevet par Henri Gutton et Georges Boissinot en 1956, introduit des discontinuités le long d'une ligne micro ruban pour le rayonnement. Les premiers prototypes apparaissent dans les années 1970 grâce aux progrès de la photolithogravure et de la modélisation. Des réalisations pour la NASA par John Howell et des applications de télémétrie par Robert Munson marquent des étapes clés. Munson propose également le premier réseau d'antennes imprimées pour augmenter la directivité du rayonnement. Ce domaine connaît depuis lors un essor important, avec des antennes imprimées utilisées dans diverses applications allant des bandes UHF aux bandes millimétriques. Les chercheurs visent à développer des antennes imprimées universelles et reconfigurables, tandis que les concepteurs disposent de logiciels de simulation avancés pour les soutenir dans leur travail.

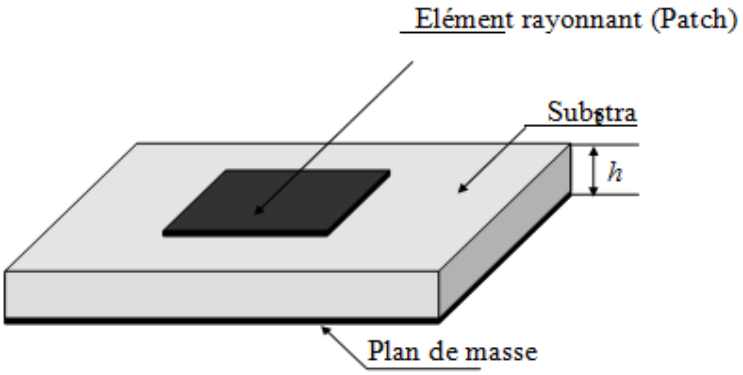


Figure1- 1 *structure générale d'une antenne patch*

1.2.1. Description des antennes patchs

Les antennes patch sont caractérisées par plusieurs paramètres physiques et géométriques :

1.2.1.1. L'élément rayonnant

Dans une antenne patch, l'élément rayonnant est communément désigné sous le nom de "patch". Il s'agit d'une pièce métallique déposée sur un substrat diélectrique. Les dimensions de ce patch varient généralement de $\lambda/2$ à λ, selon la fréquence de résonance souhaitée. Fabriqué à partir de matériaux conducteurs tels que le cuivre ou l'or, le patch est photogravé sur le substrat diélectrique avec les lignes d'alimentation. Le patch peut adopter différentes formes géométrique Les propriétés du substrat, telles que sa permittivité relative et son épaisseur, jouent un rôle crucial dans les performances de l'antenne patch.

1.2.1.1.1. Les diverses formes des éléments rayonnants

Les antennes patch peuvent avoir différentes géométries de leur élément rayonnant, en fonction des besoins de conception et des exigences de performances. Vous trouverez ci-dessous quelques formes de patch courantes utilisées dans les antennes :

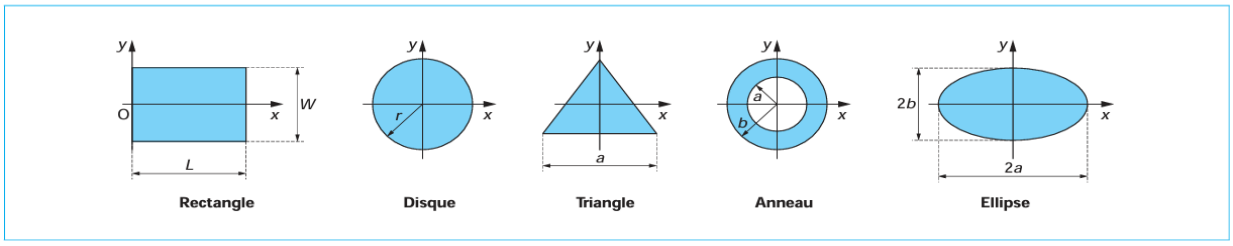


Figure1- 2 *Diverses géométries d'antennes patchs*

1.2.1.2. Le substrat

1.2.1.2.1. Les types de substrats

Il existe deux types de substrats qui sont le substrat soft et le substrat hard :

- Les substrats soft sont connus pour leur flexibilité, leur coût relativement bas et leur facilité de fabrication, mais ils présentent des coefficients d'expansion thermique élevés. Ci-dessous se trouve un tableau présentant quelques exemples de substrats soft :

__Tableau1- 1__ Critères des substrats soft

Substrat	Constante diélectrique relative (Ɛr)	Constante diélectrique effective(Ɛeff)	Pertes diélectriques Tan δ
RT-Duroid- 5880	2.2	2.1144	0.0009
RT-Duroid- 5870	2.33	2.2352	0.0011
Neltec NX 9240	2.4	2.3002	0.0010
Arlon Diclad 522	2.5	2.3931	0.0010
Benzocyclobu- Ten	2.6	2.4859	0.0010

- Les substrats hard sont réputés pour leur fiabilité accrue et leurs faibles coefficients d'expansion thermique. Cependant, ils sont plus coûteux et moins souples que les substrats soft. Voici quelques exemples de substrat hard :

__Tableau1- 2__ Critère des substrats hard

Substrat	La constante diélectrique relative (Ɛr)
Quartz	3.78
Saphir	11.7
GaAs	12.3

1.2.1.2.2. Les critères de choix du substrat

Le choix du substrat diélectrique dans une antenne patch est un compromis entre les performances recherchées et les contraintes de fabrication et de coût. Idéalement, on préfère un substrat avec une permittivité relative faible ($\varepsilon r < 3$) et une épaisseur relativement mince par rapport à la longueur d'onde (typiquement $\lambda/10$ à $\lambda/50$). Ces caractéristiques favorisent un rayonnement optimal de l'antenne patch, avec des pertes diélectriques réduites, une bande passante plus large et un gain accru. Ainsi, le choix du substrat diélectrique joue un rôle crucial dans la conception et les performances globales de l'antenne patch.

1.2.1.3. Le plan de masse

Le plan de masse dans une antenne patch est une partie cruciale de sa structure. Il se présente sous la forme d'une surface conductrice qui agit comme un contrepoids électromagnétique pour l'élément rayonnant (le patch). En étant positionné sous le substrat

diélectrique et le patch métallique, il participe à une configuration multicouche qui favorise le rayonnement de l'antenne patch, tout en contribuant à sa directivité et à son efficacité.

1.2.2. Les avantages et les inconvénients des antennes patch

Les antennes à micro-rubans se sont avérées être d'excellents émetteurs pour de nombreuses applications en raison de leurs nombreux avantages, mais elles présentent également quelques inconvénients

1.2.2.1. Les Avantages

Les antennes à micro-rubans présentent plusieurs avantages par rapport aux antennes micro-ondes conventionnelles. Les principaux avantages des antennes à micro-rubans sont énumérés comme suit :

- Elles sont légères et ont un petit volume ainsi qu'une configuration plane à profil bas.
- Elles peuvent être conformes à la surface hôte.
- Leur facilité de production de masse à l'aide de la technologie des circuits imprimés entraîne un faible coût de fabrication.
- Elles sont plus faciles à intégrer avec d'autres circuits intégrés sur le même substrat.
- Elles permettent à la fois la polarisation linéaire et la polarisation circulaire.
- Elles peuvent être compactes pour une utilisation dans les communications mobiles personnelles.
- Elles permettent des opérations à double et triple fréquence.

1.2.2.2. Les inconvénients

Les antennes à micro-rubans présentent quelques inconvénients par rapport aux antennes micro-ondes conventionnelles. Ils sont les suivants :

- Bande passante étroite.
- Gain plus faible.
- Capacité de manipulation de puissance plus faible.

Les antennes à micro-rubans ont généralement une bande passante étroite, de 1 à 5 %, ce qui limite leur utilisation généralisée. Pour surmonter cette limitation, la recherche s'est concentrée sur l'augmentation de leur bande passante. Des progrès significatifs ont été réalisés, avec des antennes à micro-rubans atteignant désormais des bandes passantes allant jusqu'à 70 %. Ce progrès a ouvert la voie à diverses configurations d'antennes à micro-rubans à large bande, discutées en détail dans ce chapitre et les suivants.

1.2.3. Applications

Les antennes patch sont extrêmement polyvalentes et trouvent leur place dans de nombreux domaines grâce à leurs avantages en termes de coût, d'encombrement et de performances. Voici quelques-unes de leurs applications courantes :

- Télécommunications sans fil : Les antennes patch sont essentielles dans les réseaux de télécommunications sans fil, comme le Wi-Fi, les réseaux cellulaires et les systèmes de communication par satellite, offrant une connectivité fiable et efficace.

- Radars : Elles sont également utilisées dans les systèmes radar pour la détection et le suivi d'objets, qu'il s'agisse d'applications militaires ou civiles, fournissant une précision et une sensibilité élevées.
- Systèmes embarqués : Grâce à leur poids réduit, leur faible encombrement et leur capacité d'intégration dans des dispositifs compacts, les antennes patch sont largement employées dans les systèmes embarqués tels que les drones, les véhicules autonomes et les appareils portables.
- Télédétection : Elles jouent un rôle important dans les systèmes de télédétection pour la surveillance de l'environnement, la cartographie et d'autres applications nécessitant la collecte de données à distance, offrant une grande sensibilité aux signaux.
- Systèmes de navigation : Les antennes patch sont également indispensables dans les systèmes de navigation par satellite, comme le GPS, pour la réception des signaux de positionnement et de synchronisation, assurant une localisation précise et fiable.

1.3. Caractéristiques d'une antenne

L'antenne est un élément conducteur électrique souvent positionner dans un environnement dégagé, il se définit par les caractères suivants **:**

1.3.1. Coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion S11 représente la manière dont l'énergie est absorbée par une antenne en général. C'est le rapport des amplitudes des ondes incidentes par rapport aux ondes réfléchies, lorsque l'antenne d'impédance Z est connectée à la source via une ligne de transmission d'impédance caractéristique Zc qui est souvent égale à 50 ohms. Le coefficient S11 est défini comme suit:

$$\Gamma = S11 = \frac{Z_{in} - Zc}{Z_{in} + Zc} \qquad (1, 1)$$

Le coefficient de réflexion peut être exprimé en dB :

$$|S11|_{db} = 20\,log|S_{11}| \qquad (1, 2)$$

1.3.2. Rapport d'onde stationnaire (VSWR)

Le Rapport d'Ondes Stationnaires (ROS), également connu sous le nom de Voltage Standing Wave Ratio (VSWR) en anglais, est un paramètre crucial lors de l'installation et du réglage des antennes d'émission. Il caractérise l'adaptation de l'antenne. Lorsque l'impédance de l'antenne correspond exactement à celle de la ligne d'alimentation, un transfert d'énergie maximal se produit entre l'émetteur et l'antenne. Cependant, en cas de désadaptation, une partie de l'onde incidente est réfléchie, ce qui génère un régime d'ondes stationnaires le long de la ligne d'alimentation. Dans ce régime, l'amplitude de l'onde stationnaire varie le long de la ligne. Le ROS est le rapport entre l'amplitude maximale et l'amplitude minimale de cette onde stationnaire, et il est exprimé sous la forme suivante:

$$ROS = \frac{Vmax_}{Vmin} = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \qquad (1, 3)$$

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

$$1 \leq ROS \leq 2$$

1.3.3. Diagramme de rayonnement

Les antennes sont rarement omnidirectionnelles c'est à dire rayonnent de manière égale dans toutes les directions, émettent et reçoivent dans les directions privilégiées. Le diagramme de rayonnement d'une antenne représente la variation de la puissance rayonnée par l'antenne dans les différentes directions de l'espace. Il indique les directions de l'espace dans lesquelles la puissance rayonnée est maximale. [12]

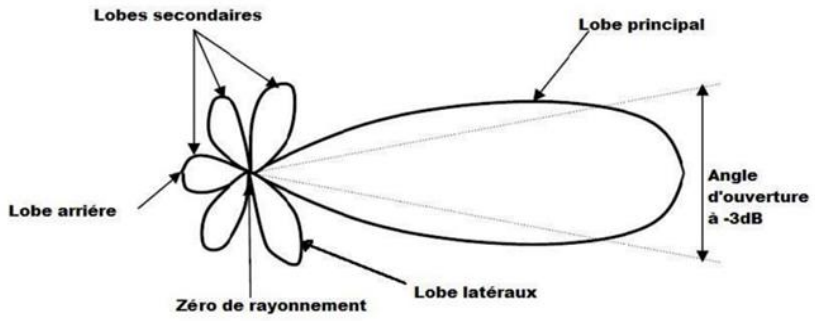


Figure1- 3 *diagramme de rayonnement*

Généralement il est caractérisé par un lobe principal autour duquel se trouve concentrée une grande partie de la puissance rayonnée, des lobes secondaires autour desquelles se répartissent la fraction de la puissance restante. On cherche à les minimiser car l'énergie rayonnée dans ces directions sont perdues. Lobe arrière indique l'énergie transmise ou reçue de la direction opposée à l'axe principal et l'angle d'ouverture est l'angle entre les deux directions autour du lobe principal ou la puissance rayonnée est égale à la moitié de la puissance rayonnée dans la direction de rayonnement maximal. [6]

1.3.4. Gain

Le gain est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée sur la puissance que rayonnerait une antenne isotrope sans perte c'est-à-dire la puissance injectée dans l'antenne.

$$D\ (\theta, \varphi\ ) = 4\pi \frac{P\ (\theta,\varphi\ )}{\text{Pinj}} \qquad (1, 4)$$

1.3.5. La 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 (θ,φ) est définie comme suit :

$$Do\ (\theta,\varphi\ ) = \frac{\mathrm{U}(\theta,\varphi)}{\mathrm{Uiso}} \qquad (1,5)$$

Avec :

U (θ,φ): Intensité de rayonnement de l'antenne considérée.

Uiso : Intensité de rayonnement d'une antenne isotrope, elle est donnée par :

$$\mathrm{Uiso} = \frac{\mathrm{Pray}}{4\pi} \qquad (1,6)$$

Pray : Puissance rayonnée de l'antenne.

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

$$\mathrm{Do} = \mathrm{MAXD}(\theta,\varphi) \qquad (1,7)$$

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

$$D(\theta,\varphi)|_{\mathrm{db}} = 10\,log\,\mathrm{Do} \qquad (1,8)$$

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

1.3.6. Polarisation

La polarisation d'une antenne se réfère à l'orientation du champ électrique de l'onde électromagnétique qu'elle émet ou reçoit. Cette orientation peut affecter de manière significative les performances de la transmission et de la réception des signaux.

1.3.6.1. Polarisation linéaire

La polarisation linéaire d'une onde électromagnétique se caractérise par une direction unique et constante du champ électrique (E) de l'onde.

1.3.6.2. Polarisation Circulaire

La polarisation circulaire est un type de polarisation où la direction du champ électrique (E) de l'onde électromagnétique tourne en hélice tout en se propageant, et son amplitude reste constante.

1.3.6.3. Polarisation elliptique

La polarisation elliptique se caractérise par une rotation de la direction du champ électrique (E) de l'onde électromagnétique, et l'amplitude du champ électrique est variable. Cette polarisation est une généralisation des polarisations linéaire et circulaire.

Soit une onde électromagnétique se propage dans l'espace libre, possède le champ électrique suivant :

$$\vec{E}(z,t) = E_{0x}(\omega t - \beta z - \varphi_1)\vec{a_x} + E_{0y}(\omega t - \beta z - \varphi_2)\vec{a_y} \qquad (1, 9)$$

Avec : $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$

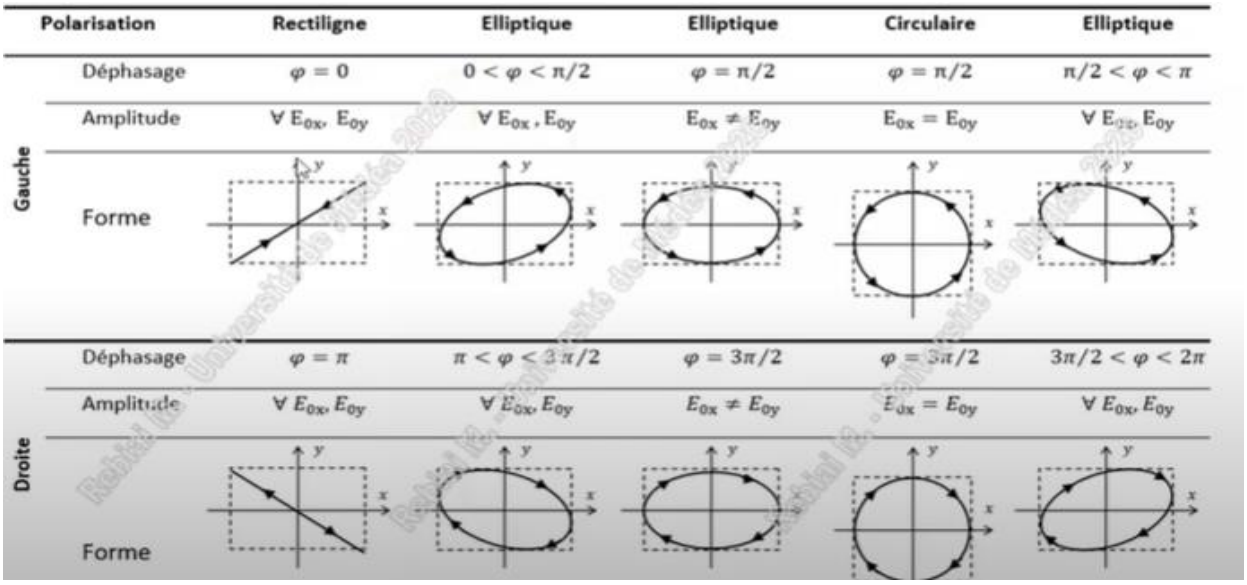


Figure1- 4 *types de polarisation*

1.3.7. Angle d'ouverture

L'angle d'ouverture d'une antenne est l'angle de direction pour lequel la puissance rayonnée est la moitié (-3dB) de la puissance rayonnée dans la direction la plus favorable. [11]

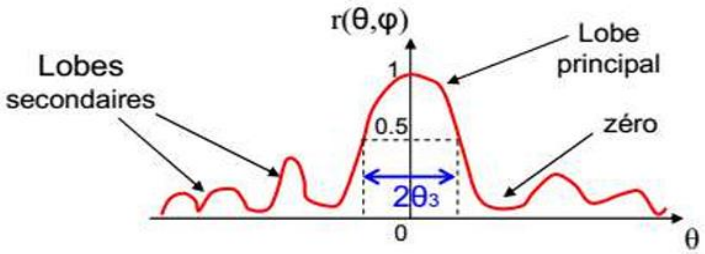


Figure1- 5 *L'angle d'ouverture*

1.3.8. Ouverture rayonnante et Rendement

L'ouverture rayonnante d'une antenne représente la surface géométrique par laquelle elle émet des ondes électromagnétiques et capte leur énergie. Le rendement d'une antenne est défini comme le rapport entre la puissance totale qu'elle émet et la puissance d'alimentation qui lui est fournie. Il est important de noter que la puissance rayonnée par l'antenne peut différer de la puissance d'alimentation qu'elle reçoit.

$$\eta = \frac{P}{Pa} \qquad (1, 10)$$

La directivité, le gain et le rendement sont reliés par la relation suivante :

$$G = \eta D \qquad (1, 11)$$

1.3.9. 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 ≤ 2) sur la bande passante comme nous pouvons le voir sur la Figure. [9]

$$|BP| = f2 - f1 \qquad (1, 12)$$

Ce paramètre est aussi évalué en pourcentage du rapport de la bande passante relative sur la fréquence centrale f0

$$BP = \frac{|BP|}{f0} * 100 \qquad (1, 13)$$

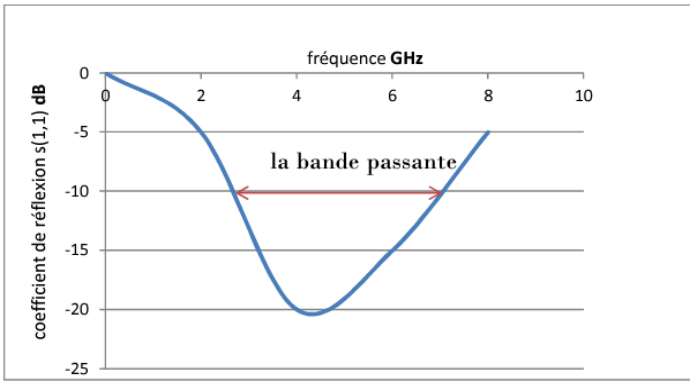


Figure1- 6 *La bande passante*

1.4. Techniques d'alimentations

L'alimentation des antennes microbandes, repose essentiellement sur deux classes d'excitation ; excitation avec contact et excitation sans contact. Dans les méthodes d'excitation avec contact, la puissance est acheminée aux patchs rayonnants en utilisant un élément de contact tel le câble coaxial et la ligne microbande. Dans la deuxième classe d'excitation, le couplage électromagnétique est utilisé pour transmettre la puissance de la ligne microbande au patch rayonnant. Les quatre techniques d'alimentation les plus utilisées sont la ligne microbande, sonde coaxiale, couplage par fente et couplage de proximité.[8]

1.4.1. Alimentation par ligne micro-ruban

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

Plus la longueur du ruban conducteur est grande, plus le patch est petit. L'avantage de cette alimentation réside dans le fait qu'elle est intégrée sur le même substrat, offrant ainsi une structure plane. Il s'agit de la technique la moins coûteuse et la plus simple à mettre en œuvre.

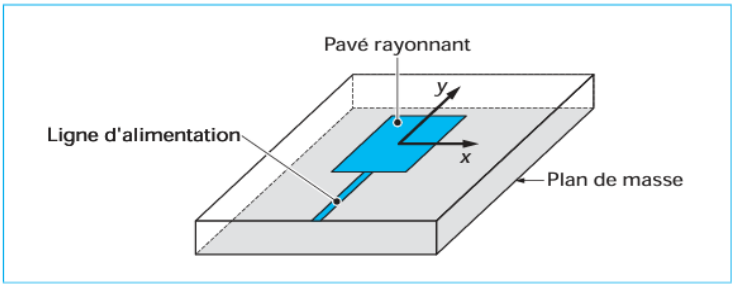


Figure1- 7 *Alimentation par ligne micro-ruban*

1.4.2. Alimentation par sonde coaxial

L'alimentation par câble coaxial est largement utilisée dans les antennes micro-ondes en raison de sa simplicité de mise en œuvre et de sa facilité d'adaptation d'impédance. Un câble coaxial se compose de deux conducteurs, l'externe et l'interne. Le conducteur externe est connecté au plan de masse, tandis que le conducteur interne est relié au patch rayonnant. Cependant, ce type d'alimentation présente des inconvénients, notamment une bande passante étroite et une modélisation complexe, surtout lorsque des substrats épais sont utilisés.

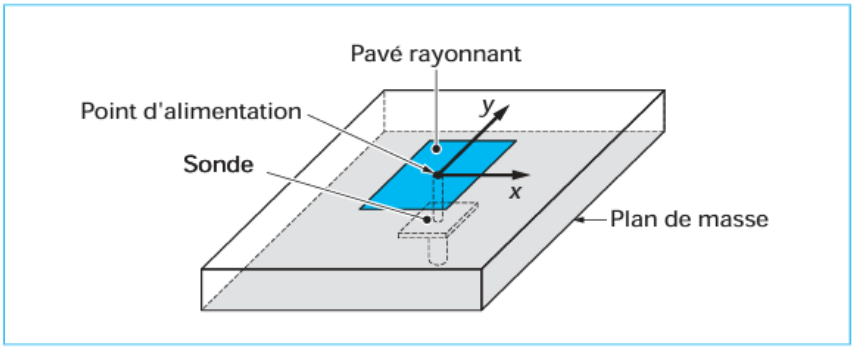


Figure1- 8 *Alimentation par sonde coaxial*

1.4.3. Alimentation par couplage électromagnétique

Dans cette technique, deux substrats sont utilisés de telle sorte que la ligne d'alimentation soit placée entre les deux, tandis que le patch est sur le substrat supérieur. Le principal avantage de cette approche est qu'elle élimine le rayonnement parasite provenant de l'alimentation, ce qui permet d'obtenir une bande passante très large, dépassant souvent 13%, grâce à l'augmentation globale de l'épaisseur de l'antenne. De plus, cette méthode offre la possibilité d'optimiser les performances de l'antenne en choisissant différents matériaux diélectriques. Cependant, cette technique présente des inconvénients, notamment la complexité de conception en raison des deux

couches diélectriques nécessitant un alignement précis. L'adaptation d'impédance peut être réalisée en contrôlant la longueur de la ligne d'alimentation.

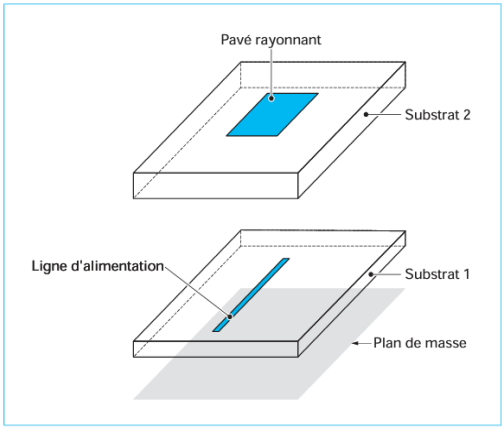


Figure1- 9 *Alimentation par ligne couplée*

1.4.4. Alimentation à travers d'une ouverture au plan de masse

Dans ce type d'alimentation, l'élément rayonnant et la ligne micro-ruban sont séparées par le plan de masse comme représente dans la figure. Le couplage entre le patch et la ligne d'alimentation est assurée par une fente ou une ouverture dans le plan de masse.

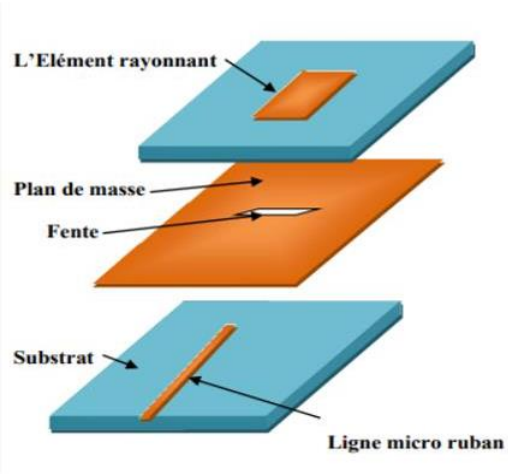


Figure1- 10 *alimentation avec ouverture*

Dans ce type d'alimentation, l'ouverture du couplage est généralement positionnée de manière centrée sous le patch. La quantité de couplage entre la ligne d'alimentation et le patch est déterminée par la forme, la taille et la position de cette ouverture. Cette configuration permet de minimiser le rayonnement parasite car la ligne d'alimentation et le patch sont séparés par le plan de masse.

Généralement, un matériau avec une constante diélectrique élevée est utilisé pour le substrat inférieur, tandis qu'un matériau plus épais et à faible constante diélectrique est choisi pour le substrat supérieur afin d'optimiser le rayonnement du patch. Cependant, cette technique présente des inconvénients majeurs. La fabrication est complexe en raison des multiples couches, ce qui augmente également l'épaisseur de l'antenne. De plus, cette méthode conduit souvent à une bande passante étroite.

Pour atteindre une adaptation d'impédance appropriée, il est nécessaire de contrôler la taille de la fente, la taille de la ligne d'alimentation ou les deux simultanément.

1.5. Les techniques d'adaptation des antennes imprimées

Assurer une adaptation d'impédance adéquate est une étape cruciale dans l'alimentation d'une antenne, quel que soit le type de technique utilisée. C'est cette adaptation qui garantit le transfert optimal de puissance de l'alimentation vers le patch. Différentes méthodes sont employées pour adapter la ligne d'alimentation à l'entrée d'une antenne patch, chacune ayant un impact spécifique sur les performances de l'antenne. Ces techniques d'adaptation varient également en fonction de la méthode d'alimentation choisie.

1.5.1. Adaptation par ligne quart d'onde

Une ligne quarte d'onde peut servir de transformateur d'impédance, pour l'adaptation entre la ligne d'alimentation et une antenne. Elle consiste à mettre une ligne λ/4 entre la ligne d'alimentation et l'antenne patch. [6]

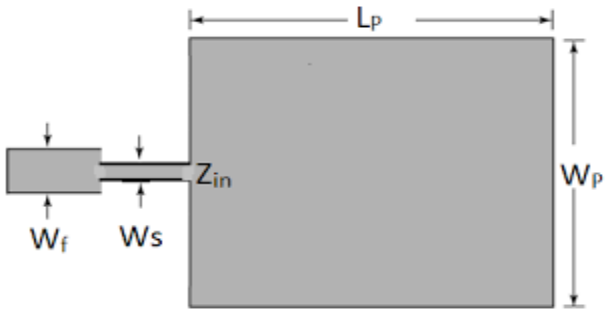


Figure1- 11 *adaptations par ligne quart d'onde*

1.5.2. Adaptation avec encoche

L'adaptation par encoche consiste à faire une encoche dans le patch en insérant la ligne d'alimentation d'une impédance caractéristique de 50 ohms à une profondeur ou l'impédance d'antenne est égale à 50ohms. [13]

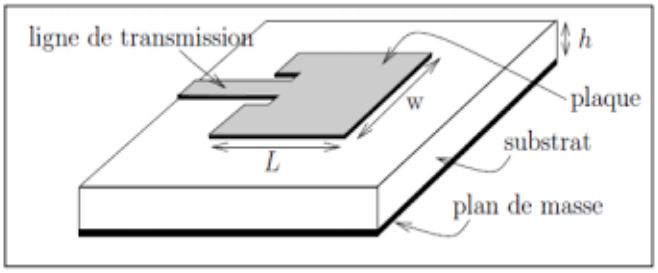


Figure1- 12 *Adaptation par encoche*

1.6. Conclusion

Le chapitre explore en profondeur les antennes patch imprimées, éléments essentiels des systèmes de communication modernes. Après avoir défini et retracé leur historique, il examine leurs composants clés, avantages, inconvénients et applications variées. Ensuite, il analyse en détail les caractéristiques cruciales des antennes patch, indispensables pour évaluer leurs performances dans différents environnements. De plus, il explore les diverses méthodes d'alimentation et d'adaptation de ces antennes, offrant ainsi une vue d'ensemble complète de leur fonctionnement et de leurs possibilités. En somme, ce chapitre constitue une ressource précieuse pour une compréhension approfondie des antennes patch imprimées et de leur rôle dans les communications sans fil.

Chapitre 2 : Étapes de réalisation d'une antenne à deux patchs sur logiciel HFSS

2.1.Introduction

Dans ce chapitre, nous explorons la conception de deux antennes patch alimentées par une ligne micro-ruban, et son adaptation par des encoches. Cette étude s'inscrit dans une volonté de surpasser les limitations des antennes patch traditionnelles, telles qu'une bande passante étroite, une fonctionnalité restreinte à une seule fréquence et un gain modéré. Motivés par la nécessité de répondre aux exigences croissantes des applications sans fil modernes, nous utilisons le logiciel HFSS comme un outil crucial dans notre processus de conception et d'analyse. Ainsi, ce chapitre dévoile notre démarche intégrée, combinant innovation conceptuelle et utilisation avancée de logiciels, dans le but de repousser les frontières de la technologie des antennes et de proposer des solutions adaptées aux défis actuels de la communication sans fil.

2.2.Problématique

Les antennes patch rectangulaires traditionnelles souffrent de diverses limitations telles qu'une bande passante étroite, une fonctionnalité restreinte à une seule fréquence et un gain modéré. Pour aborder ces défis, une nouvelle conception de deux antennes patch est envisagée, intégrant l'effet de l'ex-centrage pour améliorer les performances. Cette nouvelle configuration vise à étendre la bande passante, offrir une fonctionnalité multifréquence et augmenter le gain, tout en minimisant les effets d'interférence et en garantissant une intégration harmonieuse dans les systèmes de communication sans fil. L'objectif est de surpasser les limitations des antennes patch rectangulaires traditionnelles et de répondre aux exigences croissantes des applications modernes en termes de performances, de polyvalence et d'efficacité.

2.3.Description de la conception

Notre conception de deux antennes patch rectangulaires est le fruit d'une approche méticuleuse et intégrée, qui tire parti de divers composants pour atteindre des performances exceptionnelles. Cette structure se compose de plusieurs éléments clés :

- **Plan de Masse :** Le plan de masse constitue la fondation structurelle de nos antennes, assurant une distribution efficace des champs électromagnétiques. Réalisé en cuivre ou en aluminium pour une conductivité optimale, il garantit la stabilité et l'efficacité de nos antennes dans divers environnements.
- **Substrat 1 :** Positionné en dessous du premier patch, le substrat 1 agit comme une plateforme de support pour l'antenne. Fabriqué à partir d'un matériau diélectrique à faible perte tel que le Rogers RT, il offre des propriétés électriques et mécaniques adaptées pour une performance optimale de l'antenne.
- **Patch 1 :** Le premier patch, situé sur le substrat 1, est l'élément rayonnant principal de l'antenne. Fabriqué à partir de matériaux conducteurs tels que le cuivre, ses dimensions et sa géométrie sont soigneusement optimisées pour maximiser le rendement et la directivité de l'antenne.
- **Alimentation par une Ligne Micro-ruban :** Chaque antenne est alimentée par une ligne micro ruban, offrant une connexion efficace entre l'alimentation et le patch. Cette approche permet de réduire les pertes de signal et d'assurer une transmission stable et fiable des données.
- **Substrat 2 :** Le substrat 2 est positionné au-dessus du premier substrat, avec la ligne d'alimentation entre les deux. Choisi pour ses propriétés diélectriques spécifiques, il

contribue à optimiser les performances globales de l'antenne et à réduire les pertes de signal.

- **Patch 2 :** Le deuxième patch est monté sur le substrat 2, offrant une deuxième source de rayonnement ou une polarisation différente. Ses caractéristiques sont soigneusement ajustées pour compléter les performances de l'antenne et répondre aux exigences spécifiques de l'application.
- **Adaptation d'Impédance avec Encoche :** Des encoches sont intégrées dans la conception pour permettre une adaptation d'impédance efficace. Elles sont positionnées stratégiquement pour ajuster les caractéristiques d'impédance de l'antenne et garantir une bonne adaptation entre la ligne et le patch ainsi qu'un transfert optimal de puissance.

En combinant ces composants de manière synergique, notre conception vise à fournir des performances supérieures, une polyvalence accrue et une compatibilité optimale avec une variété d'applications sans fil. Nous avons l'intention de concrétiser cette conception en utilisant le logiciel HFSS, qui nous permettra de modéliser, simuler et analyser notre structure avec précision et fiabilité.

2.4.Présentation du logiciel HFSS

2.4.1. Définition de logiciel HFSS

Le logiciel HFSS, acronyme pour High Frequency Structure Simulator, est une plateforme de simulation de champ électromagnétique développée par Ansys, il permet aux utilisateurs de créer des modèles virtuels précis de dispositifs passifs, tels que des antennes, des circuits imprimés, des guides d'ondes, des filtres, des cavités et bien plus encore.

Grâce à ses capacités avancées, HFSS est largement utilisé dans l'industrie pour la conception, l'optimisation et la validation de produits dans des domaines tels que les télécommunications, l'électronique de puissance, l'aérospatiale, l'automobile, et la biomédicale, entre autres. Il est reconnu pour sa précision, sa fiabilité et sa capacité à traiter des problèmes complexes dans des délais rapides.

2.4.2. Historique et évolution du logiciel

HFSS a été développé par Ansoft Corporation, une société fondée en 1984 par le Dr. Zoltan Cendes à Pittsburgh, en Pennsylvanie, États-Unis. À ses débuts, Ansoft était principalement axée sur le développement de logiciels de simulation électromagnétique pour les applications de micro-ondes et de radiofréquences (RF). HFSS a été l'un des premiers produits majeurs de la société dans ce domaine. Il a été initialement introduit dans les années 1990.

En 2008, Ansys Inc. a acquis Ansoft Corporation, intégrant HFSS dans son portefeuille de produits. Cette acquisition a ouvert de nouvelles possibilités pour HFSS en lui permettant de s'intégrer avec d'autres outils de simulation d'Ansys, élargissant ainsi sa portée et ses capacités. HFSS a continué à évoluer pour répondre aux besoins changeants des ingénieurs et des chercheurs au fil des ans.

Aujourd'hui, HFSS est largement reconnu comme un outil de choix pour la conception et l'analyse de systèmes électromagnétiques complexes dans diverses industries.

2.4.3. Un projet en HFSS

2.4.3.1.Comment commencer HFSS

Avant de commencer, assurons-nous d'avoir installé le logiciel HFSS sur notre ordinateur. Il est important que HFSS soit correctement installé sur l'ordinateur sur lequel nous travaillons. Une fois l'installation terminée, nous devrions trouver une icône de HFSS. ( ) sur votre bureau. Double-clique sur cette icône pour lancer HFSS.

La fenêtre Ansoft HFSS comporte plusieurs panneaux facultatifs :

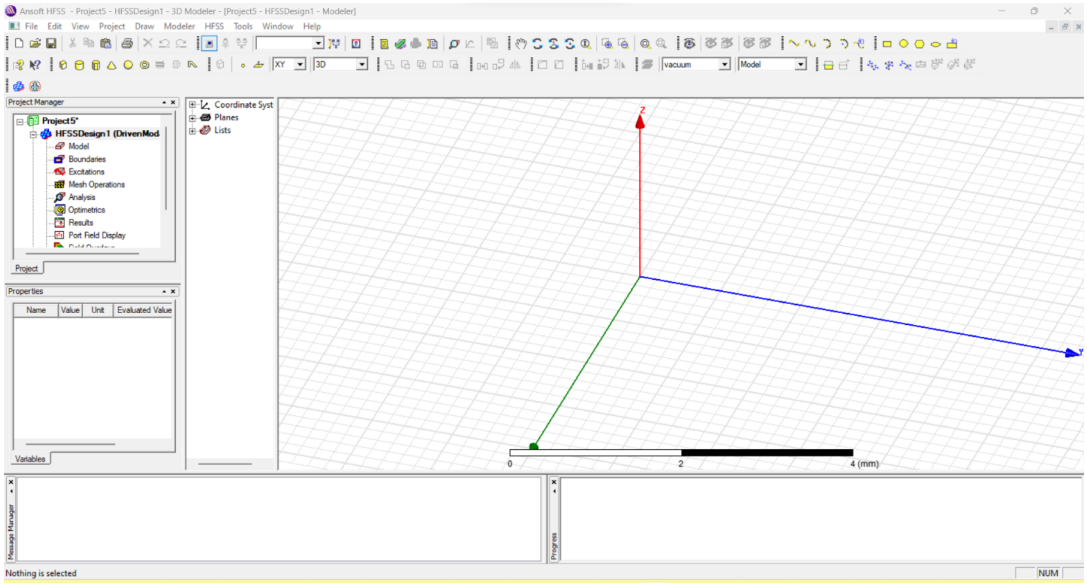


Figure2- 1 *La fenêtre de HFSS*

2.4.3.2.Le Project Manager

Comporte une structure de projet organisée sous forme d'arborescence, répertoriant les différents éléments et leur hiérarchie.

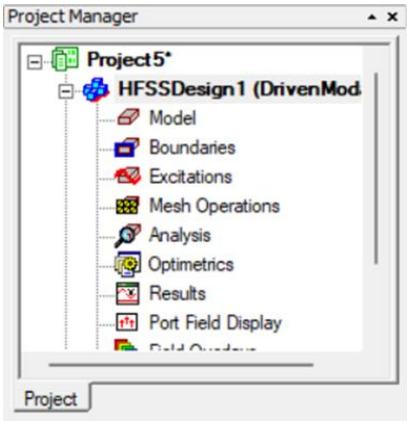


Figure2- 2 *La fenêtre de Project manager*

2.4.3.3.La barre d'outils

Les boutons de la barre d'outils dans Ansoft HFSS sont des raccourcis pour les commandes fréquemment utilisées. Bien que notre fenêtre HFSS puisse différer de l'illustration initiale, nous pouvons personnaliser la disposition de la barre d'outils selon notre convenance. Certains outils sont toujours visibles, tandis que d'autres s'affichent automatiquement en fonction du type de document sélectionné. Par exemple, la barre d'outils des rapports 2D apparaît lorsque nous sélectionnons un rapport 2D dans l'arborescence du projet.

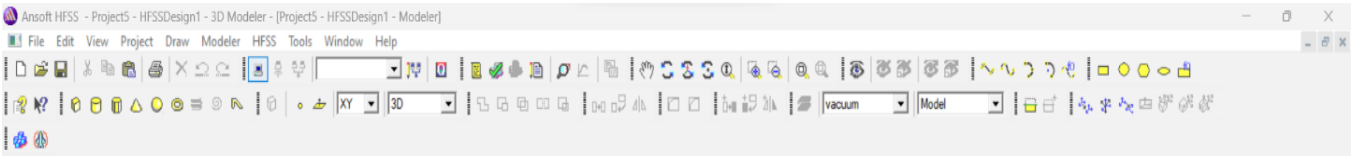


Figure2- 3 *La barre d'outils*

2.4.3.4.Le Message Manager

Permet d'afficher toutes les erreurs avant le démarrage de la simulation, offrant ainsi la possibilité de les identifier et de les corriger préalablement.



Figure2- 4 *La fenêtre de manager de message*

2.4.3.5. La fenêtre de Propretés

Pour l'affichage et la modification des paramètres des attributs du modèle.

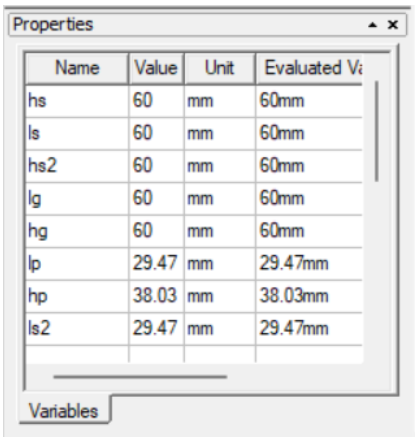


Figure2- 5 *Fenêtre de propretés*

2.4.3.6.La fenêtre de Progress

Affiche les progressions de la solution.



Figure2- 6 *Fenêtre de Progress*

2.4.3.7.La fenêtre de 3D Modeler

Contient le modèle et son arbre pour la conception active.

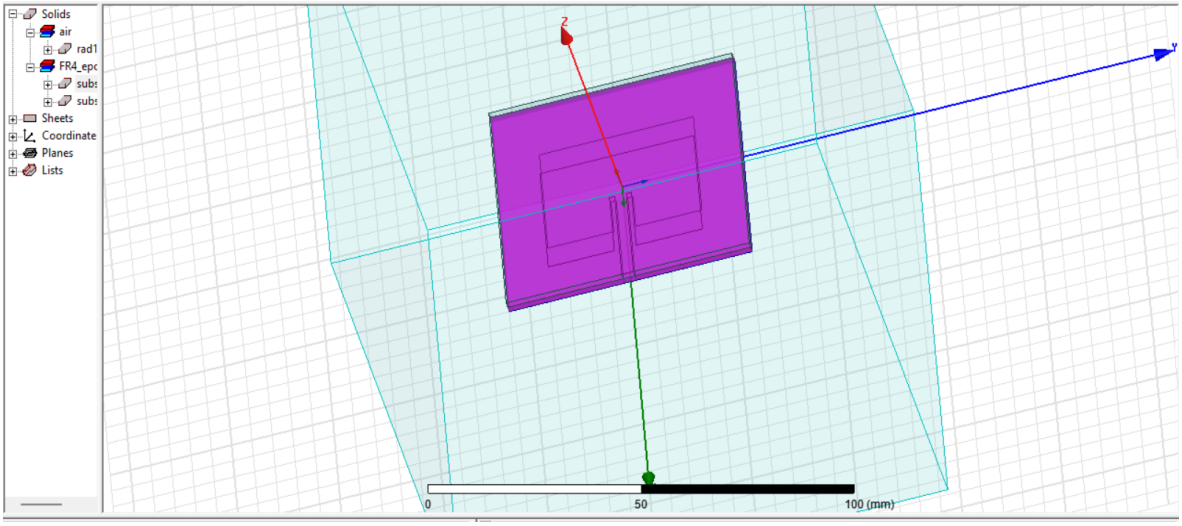


Figure2- 7 *La fenêtre de modèle en 3D*

2.4.3.8.Comment ouvrir un nouveau projet

Dans le menu "Project", sélectionnons "Insert HFSS Design". La nouvelle conception sera alors ajoutée à l'arborescence du projet et sera nommée "Model" par défaut. La fenêtre 3D Modeler s'affichera à droite du Project Manager.

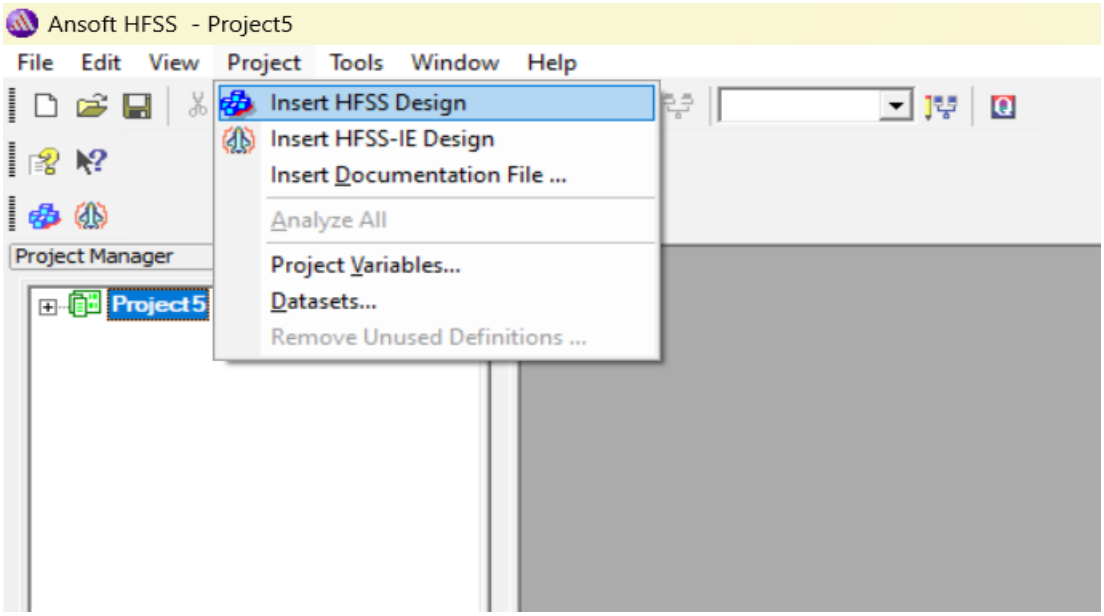


Figure2- 8 *L'ouverture d'un nouveau projet*

.

2.4.3.9.Pour ouvrir un projet HFSS existant

Dans une fenêtre Ansoft HFSS, on sélectionne le menu Fichier > Ouvrir. Ensuite on clique sur **Open** pour ouvrir le projet.

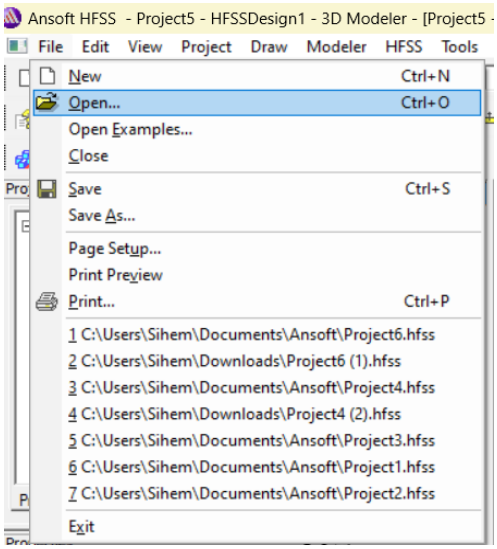


Figure2- 9 *l'ouverture d'un projet existant*

2.4.3.10. Définir le type de solution

Cette section décrit comment définir le type de solution. Le type de solution définit le type de résultats, la manière dont les excitations sont définies et la convergence. Les types de solutions suivants sont disponibles :

- **Driven Modal :** calcule les paramètres S basés sur les modes. Les solutions de la matrice S seront exprimées en termes de puissances incidents et réfléchies des modes de guide d'ondes.
- **Driven Terminal :** calcule les paramètres S basés sur les terminaux des lignes de transmission multicâbles. Les solutions de la matrice S seront exprimées en termes de tensions et de courants terminaux.
- **Eigenmode :** calcule les modes propres, ou résonances, d'une structure. Le solveur de modes propres trouve les fréquences de résonance de la structure et les champs à ces fréquences de résonance.

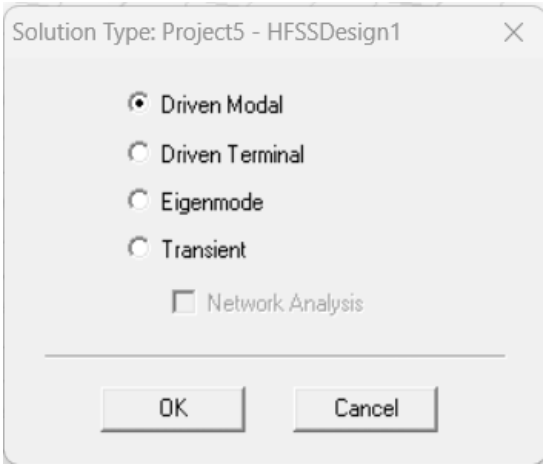


Figure2- 10 *type de solution*

On clique sur le bouton **OK.**

2.5. Création du modèle

2.5.1. L'Unité du Modèle de Mesure

Pour configurer les unités de mesure du modèle, on peut choisir ou modifier les dimensions du modèle pour qu'elles correspondent à une unité pertinente. Pour ce faire, accédons au menu "Modeler", puis sélectionnons "Units". Cela ouvrira une boîte de dialogue nommée "Set Model Unit", où nous pourrons choisir l'unité souhaitée dans la liste déroulante. Dans notre cas, nous choisissons le millimètre (mm).

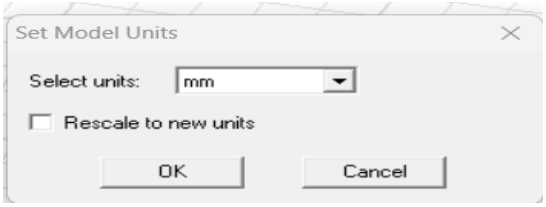


Figure2- 11 *l'unité du modèle*

2.5.2. Création des éléments

La création d'un modèle de deux antennes patch commence par la conception du plan de masse, suivi du placement du premier substrat diélectrique, typiquement le modèle **Rogers Ultralam 1520**, avec une hauteur de 1,59 mm et une constante diélectrique de 2,2. Ensuite, le premier patch est installé sur ce substrat, suivi par l'ajout d'une ligne d'alimentation micro-ruban qui est connectée au premier patch pour assurer son alimentation en énergie RF. Par la suite, le deuxième substrat diélectrique est ajouté pour assurer l'isolation entre les patches, puis le deuxième patch est positionné sur ce substrat, également alimenté par une ligne micro-ruban. Ce processus minutieux, réalisé avec précision, est essentiel pour garantir des performances optimales de l'antenne à deux éléments. Dans cette étude, nous nous concentrons spécifiquement sur la fréquence de 2,4 GHz, communément utilisée pour les communications sans fil. Ainsi, notre objectif est de concevoir une antenne qui réponde efficacement aux exigences spécifiques de cette fréquence en termes de bande passante, de gain et de directivité.

2.5.2.1. Le plan de masse

Pour créer le plan de masse, on utilise l'outil de dessin de rectangle ( ) dans la barre d'outils. Ensuite, on spécifie les propriétés matérielles et les dimensions appropriées.

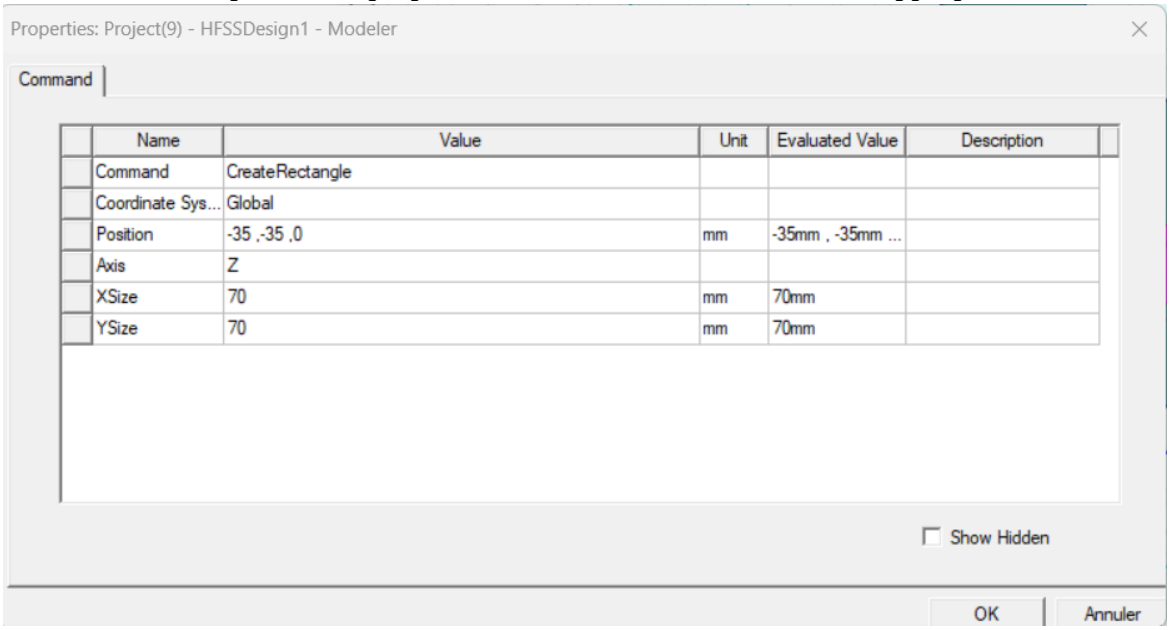


Figure2- 12 *dimension et emplacement de plan de masse*

2.5.2.2. Le premier substrat diélectrique

Pour dessiner le substrat, on clique sur l'icône représentant une boîte (box) dans la barre d'outils afin de créer une forme rectangulaire. Ensuite, on insère les propriétés matérielles ainsi que les dimensions souhaitées.

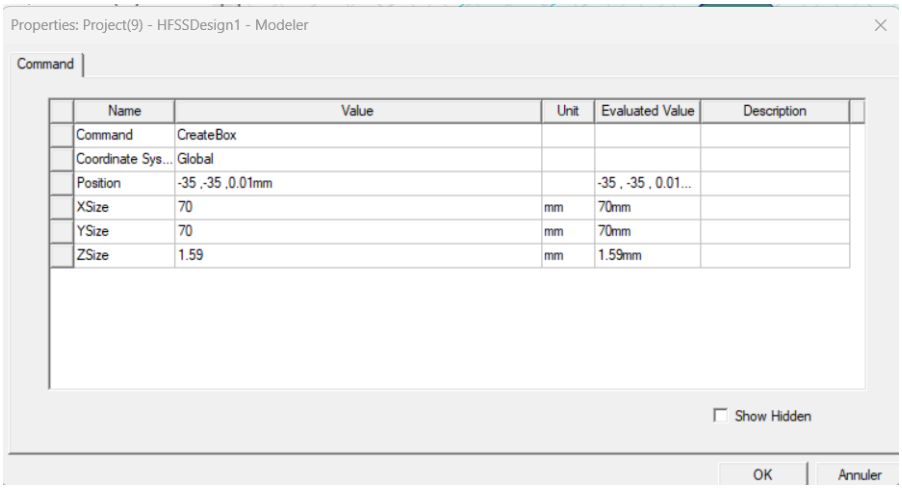


Figure2- 13 *dimension et emplacement de substrat1*

Pour définir le nom et choisir le matériau du substrat, on commence par ouvrir la fenêtre des propriétés et sélectionner l'option "Attribut". Ensuite, dans le champ "Name", nous saisissons "substrate", puis on sélectionne le matériau approprié dans le champ "Material". Une fois les paramètres configurés, on clique sur le bouton "OK" pour appliquer les modifications. Ensuite, on entre les positions et les dimensions souhaitées :

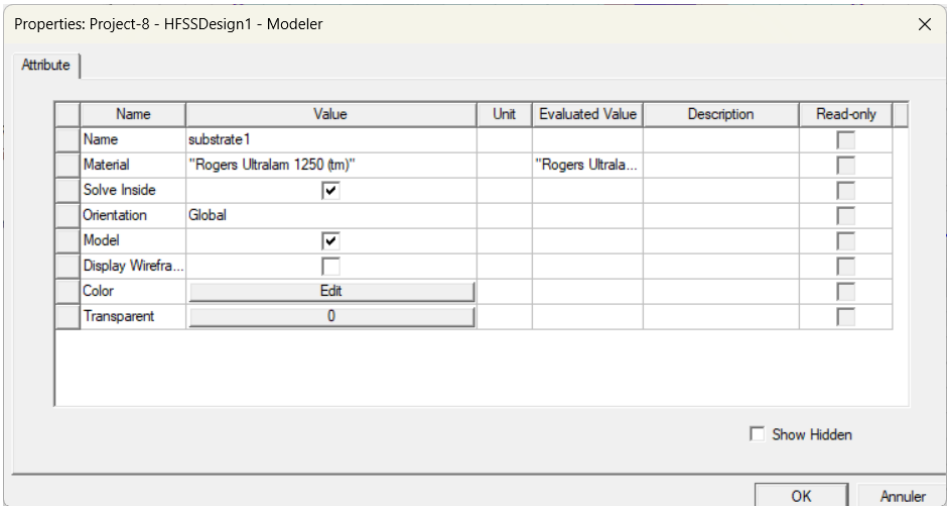


Figure2- 14 propriété du substrat

2.5.2.3. Le premier élément rayonnant (patch inférieure)

La création de patches d'antenne est intimement liée à des équations électromagnétiques qui guident la conception et l'optimisation de leurs dimensions et de leurs formes pour répondre aux

exigences de performance spécifiques, Voici les équations pour calculer les dimensions d'un patch rectangulaire :

- Calcul de la longueur effective du patch :

$$Leff = \frac{c}{2fr\sqrt{\varepsilon eff}} \qquad (2, 1)$$

Ou C est la vitesse de la lumière et εeff est la permittivité effective du substrat.

- Calcul de la permittivité effective :

$$\boldsymbol{\varepsilon eff} = \frac{\varepsilon_r+1}{2} + \frac{\varepsilon_r-1}{2}\left[1 + 12\,\frac{h}{W}\right]^{-1/2} \qquad (2, 2)$$

- Estimation de la largeur du patch (W):

$$w = \frac{c}{2fr\sqrt{\frac{\varepsilon_r+1}{2}}} \qquad (2, 3)$$

- Calcul de la variation de longueur

$$\Delta L = 0.412h\frac{(\boldsymbol{\varepsilon eff}+0.3)\left(\frac{W}{h}\right)+0.264}{(\boldsymbol{\varepsilon eff}-0.258)\left(\frac{W}{h}\right)+0.8} \qquad (2, 4)$$

- Calcul de la longueur réelle du patch

$$L = Leff - 2\Delta L \qquad (2, 5)$$

En outre, il est également possible de déterminer les dimensions des patches en utilisant des outils en ligne tels que "emtalk ", qui offrent une précision accrue et une facilité d'utilisation. Ce site demande des paramètres spécifiques tels que la hauteur du substrat, la valeur diélectrique (epsilon), et la fréquence d'opération pour calculer rapidement les dimensions optimales des patches.

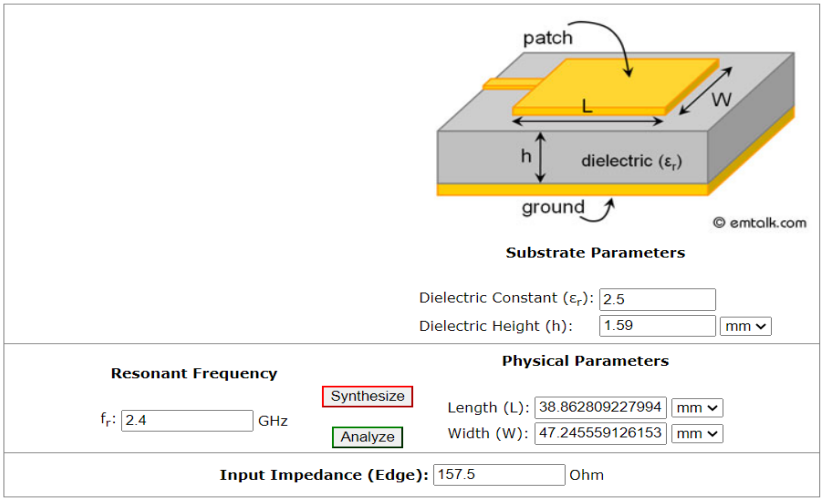


Figure2- 15 *fenêtre de calculateur emtalk*

Pour commencer, on utilise l'outil de dessin de rectangle dans la barre d'outils pour créer le patch. Ensuite, en se référant aux dimensions fournies par emtalk, on saisit la position et les dimensions du rectangle comme illustré dans la figure ci-dessous :

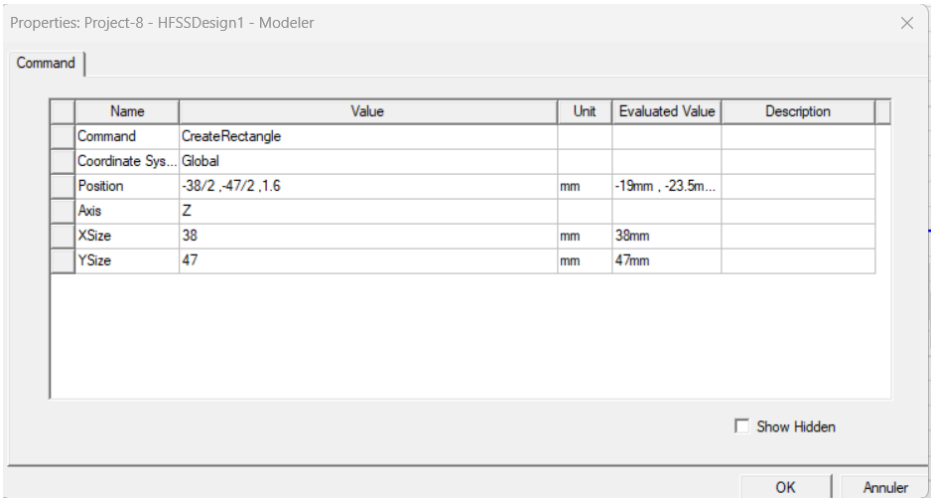


Figure2- 16 *Les dimensions et l'emplacements de patch1*

2.5.2.4. La ligne d'alimentation du patch1

Pour concevoir une ligne d'alimentation, nous appliquons des relations afin de calculer à la fois sa longueur et sa largeur.

- **La longueur de la ligne d'alimentation**

Généralement la longueur de la ligne d'alimentation est de l'ordre de la demi-longueur d'onde :

$$L = \frac{\lambda}{2} = \frac{C}{2F} \qquad (2, 6)$$

Avec :

- C : C'est la vitesse du la lumière.
- λ : La longueur d'onde.
- F : La fréquence de résonances.

- **La largeur de la ligne d'alimentation**

Pour adapter l'antenne à son alimentation, la largeur de la ligne est déterminée en fonction de l'impédance caractéristique (Zc qui est généralement égale à 50 Ohm) en utilisant l'équation suivante [14]:

$$Zc = \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon re}\left[\frac{Wo}{h}++1.393+0.667\,ln\left(\frac{Wo}{h}+1.444\right)\right]} \qquad (2, 7)$$

Avec :

- h : L'épaisseur du substrat.
- W0 : La largeur de la ligne d'alimentation.
- Ɛre représente la permittivité effective de l'antenne et elle est définie par l'équation suivante :

$$\varepsilon_{re} = \frac{\varepsilon_r+1}{2} + \frac{\varepsilon_r-1}{2}\left[1 + 12\,\frac{h}{W}\right]^{-1/2} \qquad (2, 8)$$

Pour dessiner la ligne d'alimentation, nous avons utilisé l'outil rectangle et suivi les mêmes étapes de positionnement et de dimensionnement que pour les autres éléments.

Ensuite, pour combiner la ligne d'alimentation et le patch en un seul objet, Nous sélectionnons les deux objets dans l'arborescence de l'historique et cliquons sur une option permettant de les unir (

). On assure que les deux objets sont fabriqués à partir du même matériau.

2.5.2.5. Le deuxième substrat diélectrique

Pour définir le deuxième substrat, on suit les mêmes étapes en utilisant l'icône représentant une boîte dans la barre d'outils pour créer une nouvelle forme rectangulaire. Assurons-nous d'insérer les propriétés matérielles ainsi que les dimensions requises. Ensuite, ouvrons la fenêtre des propriétés et définissons le nom du substrat comme "substrat2" et sélectionnons le matériau approprié. Une fois ces paramètres configurés, cliquons sur "OK" pour appliquer les modifications. Ensuite, saisissons les positions et les dimensions désirées pour le deuxième substrat.

2.5.2.6. Le deuxième élément rayonnant (patch supérieure)

Pour dessiner le deuxième patch, on utilise également l'outil de dessin de rectangle dans la barre d'outils pour créer la forme du patch. Ensuite, en se basant sur les dimensions calculées par emtalk, on entre les valeurs correspondantes pour la position et les dimensions du rectangle

2.5.2.7. La ligne d'alimentation du patch2

Pour dessiner la deuxième ligne d'alimentation, procédons de la même manière en utilisant l'outil rectangle pour créer la forme désirée. Ensuite, suivons les étapes de positionnement et de dimensionnement similaires à celles des autres éléments. Enfin, pour fusionner la deuxième ligne d'alimentation avec le deuxième patch en un seul objet, sélectionnons les deux éléments dans l'arborescence de l'historique et utilisons l'option appropriée pour les combiner. Assurons-nous que les deux objets sont fabriqués à partir du même matériau pour garantir une transmission efficace de l'énergie RF.

2.5.2.8. L'adaptation en utilisant des encoches

Pour l'adaptation du circuit, nous avons choisi la méthode de l'encoche. Nous avons utilisé une loi spécifique pour calculer la longueur de l'encoche, tandis que la largeur est quelconque. Cette expression est valide pour les valeurs de permittivité relatives comprises entre 2 et 10. L'équation utilisée est la suivante :

$$Y = 10^{-4} * [0.001699\,\varepsilon_r^7 + 0.13761\,\varepsilon_r^6 - 6.1783\varepsilon_r^5 + 93.187\,\varepsilon_r^4 - 682.69\,\varepsilon_r^3 + 2561.9\,\varepsilon_r^2 - 4043\,\varepsilon_r^1 + 6697]\,L\,/2 \qquad (2, 9)$$

2.5.2.9. Création du port (waveport)

Pour définir le port de guide d'ondes au début de la ligne d'alimentation, nous utilisons l'outil rectangle dans la barre d'outils pour dessiner un rectangle unique entre les deux patchs. Les informations requises pour définir le port doivent être renseignées. Le plan de référence de ce port est placé directement au début du plan de rayonnement.

2.5.2.9.1. Assigner une excitation au port d'alimentation

Les excitations servent à spécifier la source des champs électromagnétiques, des charges, des courants ou des tensions pour les objets ou leurs éléments individuels. Pour le type de solution "Driven Model", les types d'excitations suivants sont disponibles :

- **Wave Port :** Surface par laquelle un signal entre ou sort de la géométrie.
- **Lumped Port :** Surface interne par laquelle un signal entre ou sort de la géométrie.
- **Incident Wave :** Champ électrique constant à travers les points d'une alimentation.
- **Voltage Source :** Courant électrique constant à travers les points d'une alimentation.
- **Magnetic Bias :** Champ intérieur net qui influe sur un objet de matériau ferromagnétique en 3D.

Dans notre situation, nous choisissons le type "Lumped Port". Cliquons sur "Lumped Port", donnons-lui le nom de notre choix, puis définissons la ligne d'intégration.

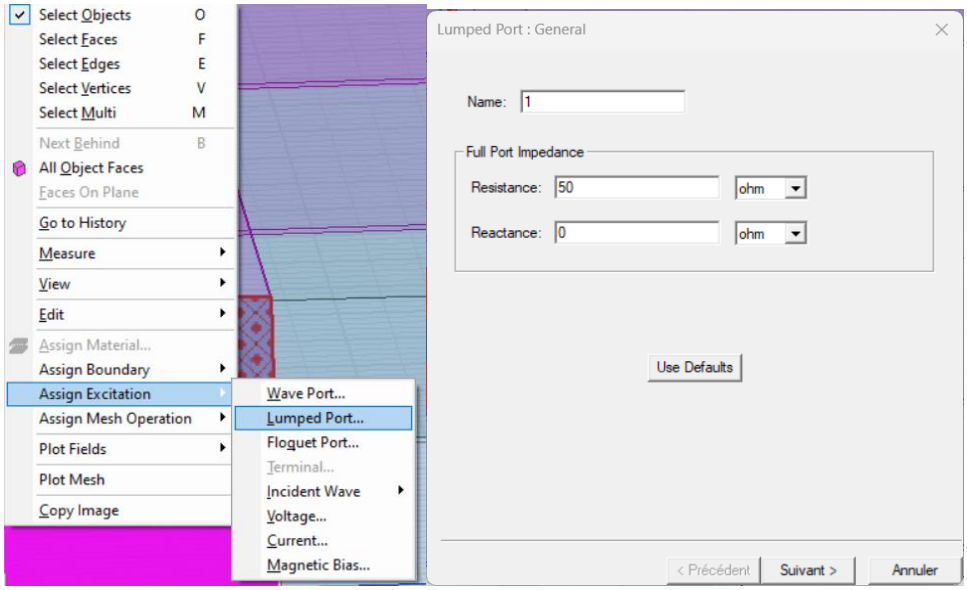


Figure2- 17 *Le port d'alimentation*

2.5.2.10. Milieu de rayonnement

Le calcul des dimensions de la "box de radiation" (ou boîte de rayonnement) dans un logiciel de simulation comme HFSS est crucial pour obtenir des résultats précis de la simulation des antennes. Voici une méthode standard pour calculer les dimensions de la boîte de rayonnement :

$$Lbox = L + \frac{\lambda}{2} \qquad (2, 10)$$

$$Wbox = W + \frac{\lambda}{2} \qquad (2, 11)$$

$$Hbox = H + \frac{\lambda}{2} \qquad (2, 12)$$

$$Avec:\ \lambda = \frac{c}{f} \qquad (2, 13)$$

L et W sont la longueur et la largeur de l'antenne et H est la hauteur totale de l'antenne (substrat + patch).

Pour définir le milieu de rayonnement, on dessine un volume cubique dont les dimensions sont supérieures à celles de notre structure. On sélectionne l'air comme matériau pour ce milieu.

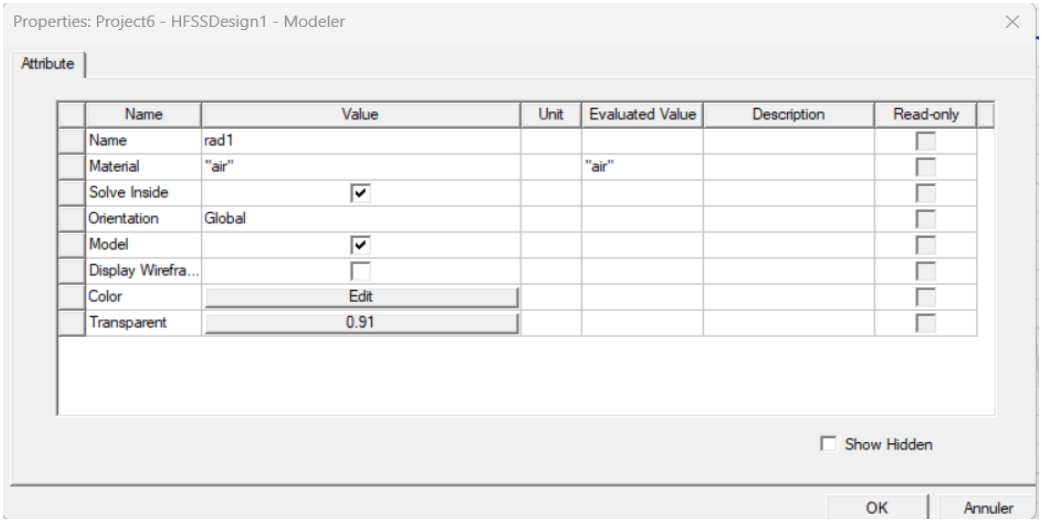


Figure2- 18 *propriété de milieu de rayonnement*

2.6. Structure finale

À la fin, la structure obtenue sera la suivante :

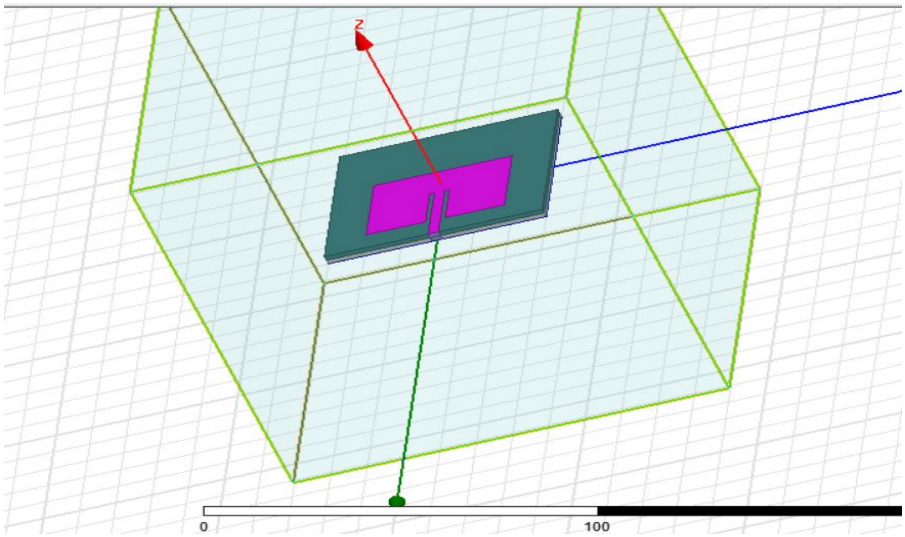


Figure2- 19 *Structure finale de deux patchs rectangulaires sur HFSS*

2.7. Installation d'analyse (Analysis setup)

Pour créer une configuration d'analyse, on sélectionne "**Add Solution Setup**" dans le menu HFSS > Analysis Setup > **Add Solution Setup.**

Dans la fenêtre de configuration de la solution, on clique sur l'onglet "General", puis sur le bouton "OK".

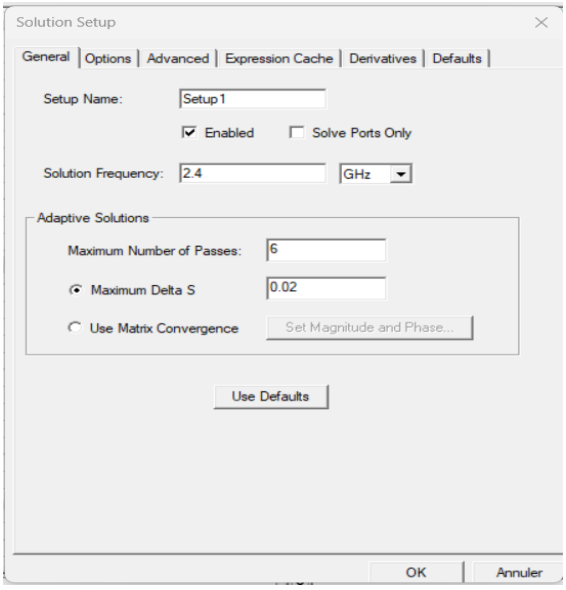


Figure2- 20 *Fenêtre d'installation d'analyse*

2.8. Ajouter le champ de fréquence (Add Frequency Sweep)

Pour intégrer un balayage en fréquence, on accède à "Add Sweep" dans le menu HFSS > Analysis Setup > Add Sweep. On sélectionne la solution à configurer : Setup1, puis on clique sur OK. Ensuite, la fenêtre pour définir le type de balayage en fréquence apparaîtra : on choisit "Fast"

et on spécifie les paramètres suivants : Frequency Linear Count, Start: 1 GHz, Stop: 10 GHz. Enfin, on clique sur OK pour valider.

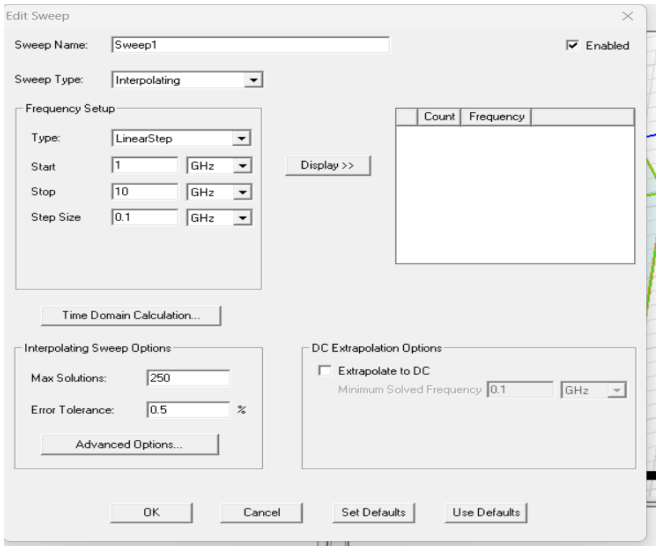


Figure2- 21 *champ de fréquence*

2.9. La validation et l'analyse

- **La validation**

Pour la validation, on clique sur l'icône de vérification (check)  dans la barre d'outils :

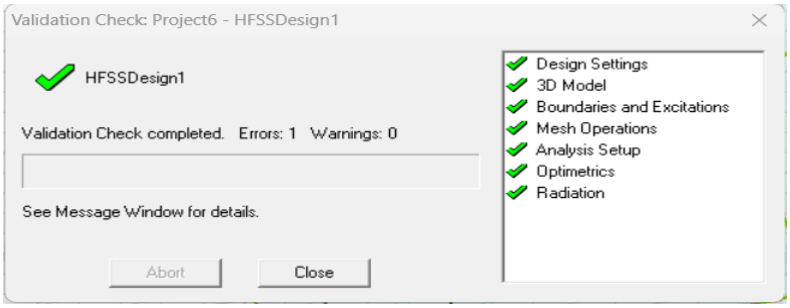


Figure2- 22 *fenêtre de validation*

- **L'analyse**

Pour lancer le processus de résolution, on sélectionne "Analyze All" dans le menu HFSS.

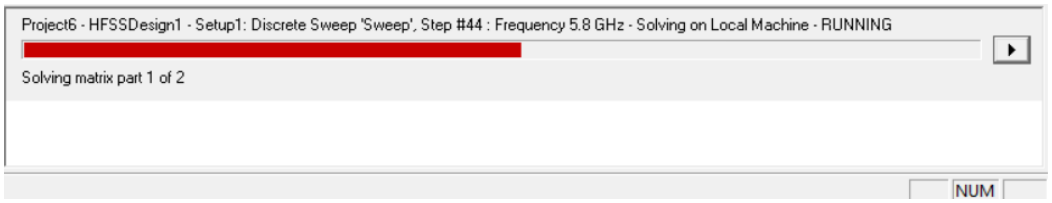


Figure2- 23 *La fenêtre d'analyse*

Une fois l'analyse terminée, nous pouvons afficher les résultats désirés.

2.10. Les résultats

Pour visualiser les résultats, on accède d'abord au Project Manager, puis on sélectionne l'onglet "Résultats". Ensuite, on choisit la forme de visualisation souhaitée.

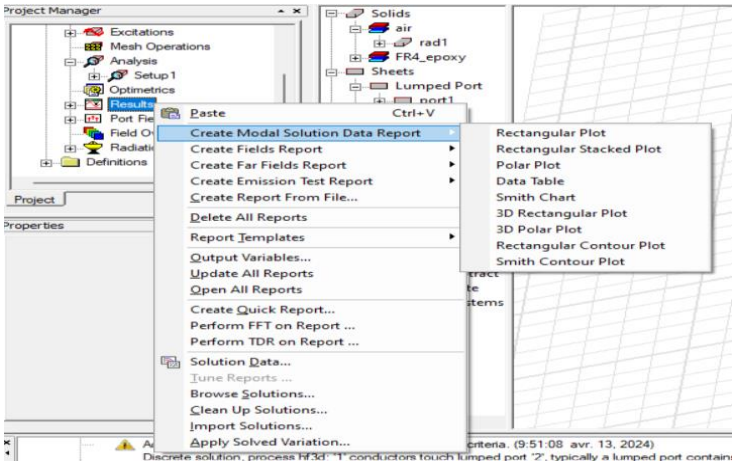


Figure2- 24 *Le type d'affichage de résultat*

2.11. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré la conception d'une antenne à deux éléments en utilisant le logiciel HFSS. Après avoir introduit la problématique, nous avons détaillé chaque étape du processus de conception, depuis la création des éléments constitutifs tels que les patches et les lignes d'alimentation, jusqu'à l'installation d'analyses et l'ajout de fréquences. Nous avons également examiné l'utilisation des encoches pour l'adaptation du circuit. Ce chapitre fournit ainsi une vue d'ensemble exhaustive du processus de conception, offrant une base solide pour la mise en œuvre pratique des antennes à deux éléments.

Chapitre 3 : Discussion des résultats de la conception d'une antenne à deux patchs rectangulaires sur HFSS

3.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous abordons la conception d'une antenne avec deux patchs rectangulaires travaillant en harmonie pour surmonter les limitations des antennes patchs simples en termes de bande passante et de fréquences de fonctionnement. Nous débutons par exposer les limitations associées à une antenne avec patch simple, soulignant ainsi la nécessité d'une solution plus avancée afin d'améliorer ces limitations.

Ensuite, nous explorons les motivations sous-jacentes à la conception d'une antenne avec deux patchs, mettant en lumière les avantages potentiels en termes de performances multifréquences, bande passante et de gain amélioré. Ce chapitre présente donc la proposition d'une nouvelle structure d'antenne avec deux patchs rectangulaires, optimisant ainsi les performances globales.

Nous examinons également l'impact de l'ex-centrage des patchs sur les caractéristiques de l'antenne, explorant ainsi les possibilités d'optimisation. En outre, nous nous concentrons sur une analyse détaillée de la conception proposée, des techniques de simulation utilisées, et des résultats obtenus à travers des simulations.

Afin de valider notre travaille et conception par le logiciel HFSS on va au début faire une conception d'une antenne a deux patchs qui travaille en 2.4 GHz et comparé les résultats avec celle de l'article de référence [21]

3.2. Conception d'une Antenne avec deux Patchs Rectangulaire Résonant à 2.4 GHz

3.2.1. Caractéristiques et spécifications de conception

Nous allons concevoir une antenne à deux patchs résonants opérant à la fréquence de 2,4 GHz, en utilisant des dimensions identiques à celles décrites dans l'article référencé sous le numéro [21]. La conception utilisera le substrat Rogers Ultralam avec une permittivité relative de 2,5 et une épaisseur de 1,59 mm, afin de justifier et valider notre conception proposée.

Tableau3- 1 *Dimensions de l'antenne à deux patchs résonants en 2,4 GHz*

	Paramètres de l'antenne	Dimensions (mm)
L	**Longueur du patch**	**38**
W	**Largeur du patch**	**47**
Y0	**Longueur de l'encoche**	**12**
W0	**Largeur de l'encoche**	**2.06**
Lf	**Longueur ligne d'alimentation**	**28**
Wf	**Largeur de la ligne d'alimentation**	**2.6**
Lp	**Longueur de plan de masse**	**70**
Wp	**Largeur de plan de masse**	**70**

3.2.2. Analyse des résultats

Nous allons procéder à la simulation et à la visualisation des paramètres la conception de notre antenne.

- **Coefficient de réflexion S_{11} en fonction de fréquence**

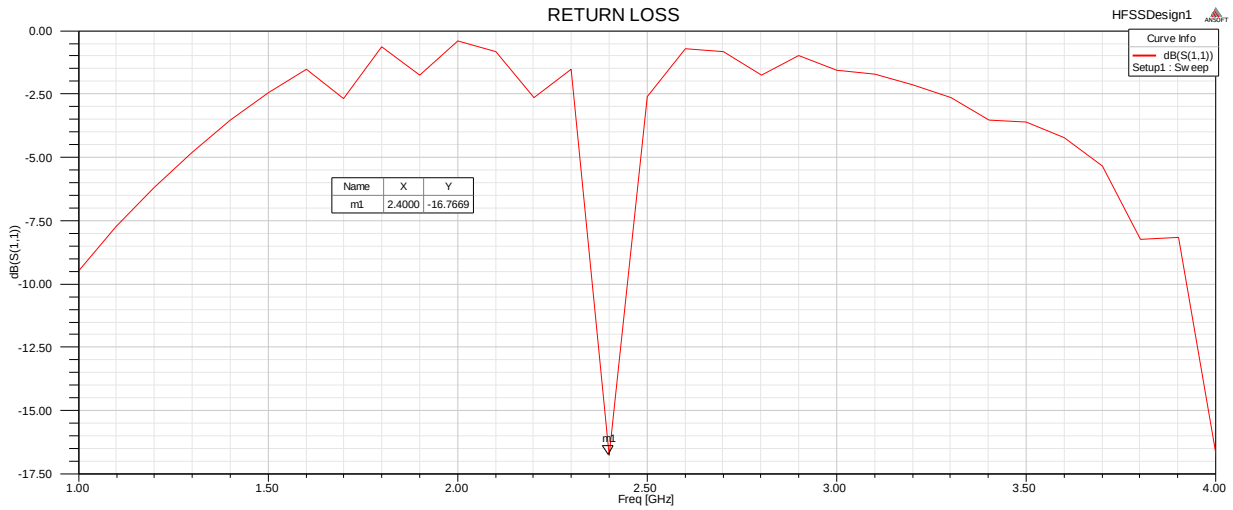


Figure 3- 1 *Coefficient de réflexion d'une antenne a deux patchs résonants à 2.4GHz*

- **Coefficient de réflexion S_{11} en fonction de fréquence après l'ex centrage de patch supérieur avec 1cm**

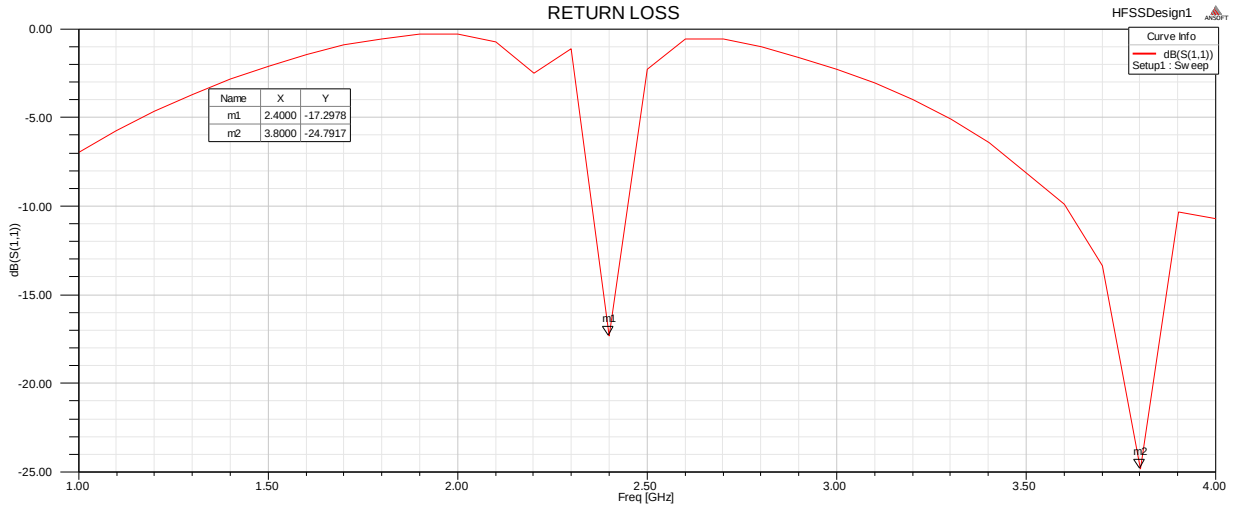


Figure 3- 2 *Coefficient de réflexion d'une antenne a deux patchs résonants à 2.4GHz excentré avec 1cm*

Les résultats obtenus présentent une concordance presque exacte avec les valeurs rapportées dans l'article de référence, ce qui soutient notre démarche et renforce la validité de notre travail et notre conception sur HFSS.

3.3. Conception d'une Antenne avec un seul Patch Rectangulaire Résonant à 3,5 GHz (Application 5G)

3.3.1. Caractéristiques et spécifications de conception

Pour pouvoir faire une comparaison et voir les améliorations apportées par notre conception de deux patchs, on va au début réaliser une conception d'une antenne avec un seul patch rectangulaire sur le logiciel HFSS. Cette antenne est constituée d'un patch rectangulaire imprimé sur un substrat diélectrique **Rogers Ultralam 1250** avec une permittivité relative de **2.5**. L'épaisseur du substrat est de **1.6 mm** Le plan de masse situé en dessous est entièrement métallisé, et l'antenne fonctionne à une fréquence de **3.5 GHz**. Les spécifications détaillées, y compris les dimensions des composants, seront répertoriées dans un tableau pour référence ultérieure.

Tableau3- 2 *Dimensions de l'antenne à un seul patch résonants en 3.5 GHz*

	Paramètres de l'antenne	Dimensions (mm)
L	**Longueur du patch**	**26**
W	**Largeur du patch**	**32**
Y0	**Longueur de l'encoche**	**7.7**
W0	**Largeur de l'encoche**	**1.45**
Lf	**Longueur ligne d'alimentation**	**19.7**
Wf	**Largeur de la ligne d'alimentation**	**3.9**
Lp	**Longueur de plan de masse**	**50**
Wp	**Largeur de plan de masse**	**50**

Les dimensions des composantes sont calculées en utilisant des équations standards disponibles dans la littérature, ainsi que des logiciels de calcul dédiés. L'antenne est spécifiquement conçue pour opérer à une fréquence de 3.5 GHz.

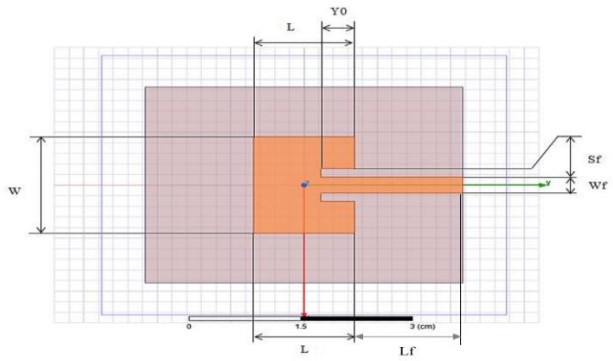


Figure 3- 3 *Antenne patch rectangulaire alimentée par ligne microbande*

3.3.2. Analyse des résultats

Après avoir finalisé la géométrie de l'antenne sur HFSS (conception déjà cité en détail dans le chapitre 2), nous avons procédé à la simulation électromagnétique pour évaluer ses performances à la fréquence de 3.5 GHz

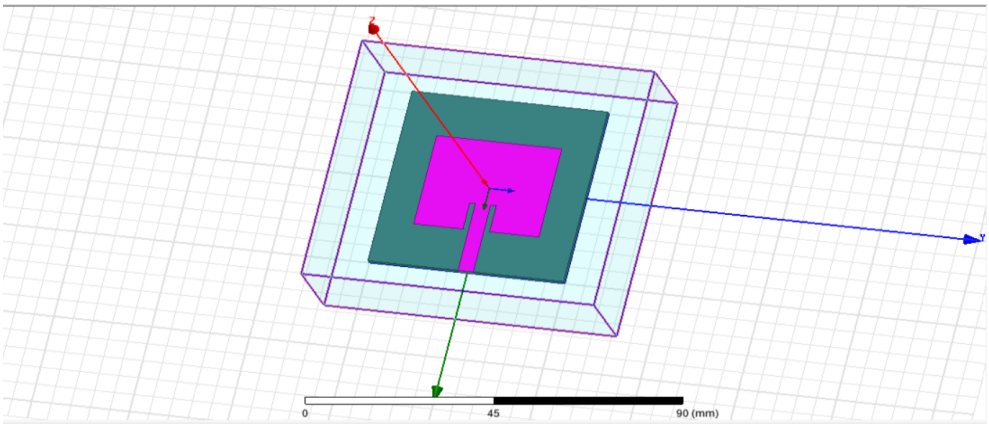


Figure 3- 4 *géométrie d'antenne patch rectangulaire sur HFSS fonctionne à la fréquence de 3.5 GHz*

- **Coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence :**

Nous avons analysé le coefficient de réflexion S11 pour évaluer l'adaptation d'impédance de l'antenne sur une plage de fréquences autour de 3.5 GHz. Les résultats montrent comment la performance de l'antenne varie avec la fréquence et permettent de déterminer si l'antenne est correctement accordée à la fréquence de fonctionnement souhaitée.

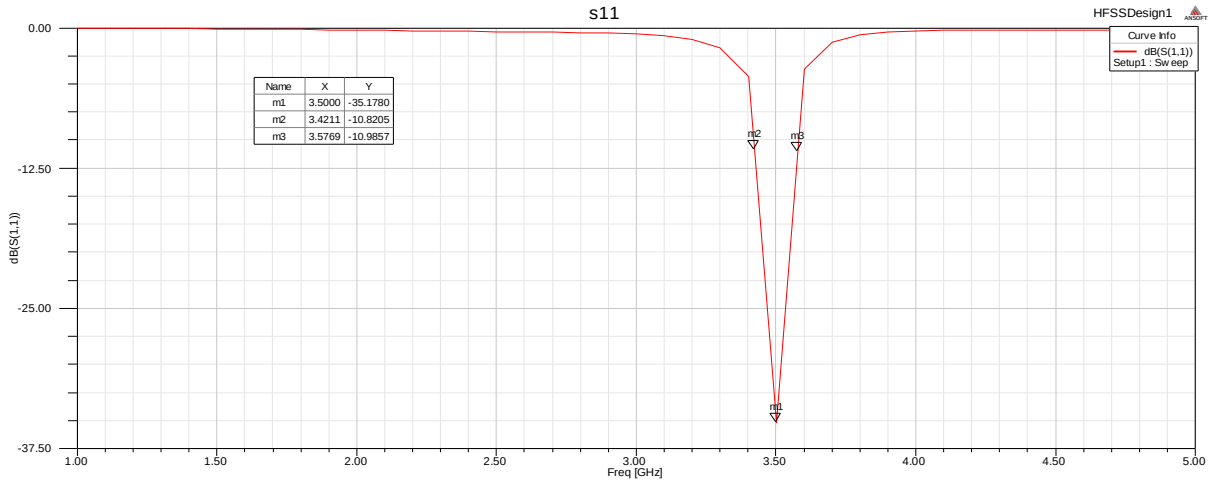


Figure 3- 5 *Coefficient de réflexion* $\mathbf{S_{11}}$ *d'une antenne avec un seul patch résonant à 3.5GHz*

Le tableau suivant présente un résumé des résultats obtenus à la fréquence de résonance principale de 3.5 GHz ainsi que la bande passante:

Tableau3- 3 *Analyse de* S_{11} *de l'antenne avec un seul patch résonant a 3.5ghz*

La fréquence de résonance	**La valeur de S_{11}**	**La bande passante** **BP= [Fmin, Fmax GHz] =Fmax-Fmin**
3.5GHz	-35.17 dB	BP= [3.42 ,3.57 GHz] =150Mhz

- **Le gain en 3D**

L'analyse du gain en 3D a révélé que l'antenne présente un gain directif, avec une valeur maximale mesurée de 6.5 dB, assurant un rayonnement sur le plan supérieur de l'antenne.

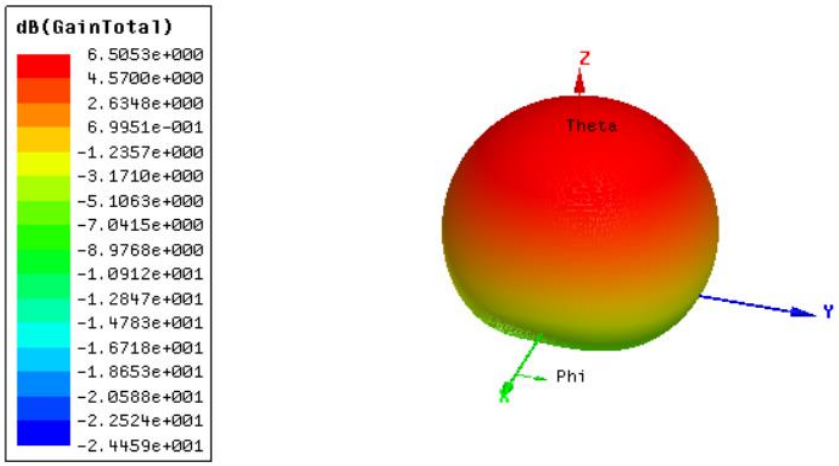


Figure 3- 6 *Le gain en 3D d'antenne patch rectangulaire sur HFSS fonctionne à la fréquence de 3.5 GHz*

- **Efficacité de rayonnement**

L'efficacité de rayonnement à la fréquence de 3.5 GHz est mesurée à 0.95, ce qui indique que l'antenne convertit efficacement l'énergie électrique en rayonnement électromagnétique, assurant ainsi une performance optimale dans la transmission ou la réception des signaux.

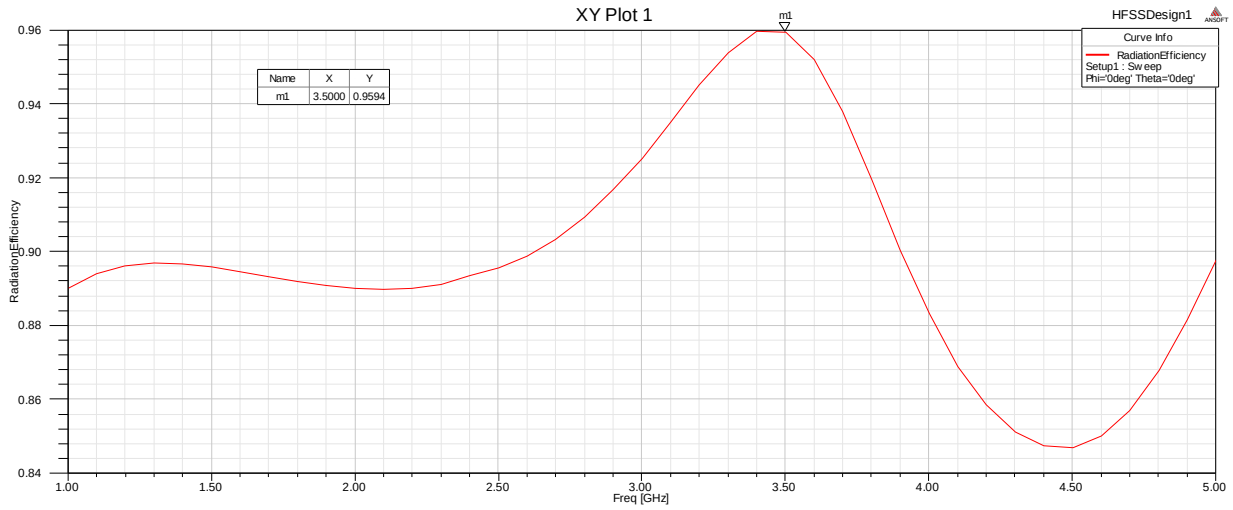


Figure 3- 7 *l'efficacité de rayonnement en fonction de la fréquence d'antenne patch rectangulaire fonctionne à la fréquence de 3.5 GHz*

- **La puissance rayonnée et la puissance acceptée**

Les valeurs de puissance rayonnée et de puissance acceptée sont toutes deux mesurées à 0.95, ce qui dénote une conversion efficace de l'énergie électrique en rayonnement électromagnétique, et réciproquement en réception. Cette cohérence entre les deux paramètres indique une performance équilibrée de l'antenne dans la transmission et la réception des signaux.

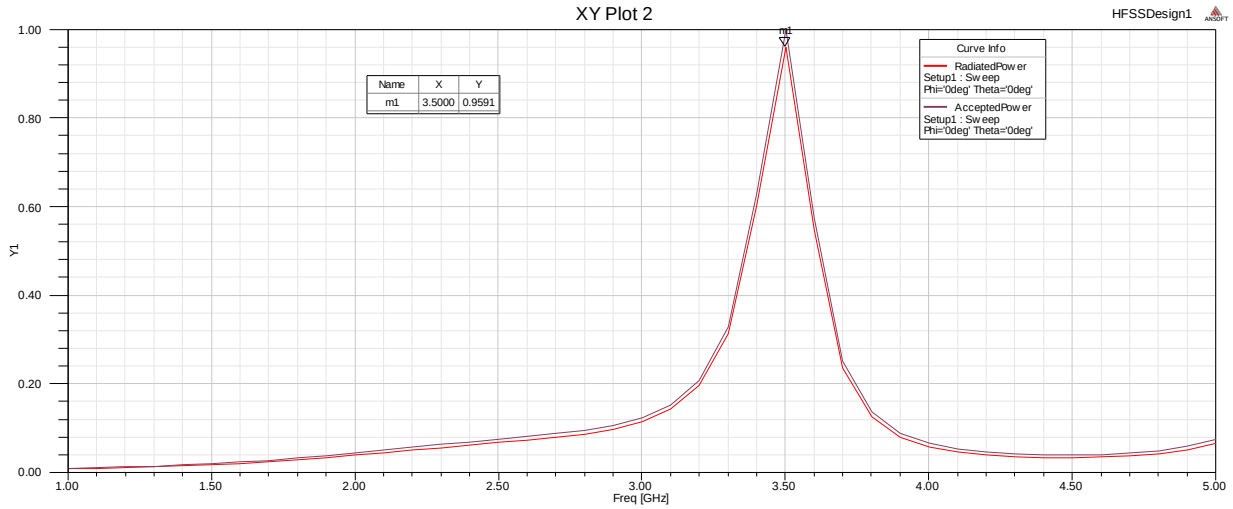


Figure 3- 8 *La puissance rayonnée et la puissance acceptée en fonction de la fréquence d'antenne patch rectangulaire sur HFSS fonctionne à la fréquence de 3.5 GHz*

3.4. Conception d'une antenne à deux patchs rectangulaires résonant à 3.5GHz

3.4.1. Caractéristiques et spécifications de conception

Nous allons concevoir une antenne à deux patchs rectangulaires résonant à **3.5 GHz** sur HFSS en utilisant le substrat **Rogers ULTRALAM 1250**. Les étapes incluent la création du plan de masse, la mise en place du premier patch sur ce substrat, et l'ajout du second substrat avec le

second patch par-dessus, optimisant les encoches pour l'adaptation de l'antenne. Après avoir configuré et positionné les points d'alimentation, nous simulerons l'antenne pour maximiser ses performances.

Dans cette conception, les dimensions des composants sont identiques à celles d'un seul patch, mais nous avons ajusté légèrement les encoches pour optimiser le couplage entre les deux patchs. De plus, un autre port d'alimentation a été ajouté pour alimenter individuellement chaque patch, permettant ainsi une adaptation précise et efficace.

Voici la conception finale de l'antenne à deux patchs sur HFSS :

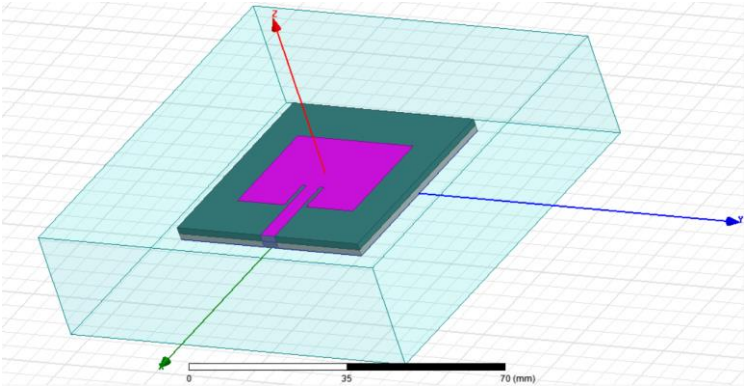


Figure 3- 9 *la conception d'une antenne a deux patchs résonants à 3.5Ghz sur HFSS*

3.4.2. Analyse des résultats

Cette section présente les résultats de simulation de l'antenne à deux patchs superposés résonant à 3.5 GHz.

- **Coefficient de réflexion S_{11} en fonction de fréquence**

La figure suivante présente le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence d'une antenne à deux patchs rectangulaires résonant à 3.5GHz :

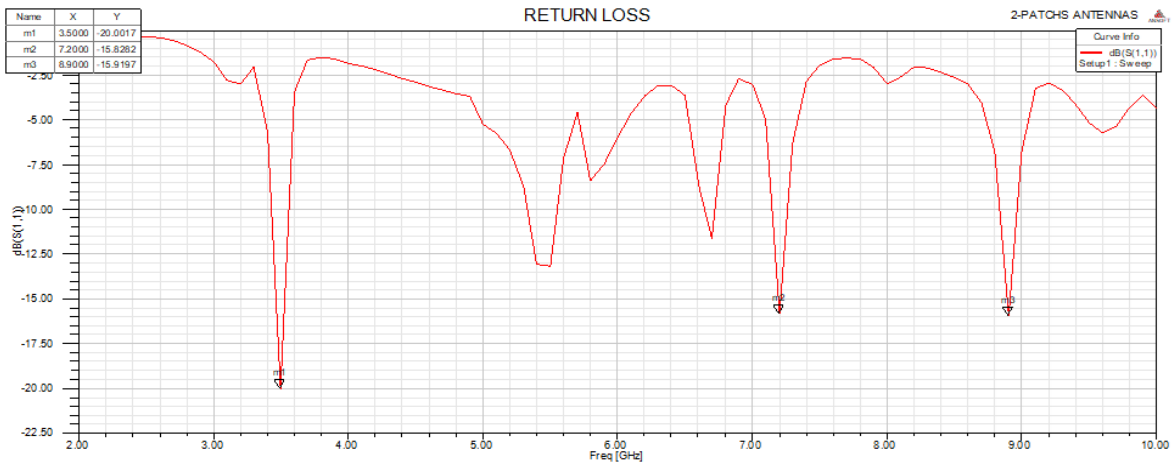


Figure 3- 10 *Coefficient de réflexion S11 d'une antenne à deux patchs rectangulaires résonant a 3.5GHz*

Le tableau ci-dessous présente les fréquences de résonance, les bandes de fréquences correspondantes et les largeurs de bande passante pour l'antenne à deux patches :

Tableau3- 4 *Analyse de s11 de l'antenne avec deux patchs résonants a 3.5ghz*

La fréquence de résonance	**La valeur de S_{11}**	**La bande passante** **BP= [Fmin, Fmax GHz] =Fmax-Fmin**
3.5GHz	-20dB	BP= [3.43 ,3.56 GHz] =130Mhz
7.2 GHz	-15.82 dB	BP= [7.14,7.26 GHz] =120MHz
8.9 GHz	-15.91 dB	BP= [8.83,9.96 GHz] =130Mhz

Le graphe de S11 de l'antenne à deux patches montre des améliorations significatives par rapport à l'antenne à un seul patch. Initialement, avec un seul patch, l'antenne avait une seule bande passante notable autour de **3.5 GHz**. Cependant, avec l'ajout d'un deuxième patch, nous avons non seulement maintenu une bande passante principale autour de 3.5 GHz (de **3.43 GHz** à **3.56 GHz**, soit **130 MHz),** mais aussi gagné de nouvelles fréquences de résonance. Ces nouvelles bandes passantes incluent une plage de **7.14 GHz** à **7.26 GHz** (**120 MHz**) et une autre de **8.83 GHz** à **9.96 GHz** (**130 MHz**). Cela démontre que l'antenne à deux patches peut fonctionner efficacement sur une gamme plus large de fréquences, améliorant ainsi sa polyvalence et son efficacité pour diverses applications. En comparaison avec l'antenne à un seul patch, l'antenne à deux patches offre une meilleure performance avec plusieurs bandes passantes, ce qui la rend plus adaptée pour des applications nécessitant une opération sur plusieurs fréquences.

- **Le gain en 3D**

La figure ci-dessous présente le gain en 3D de notre antenne. Avec une valeur maximale du gain de 6.7 dB, cette représentation illustre la distribution spatiale des champs rayonnés dans l'espace, confirmant ainsi que notre conception a amélioré aussi le gain.

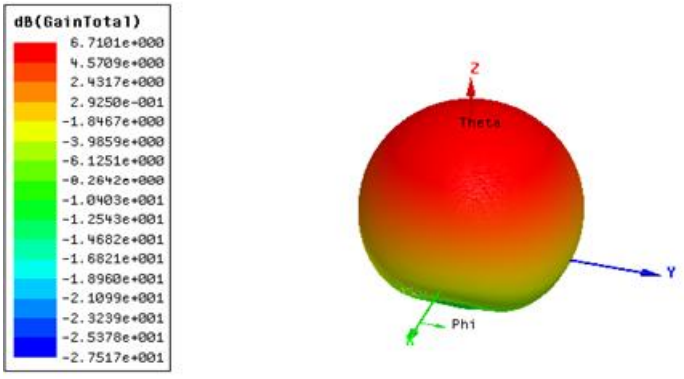


Figure 3- 11 *le gain en 3D de l'antenne a deux patchs rectangulaires sur HFSS fonctionne à la fréquence de 3.5 GHz*

- **Efficacité de rayonnement**

La figure présente l'efficacité de rayonnement (%) en fonction de la fréquence (GHz) pour différentes bandes de fréquences de l'antenne proposée. Les valeurs d'efficacité de rayonnement sont remarquablement élevées, avec des performances notables telles que 95% à 3.5 GHz, 95% à 7.2 GHz et 96% à 8.9 GHz. Ces résultats témoignent de la capacité de l'antenne à maintenir une efficacité élevée sur une gamme variée de fréquences, renforçant ainsi son utilité dans diverses applications de communication sans fil.

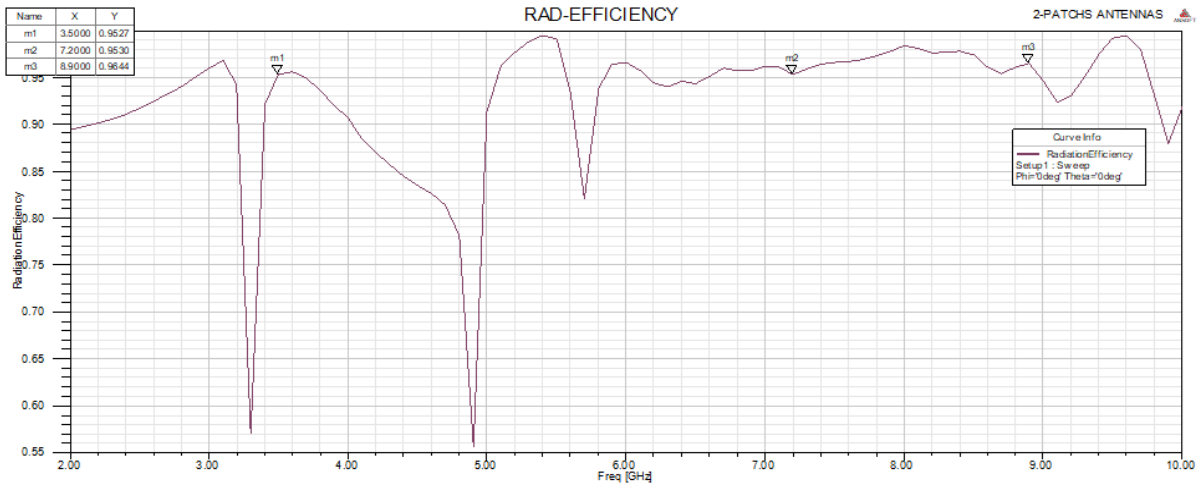


Figure 3- 12 *l'efficacité de l'antenne a deux patchs en fonction de la fréquence d'une résonant a 3.5GHz*

- **La puissance rayonnée et la puissance acceptée**

À toutes les fréquences visualisées, la puissance rayonnée et la puissance acceptée maintiennent une correspondance parfaite, demeurant constantes. Cette cohérence entre les deux paramètres atteste de l'efficacité égale de l'antenne dans ses fonctions de transmission et de réception, mettant en évidence une conversion stable de l'énergie électrique en rayonnement électromagnétique, et réciproquement, sur l'ensemble de la plage de fréquences analysée.

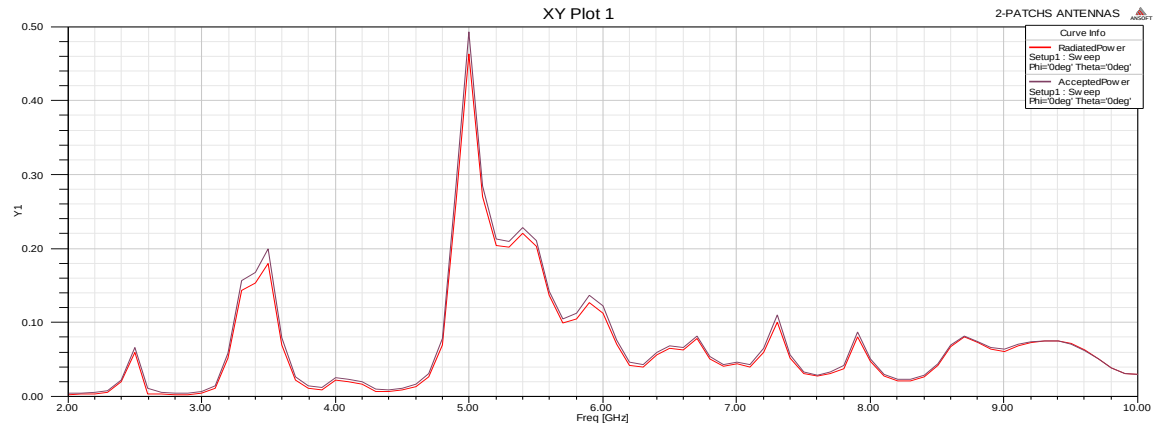


Figure 3- 13 *La puissance rayonnée et la puissance acceptée d'une antenne a deux patchs résonants a 3.5GHz en fonction de la fréquence*

3.5. Étude de l'impact de l'ex-centrage sur les performances de l'antenne à deux patchs rectangulaires

Dans cette section, nous allons explorer les effets de l'ex-centrage sur les caractéristiques de l'antenne en déplaçant délibérément le centre géométrique de l'élément rayonnant. L'ex-centrage, dans le contexte des antennes, fait référence au déplacement délibéré du centre géométrique de l'élément rayonnant par rapport à son emplacement habituel. Cela signifie que l'antenne n'est pas positionnée exactement au centre de son support ou de son substrat. Cette étude nous permettra de comprendre comment les variations de position influent sur les performances de l'antenne et nous aidera à optimiser sa conception pour une efficacité maximale dans divers scénarios d'application.

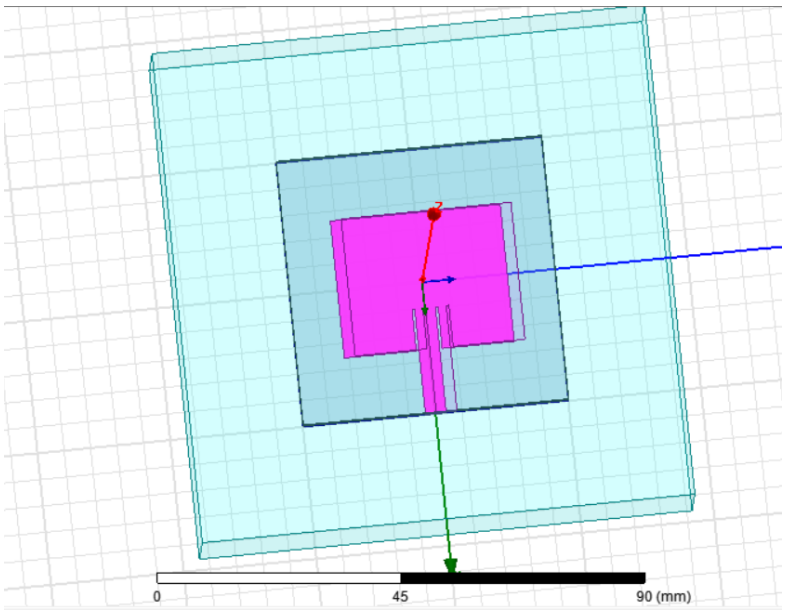


Figure 3- 14 *Antenne a Patch excentré*

3.5.1. Effet de l'ex-centrage du patch supérieur

3.5.1.1. Effet de l'ex-centrage avec 1 mm sur l'axe OY

Nous avons ajusté le patch supérieur avec 1 mm sur l'axe OY afin d'observer les changements sur ses caractéristiques.

3.5.1.2. Analyse des résultats

- **Coefficient de réflexion S_{11} en fonction de fréquence**

La figure suivante présente le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence après un décalage de 1 mm :

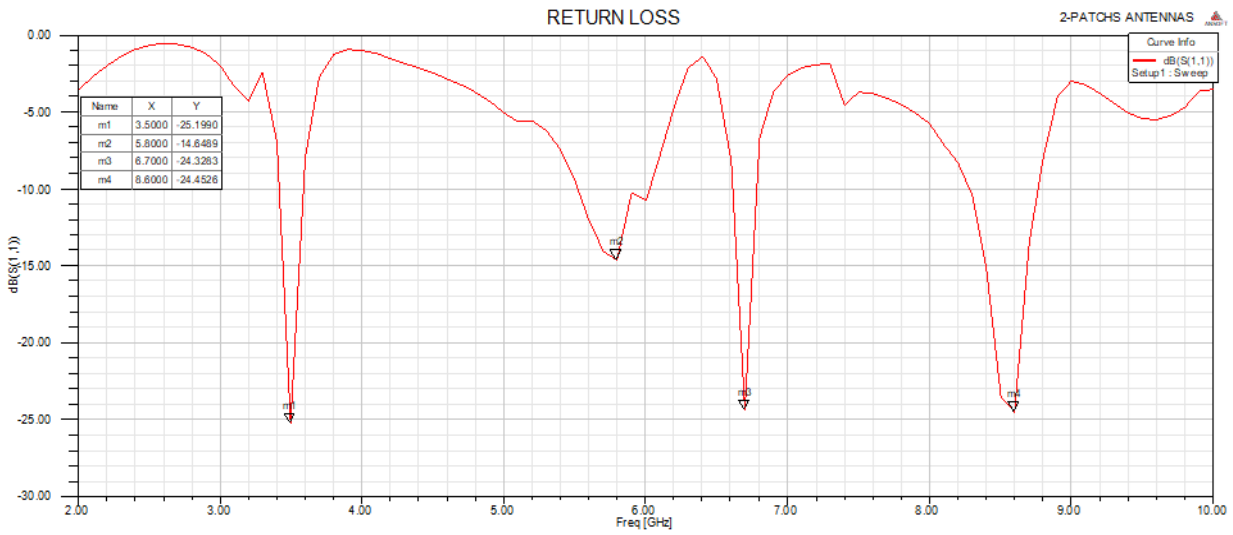


Figure 3- 15 *Coefficient de réflexion* $\mathbf{S_{11}}$ *d'une antenne à deux patchs après l'ex-centrage de patch sup avec 1 mm*

Le tableau ci-dessous présente les fréquences de résonance, les bandes de fréquences correspondantes et les largeurs de bande passante pour l'antenne à deux patches :

Tableau3- 5 *Analyse de* $\mathbf{S_{11}}$ *de l'antenne avec deux patchs après l'ex-centrage de patch sup avec 1 mm*

La fréquence de résonance	**La valeur de S_{11}**	**La bande passante** **BP= [Fmin, Fmax GHz] =Fmax-Fmin**
3.5GHz	-25.19dB	BP= [3.41 ,3.58 GHz] =170Mhz
5.8GHz	-14.64dB	BP= [5.52,6.02 GHz] =500Mhz
6.7 GHz	-24.32 dB	BP= [6.61,6.78 GHz] =170MHz
8.6 GHz	-24.45 dB	BP= [8.27,8.76 GHz] =490Mhz

L'ex-centrge du patch supérieur de 1 mm a produit des changements notables dans les performances de l'antenne. Les résultats montrent une amélioration significative des bandes passantes, notamment une nouvelle bande passante très significatif autour de **5.8 GHz** (de **5.52 GHz** à **6.02 GHz**, soit **500 MHz**) et une autre autour de **8.6 GHz** (de **8.27 GHz** à **8.76 GHz**, soit **490 MHz**). De plus, la bande passante principale centrée autour de **3.5 GHz** s'est légèrement élargie, passant de **130 MHz** à **170 MHz** (de **3.41 GHz** à **3.58 GHz**). Ces améliorations sont également observées dans la bande passante secondaire autour de **6.7 GHz**, qui est passée de **120 MHz** à **170 MHz** (de **6.61 GHz** à **6.78 GHz**).

- **Le gain en 3D**

L'ajustement de l'antenne n'a pas d'influence négative sur le gain, qui reste conservé malgré les modifications apportées.

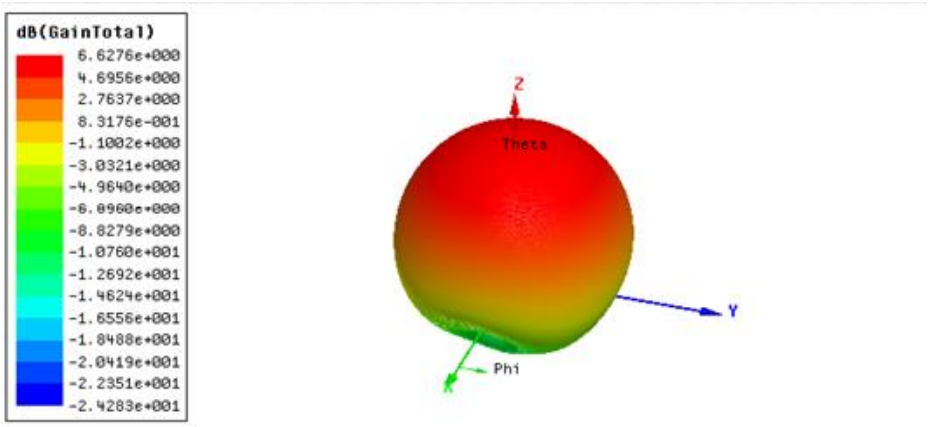


Figure 3- 16 *le gain en 3D de l'antenne a deux patchs Après l'ex-centrage de 1mm*

- **Efficacité de rayonnement**

La figure présente l'efficacité de rayonnement (%) pour différentes bandes de fréquences de l'antenne après le décalage. Malgré ce décalage, l'efficacité reste élevée avec des valeurs notables telles que 93% à 3.5 GHz, 92% à 5.8 GHz, 95% à 6.7 GHz et 99% à 8.6 GHz.



Figure 3- 17 *l'efficacité de l'antenne a deux patchs après l'ex-centrage de patch sup avec 1 mm*

- **La puissance rayonnée et la puissance acceptée**

Les deux graphes de puissance rayonnée et de puissance acceptée démontrent une forte similitude, mettant en évidence la cohérence entre la puissance émise par l'antenne et celle qui est captée. Cette correspondance souligne une efficacité équilibrée de l'antenne dans la transmission et la réception des signaux électromagnétiques.

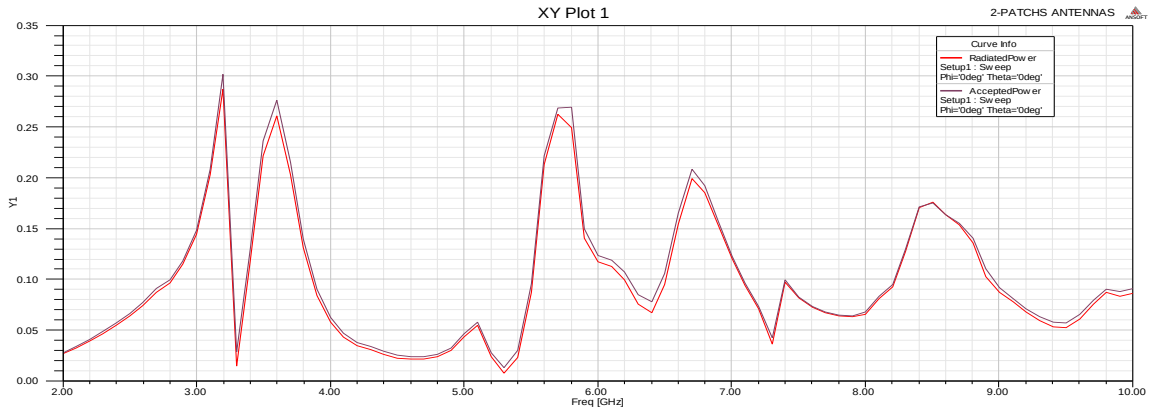


Figure 3- 18 *la puissance rayonnée et acceptée de l'antenne a deux patchs après l'ex-centrage de 1mm*

3.5.1.3. Effet de l'ex-centrage avec 2 mm sur l'axe OY

Après avoir ajusté le patch supérieur avec 2 mm sur l'axe OY pour observer les changements sur ses caractéristiques, nous prévoyons désormais de décaler le patch avec 2 mm pour poursuivre notre analyse.

3.5.1.4. Analyse des résultats

- **Coefficient de réflexion S_{11} en fonction de fréquence**

La figure suivante présente le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence après un décalage de 2 mm :



Figure 3- 19 *Coefficient de réflexion* S_{11} *d'une antenne à deux patchs après l'ex-centrage de patch sup avec 2 mm*

Le tableau ci-dessous synthétise les fréquences de résonance, les valeurs de S_{11}correspondantes et les bandes passantes associées :

Tableau3- 6 *Analyse de* S_{11} *de l'antenne avec deux patchs après l'ex-centrage de patch sup avec 2 mm*

La fréquence de résonance	**La valeur de S_{11}**	**La bande passante** **BP= [Fmin, Fmax GHz] =Fmax-Fmin**
3.5GHz	-25.8dB	BP= [3.42 ,3.58 GHz] =160Mhz
5.6GHz	-39.92dB	BP= [5.48,5.85 GHz] =370Mhz
7.2 GHz	-20.15 dB	BP= [7.13,7.27 GHz] =140MHz

L'ex-centrage du patch supérieur de 2 mm a conduit à une légère modification de la bande passante principale autour de 3.5 GHz, avec une bande passante de 160 MHz. De nouvelles fréquences de résonance apparaissent à 5.6 GHz et 7.2 GHz, avec des bandes passantes de 370 MHz et 140 MHz respectivement. Notons que la bande passante de 7.2 GHz s'est élargie par rapport à la configuration initiale.

- **Le gain en 3D**

Le gain de l'antenne demeure stable malgré les ajustements effectués, démontrant ainsi sa fiabilité et sa robustesse dans différentes configurations

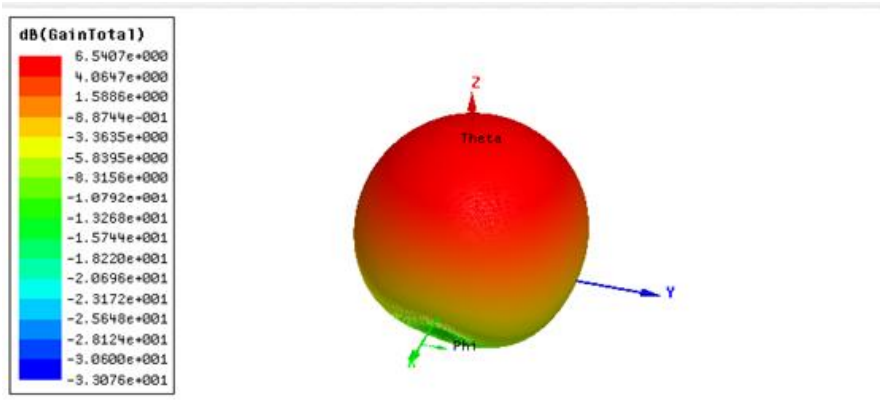


Figure 3- 20 *le gain en 3D de l'antenne a deux patchs Après l'ex-centrage de2mm*

- **Efficacité de rayonnement**

L'efficacité de l'antenne reste élevée sur une gamme de fréquences variée, avec des valeurs notables telles que 95% à 3.5 GHz, 97% à 5.6 GHz et 94% à 7.2 GHz.

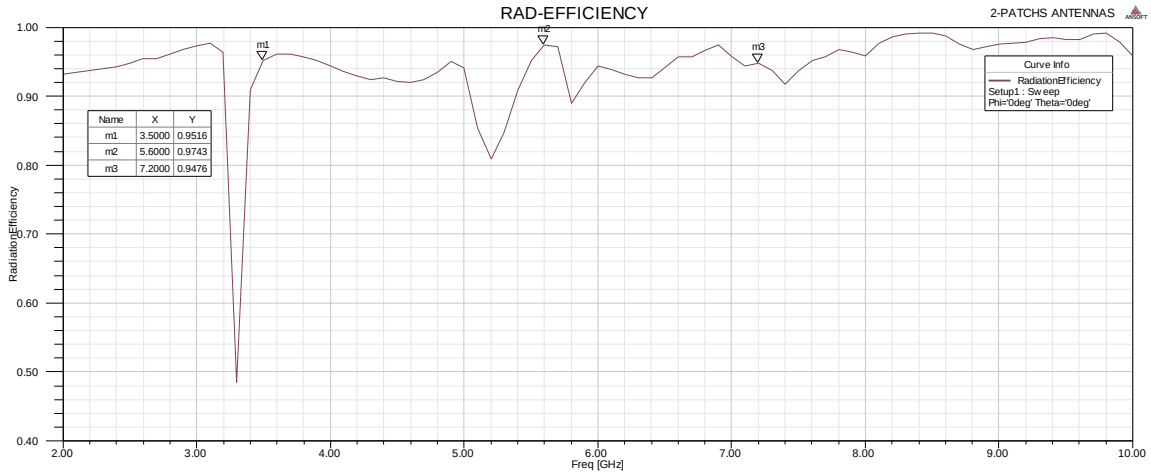


Figure 3- 21 *l'efficacité de rayonnement de l'antenne a deux patchs en fonction de la fréquence Après l'ex-centrage de2mm*

- **La puissance rayonnée et la puissance acceptée**

Les graphiques de puissance rayonnée et de puissance acceptée mettent en évidence la cohérence remarquable entre les deux paramètres malgré le décalage appliqué à l'antenne.

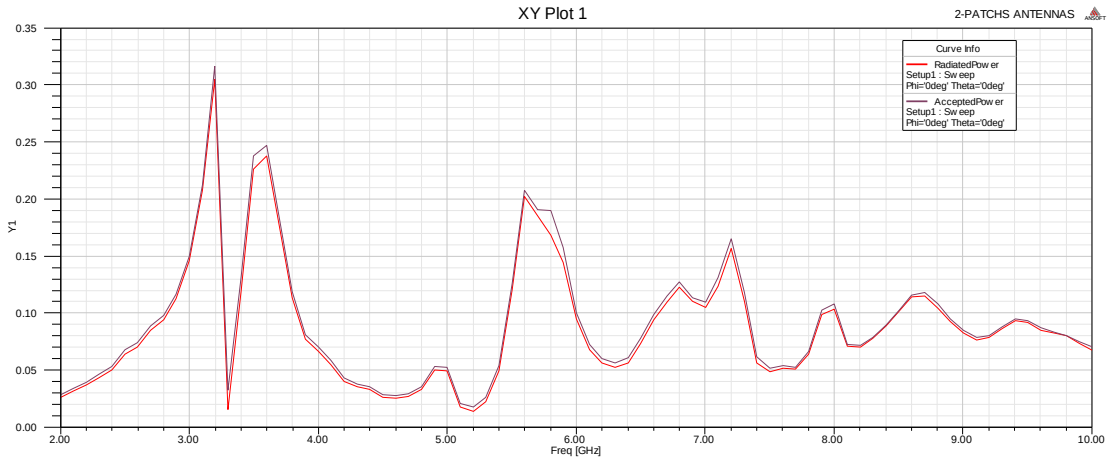


Figure 3- 22 *La puissance rayonnée et la puissance acceptée en fonction de la fréquence Après l'ex-centrage de2mm*

3.5.1.5. Effet de l'ex-centrage avec 3 mm sur l'axe OY

Nous prévoyons maintenant de poursuivre notre analyse en décalant l'antenne de 3 mm afin d'évaluer davantage son comportement dans différentes configurations.

3.5.1.6. Analyse des résultats

- **Coefficient de réflexion S_{11}en fonction de fréquence**

La figure suivante présente le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence après un décalage de 3 mm :

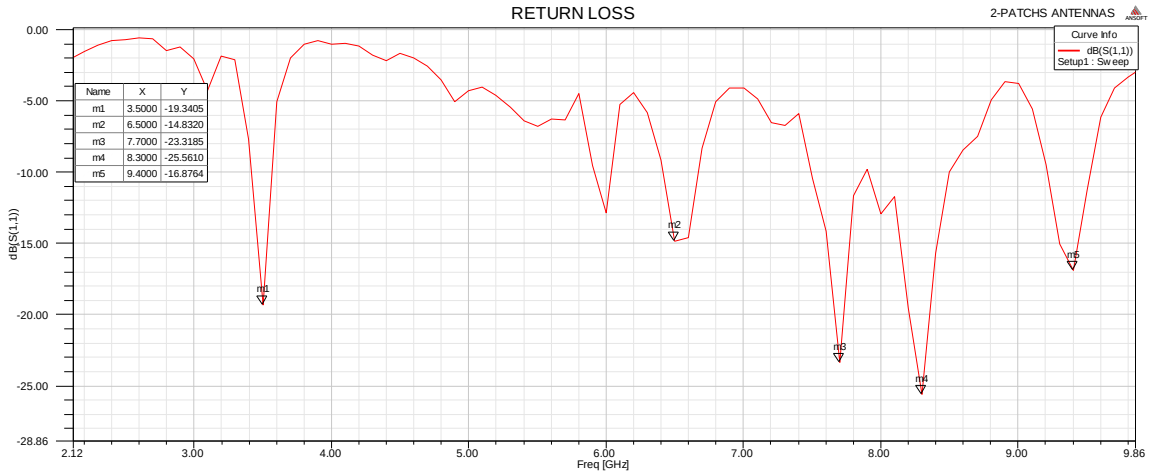


Figure 3- 23 *Coefficient de réflexion* $\mathbf{S_{11}}$ *d'une antenne à deux patchs après l'ex-centrage de patch sup avec 3 mm*

Le tableau ci-dessous présente les fréquences de résonance, les bandes de fréquences correspondantes et les largeurs de bande passante pour l'antenne à deux patches :

Tableau3- 7 *Analyse de* $\mathbf{S_{11}}$ *de l'antenne avec deux patchs après l'ex-centrage de patch sup avec 3 mm*

La fréquence de résonance	**La valeur de S_{11}**	**La bande passante** **BP= [Fmin, Fmax GHz] =Fmax-Fmin**
3.5GHz	-19.34dB	BP= [3.41 ,3.56 GHz] =150Mhz
6.5GHz	-14.83dB	BP= [6.41,6.67 GHz] =260Mhz
7.7 GHz	-23.31 dB	BP= [7.49,7.88 GHz] =390MHz
8.3GHz	-25.56dB	BP= [8.1,8.46 GHz] =360MHz
9.4GHz	-16.87dB	BP= [9.21,9.52 GHz] =310MHz

L'ex-centrage du patch supérieur de **3 mm** a induit des variations significatives dans les performances de l'antenne. La bande passante principale, centrée autour de **3.5 GHz**, s'est légèrement élargie, couvrant une plage de fréquences de **3.41 GHz** à 3.56 GHz, soit une bande passante de **150 MHz**. En outre, une nouvelle fréquence de résonance à 6.5 GHz est observée,

avec une bande passante étendue de **260 MHz**, allant de **6.41 GHz** à **6.67 GHz**. Cela démontre une capacité accrue de l'antenne à opérer sur des fréquences plus élevées tout en conservant des performances satisfaisantes sur la bande principale. De plus, une résonance à **7.7 GHz** est observée, avec une bande passante étendue de **390 MHz** (de **7.49 GHz** à **7.88 GHz**), offrant ainsi une meilleure adaptabilité de l'antenne à des environnements de fréquences variées. Les résultats révèlent également une résonance à **8.3 GHz**, avec une bande passante de **360 MHz** (de **8.1 GHz** à **8.46 GHz**), et à **9.4 GHz**, avec une bande passante de **310 MHz** (de **9.21 GHz à 9.52 GHz**), soulignant l'efficacité de l'antenne sur une gamme étendue de fréquences.

- **Le gain en 3D**

Le gain de l'antenne reste constant malgré les différentes configurations testées, démontrant ainsi sa stabilité et sa fiabilité dans différentes situations.

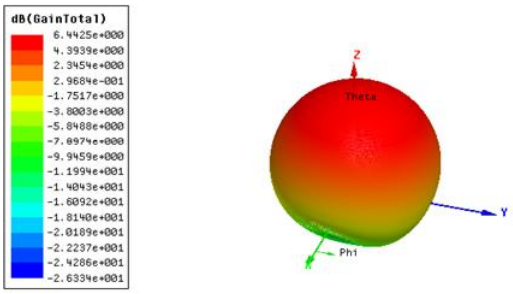


Figure 3- 24 le gain en 3D de l'antenne a deux patchs Après l'ex-centrage de 3mm

- **Efficacité de rayonnement**

L'efficacité de l'antenne demeure remarquablement élevée sur une gamme variée de fréquences, avec des valeurs notables telles que 95% à 3.5 GHz, 92% à 6.5 GHz, 97% à 7.7 GHz, 97% à 8.3 GHz et 99% à 9.4 GHz.

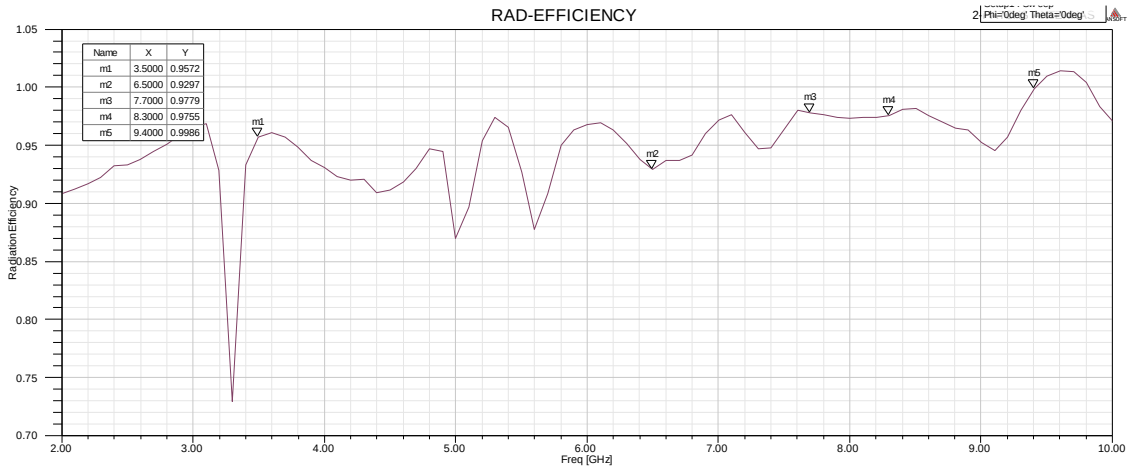


Figure 3- 25 l'efficacité de rayonnement en fonction de la fréquence Après l'ex-centrage de2mm

- **La puissance rayonnée et la puissance acceptée**

Les deux graphiques présentent des variations similaires, avec des valeurs cohérentes tout au long des ajustements.

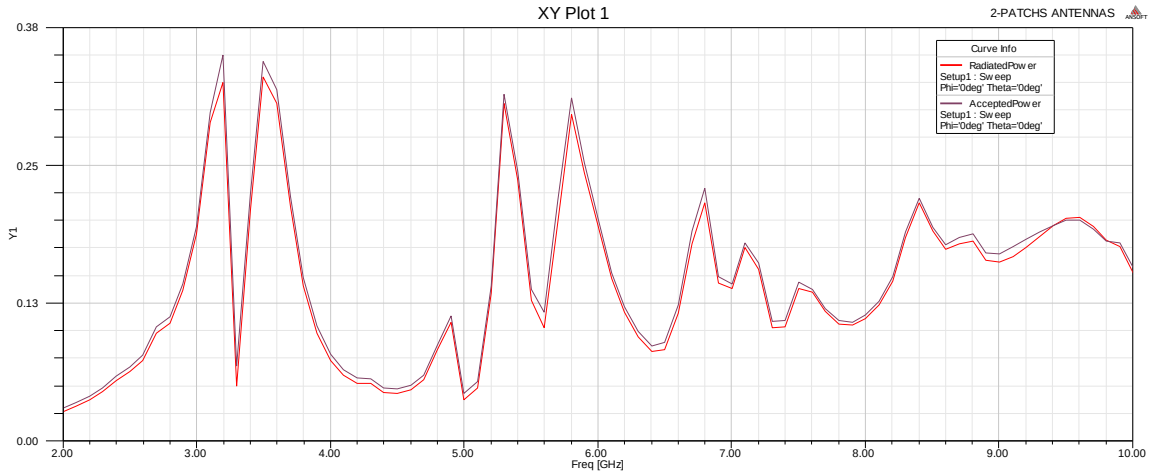


Figure 3- 26 *La puissance rayonnée et la puissance acceptée en fonction de la fréquence Après l'ex-centrage de2mm*

3.5.1.7. Effet de l'ex-centrage avec -2 mm sur l'axe OY

3.5.1.8. Analyse des résultats

- **Coefficient de réflexion S_{11} en fonction de fréquence**

La figure suivante présente le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence après un décalage de -2 mm :

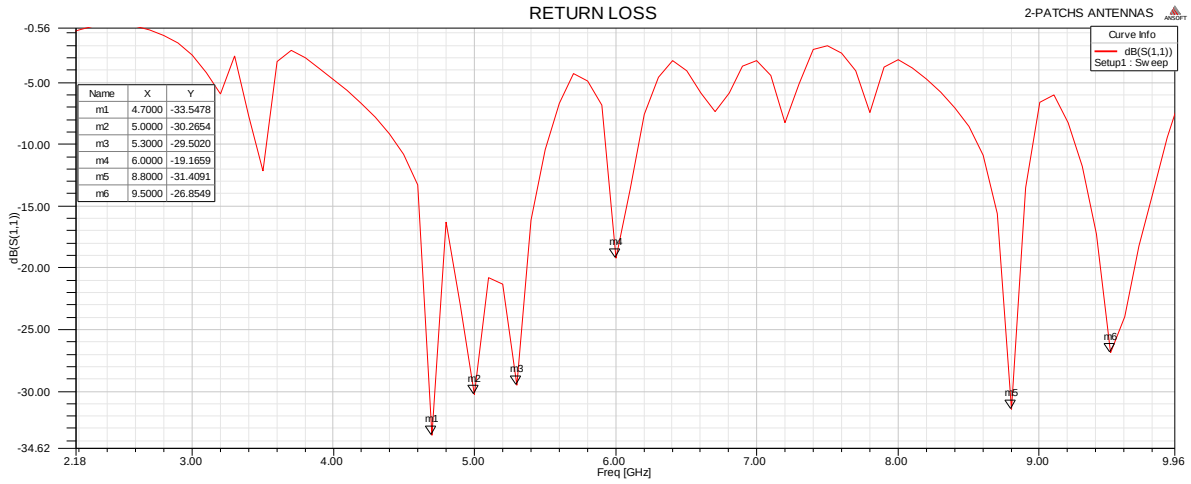


Figure 3- 27 *Coefficient de réflexion* $\mathbf{S_{11}}$ *d'une antenne à deux patchs après l'ex-centrage de patch sup avec -2 mm*

Le tableau ci-dessous présente les fréquences de résonance, les bandes de fréquences correspondantes et les largeurs de bande passante pour l'antenne à deux patches :

Tableau3- 8 *Analyse de* S_{11} *de l'antenne avec deux patchs après l'ex-centrage de patch sup avec -2 mm*

La fréquence de résonance	**La valeur de S_{11}**	**La bande passante** **BP= [Fmin, Fmax GHz] =Fmax-Fmin**
4.7GHz	-33.54dB	BP= [4.61 ,4.8 GHz] =190Mhz
5GHz	-30.26dB	BP= [4.86,5.1 GHz] =240Mhz
5.3 GHz	-29.5 dB	BP= [5.2,5.36 GHz] =160MHz
6GHz	-19.16dB	BP= [5.92,6.15 GHz] =230MHz
8.8GHz	-31.4dB	BP= [8.56,8.96 GHz] =400MHz
9.5GHz	-26.85dB	BP= [9.24,9.88 GHz] =640MHz

Pour l'ex-centrage de -2 mm, les performances de l'antenne ont été notablement affectées, comme en témoignent les mesures de réflexion S11. À 4.7 GHz, une bande passante de 190 MHz est observée, s'étendant de 4.61 GHz à 4.8 GHz. À 5 GHz, une bande passante de 240 MHz est relevée entre 4.86 GHz et 5.1 GHz. À 5.3 GHz, une bande passante de 160 MHz est observée entre 5.2 GHz et 5.36 GHz. À 6 GHz, une bande passante de 230 MHz est relevée, s'étendant de 5.92 GHz à 6.15 GHz. À 8.8 GHz, une bande passante de 400 MHz est observée entre 8.56 GHz et 8.96 GHz. Enfin, à 9.5 GHz, une bande passante remarquable de 640 MHz est observée, allant de 9.24 GHz à 9.88 GHz. Cependant, il est important de noter que la fréquence principale centrée autour de 3.5 GHz a été perdue dans cette configuration

- **Le gain en 3D**

Le gain de l'antenne reste constant, principalement dans les environs de 6 dB, démontrant ainsi sa stabilité et sa fiabilité dans différentes configurations et décalages.

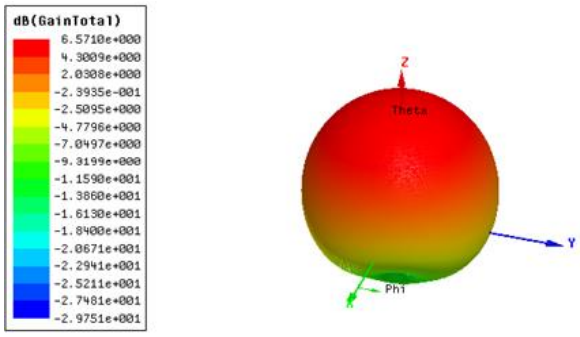


Figure 3- 28 *le gain en 3D de l'antenne a deux patchs Après l'ex-centrage de -2mm*

- **Efficacité de rayonnement**

L'efficacité de l'antenne demeure élevée sur différentes fréquences, avec des valeurs notables telles que 95% à 3.5 GHz, 92% à 6.5 GHz, 97% à 7.7 GHz, 97% à 8.3 GHz, et un maximum de 99% à 9.4 GHz.



Figure 3- 29 *l'efficacité de rayonnement en fonction de la fréquence Après l'ex-centrage de -2mm*

- **La puissance rayonnée et la puissance acceptée**

On observe une similitude marquée entre les deux graphiques.

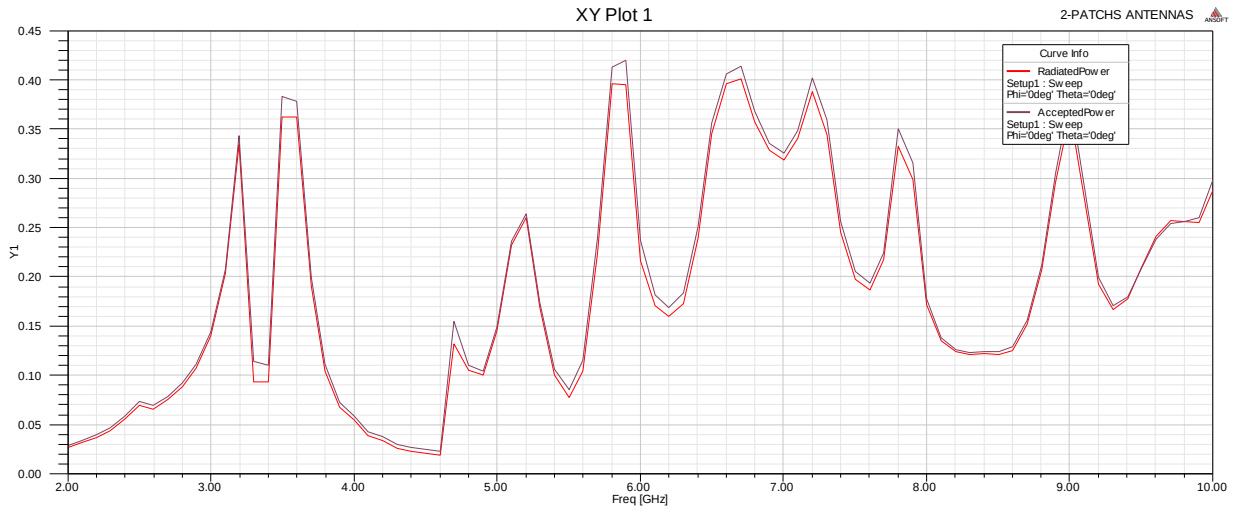


Figure 3- 30 *La puissance rayonnée et la puissance acceptée en fonction de la fréquence Après l'ex-centrage de -2mm*

3.5.1.9. Effet de l'ex-centrage avec 2 mm sur l'axe OX et -1mm sur l'axe OY

Nous allons maintenant effectuer un décalage simultané sur les axes OX et OY afin d'observer les effets combinés sur les caractéristiques de l'antenne.

3.5.1.10. Analyse des résultats

- **Coefficient de réflexion S_{11} en fonction de fréquence**

La figure suivante présente le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence après l'ex-centrage avec 2 mm sur l'axe OX et -1mm sur l'axe OY :

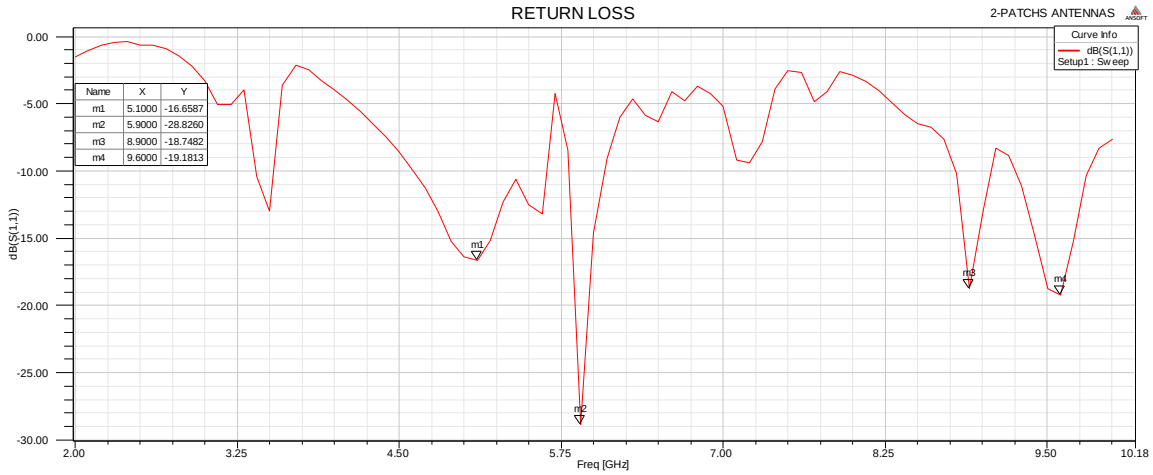


Figure 3- 31 *Coefficient de réflexion* $\mathbf{S_{11}}$ *d'une antenne à deux patchs après l'ex-centrage de patch sup avec 2 mm sur OX, -1mm sur OY*

Le tableau ci-dessous présente les fréquences de résonance, les bandes de fréquences correspondantes et les largeurs de bande passante pour l'antenne à deux patches :

Tableau3- 9 *Analyse de* $\mathbf{S_{11}}$ *de l'antenne avec deux patchs après l'ex-centrage de patch sup avec 2 mm sur OX et -1mm sur OY*

La fréquence de résonance	**La valeur de S_{11}**	**La bande passante** **BP= [Fmin, Fmax GHz] =Fmax-Fmin**
5.1GHz	-16.65dB	BP= [4.7 ,5.4 GHz] =700Mhz
5.9 GHz	-28.82 dB	BP= [5.8,6.08 GHz] =280MHz
8.9GHz	-18.74dB	BP= [8.79,9.06 GHz] =270MHz
9.6GHz	-19.18dB	BP= [9.25,9.81 GHz] =560MHz

Pour l'ex-centrage de ce cas, les mesures de $\boldsymbol{S_{11}}$ révèlent des résultats significatifs. À 5.1 GHz, une bande passante remarquable de 700 MHz est observée, s'étendant de 4.7 GHz à 5.4 GHz. À 5.9 GHz, une bande passante de 280 MHz est relevée entre 5.8 GHz et 6.08 GHz. À 8.9 GHz, une bande passante de 270 MHz est observée entre 8.79 GHz et 9.06 GHz. De plus, à 9.6 GHz, une bande passante de 560 MHz est observée, allant de 9.25 GHz à 9.81 GHz.

Comparativement à la configuration initiale où la bande passante à 8.9 GHz s'est élargie avec une augmentation de 140 MHz. Il est à noter que la fréquence principale centrée autour de 3.5 GHz est perdue dans cette configuration.

- **Le gain en 3D**

Le gain de l'antenne reste stable, se maintenant aux environs de 6 dB, malgré les décalages effectués sur les axes OX et OY.

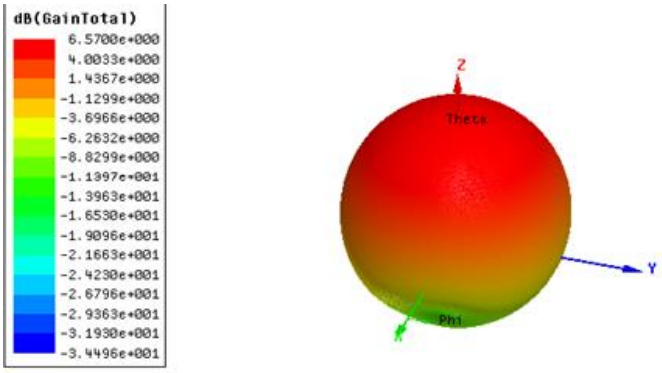


Figure 3- 32 *le gain en 3D de l'antenne a deux patchs fonctionne à la fréquence Après l'ex-centrage de2 mm sur OX et -1mm sur OY*

- **Efficacité de rayonnement**

L'efficacité de l'antenne reste élevée et stable sur diverses fréquences, avec des valeurs notables de 78% à 5.1 GHz, 95% à 5.9 GHz, 96% à 8.9 GHz et 99% à 9.6 GHz



Figure 3- 33 *l'efficacité de rayonnement en fonction de la fréquence Après l'ex-centrage de2 mm sur OX et -1mm sur OY*

- **La puissance rayonnée et la puissance acceptée**

Malgré les décalages effectués sur les axes OX et OY, la puissance rayonnée et acceptée par l'antenne demeure quasiment identique, indiquant que la performance de l'antenne est toujours conservée.

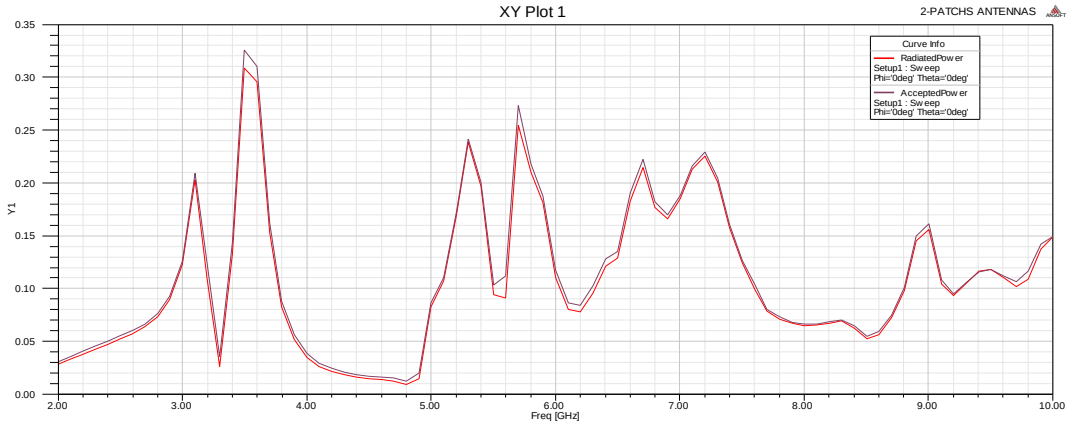


Figure 3- 34 *La puissance rayonnée et la puissance acceptée en fonction de la fréquence Après l'ex-centrage de2 mm sur OX et -1mm sur OY*

3.5.2. Effet de l'ex-centrage du patch inférieur

3.5.2.1. Effet de l'ex-centrage avec 1 mm sur l'axe OY

Nous allons maintenant procéder au décalage du patch inférieur afin d'observer les effets sur les caractéristiques de l'antenne.

3.5.2.2. Analyse des résultats

- **Coefficient de réflexion S_{11} en fonction de fréquence**

La figure suivante présente le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence après l'ex-centrage avec 1 mm sur l'axe OY :

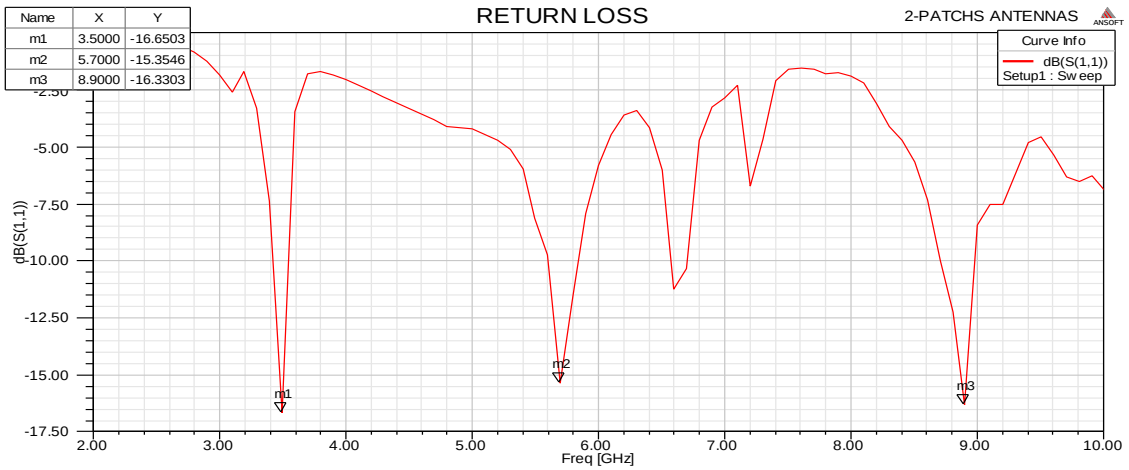


Figure 3- 35 *Coefficient de réflexion* S_{11} *d'une antenne à deux patchs après l'ex-centrage de patch inf. avec 1 mm*

Le tableau ci-dessous présente les fréquences de résonance, les bandes de fréquences correspondantes et les largeurs de bande passante pour l'antenne à deux patches :

Tableau3- 10 *Analyse de* S_{11} *de l'antenne avec deux patchs après l'ex-centrage de patch inf. avec 1 mm*

La fréquence de résonance	**La valeur de S_{11}**	**La bande passante** **BP= [Fmin, Fmax GHz] =Fmax-Fmin**
3.5GHz	-15.65dB	BP= [3.43 ,3.54Ghz GHz] =110Mhz
5.7 GHz	-15.35 dB	BP= [5.63,5.80Ghz] =180Mhz
8.9GHz	-16.33dB	BP= [8.7,8.96Ghz] =260Mhz

Pour l'ex-centrage du patch inférieur de 1 mm, les mesures de S11 montrent des résultats significatifs. À 3.5 GHz, une bande passante de 110 MHz est observée, s'étendant de 3.43 GHz à 3.54 GHz. À 5.7 GHz, une bande passante de 180 MHz est relevée entre 5.63 GHz et 5.80 GHz. À 8.9 GHz, une bande passante de 260 MHz est observée entre 8.7 GHz et 8.96 GHz.

- **Le gain en 3D**

Le gain reste toujours conservé aux environs de 6 dB, même après le décalage du patch inférieur.

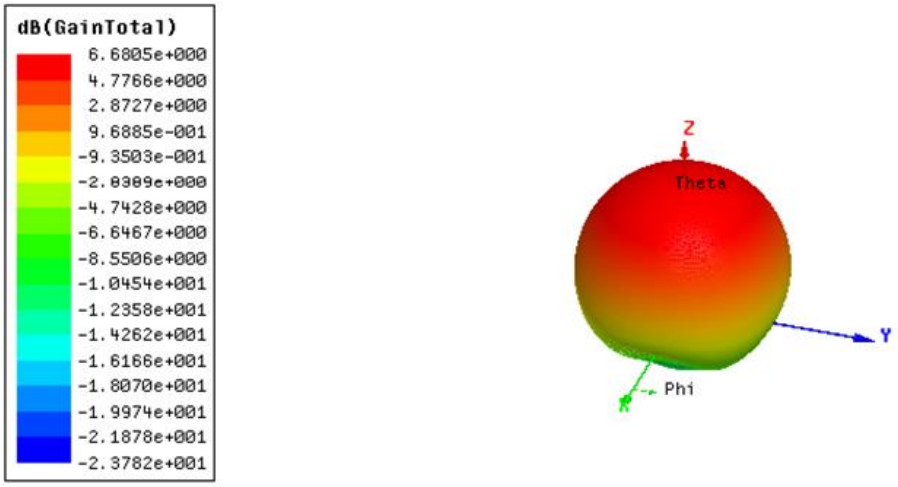


Figure 3- 36 *Le gain en 3D d'une antenne à deux patchs rectangulaires après l'ex-centrage de patch inf. avec 1 mm*

- **Efficacité de rayonnement**

L'efficacité de l'antenne demeure élevée, avec des valeurs de 95% à 3.5 GHz, 98% à 5.7 GHz et 98% à 8.9 GHz, même après le décalage du patch inférieur.

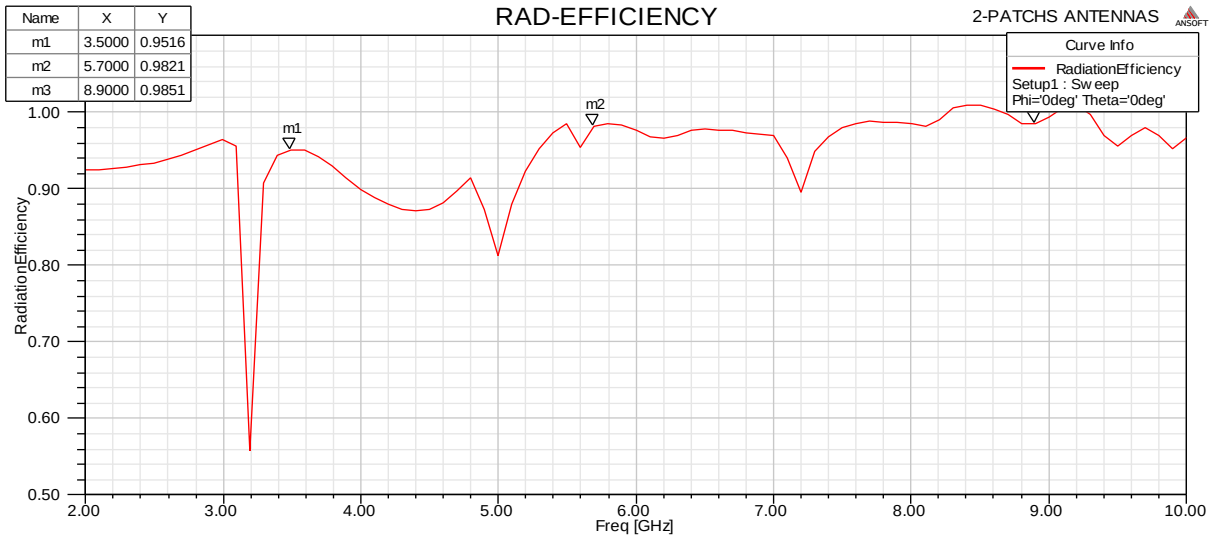


Figure 3- 37 *l'efficacité de rayonnement en fonction de la fréquence après l'ex-centrage de patch inf. avec 1 mm*

- **La puissance rayonnée et la puissance acceptée**

La puissance rayonnée et acceptée par l'antenne reste légèrement modifiée, soulignant ainsi la stabilité des performances de l'antenne même après le décalage du patch inférieur.

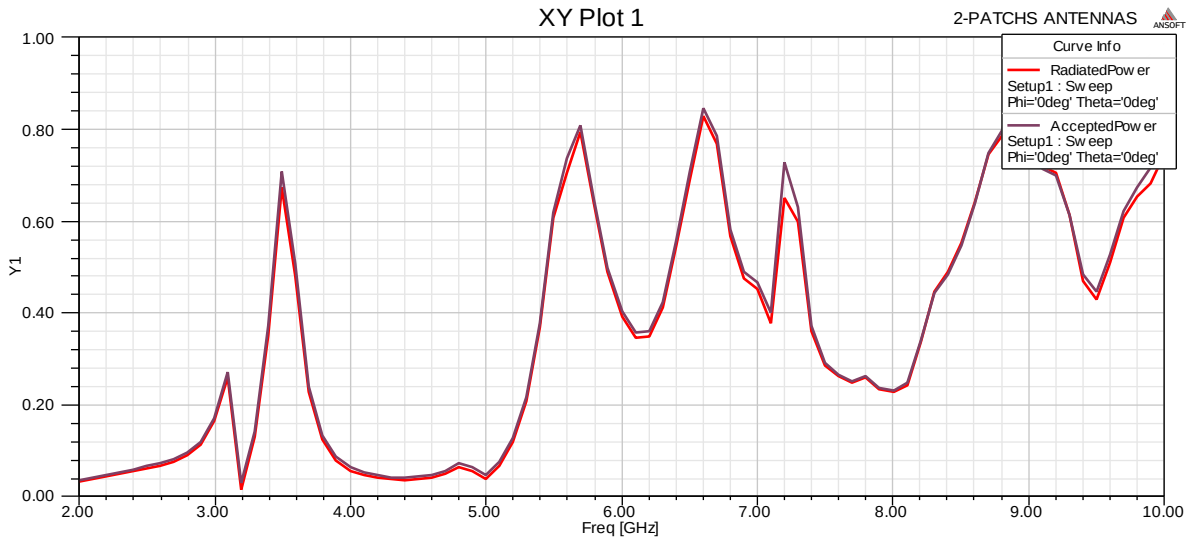


Figure 3- 38 *La puissance rayonnée et la puissance acceptée en fonction de la fréquence après l'ex-centrage de patch inf. avec 1 mm*

3.5.2.3. Effet de l'ex-centrage avec 2mm sur l'axe OY

3.5.2.4. Analyse des résultats

- **Coefficient de réflexion S_{11} en fonction de fréquence**

La figure suivante présente le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence après l'ex-centrage avec 2mm sur l'axe OY :

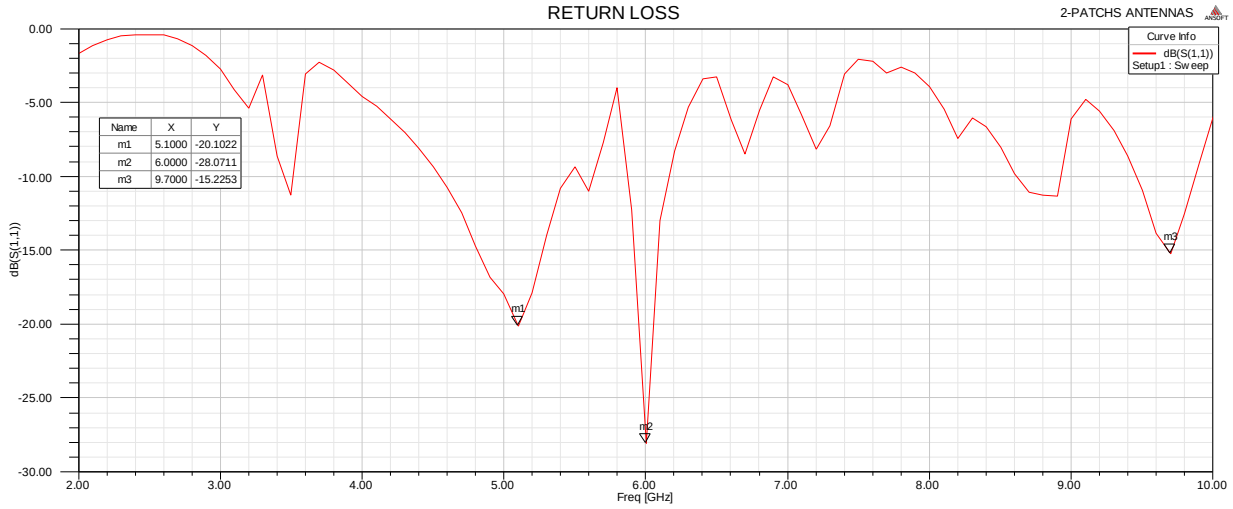


Figure 3- 39 *Coefficient de réflexion* $\boldsymbol{S_{11}}$ *d'une antenne à deux patchs rectangulaires après l'ex-centrage de patch inf. avec 2 mm*

Le tableau ci-dessous présente les fréquences de résonance, les bandes de fréquences correspondantes et les largeurs de bande passante pour l'antenne à deux patches :

Tableau3- 11 *Analyse de* S_{11} *de l'antenne avec deux patchs après l'ex-centrage de patch inf. avec 2 mm*

La fréquence de résonance	**La valeur de S_{11}**	**La bande passante** **BP= [Fmin, Fmax GHz] =Fmax-Fmin**
5.1GHz	-20.1dB	BP= [4.54 ,5.45Ghz GHz] =910Mhz
6 GHz	-28.07dB	BP= [5.87,6.16Ghz] =290Mhz
9.7GHz	-15.22dB	BP= [9.46,9.87Ghz] =410Mhz

Pour l'ex-centrage de 2 mm du patch inférieur, les mesures de réflexion S11 révèlent des résultats significatifs. À 5.1 GHz, une bande passante remarquable de 910 MHz est observée, s'étendant de 4.54 GHz à 5.45 GHz. À 6 GHz, une bande passante de 290 MHz est relevée entre 5.87 GHz et 6.16 GHz. À 9.7 GHz, une bande passante de 410 MHz est observée entre 9.46 GHz et 9.87 GHz, Cette réduction est accompagnée de l'absence de la fréquence principale à 3.5 GHz.

- **Le gain en 3D**

Le gain de l'antenne reste constant, généralement aux alentours de 6 dB.

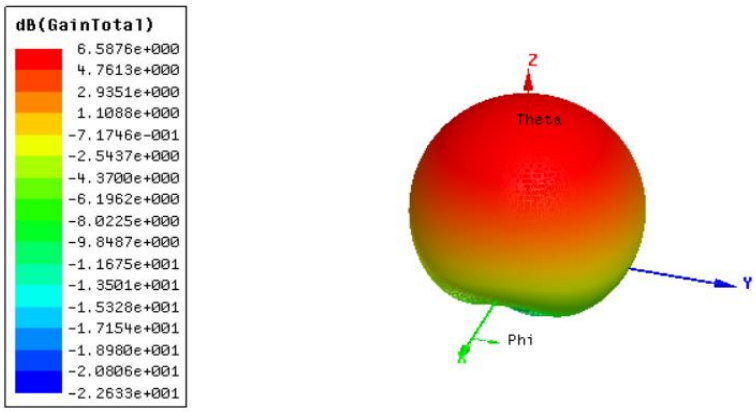


Figure 3- 40 *Le gain en 3D d'une antenne à deux patchs après l'ex-centrage de patch inf. avec 2 mm*

- **Efficacité de rayonnement**

L'efficacité est inférieure par rapport aux autres fréquences à 5.1 GHz, mais reste élevée sur l'ensemble de la plage de fréquences étudiée, 95% à 6 GHz et de 92% à 9.7 GHz.

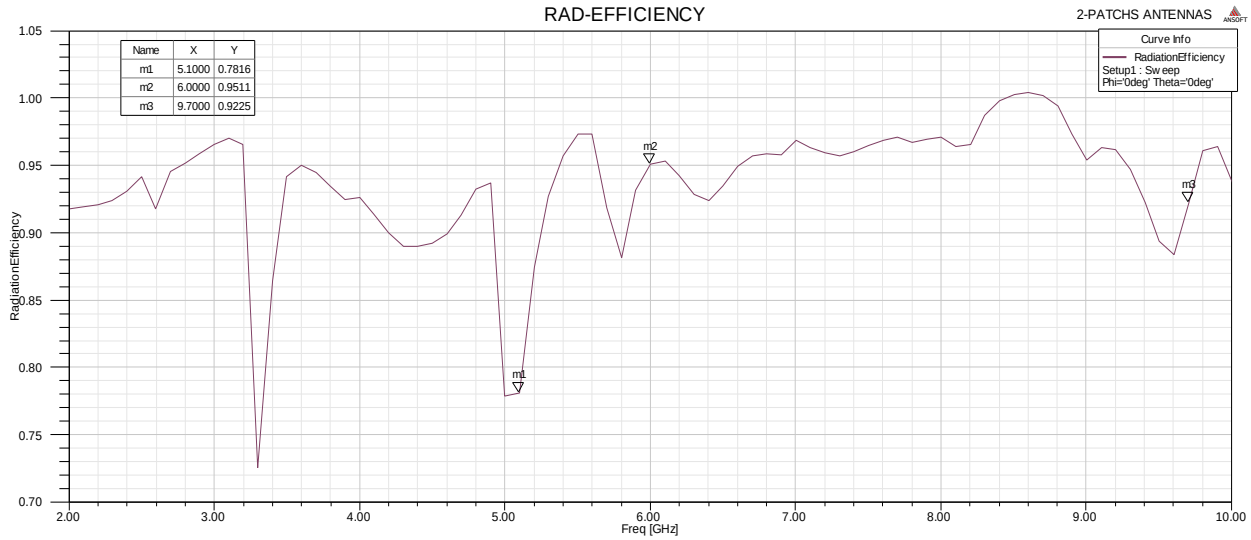


Figure 3- 41 *l'efficacité de rayonnement en fonction de la fréquence après l'ex-centrage de patch inf. avec 2 mm*

- **La puissance rayonnée et la puissance acceptée**

La puissance rayonnée et acceptée par l'antenne reste constante.

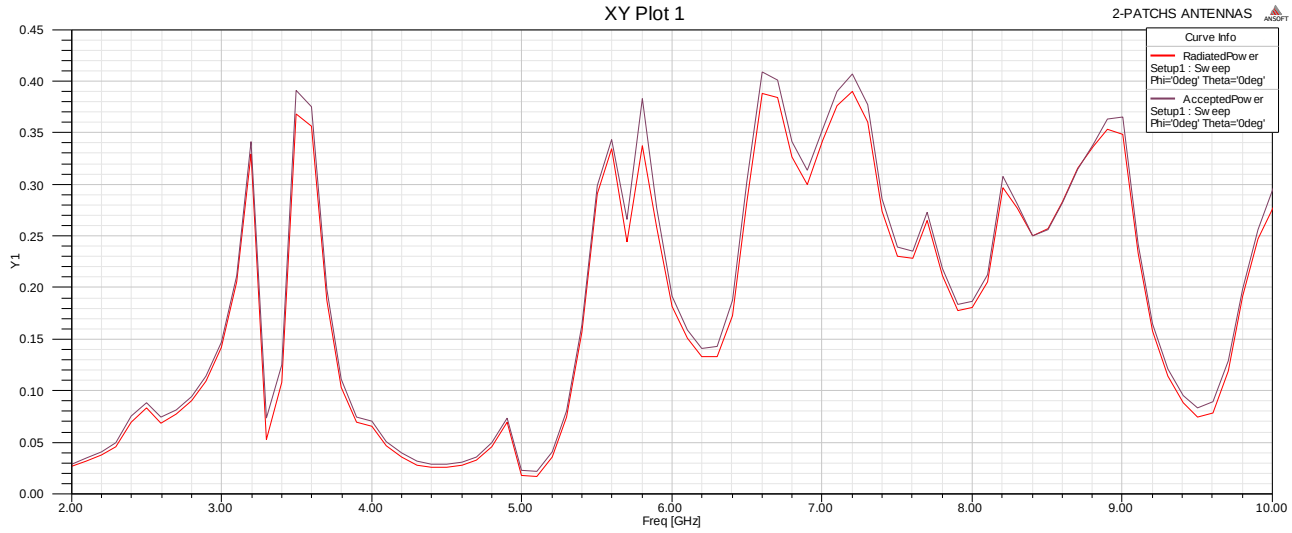


Figure 3- 42 *La puissance rayonnée et la puissance acceptée en fonction de la fréquence après l'ex-centrage de patch inf. avec 2 mm*

3.5.2.5. Effet de l'ex-centrage avec 2 mm sur l'axe OX et 2 mm sur l'axe OY

3.5.2.6. Analyse des résultats

- **Coefficient de réflexion S_{11} en fonction de fréquence**

La figure suivante présente le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence apres l'ex-centrage avec 2 mm sur l'axe OX et 2 mm sur l'axe OY :

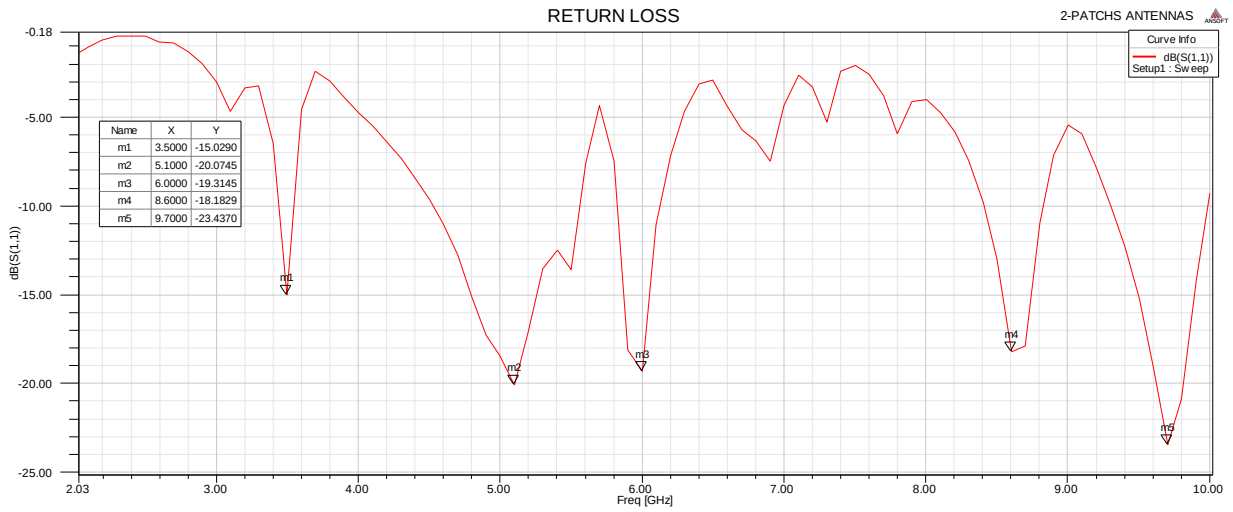


Figure 3- 43 *Coefficient de réflexion* S_{11} *d'une antenne à deux patchs après l'ex-centrage de patch inf. avec 2 mm sur OX et 2mm sur OY*

Le tableau ci-dessous présente les fréquences de résonance, les bandes de fréquences correspondantes et les largeurs de bande passante pour l'antenne à deux patches :

Tableau3- 12 *Analyse de* S_{11} *de l'antenne avec deux patchs après l'ex-centrage de patch inf. avec 2 mm sur ,OX 2mm OY*

La fréquence de résonance	**La valeur de S_{11}**	**La bande passante** **BP= [Fmin, Fmax GHz] =Fmax-Fmin**
3.5GHz	-15.02dB	BP= [3.44 ,3.54Ghz GHz] =100Mhz
5.1 GHz	-20.07dB	BP= [4.7,5.4Ghz] =700Mhz
6GHz	-19.31dB	BP= [5.82,6.13Ghz] =310Mhz
8.6GHz	-18.18dB	BP= [8.41,8.82Ghz] =410Mhz
9.7GHz	-23.43dB	BP= [9.3,9.98Ghz] =680Mhz

Pour l'ex-centrage de ce cas du patch inférieur, les mesures de S11 révèlent des résultats significatifs. À 3.5 GHz, une bande passante de 100 MHz est observée, s'étendant de 3.44 GHz à 3.54 GHz. À 5.1 GHz, une bande passante de 700 MHz est relevée entre 4.7 GHz et 5.4 GHz. À 6 GHz, une bande passante de 310 MHz est observée entre 5.82 GHz et 6.13 GHz. À 8.6 GHz, une bande passante de 410 MHz est observée entre 8.41 GHz et 8.82 GHz. À 9.7 GHz, une bande passante de 680 MHz est observée entre 9.3 GHz et 9.98 GHz.

- **Le gain en 3D**

Le gain de l'antenne reste constant, généralement aux alentours de 6 dB.

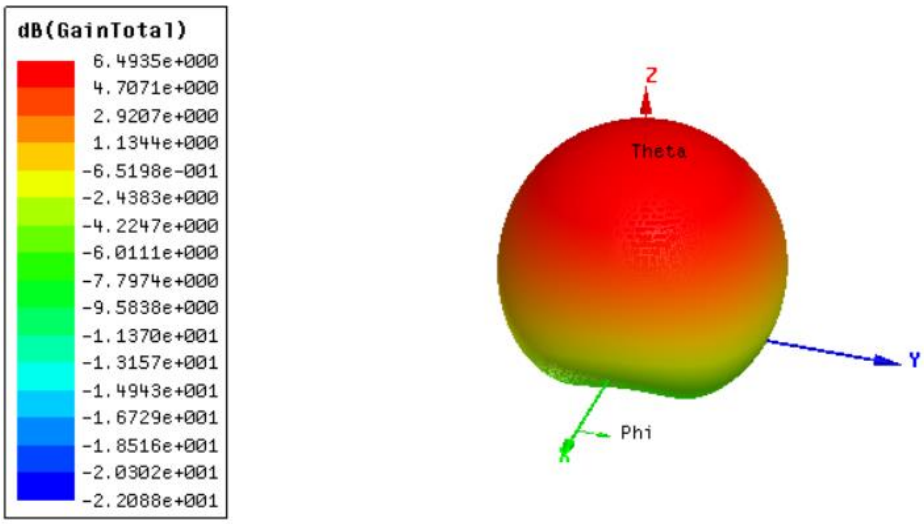


Figure 3- 44 *Le gain en 3D d'une antenne à deux patchs après l'ex-centrage de patch inf. avec 2 mm sur ,OX 2mm OY*

- **Efficacité de rayonnement**

L'efficacité de l'antenne varie selon la fréquence : à 3.5 GHz elle est de 93%, à 5.1 GHz de 83%, à 6 GHz de 96%, à 8.6 GHz de 99%, et à 9.7 GHz elle atteint également 99%.

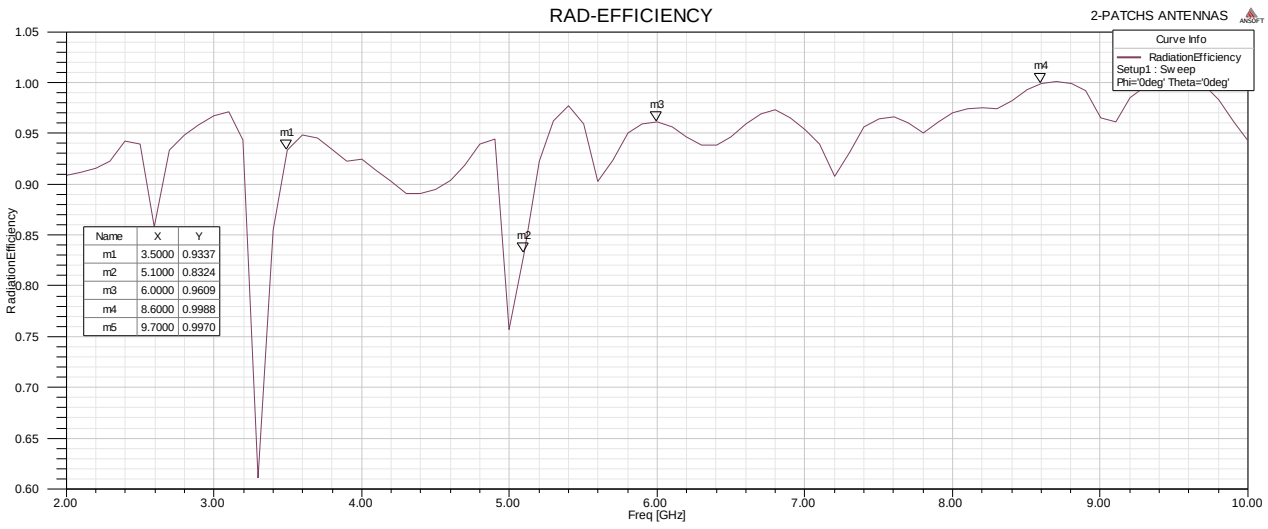


Figure 3- 45 *l'efficacité de rayonnement en fonction de la fréquence après l'ex-centrage de patch inf. avec 2 mm sur OX et 2mm sur OY*

- **La puissance rayonnée et la puissance acceptée**

La puissance rayonnée et acceptée par l'antenne reste constante.

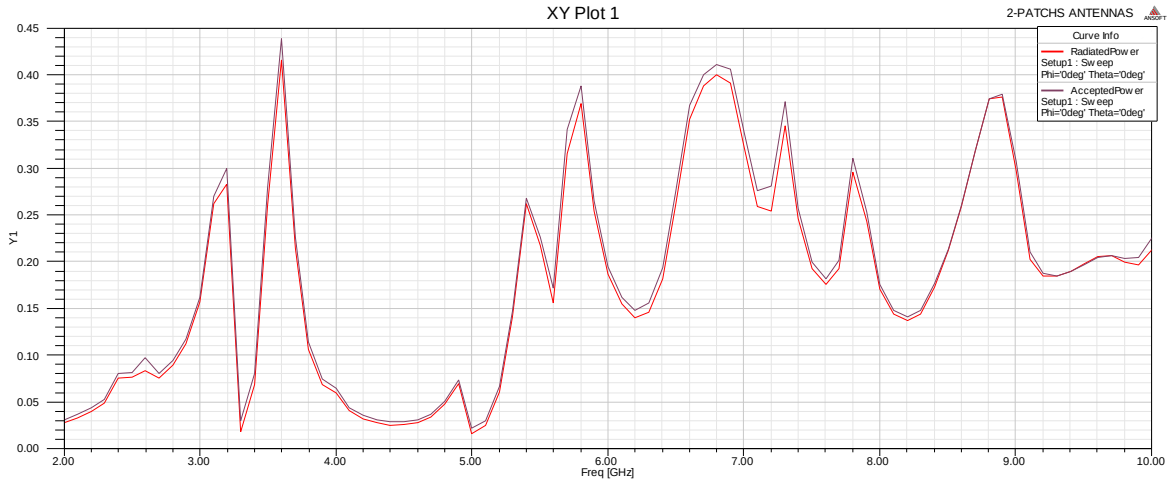


Figure 3- 46 *La puissance rayonnée et la puissance acceptée en fonction de la fréquence après l'ex-centrage de patch inf. avec 2 mm sur OX et 2mm sur OY*

3.5.2.7. Effet de l'ajout de 2 mm sur les dimensions (la largeur) du patch supérieur

Nous allons maintenant procéder à l'ajout de 2 mm aux dimensions du patch supérieur afin d'évaluer son impact sur les performances de l'antenne.

3.5.2.8. Analyse des résultats

- **Coefficient de réflexion S_{11} en fonction de fréquence**

La figure suivante présente le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence après l'ajout de 2 mm sur les dimensions du patch supérieur :

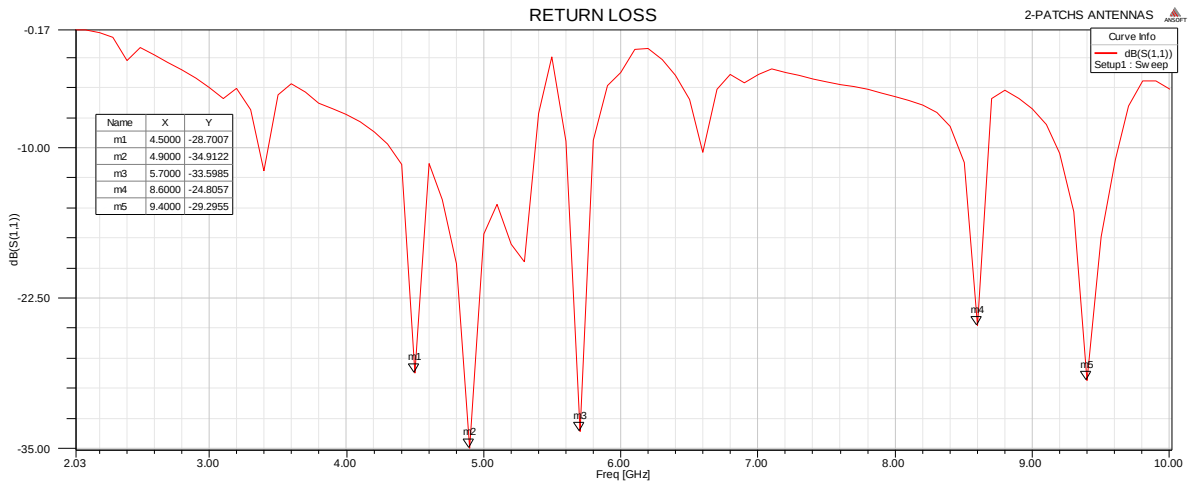


Figure 3- 47 *le S11 d'une antenne à 2 patchs résonant a 3.5GHz après l'ajout de 2 mm sur les dimensions du patch sup*

Le tableau ci-dessous présente les fréquences de résonance, les bandes de fréquences correspondantes et les largeurs de bande passante pour l'antenne à deux patches :

Tableau3- 13 *Analyse de* S_{11} *de l'antenne avec deux patchs après l'ajout de 2 mm sur les dimensions du patch sup*

La fréquence de résonance	**La valeur de S_{11}**	**La bande passante** **BP= [Fmin, Fmax GHz] =Fmax-Fmin**
4.5GHz	-28.7dB	BP= [3.44 ,3.54Ghz GHz] =100Mhz
4.9GHz	-34.91dB	BP= [4.7,5.4Ghz] =700Mhz
5.7GHz	-33.59dB	BP= [5.82,6.13Ghz] =310Mhz
8.6GHz	-24.8dB	BP= [8.41,8.82Ghz] =410Mhz
9.4GHz	-29.29dB	BP= [9.3,9.98Ghz] =680Mhz

L'ajout de 2 mm sur les dimensions (la largeur) du patch supérieur a généré des variations significatives dans les performances de l'antenne, telles qu'indiquées par les mesures de S11. À 4.5 GHz, une bande passante de 100 MHz a été observée, s'étendant de 3.44 GHz à 3.54 GHz. À 4.9 GHz, une bande passante plus large de 700 MHz a été relevée entre 4.7 GHz et 5.4 GHz. À 5.7 GHz, une bande passante de 310 MHz a été identifiée entre 5.82 GHz et 6.13 GHz. De même, à 8.6 GHz et 9.4 GHz, des bandes passantes respectives de 410 MHz et 680 MHz ont été observées dans les plages de fréquences spécifiées. Cependant, cette configuration a entraîné l'absence de la fréquence principale à 3.5 GHz, soulignant ainsi l'impact significatif de l'ajout de 2 mm sur les performances de l'antenne.

- **Le gain en 3D**

Le gain reste toujours conservé aux environs de 6 dB, même après le changement des dimensions.

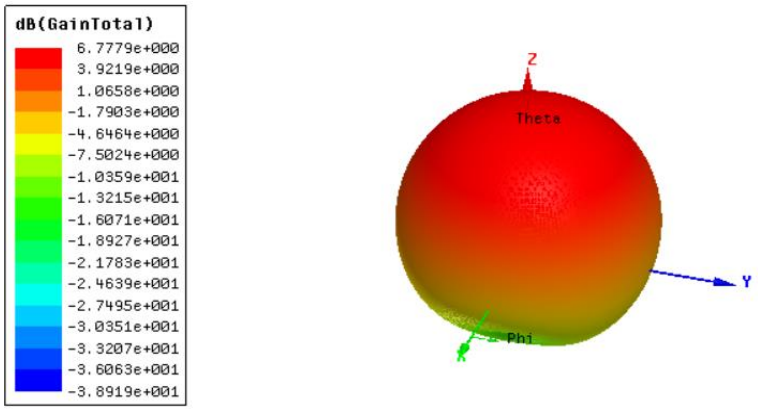


Figure 3- 48 *Le gain en 3D d'une antenne à deux patchs après l'ajout de 2 mm sur les dimensions du patch sup*

- **Efficacité de rayonnement**

L'efficacité de l'antenne varie selon la fréquence : à 4.5 GHz elle est de 85%, à 4.9 GHz de 97%, à 5.7 GHz de 94%, à 8.6 GHz de 95%.

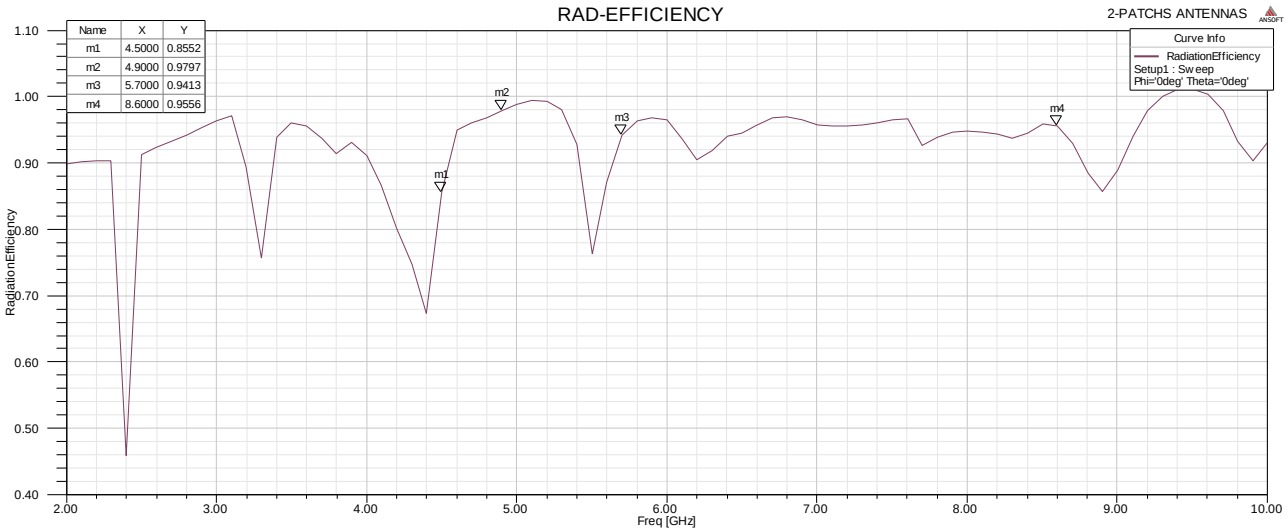


Figure 3- 49 *l'efficacité de rayonnement en fonction de la fréquence après l'ajout de 2 mm sur les dimensions du patch sup*

- **La puissance rayonnée et la puissance acceptée**

La puissance rayonnée et acceptée par l'antenne reste constante.

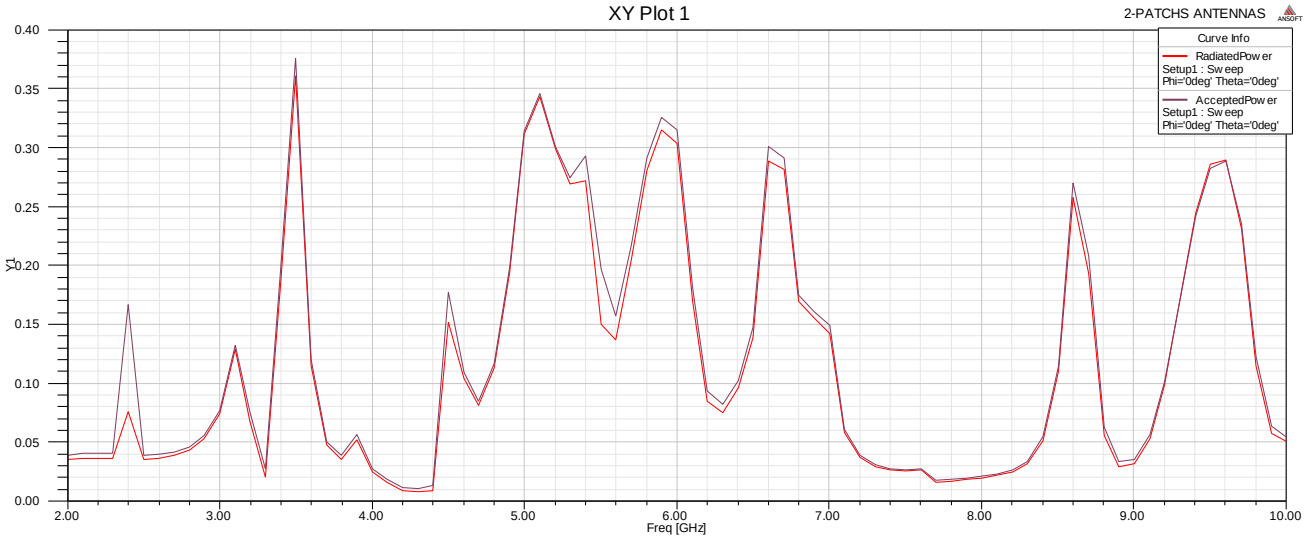


Figure 3- 50 *La puissance rayonnée et la puissance acceptée en fonction de la fréquence après l'ajout de 2 mm sur les dimensions du patch sup*

3.6. Conclusion

Notre exploration des différentes configurations d'antennes patch, allant d'une conception à un seul patch à une conception à deux patches, a révélé des améliorations notables dans les performances globales de l'antenne. L'introduction d'un deuxième patch a généralement conduit à une expansion des bandes passantes, offrant ainsi une plus grande polyvalence et une efficacité accrue sur un large éventail de fréquences. Malgré les variations observées lors de l'ex-centrage des patches, telles que la perte de la fréquence principale à 3.5 GHz dans certains cas, l'efficacité de l'antenne est restée constamment élevée, généralement autour de 90%.

De même, le gain de l'antenne est resté stable, conservé aux alentours de 6 dB dans toutes les configurations testées.

En particulier, l'ex-centrage du patch inférieur de 2 mm sur les deux axes, Ox et Oy, nous a permis d'obtenir plus de quatre fréquences de résonance avec des bandes passantes très larges. Ces résultats soulignent l'importance de tenir compte des ajustements géométriques lors de la conception des antennes patch pour optimiser leurs performances pour des applications spécifiques.

De plus, les configurations d'ex-centrage et l'ajout de dimensions supplémentaires ont élargi les possibilités d'utilisation de l'antenne en offrant plusieurs gammes de fréquences et plus de quatre fréquences de résonance, enrichissant ainsi sa capacité à répondre à divers besoins en communication.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

En conclusion, notre étude a permis de concevoir et d'analyser une antenne à deux patchs rectangulaires résonant à 3,5 GHz, en utilisant des références expérimentales pour valider notre travail. Cette fréquence, largement utilisée pour les applications 5G, représente un domaine de recherche particulièrement pertinent et dynamique dans le contexte actuel des communications sans fil.

Notre conception d'antenne à deux patchs a démontré des performances améliorées par rapport à une antenne à un seul patch, notamment en termes de bande passante, de gain et d'efficacité. La comparaison avec une antenne à un seul patch résonant à la même fréquence a révélé que notre approche permettait d'obtenir une meilleure uniformité de rayonnement et une réponse en fréquence plus stable. Ces résultats confirment l'efficacité de la configuration à deux patchs pour les applications nécessitant des fréquences plus élevées.

L'étude de l'effet de l'ex-centrage des patchs sur les caractéristiques de l'antenne a montré que des ajustements minutieux de la position des patchs peuvent influencer de manière significative des paramètres clés tels que l'impédance, le coefficient de réflexion et la réponse en fréquence. En particulier, l'ex-centrage des patchs supérieur et inférieur a permis d'optimiser les performances de l'antenne, et grâce à cette technique, nous avons également pu explorer la possibilité d'utiliser l'antenne pour d'autres applications telles que le Wi-Fi à 5 GHz et les radars, démontrant ainsi la flexibilité de notre conception.

La nouvelle tendance dans le domaine des communications sans fil met en avant les antennes à patch, et notre travail s'inscrit dans cet élan en visant à améliorer et à rendre ces antennes plus flexibles et polyvalentes. En travaillant sur la conception de ces antennes, nous avons cherché à les adapter à des usages multiples et à des fréquences variées, répondant ainsi aux besoins croissants de multifonctionnalité dans les systèmes de communication moderne.

En termes de méthodologie, l'utilisation du logiciel HFSS s'est avérée essentielle pour simuler et optimiser la conception de notre antenne. HFSS a permis de réaliser des analyses précises des distributions de champ électromagnétique, facilitant ainsi l'identification des configurations optimales et la prédiction des performances réelles de l'antenne. L'apprentissage de l'utilisation de HFSS a été une étape cruciale dans notre projet, nous permettant de maîtriser un outil de simulation avancé indispensable pour la conception moderne des antennes.

Enfin, notre étude ouvre la voie à des recherches futures sur l'optimisation des antennes à patch pour d'autres bandes de fréquence utilisées dans les communications sans fil, ainsi qu'à l'exploration de nouvelles configurations et matériaux pour améliorer encore les performances et l'efficacité des systèmes d'antennes.

Références Bibliographiques

[1] J. Roger, "Antennes - Bases et principes," Techniques de l'Ingénieur, Réf. E3280 V1, 10 novembre 1998.

[2] Elliptika. (s.d.). Études de cas : Antenne Patch, sur https://www.elliptika.com/fr/case-studies/antenne-patch/.

[3] X. Begaud, "Conception d'antennes - Fondamentaux," Techniques de l'Ingénieur, 10 novembre 2015. Dernière validation : 14 février 2023.

[4] A. Mihoub, "Étude et conception d'antennes pour l'intégration dans les terminaux ultra-miniatures," Thèse de doctorat, Université de Lille 1, 2013.

[5] ResearchGate, "Configuration de l'antenne patch imprimée sur un méta-substrat formé par un réseau 3D," 2015.

[6] TRAORE Balla Moussa et TRAORE Rabia, "INFLUENCE DES PARAMETRES GEOMETRIQUES SUR LES PERFORMANCES DE L'ANTENNE PATCH RECTANGULAIRE, "Master en Systèmes des télécommunication, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem,2023.

[7] Kumar, Girish, " Broadband microstrip antennas," 2003.

[8] Boualem MEKIMAH, " Etude du fonctionnement en mode bifréquence des patchs microbandes empilés et excentrés", Magister en Electronique, Université Kasdi Merbah Ouargla.

[9] CHERGUI Safa et DJABRI Roumaissa, "CONCEPTION D'UNE ANTENNE PATCH RECTANGULAIRE A DOUBLE BANDE AVEC LA STRUCTURE A DEFAUT DANS LE PLAN DE MASSE (DGS) ",Master Académique, Université Larbi Tébessi–,2021.

[10] CHERIET Sidali et TOUDERT Riad, conception ,simulation et réalisation d'une antenne patch ultra large bande,Mémoire de MASTER,univ Saad Dahlab Blida,2019.

[11] MAALOUL Elhadi et HAMADOU Akram, Etude et Simulation d'une Antenne Micro-ruban Ultra Large Bande, MASTER ACADEMIQUE, Université Kasdi Merbah Ouargla,2018.

[12] BELKHIRI Hossam Eddine et SEGHIRI Oussama, Conception et simulation d'un réseau d'antennes micro-rubans triangulaires à BIE à deux éléments, Master Académique, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF,2020.

[13] Y. BENCHERIF et F. BOUGUENINA , «Réseaux d'antenne patch pour application spatial,» Mastre en Réseaux Télécommunications, Université Belhadj Bouchaib–Ain Temouchent, 2021.

[14] BENAZZOUZ Ghouti et BENSENANE Ikram, Conception et réalisation d'une antenne miniature pour l'application LTE, MASTER, Université Aboubakr Belkaïd,2019.

[15] Cyril LUXEY, Robert STARAJ,Georges KOSSIAVAS, Albert PAPIERNIK, Antennes imprimées Techniques et domaines d'applications ,TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR, 10 août 2007.

[16] Ansoft Corporation ,user's guide – High Frequency Structure Simulator ,electronic design automation software,USA, 21 June 2005.

[17] X.-C. Yin; C.-L. Ruan; S.-G. Mo; C.-Y. Ding and J.-H.Chu, "A compact ultrawideband microstrip antenna with multiple notches," Progress In Electromagnetics Research, PIERs 84, 321–332, 2008.

[18] Son Trinh-Van and Chien Dao-Ngoc, "Dual band-notched UWB Antenna based on Electromagnetic Band Gap Structures," Journal on Electronics and Communications, Vol. 1, No. 2, April – June, 2011.

[19] A. Hafiane, "Etude du couplage d"antennes imprimées par la méthode des différences.

[20] D. M. Pozar, D. H. Schaubert « MicrostripAntennas : The Analysis And Design Of Microstrip Antennas And Arrays » 2002.

[21] J.P. Damiano et J. Bennegueouche et A. Papiernik, Study of multilayer microstrip antennas with radiating elements of various geometry, IEE PROCEEDINGS.

[22] Improved Multiband Rectangular Microstrip Patch Antenna for 5G Application,journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering.

[23] NISHA Singh et Anupam Verma, Rectangular microstrip Patch Antenna,ResearchGate, December 200